ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

SaintPetersburg OPEN 2026

26-29 мая 2026

OPEN CONFERENCE

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

13-й Школы-конференции с международным участием по Оптоэлектронике, Фотонике и Наноструктурам SPbOPEN 2026

26-29 мая 2026

Санкт-Петербург

Авторские права © 2026 Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» — Санкт-Петербург и отдельные авторы. Все права защищены. Никакие части данной электронной публикации не могут быть многократно скопированы, сохранены в поисковой системе или переданы в любой форме или любыми средствами, электронными, механическими, фотокопированием, записью или иным образом, без письменного разрешения издателя. Разрешается изготовление фотокопий отдельных статей для личного использования или исследований.

13-я Школа-конференция с международным участием по оптоэлектронике, фотонике и наноструктурам Saint Petersburg OPEN продолжает традицию ежегодных научных семинаров для молодежи по актуальным проблемам физики и техники, основанную по инициативе лауреата Нобелевской премии по физике академика Жореса Ивановича Алфёрова.

Место проведения конференции:

НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, 25-я линия Васильевского острова, дом 6, корпус 1, Российская Федерация.

Более подробная информация о Школе и конференции представлена на https://spb.hse.ru/spbopen/.

В сборник включены тезисы работ, отобранных для участия в Школе-конференции, оформленные в соответствии с требованиями к оформлению тезисов. Данный том был составлен НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург на основе электронных файлов, предоставленных авторами. При составлении сборника были внесли лишь незначительные технические исправления.

Председатель Программного и Организационного комитетов

чл.-корр. РАН А.Е. Жуков (НИУ ВШЭ - Санкт-Петербург)

Программный Комитет

А.А. Липовский (СПбПУ Петра Великого)

П.Н. Брунков (ФТИ им. Иоффе РАН)

Г.Э. Цырлин (СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова)

Н.В. Крыжановская (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург)

В.В. Журихина (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург)

В.Г. Дубровский (СПбГУ)

С.В. Макаров (ИТМО)

Организационный Комитет

Н.В. Крыжановская (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург)

А.С. Драгунова (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург)

Э.И. Моисеев (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург)

А.А. Образцова (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург)

Е.А. Русаловская (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург)

Программа конференции

26 мая 2026 (вторник)

Весь день **Прибытие, свободное время**

27 мая 2026 (среда)

09:00 - 10:00 **Регистрация участников (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург, 25-я линия Васильевского острова, дом 6, корпус 1)**

10:00 - 10:10 **Открытие Алексей Жуков** *(ВШЭ – Санкт-Петербург)*

10:10 - 10:40 **Многоуровневая настройка однослойных углеродных нанотрубок для их применений в оптоэлектронике Альберт Насибулин** *(Сколтех)*

10:40 - 11:10 **Фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения Максим Шварц** *(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)*

11:10 - 11:40 **Anisotropic semiconductor nanocrystals and their light-emitting devices Fangze Liu** *(Beijing Institute of Technology, P.R. China)*

11:40 - 12:00 **Кофе-брейк**

12:00 - 12:30 **Перовскитный поляритонный лазерный диод Анатолий Пушкарев** *(Сколтех)*

12:30 - 13:00 **Оптические микролазеры на основе III-N гетероструктур: эпитаксия, изготовление и исследование Наталья Крыжановская** *(НИУ ВШЭ – СПб)*

13:00 - 13:30 **Сессия «Презентации в лифте» I**

(Молодые ученые представляют основную идею своих постеров в 1-минутной презентации, используя 1-2 слайда)

13:30 - 15:00 **Обед**

По желанию: 14:00 - 15:00 **Круглый стол " МШГ микролазеры для ультрафиолетового и видимого диапазонов спектра на подложках кремния и сапфира "** *по материалам совместного исследования в рамках проекта НИУ ВШЭ «Международное академическое сотрудничество» (Academic Cooperation) Международной лаборатории квантовой оптоэлектроники НИУ ВШЭ Санкт-Петербург и научного коллектива Центра «Широкозонная нано- и микроэлектроника» Института физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси.*

15:00 - 16:30 **Постерная сессия I**

1. Полупроводниковые лазеры, солнечные элементы, другие оптоэлектронные приборы

3. Синтез и структурные свойства полупроводниковых материалов и наноструктур

6. Другие аспекты нанотехнологий

16:30 - 17:00 **Кофе-брейк**

17:00 - 18:00 **Постерная сессия I** (продолжение)

28 мая 2026 (четверг)

09:00 - 10:00 **Регистрация участников (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург, 25-я линия Васильевского острова, дом 6, корпус 1)**

10:00 - 10:30 **Фотонные интегральные схемы: состояние и перспективы** **Алексей Устинов** *(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)*

10:30 - 11:00 **Сверхпроводниковый однофотонный детектор - ключевой элемент квантовых фотонных интегральных схем** **Григорий Гольцман** *(МПГУ / НИУ ВШЭ)*

11:00 - 11:30 **Терагерцовое излучение: физика и возможности применения** **Дмитрий Хохлов** *(МГУ / ФИАН)*

11:30 - 12:00 **Кофе-брейк**

12:00 - 12:30 **Когерентные волоконно-оптические системы: от глобальных телекоммуникаций до медицинской диагностики** **Николай Ушаков** *(СПбПУ Петра Великого)*

12:30 - 13:00 **Полупроводниковые нанопровода в фотонике** **Алексей Большаков** *(МФТИ)*

13:00 - 13:30 **Сессия «Презентации в лифте» II**

(Молодые ученые представляют основную идею своих постеров в 1-минутной презентации, используя 1-2 слайда)

13:30 - 15:00 **Обед**

15:00 - 16.30 **Постерная сессия II**

2. Электрические, магнитные и СВЧ приборы и свойства полупроводниковых материалов и структур
4. Нанофотоника, спектроскопия, микрорезонаторы, оптические свойства, плазмоника
5. Биомедицинские применения полупроводниковых материалов и приборов, биофизика, нанобиотехнологии, биофотоника

16:30 - 17:00 **Кофе-брейк**

17:00 - 18:00 **Постерная сессия II** (продолжение)

18:00 - 18:30 **Закрытие конференции и церемония награждения**

Алексей Жуков *(ВШЭ – Санкт-Петербург)*

29 мая 2026 (пятница)

Весь день **Отъезд, свободное время**

По желанию: Экскурсия с сопровождающим в Международную лабораторию квантовой оптоэлектроники НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург (12.00-14.00)

Содержание сборника

1. Полупроводниковые лазеры, солнечные элементы, другие оптоэлектронные приборы			
1-00	Крыжановская Наталья Владимировна	НИУ ВШЭ	Оптические микролазеры на основе III-N гетероструктур: эпитаксия, изготовление и исследование (Приглашенный)
1-01	Козлов Илья Александрович	АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»	Методика оценки сдвига мгновенной оптической частоты импульсного излучения, формируемого полупроводниковым оптическим усилителем
1-02	Реутов Алексей Алексеевич	ООО Курэйт	Анализ безопасности квантового распределения ключей с декойными состояниями при backflash и лазерной инжекции/сидинг источника
1-03	Комаров Сергей Дмитриевич	НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург	Низкопороговая генерация на модах шепчущей галереи в микродисковых лазерах InGaN/GaN
1-04	Зеленский Глеб Викторович	Московский педагогический государственный университет Институт физики, технологии и информационных систем	Исследование характеристик детекторов терагерцового диапазона излучения на основе пленок углеродных нанотрубок.
1-05	Михайлов Олег Павлович	СПбАУ РАН имени Ж. И. Алфёрова	Исследование радиационной стойкости GaP/Si гетероструктурных солнечных элементов методами емкостной спектроскопии
1-06	Харченко Антон Александрович	Алферовский университет, ФТИ им. А.Ф. Иоффе	Полупроводниковый оптический усилитель спектрального диапазона 1020-1075 нм с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs/GaAs
1-07	Образцова Анна Александровна	НИУ ВШЭ - Санкт-Петербург	Анализ параметров усиления квантовых точек в коротких лазерных полосках
1-09	Кунков Роман Эдуардович	ФТИ им. А. Ф. Иоффе	Поверхностно облучаемые фотодиоды для спектральной области λ = 2 – 5 мкм на основе ДГС N-InAsSbP/InAsSb/P-InAsSbP
1-10	Баранцев Олег Вячеславович	СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова	Влияние конструкции InAlAs метаморфных буферных слоев на электрофизические характеристики кристаллов InGaAs фотодиодов ближнего ИК-диапазона
1-11	Васильев Андрей Андреевич	АО "ОКБ-Планета"	Особенности технологии изготовления вертикально-излучающего лазера с длиной волны 850 нм
1-13	Мазун Екатерина Дмитриевна	Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого/Акционерное общество «ОКБ-Планета»	Применение полиимида в оптоэлектронике
1-14	Данилова Виктория Владиславовна	Санкт-Петербургский государственный университет	Использование метода лазерной очистки при реставрации объектов культурного наследия с каменным декором из песчаника
1-15	Би Цзячэнь	Университет науки и технологий МИСИС	Использование кремниевых квантовых точек для предотвращения нагрева солнечных элементов
1-16	Пан Хайхун	Лаборатория перспективной солнечной энергетики НИТУ МИСИС	Низкотемпературное Ионно-Лучевое Напыление (IBS) Nio Для Лёгких И Гибких Перовскитных Солнечных Элементов

1-17	Бермас Вячеслав Романович	Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)	Исследование возможности использования лазерного 3D-сканирования для мониторинга деревянной скульптуры
1-18	Каримова Алина Ильшатовна	НИУ ВШЭ, направление физика	Исследование влияния обработки фокусированным ионным пучком на темновые характеристики волноводных фотодетекторов
1-19	Самарцев Илья Владимирович	ННГУ им. Н.И. Лобачевского	Metamorphic InGaAs photodiode with low dark current on a GaAs substrate for the 1.17 - 1.29 µm range
1-20	Беляева Екатерина Алексеевна	Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»	Исследование связанных микродисковых лазеров с квантовыми точками InGaAs/GaAs.
1-22	Радаев Олег Александрович	УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН	Зависимость потоков излучения видимого и ближнего инфракрасного участков спектра светодиодных матриц от тока и температуры
1-23	Новиков Андрей Александрович	Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого	Активация вторичных эмиттеров из бериллиевой бронзы
1-24	Башнин Никита Викторович	Санкт-Петербургский институт истории РАН	3D-оцифровка восковых печатей с использованием лазерного 3D-сканирования
1-25	Иванов Владимир Сергеевич	Университет ИТМО	Ионная миграция в перовските MAPbBr2I: эффекты Хоука и Шоттки
1-26	Федосов Игорь Сергеевич	НИУ ВШЭ СПб	Оптоэлектронный логический элемент И/И-НЕ на основе термооптического эффекта в А3В5 микродисковом лазере
1-27	Низаметдинов Азат Маратович	УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН	Распределенный контроль температуры обмоток трансформатора с помощью перестраиваемого полупроводникового лазера
1-28	Степанов Юлиан Стефанович	Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича	Исследование когерентных свойств полупроводниковых лазерных источников
1-29	Копытов Павел Евгеньевич	Университет ИТМО	Максимальный КПД одночастотных вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300 нм
1-30	Поздеев Вячеслав Алексеевич	СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова; Академический университет им. Ж.И. Алферова	Исследование влияния поверхностного натяжения суспензии PEDOT:PSS и параметров нанесения на однородность покрытий
1-31	Мысь Дмитрий Александрович	Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)	Лазерный локатор для подводного обнаружения объектов
1-32	Сун Цинхао	Университет ИТМО	Simulation based on optical properties of Halide Perovskite Solar Cells

2. Электрические, магнитные и СВЧ приборы и свойства полупроводниковых материалов и структур

2-01	Нестеренко Павел Евгеньевич	НИИТ НИУ ВШЭ	Терагерцовая гибридная антенная сборка с металлическими и диэлектрическими элементами
2-02	Козлов Алексей Константинович	МФТИ (НИУ)/НИИМЭ	TCAD моделирование резистивного переключения элемента хранения ReRAM на основе оксида гафния
2-03	Давиденко Валерия Анатольевна	Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (ИНЭП ЮФУ)	Моделирование отклика сенсора диоксида азота на основе TiO2-SnO2 пленок
2-04	Брулев Артем Игоревич	Университет ИТМО/ФТИ им. А.Ф. Иоффе	Взаимодействие между магнонными модами в редкоземельных ортоферритах
2-05	Ушаков Вадим Михайлович	Лаборатория квантовых детекторов, МПГУ, Москва, Россия	Экспериментальная демонстрация и оценка предотвращения блокировок в сетях 6G субтерагерцового диапазона
2-06	Мартыненко Егор Викторович	Московский физико-технический институт	Исследования эффективной диэлектрической проницаемости жидкостей в СВЧ-диапазоне методом классической молекулярной динамики
2-09	Стекольщиков Егор Владимирович	ФГБУ "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт""	Двунаправленный датчик скорости потока газа на основе технологии МЭМС
2-10	Ершова Маргарита Игоревна	Научно-исследовательский институт телекоммуникаций, НИУ ВШЭ; Лаборатория квантовых детекторов, МПГУ	Полностью кремниевая фокусирующая пластина D-диапазона
2-11	Слепченков Михаил Михайлович	ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»	Электрофизические свойства гибридных графен-нанотрубных пленок, функционализированных наночастицами оксидов металлов
2-12	Игнатович Владислав Олегович	Южный Федеральный университет	Применение плоских и объемных метаповерхностей для защиты наземной радиоаппаратуры от помех в дальней зоне
2-13	Антошкин Герман Владимирович	Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)	Устройство управления характеристик антенной системы на основе метаповерхности
2-14	Бабичек Илья Викторович	МФТИ/АО "НИИМЭ"	Влияние флуктуаций показателя преломления на распространение света в диэлектрическом двухмерном волноводе
2-15	Рожкова Полина Вадимовна	Научно-исследовательский институт телекоммуникаций, НИУ ВШЭ	Суб-терагерцовый оптоэлектронный модулятор на основе перфорированного кремния
2-16	Ромашкин Алексей Валентинович	Национальный исследовательский университет «МИЭТ»	Различия резистивного отклика на пары изопропанола, этанола и воды для карбоксилированных и амидированных углеродных нанотрубок
2-17	Приходько Анатолий Николаевич	Научно-исследовательский институт телекоммуникаций НИУ ВШЭ	Терагерцовый пространственный модулятор на основе арсенида галлия
2-18	Львов Андрей Валерьевич	НИИ телекоммуникаций НИУ ВШЭ	Планарная антенна X-диапазона, интегрированная с транзистором

2-19	Фудин Дмитрий Геннадьевич	МПГУ	Терагерцевый монолитный интерферометр Маха-Цендера на основе кремниевых волноводов без подложки
2-20	Драгомерецкий Иван Олегович	Московский физико-технический институт	Моделирование отражающего мета-атома на базе жидких кристаллов
2-22	Розенблит Алина Дмитриевна	Университет ИТМО	Топологические краевые состояния высокого порядка в квадратной решётке из разомкнутых кольцевых резонаторов с дипольным и квадрупольным откликом
2-23	Белозеров Игорь Александрович	НИЦ «Курчатовский институт»	Контактное сопротивление и ресурс МЭМС-переключателя при разных токах коммутации
2-24	Богуш Инна Юрьевна	ФГАОУВО "Южный федеральный университет"	Импедансометрия электродных материалов на основе сульфидов переходных металлов: количественный анализ кинетики электрохимических реакций
2-25	Ружевич Максим Станиславович	СПбГЭТУ «ЛЭТИ»	Фотолюминесценция и фотоотражение гетероструктур HgTe/CdHgTe с «узкими» квантовыми ямами
2-26	Чижиков Сергей Владимирович	Севастопольский государственный университет	Исследование возможности применения новой конструкции полевых транзисторов для повышения энергоэффективности монолитных интегральных схем приемного тракта радиометра
2-27	Кропотов Арсений Андреевич	Университет ИТМО	Оптическое детектирование радиальной динамики частиц, локализованных в квадрупольных электродинамических ловушках
2-28	Фролов Илья Владимирович	Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук	Электрофизические характеристики полимерных нанокомпозитов на основе эпоксидной смолы с углеродными наноструктурами и магнитными частицами
2-29	Шлепаков Павел Сергеевич	НИЦ "Курчатовский институт"	Влияние диаметра рабочей камеры на перемещение и развиваемую силу взрывного актюатора
2-30	Морозов Матвей Олегович	Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова / Обособленное подразделение «Отдел микротехнологий» – Ярославль ОФТИ им. К.А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт»	Расчет рабочих характеристик МЭМС-переключателя последовательно-шунтирующего типа для диапазона частот 0.4-10 ГГц
2-31	Кожуховский Алексей Константинович	Московский Педагогический Государственный Университет, Лаборатория Квантовых Детекторов	Субтерагерцовый волноводный монолитный аттенюатор без подложки на основе материала с фазовой памятью GST
2-32	Чиглинцев Эмиль Олегович	МФТИ, РКЦ	Внеплоскостная терагерцевая эмиссия, обусловленная анизотропией в композиционно упорядоченном двумерном сплаве ДПМ
2-33	Хрошин Даниил Алексеевич	Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет им. В.И. Ульянова (Ленина)	Разработка модели интегрально-оптического волновода трапецеидального поперечного сечения

3. Синтез и структурные свойства полупроводниковых материалов и наноструктур

3-01	Раянова Камилла Алмазовна	Московский политехнический университет	Spin-coating deposition of graphene oxide films from multicomponent suspensions for flexible electronics
3-03	Хруль София Николаевна	СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова	Омические контакты Ni/Au и Ni/Ti/Au к p-GaP
3-04	Мельников Арсений Евгеньевич	СПбГУ	Зависимость состава двумерных наноструктур тройных соединений III-V от шага и радиуса отверстий при селективной эпитаксии.
3-05	Лендяшова Вера Вадимовна	СПбГУ	Эпитаксиальные пленки Al на подложках Si, полученные методом молекулярно-пучковой эпитаксии, для создания плазмонных нанолазеров
3-07	Поздеев Вячеслав Алексеевич	СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова; Академический университет им. Ж.И. Алферова	Пассивация поверхности кристаллического и наноструктурированного кремния слоем Al2O3, сформированным методом PE-ALD с использованием N2O-плазмы
3-08	Станчик Алёна Викторовна	ГО "НПЦ НАН Беларуси по материаловедению"	Получение и исследование свойств тонких пленок MoSe2
3-09	Уймина Полина Георгиевна	МФТИ	Морфологически-зависимая фотолюминесценция вертикально-ориентированного дисульфида молибдена
3-10	Данилина Элеонора Михайловна	Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук	Термодинамический анализ стабильности твердых растворов AlGaInAsP на основе квазихимической модели
3-11	Филалова Эмилия Марсовна	МФТИ, Физтех	Двухстадийное радикальное окисление кремния для формирования ультратонкого подзатворного диэлектрика
3-12	Шубина Ксения Юрьевна	Алферовский университет	Оптические свойства объемных слоев GaPN(As) и сверхрешеток GaPNAs/GaPN, синтезированных на кремниевых подложках
3-13	Загороднева Валерия Николаевна	НИУ «Высшая школа экономики», Лаборатория спектроскопии твердого тела в ФТИ им. А.Ф.Иоффе	Поверхностное сопротивление и транзисторные эффекты в пленках WS_2 и WSe_2, полученных лазерным осаждением
3-14	Балакирев Сергей Вячеславович	Южный федеральный университет	Исследование процессов роста квантовых точек InAs на структурированной поверхности GaAs(111)B при различных режимах молекулярно-лучевой эпитаксии
3-16	Ковалев Александр Николаевич	МФТИ (НИУ) / АО НИИМЭ	Модификация поверхности в процессе атомно-слоевого травления SiO2
3-17	Семёнов Дмитрий Александрович	Университет ИТМО	Генерация второй гармоники в квазидвумерном галогениде свинца на основе MePEA
3-18	Адамович Артем Александрович	Ульяновский государственный университет	Пористый кремний как материал электродов для суперконденсаторов
3-19	Дуплийчук Иван Сергеевич	ФТИ им. Иоффе	ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ЭВОЛЮЦИИ ДЕФЕКТОВ В БУФЕРНОМ СЛОЕ СОДЕРЖАЩЕМ СВЕРХРЕШЕТКИ ALGAN/ALN НА ПОДЛОЖКАХ SI
3-21	Ярчук Эрнст Янович	СПбГЭТУ "ЛЭТИ"	Влияние температуры отжига на структурные и оптические свойства многослойных структур InP/GaN, сформированных методом плазмохимического атомно-слоевого осаждения

3-22	Алешина Марина Юрьевна	МФТИ	Влияние морфологии наночастиц золота на SERS-усиление сформированных сухой аэрозольной печатью плазмонных структур
3-23	Сидоров Евгений Александрович	Государственный университет "Дубна"	Исследование влияния функционализации на оптические свойства борных квантовых точек
3-24	Духан Денис Дмитриевич	Лаборатория эпитаксиальных технологий ИНЭП ЮФУ	Стабилизация условий формирования капельных наноструктур In/GaAs путем предварительного осаждения металлического Ga
3-25	Агафонов Дмитрий Вячеславович	АО Пензенский научно-исследовательский институт электронно-механических приборов	Исследование полупроводниковых и пьезоэлектрических свойств широкозонных полупроводников SiC и AlN, полученных методом магнетронного распыления
3-26	Кугаевский Александр Дмитриевич	ИНЭП ЮФУ	Исследование влияния температуры роста на селективность и оптические свойства ННК GaAs на ФИП модифицированных подложках Si(111)
3-27	Харламова Анастасия Александровна	Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В.Ломоносова	Исследование структуры монокристаллических алмазных методом поляризационной микроскопии
3-28	Грушевский Егор Алексеевич	Отдел микротехнологий-Ярославль, ОФТИ им. К.А. Валиева, НИЦ Курчатовский институт	Исследование фазового состава ферромагнитных нанопроволок в процессе электрохимического осаждения в поры анодного окисла алюминия
3-29	Панков Егор Романович	СПбГУ	Моделирование динамики контактного угла капли и кристаллической фазы нитевидных нанокристаллов тройных соединений III-V
3-30	Шандыба Никита Андреевич	Лаборатория эпитаксиальных технологий ИНЭП ЮФУ	Влияние пассивации массивов ННК GaAs, сформированных на ФИП-модифицированных подложках Si(111), на их оптические свойства
3-31	Солодовник Наталия Евгеньевна	Лаборатория эпитаксиальных технологий, Южный федеральный университет	Исследование механизмов локального травления GaAs в точках ФИП-модификации
3-32	Ерёменко Михаил Михайлович	Лаборатория эпитаксиальных технологий ИНЭП ЮФУ	Исследование капельной эпитаксии наноструктур Ga на структурированных подложках Si(001)
3-33	Торгунаков Виталий Геннадьевич	Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)	Формирование полупроводникового канала на основе IGZO с применением технологии аэрозольной печати для тонкопленочных транзисторов
3-34	Жигаев Данила Алексеевич	Самарский университет	Моделирование индукционного нагрева экспериментального CVD-реактора
3-35	Пикин Данил Игоревич	Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук	Синтез субмикронных кристаллов InGaN на SiC/Si(111) подложках методом молекулярно-пучковой эпитаксии
3-36	Папылев Денис Сергеевич	Университет ИТМО	Влияние буферных слоев InP/InGaAs в гетероструктурах квантово-каскадных лазеров на ширину гетерограниц сверхрешеток InGaAs/InAlAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии

3-37	Климин Виктор Сергеевич	Южный федеральный университет	Влияние состава газоразрядной плазмы на морфологию структур на поверхности карбида кремния
3-38	Климин Виктор Сергеевич	Южный федеральный университет	Метаматериалы с нулевым показателем преломления на основе SiC с проводящим графеновым слоем
3-39	Климин Виктор Сергеевич	Южный федеральный университет	Синтез графена на полярных гранях SiC(0001) и SiC(000–1) методом плазмохимической обработки
3-40	Ким Ксения Борисовна	ВГУИТ	Особенности состава и оптических свойств систем доставки лекарств на основе пористого кремния с осажденным циннаризином
3-41	Вячеславова Екатерина Александровна	СПбАУ РАН им. Ж.И.Алферова	Влияние газового соотношения SF6/O2 на морфологию структур черного кремния
3-42	Ким Ксения Борисовна	ВГУИТ	Влияние морфологии макро- и мезопористого кремния на формирование золотых покрытий при вакуумно-термическом напылении
3-43	Моисеева Татьяна Анатольевна	Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет	Синтез и исследование композитных материалов на основе азотированного углерода с сульфидами переходных металлов.
3-44	Вакулов Захар Евгеньевич	Южный федеральный университет	ВИМС исследования пленок ниобата лития, полученных методом импульсного лазерного осаждения для нейроморфных применений
3-45	Лях Михаил Алексеевич	ФГБУ "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР "КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"	Связь магнитных свойств и магнитоупругих взаимодействий в многослойных магнитных структурах
3-46	Якушова Надежда Дмитриевна	ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»	Управление зонной структурой золь-гель пленок ZnO:Bi:Fe: синергетический эффект адсорбции красителей и воздействия УФ излучения
3-47	Ушакова Ольга Сергеевна	Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского	Визуализация этапов формирования наночастиц аспарагината хитозана методом просвечивающей электронной микроскопии
3-48	Саенко Александр Викторович	Южный федеральный университет	Влияние термического отжига на структурные свойства и фазовый переход пленок CuxO для оптоэлектронных мемристивных структур
3-50	Ракитин Владимир Валерьевич	Федеральный исследовательский Центр проблем химической физики и медицинской химии РАН	Исследование коррозионных свойств и фоточувствительности фотокатодов Mo/MoOx/Ag0.6Cu0.4GaSe2
3-51	Бурьянская Евгения Львовна	МГТУ им. Н.Э. Баумана (место работы)/НИТУ МИСИС (место учебы)	Доменная структура полимерных сегнетоэлектриков на основе сополимера ВДФ/ТФЭ
3-52	Ганыкина Екатерина Андреевна	АО «НИИМЭ»	Атомно-слоевое осаждение пленок оксида тантала для применения в резистивной памяти ReRAM
4. Нанофотоника, спектроскопия, микрорезонаторы, оптические свойства, плазмоника			
4-01	Петухов Никита Андреевич	Санкт-Петербургский государственный университет	КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ CsPbBr3 И CsPbI3, СФОРМИРОВАННЫХ ВО ФТОРФОСФАТНОМ СТЕКЛЕ

4-03	Максимов Федор Михайлович	Московский физико-технический институт	Усиление фотолюминесценции однослойных углеродных нанотрубок на метаповерхности
4-04	Левичев Матвей Вячеславович	СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова / МФТИ	Влияние материала нитевидного нанокристалла на локализацию мод и потери в гибридных структурах Ag/WS_2
4-05	Синицкая Олеся Алексеевна	Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И.Алферова Российской академии наук	Исследование особенностей спектральных характеристик фотодетекторов УФ-диапазона на основе эпитаксиальных слоёв GaN
4-06	Авдеенко Даниил Викторович	ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского»	Фотоиндуцированный сдвиг частоты ФМР в эпитаксиальных пленках катион-замещенных гранатов железа
4-07	Оськин Егор Викторович	Санкт-Петербургский государственный университет	Неэкспоненциальная кинетика фотолюминесценции нанокристаллов CsPbBr3 в стеклянной матрице
4-08	Авдеенко Даниил Викторович	ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»	Адресная фотоиндуцированная модификация спектров ФМР в тонких плёнках катион-замещённого граната железа
4-09	Плешаков Олег Сергеевич	СпбАУ РАН им. Ж.И. Алферова	Стеклянные микролинзы, сформированные методом ионного обмена через поляризованную маску
4-10	Кучинов Даниил Александрович	Санкт-Петербургский государственный университет	Влияние экситон-фононного взаимодействия на температурно-зависимую фотолюминесценцию перовскитных нанокристаллов CsPbX3 в стеклянной матрице
4-11	Завьялова Есения Сергеевна	ИТМО, МФТИ	Оптическая наноантенна на основе гетероструктурных нитевидных нанокристаллов GaP/GaAs1-xPx
4-12	Кан Геннадий Радионович	Алферовский университет	Визуализация краевого распределения электрического поля при помощи второй гармоники в ионообменных стеклах
4-13	Терпицкий Алексей Николаевич	Академический университет им. Ж.И. Алферова	Локальная ГВГ на зарядовых структурах в стекле
4-14	Козко Иван Алексеевич	Лаборатория функциональных наноматериалов, Центр фотоники и двумерных материалов, МФТИ, Физтех	Новые подходы к созданию мембран с контролируемым оптическим пропусканием на основе полимеров и нитевидных нанокристаллов фосфида галлия
4-15	Дыкова Анастасия Вадимовна	Университет ИТМО	Низкопороговая усиленная спонтанная люминесценция в квазидвумерных перовскитах
4-16	Фомина Елизавета Александровна	СПб ГТЭУ ЛЭТИ	Расчет керровских солитонов в нитрид-кремниевом микрокольцевом резонаторе
4-17	Семушев Климент Витальевич	Университет ИТМО	Нейросетевой анализ устойчивости квази-связанных состояний в континууме к структурному беспорядку в метаструктурах
4-18	Курганов Георгий Денисович	Университет ИТМО	Асимметричные краевые топологические состояния в зигзагообразной цепочке из бианизотропных диэлектрических резонаторов
4-19	Неклюдов Егор Вячеславович	ИТМО	Формирование и сравнение оптических свойств локализованных излучателей на основе монослоёв

			дихалькогенидов переходных металлов, полученных методом локальной деформации зондом АСМ
4-20	Сапожникова Елизавета Викторовна	Университет ИТМО	Управление оптическими свойствами смешаннокатионных и смешанногалогенидных коллоидных перовскитных нано и микрокристаллов
4-21	Кириченко Данил Владимирович	Лаборатория эпитаксиальных технологий, Южный федеральный университет, Таганрог	Разработка метода формирования мембранных структур на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs с квантовой ямой InGaAs с использованием фокусированного ионного пучка и селективного жидкостного травления
4-22	Цаплин Илья Александрович	МФТИ	Параметрическое исследование и сравнительный анализ электромагнитного поля в системе из двух сферических наночастиц для различных металлов: алюминия, платины и магния
4-23	Экгардт Алексей Андреевич	НИУ ИТМО	Влияние диффузии носителей заряда на оптические свойства галогенидных перовскитных люминофоров с памятью
4-24	Осколкова Татьяна Олеговна	Университет ИТМО	Оптическое детектирование муаровых экситонов в ван-дер-ваальсовых гетероструктурах при комнатной температуре
4-25	Войтович Вероника Ивановна	НИУ ВШЭ – СПб	Микродисковые лазеры с квантовыми ямами InGaAsN/GaAs с пассивацией плазмохимическим осаждением SiO2
4-27	Неелова Ангелина Дмитриевна	СПбГЭТУ «ЛЭТИ»	Лазерная очистка железистых чернил на бумаге
4-28	Кулик Владислав Сергеевич	ФГБОУ ВО «Университет «Дубна»	Настройка оптических свойств квантовых точек карбида бора
4-29	Верещагина Юлиана Витальевна	ФГАОУ ВО «САФУ имени М.В. Ломоносова»	Распределение немонохроматических фотонов на свободных электронах
4-30	Лепехина Татьяна Константиновна	СПбГЭТУ «ЛЭТИ»	Исследование эффективности лазерной очистки органических материалов методами инфракрасной Фурье-спектроскопии, спектрофотометрии и атомно-силовой микроскопии
4-31	Лепаев Александр Николаевич	Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета	Продукты пиролиза в диффузионном пламени уротропина
4-32	Баделина Екатерина Владимировна	Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»	Двухуровневая лазерная генерация в микродисковых лазерах с активной областью на основе плотных массивов квантовых точек InGaAs/GaAs
4-33	Патарашвили Антон Николаевич	Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)	Формирование коллоидных систем на основе наночастиц металлов и оксидов, синтезированных методом искровой абляции в газе
4-34	Фунтикова Анастасия Сергеевна	Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого	Исследование процессов генерации второй гармоники в наночастицах типа ядро-оболочка на основе мезопористого композита Si/SiO2
4-35	Василевский Павел Николаевич	Национальный исследовательский университет «Московский	Нелинейно-оптическое преломление в растворах красителей для генерации бесселеподобных пучков

		институт электронной техники»	
4-36	Горелкина Татьяна Дмитриевна	ITMO University	Магнитоуправляемые экситон-поляритоны в антиферромагнетике CrSBr
4-37	Костина Дина Евгеньевна	МФТИ	Влияние количества слоев оксида цинка на плазмон-усиленную фотолюминесценцию в ZnO/PLL/Al наноструктурах
4-38	Фаттахов Илья Сергеевич	Обособленное подразделение «Отдел микротехнологий» – Ярославль ОФТИ им. К.А. Валиева ЦПМ НИЦ «Курчатовский институт»	Управление оптической киральностью в кремниевых наноспиралях, полученных методом наклонного напыления, через изменение геометрических параметров
4-39	Чебохин Максим Михайлович	НИЦ «Курчатовский институт»/ Обособленное подразделение «Отдел микротехнологий» – Ярославль ОФТИ им. К.А. Валиева ЦПМ НИЦ «Курчатовский институт»	Моделирование кирального оптического отклика никелевых наноспиралей
4-40	Воронин Антон Сергеевич	ФИЦ КНЦ СО РАН (Красноярск), МГТУ им Н.Э. Баумана (Москва)	Экранирующие свойства прозрачных плёнок In2O3/Ag/In2O3 и сэндвич-структур на их основе
4-41	Чернов Леонид Игоревич	Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого	Морфология поверхности эпитаксиальных структур арсенида индия после их обработки различными очищающими составами
4-42	Николаева Александра Владиславовна	СПбАУ им. Ж. И. Алферова РАН	Деформационная модуляция спектра фотолюминесценции монослоя Wse_2 на плазмонных нанобампах
4-43	Клименко Роман Павлович	Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. Проф. М.А. Бонч-Бруевича	Метод исследования границы раздела углеводородных смесей с помощью дифференциальных измерений
4-44	ZHAO DANNI	ITMO	APPLICATION OF POLARIZATION-DEPENDENT PS CHAIN STRUCTURES IN BIODETECTION
4-45	Иванчук Данила Романович	Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева	Экспериментальное исследование технологического процесса изготовления дифракционных фильтров для реализации оптической обработки информации
4-46	Аникина Мария Александровна	СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова	Численное моделирование и анализ модовых характеристик субволновых щелевых волноводов на основе нитевидных нанокристаллов GaP
5. Биомедицинские применения полупроводниковых материалов и приборов, биофизика, нанобиотехнологии, биофотоника			
5-01	Гагарина Марина Михайловна	СПбАУ им. Ж.И. Алферова	Экономически эффективная техника корпусирования ретинальных зрительных имплантов
5-02	Бойцова Наталья Андреевна	Академический университет им. Ж.И. Алферова	Электроды на основе медно-оловянных композитов как экономически эффективная замена золотым биоэлектродам
5-03	Абелит Анна Андреевна	СпбАУ им. Ж. И. Алферова	Визуализация цитоплазматической мембраны клеток HeLa с помощью красителя ABDS и методов искусственного интеллекта

5-04	Ефремова Кристина Дмитриевна	Институт биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники, Москва, Зеленоград, Россия	Метод оценки тромбообразования нанокомпозитных покрытий в динамических условиях модельных жидкостей
5-05	Морозова Анастасия Сергеевна	Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»	Биоинтегрируемые тензочувствительные конструкции: влияние сенсорной архитектуры на функциональные свойства
5-06	Гусева Юлия Андреевна	Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук	Рефрактометрический экспресс-метод определения плотности и осмолярности мочи для оценки поражения почек на ранней стадии
5-07	Залесский Александр Дмитриевич	ФИЦ ХФ РАН, 0114 лаборатория био- и нанофотоники	Слияние модельной системы «ооцит –цитопласт» при помощи фемтосекундного лазерного скальпеля
5-08	Кулясов Кирилл Денисович	СПбПУ	Влияние инфекции гриппа А на долговременную потенциацию гиппокампа у мышей с моделью болезни Альцгеймера
5-09	Иванова Александра Сергеевна	Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Институт биомедицинских систем (БМС)/Научно-исследовательская лаборатория «Биомедицинские нанотехнологии» (НИЛ БМН), г. Москва	Разработка и исследование тонкоплёночного биодеградируемого электропроводящего композита на основе хитозана и одностенных углеродных нанотрубок для регенерации нервной ткани
5-10	Водяшкин Андрей Алексеевич	Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)	Зеленый синтез наночастиц серебра с применением экстракта шиповника
5-11	Малюкова Полина Андреевна	МПГУ	Исследование излучения кожи в терагерцовом диапазоне частот
5-12	Парфенов Вадим Александрович	Санкт-Петербургский институт истории РАН	Воздействие импульсного УФ излучения медного лазера на жизнеспособность микроскопических грибов
5-13	Бакшеева Ксения Алексеевна	Московский педагогический государственный университет	Исследование излучения кожи человека при воздействии ментальной нагрузки при помощи однопиксельной ТГц камеры
5-14	Куксин Артем Викторович	Национальный исследовательский университет «МИЭТ»	Электродные интерфейсы на основе лазерно-индуцированных углеродных гетероструктур
5-15	Пермякова Эвелина Владимировна	Пермский государственный национальный исследовательский университет	Автоматизированное формирование волоконно-оптического полимерного датчика температуры на основе интерферометра Фабри-Перо

5-16	Денисова Елена Артемовна	Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН)	Полиномиальная и гауссова модели спектральной огибающей как инструмент ранней диагностики ишемической болезни сердца по данным электрокардиографа сверхвысокого разрешения
5-17	Антипенко Владимир Викторович	ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»	Влияние внешней температуры на результат измерения биоимпеданса
5-18	Харламова Анастасия Александровна	Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В.Ломоносова	Рассеяние ультракоротких лазерных импульсов различной формы на азотистом основании ДНК
5-19	Шепелева Анастасия Эдуардовна	Пензенский государственный университет/АО «Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов»	Исследование выходных характеристик магнитометрического сенсора для измерения слабых магнитных полей на базе аморфного микроволокна
5-20	Морозов Роман Ростиславович	Университет ИТМО / Институт аналитического приборостроения Российской академии наук	Методика обработки сигналов плавления ДНК, основанная на удалении базовой линии
5-21	Микушина Анна Дмитриевна	Алферовский университет	Исследование чувствительности метода кругового дихроизма для определения конформационных изменений структур пептидных агонистов GLP-1
5-22	Полевщиков Александр Юрьевич	Высшая Школа Экономики	Моделирование неканонического пути активации рецептора CCR6 пептидом врожденного иммунитета - бета-дефенсином 1
6. Другие аспекты полупроводниковых нанотехнологий			
6-01	Корякова Екатерина Евгеньевна	МФТИ (НИУ)	Влияние предварительной озонации кремниевых пластин на однородность нанесения калибровочных микросфер
6-02	Салхаб Мхмад -	Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)	Лазерная постобработка деталей из AlSi10Mg, изготовленных методом селективного лазерного плавления
6-03	Ячук Владимир Аркадиевич	НИУ "МЭИ"	Исследование электрических характеристик ультратонких неоднородных металл- оксидных плёнок
6-04	Давыдов Владислав Олегович	Лаборатория печатной и кремниевой микроэлектроники	Разработка симулятора направленного осаждения наночастиц с самосогласованной эволюцией электрического поля
6-05	Чихрина Ульяна Сергеевна	ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет"	Математическое моделирование петли диэлектрического гистерезиса с учетом влияния поляризационного шума
6-06	Дмитриева Диана Сергеевна	Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича	Новая модель волоконно-оптического датчика для контроля радиационной обстановки в дистанционном режиме с возможностью замены поврежденного оптического волокна
6-07	Водяшкин Андрей Алексеевич	Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана	Разработка метода получения композита на основе поливинилиденфторида и аморфных наночастиц диоксида титана

		(национальный исследовательский университет)	
6-08	Коршунков Алексей Максимович	НИУ ВШЭ СПб	Defect formation in GaAs due to Focused Ion Beam irradiation
6-09	Шалаев Никита Сергеевич	ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет"	Моделирование процесса микродугового оксидирования методом резервуарных вычислений
6-10	Голубков Павел Евгеньевич	ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет"	Измерение сопротивления и емкости микродуговых оксидных покрытий
6-11	Зинченко Тимур Олегович	ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет"	Байесовская оптимизация процесса спрей-пиролиза для целевых электрофизических параметров оксидных пленок
6-12	Володина Дарья Владимировна	Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН	Этапы формирования частиц кремнезема со сверхвысокой удельной поверхностью
6-13	Зинченко Тимур Олегович	ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет"	Аналитическая модель электропроводности поликристаллических оксидных пленок с учетом барьеров на границах зерен
6-14	Новичков Максим Дмитриевич	ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет"	Текстурированные плёнки нитрида алюминия для активных элементов микроэлектромеханических систем
6-15	Максов Андрей Анатольевич	ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет"	Оптимальное управление процессом формирования толщины покрытия при микродуговом оксидировании
6-16	Свинкин Никита Алексеевич	Университет ИТМО / Институт аналитического приборостроения Российской академии наук	Методика обработки сигналов плавления ДНК, основанная на удалении базовой линии

Оптические микролазеры на основе III-N гетероструктур: эпитаксия, изготовление и исследование

Н.В. Крыжановская[1]✉, Э.И. Моисеев[1], С.Д. Комаров[1], К.А. Иванов[1], Д.А. Масютин[1], А.Ф. Цацульников[2], А.В. Сахаров[2,3], Д.С. Артеев[2,3], Е.Е. Заварин[2,3], А.Е. Николаев[3], А.А. Пивоварова[1,3], Н.Д. Ильинская[3], И.П. Смирнова[3], Л.К. Марков[3], Е.В. Луценко[4], А.Г. Войнилович[4], А.Е. Жуков[3]

[1] НИУ ВШЭ, Санкт-Петербург, Россия;
[2] НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия
[3] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
[4] Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь
✉ nataliakryzh@gmail.com

Аннотация. Исследованы характеристики микродисковых и микрокольцевых лазеров на основе InGaN/GaN/AlGaN эпитаксиальных полупроводниковых структур, синтезированных на подложках кремния и сапфира. При оптической накачке в импульсном режиме продемонстрирована лазерная генерация на модах шепчущей галереи в микролазерах диаметром 2-12 мкм. Получена генерация от комнатной температуры до 100 градусов Цельсия вблизи 420 нм, с высокой температурной стабильностью длины волны излучения, которая описывается коэффициентом $d\lambda/dT$ = 0,0115 нм/К.

Ключевые слова: микролазеры, моды шепчущей галереи, полупроводники, III-N гетероструктуры, квантовые ямы.

Введение

Создание эффективных и компактных микролазеров, излучающих в УФ и видимом спектральном диапазонах и совместимых с фотонными схемами требуется для таких приложений как биохимическое детектирование и создание быстрых оптических межсоединений и переключений на плате [1, 2]. Микроструктуры на основе нитрида галлия (GaN) обладают значительным потенциалом для применения в микролазерах и фотонных интегральных схемах следующего поколения благодаря своим уникальным оптоэлектронным свойствам, включая высокую яркость и высокую скорость отклика. Применение высокодобротных III-N резонаторов, таких как дисковые или кольцевые позволяет реализовать очень компактные источники когерентного излучения видимого и ультрафиолетового диапазонов [3]. Кроме того, благодаря свойствам III-N полупроводниковых соединений и большому межмодовому расстоянию в микролазерах возможна реализация высокой стабильности пороговых и спектральных характеристик в широком температурном диапазоне.

В данной работе описаны методы и технологические подходы создания высокодобротных III-N микролазеров на подложках кремния и сапфира. Созданы и исследованы в широком диапазоне температур характеристики микролазеров с внешним диаметром 2-12 мкм. Получена низкопороговая лазерная генерация (P_{th} ~200кВт/см^2) и высокая температурная стабильность пороговой мощности накачки и спектрального положения линии лазерной генерации.

Материалы и методы

Эпитаксиальные гетероструктуры выращивалась методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках кремния (111) или сапфира (установка Dragon-125 с горизонтальным индукционно-нагреваемым реактором). Сначала формировались буферные слои, обеспечивающие низкую плотность дислокаций и оптическое ограничение со стороны подложки. В качестве активной области использовались квантовые ямы $In_{0.1}Ga_{0.9}N$/GaN толщиной 2 нм, разделенных между собой слоями GaN толщиной 8 нм. Количество квантовых ям менялось от 3 до 5. Исследования структурных свойств выполнялись с помощью сканирующей электронной микроскопии и

просвечивающей электронной микроскопии. Резонаторы диаметром 2−12 мкм создавались с помощью плазмохимического травления через металлическую (Ni) маску. Для уменьшения шероховатости боковой стенки резонатора структуры обрабатывались в растворе KOH (0.8%). Исследования оптических свойств проводились при накачке в непрерывном режиме (He-Cd лазер, 325 нм) и в импульсном режиме с помощью лазера с акустооптическим модулятором добротности (λ = 355 нм, длительность импульса 9 нс, частота 10 кГц). Луч лазера накачки фокусировался на одиночном микролазере с помощью объектива, излучение микролазера регистрировалось с помощью монохроматора или спектрометра с кремниевым детектором.

Результаты и обсуждение

Методом конечных элементов выполнено моделирование распределения электрического поля мод шепчущей галереи малых радиальных порядков. Моделирование проводилось с учётом вертикального ограничения в слоях структуры для набора азимутальных порядков в двумерной геометрии с учётом осевой симметрии резонатора. Исследовалась добротность мод, фактор оптического ограничения в зависимости от длины волны, геометрии резонатора и состава слоев гетероструктуры. Показано, что для мод, локализованных вблизи внешнего края резонатора добротность имеет значения более 10^{12}, а фактор оптического ограничения – не менее 4,15%. Продемонстрирована лазерная генерация в дисковых и кольцевых резонаторах на кремнии диаметром 5-8 мкм. Пороговая мощность оптической накачки при комнатной температуре составила 250 кВт/см², получена характеристическая температура T_0= 200 К в диапазоне 20–100 °C. Температурная стабильность длины волны излучения лазеров вблизи 420 нм описывается коэффициентом $d\lambda/dT$ = 0,0115 нм/К.

Получена лазерная генерация в дисковых и кольцевых резонаторах на сапфире диаметром 2-12 мкм. Пороговая мощность оптической накачки при комнатной температуре составила менее 200 кВт/см², получено экспериментальное значение добротности на уровне 5500. В резонаторах диаметром 6 мкм и менее поддерживается одномодовый режим генерации, в спектрах лазеров с резонатором диаметром 7-12 мкм наблюдается серия линий, отстоящих на междмодовом расстоянии мод шепчущей галереи.

Заключение

В последние два десятилетия светодиоды на основе нитридов III группы и области их применения продемонстрировали мощное развитие и стали неотъемлемой частью нашей жизни. Полученные в работе результаты подтверждают, что микроизлучатели на основе нитридов III группы относятся к научно-технологическим решениям, которые также могут произвести революцию в этой области в ближайшие несколько лет и оказать влияние на нашу повседневную жизнь.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках проекта «Международное академическое сотрудничество» НИУ ВШЭ. Оптические измерения проводились на уникальной научной установке «Комплексный оптоэлектронный стенд» НИУ ВШЭ- Санкт-Петербург.

Список литературы

[1] W.Y. Fu, H.W. Choi. Progress in Quantum Electronics, **95**, Art. no. 100516 (2024).
[2] H.Zhao, M.Feng, J.Liu, X.Sun, T.Tao, Q. Sun, H.Yang. Nanophotonics, **12**, 111-118 (2023). Vol., iss.1. P.
[3] S.Tohi, G.Harari, T.Ito, Y.Lumer, M.Bandres, K.Omae, M.Segev. Phys. Rev. Appl, **21**(2), Art. no. 024014 (2024).

Методика оценки сдвига мгновенной оптической частоты импульсного излучения, формируемого полупроводниковым оптическим усилителем

И. А. Козлов [1]✉, **Ф. В. Скляров** [1]

[1] АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР», Санкт-Петербург, Россия.

✉kozlovia1@yandex.ru

Аннотация. В работе предложена методика оценки сдвига мгновенной оптической частоты излучения в пределах импульса, формируемого полупроводниковым оптическим усилителем. Методика основана на преобразовании паразитной частотной модуляции в разность фаз интерферирующих импульсов в разбалансированном интерферометре с последующей демодуляцией по алгоритму PGC.

Ключевые слова: оптический полупроводниковый усилитель, паразитная частотная модуляция, временное мультиплексирование со спектральным уплотнением.

Введение

Полупроводниковые оптические усилители (SOA) широко применяются в системах TDM мультиплексирования волоконно-оптических датчиков для формирования коротких зондирующих импульсов [1,2]. Вместе с тем нелинейная динамика усиления SOA приводит к паразитной частотной модуляции оптического излучения, вызывающей спектральное уширение импульсов и искажение их временной формы [3–4].

В интерферометрических измерительных схемах такие спектральные и фазовые искажения снижают контрастность интерференции и точность измерений [1]. В связи с этим в настоящей работе предлагается интерферометрический метод оценки величины сдвига мгновенной частоты оптического излучения в пределах оптического импульса.

Материалы и методы

Исследование паразитной частотной модуляции оптического импульса SOA выполнялось с использованием экспериментальной установки, схема которой приведена на рисунке 1.

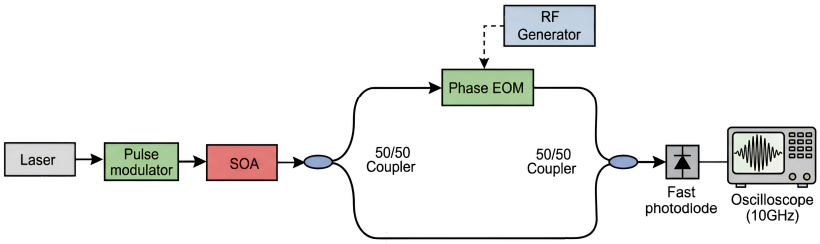


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Излучение узкополосного лазера подавалось на вход SOA, формирующего прямоугольные оптические импульсы. Преобразование паразитной частотной модуляции в разность фаз интерферирующих импульсов происходило в разбалансированном интерферометре. В интерференционный сигнал вносилась высокочастотная вспомогательная гармоническая фазовая модуляция с помощью электрооптического модулятора, установленного в одно из плеч интерферометра. Детектирование разности фаз интерферирующих импульсов осуществляется с использованием алгоритма PGC (Phase Generated Carrier). Мгновенная частота оптического излучения восстанавливалась из сигнала демодулированной фазы интерференционного сигнала в соответствии с выражением:

$$\Delta v = \frac{\varphi}{2\pi\Delta t} \qquad (1)$$

где $\Delta\nu-$ сдвиг мгновенной оптической частоты, $\varphi-$ демодулированная фаза интерференционного сигнала, $\Delta t-$ временная задержка излучения между двумя плечами интерферометра.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 приведена осциллограмма интерференционного сигнала. Наличие интерференционных колебаний на всей длительности оптического импульса свидетельствует о наличии сдвига мгновенной частоты оптического излучения.

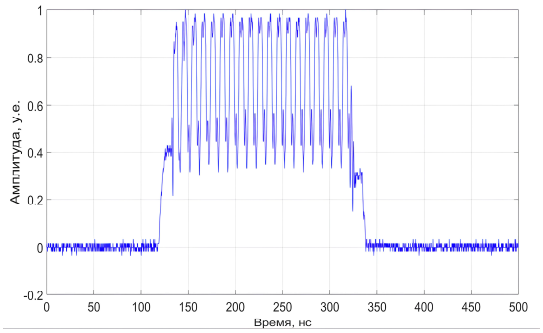


Рис. 2. Осциллограмма интерференционного сигнала.

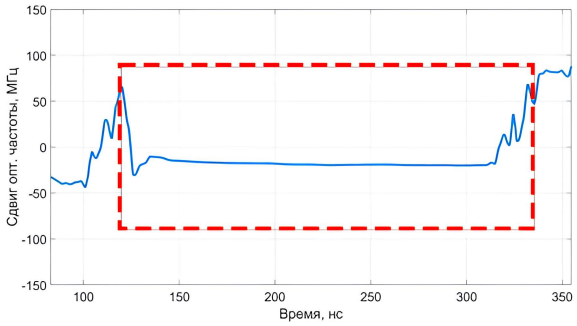


Рис. 3. Сдвиг оптической частоты. Область, соответствующая длительности детектируемого интерференционного сигнала, выделена пунктирной линией.

На основании демодулированной фазы интерференционного сигнала был восстановлен сигнал сдвига мгновенной оптической частоты (рисунок 3). Необходимо отметить, что в рамках данного метода определялся относительный сдвиг мгновенной частоты. Из графика видно, что на протяжении длительности плато импульса наблюдался некоторый стационарный сдвиг оптической частоты. В области, соответствующей наложению фронтов интерферирующих импульсов, наблюдались колебания, связанные с изменением частотного сдвига на данных участках импульсов. В области переднего фронта сдвиг мгновенной оптической частоты составил 13 МГц, в области заднего фронта – 33 МГц.

Заключение

В работе предложена и экспериментально апробирована методика оценки сдвига мгновенной оптической частоты импульсного излучения полупроводникового оптического усилителя, основанная на регистрации интерференционного сигнала в разбалансированном интерферометре и демодуляции фазы с помощью алгоритма PGC. Показано, что при длительности оптических импульсов 200 нс и временной задержке между плечами интерферометра 13,2 нс удаётся восстановить динамику сдвига мгновенной частоты как в области плато импульса, так и в области перекрытия фронтов оптических импульсов.

Список литературы

[1] Bush J., Cekorich A. Low-cost interferometric TDM technology for dynamic sensing applications //Fiber Optic Sensor Technology and Applications III. – SPIE, 2004. – Т. 5589. – С. 132-143.

[2] Luo Z. et al. A time-and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings //Optics Express. – 2013. – Т. 21. – №. 19. – С. 22799-22807.

[3] Baveja P. P. et al. Self-phase modulation in semiconductor optical amplifiers: impact of amplified spontaneous emission //IEEE journal of quantum electronics. – 2010. – Т. 46. – №. 9. – С. 1396-1403.

[4] Olsson N. A., Agrawal G. P. Spectral shift and distortion due to self-phase modulation of picosecond pulses in 1.5 μm optical amplifiers //Applied physics letters. – 1989. – Т. 55. – №. 1. – С. 13-15.

Анализ безопасности квантового распределения ключей с декойными состояниями при backflash и лазерной инжекции/сидинг источника

А. А. Реутов[1, 2]
[1] ООО Курэйт, Москва, Россия
[2] МФТИ, Москва, Россия
aleksey.reutov@phystech.edu

Аннотация. Рассмотрены два аппаратных побочных канала в системах квантового распределения ключей с декойными состояниями: обратное свечение детекторов (backflash) и внешняя оптическая инжекция/сидинг в лазерный источник Алисы Для backflash используется модель маркированных событий, в которой потенциально раскрытые отсчёты консервативно исключаются из оценки однофотонного вклада. Моделирование протокола BB84 показывает, что при вероятности backflash не более 0,23 % скорость секретного ключа и предельная дальность практически не изменяются; при использовании изоляторов потеря дальности составляет несколько метров. Для лазерной инжекции показано, что рассогласование фактических и объявленных интенсивностей приводит к завышению оценки секретного ключа; согласование параметров оценки с максимально допустимым сдвигом интенсивностей восстанавливает консервативность оценки.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, декойные состояния, BB84, backflash, лазерная инжекция.

Введение

Практическая безопасность КРК определяется не только доказательством для идеализированной схемы, но и корректностью моделей реальных детекторов и источников. В протоколах с декойными состояниями [1, 2] особенно критичны побочные каналы, изменяющие либо объём информации, доступный нарушителю после регистрации фотона, либо сами интенсивности импульсов, используемые при оценке параметров. В работе совместно рассматриваются два таких эффекта: backflash в приёмнике Боба и воздействие оптической инжекции/сидинга на лазеры Алисы.

1. Учёт backflash в decoy-state BB84

При срабатывании лавинного фотодиода обратное свечение может распространяться в квантовый канал [3] и раскрывать информацию о зарегистрированном событии. Для учёта этого эффекта события backflash трактуются как маркированные [4]: соответствующие отсчёты исключаются из вклада в секретный ключ. Если задана верхняя оценка вероятности backflash, а $E^u(M)$ — верхняя статистическая оценка числа зарегистрированных событий, то число скомпрометированных отсчётов ограничивается выражение

$$E^u(M_{bf}) = E^u(M)p_{bf}$$
$$M_{bf}^u = f^u(E^u(M_{bf}), eps)$$

где где $f^u(x, eps)$ – граница Чернова для математического ожидания величины x, а eps – параметр eps-безопасности протокола.

худшем сценарии каждый скомпрометированный отсчёт считается однофотон

В наихудшем сценарии каждый скомпрометированный отсчёт считается однофотонным событием в ключевом базисе Z; поэтому верхняя оценка числа backflash-отсчётов вычитается из нижней оценки однофотонного вклада, а верхняя оценка ошибки пересчитывается на уменьшенной выборке. Граница строится консервативно, например с использованием неравенства Чернова, и непосредственно встраивается в конечноразмерную оценку длины секретного ключа.

$$M_{1,ZZ,bf}^l = M_{1,ZZ}^l - M_{bf}^u$$

Таблица 1

Влияние вероятности backflash на параметры ключа

Вероятность backflash	**7 %**	**0,23 %**	**0,0013 %**	**0 %**
Максимальная дальность, м	128 844	140 242	140 486	140 488
Однофотонная ошибка	13,8 %	8,57 %	8,43 %	8,43 %
Ошибка сигнальных состояний	3,36 %	4,85 %	4,88 %	4,88 %

Численный расчёт показывает, что для вероятности backflash 0,23 % предельная дальность меньше идеальной на 246 м, а для значения 0,0013 %, соответствующего схеме с изоляторами, — только на 2 м. При этом однофотонная ошибка для изолированной схемы совпадает с идеальным случаем с точностью представленных значений. Следовательно, при подавленном обратном свечении консервативный учёт backflash практически не ухудшает рабочие характеристики системы.

2. Атака лазерной инжекции,сидинга на источник

При лазерного сидинга/инжекции внешнее излучение изменяет мощность импульсов источника и, следовательно, фактические средние числа фотонов. Обозначая номинальные интенсивности через μ и коэффициент сдвига мощности через κ, воздействие можно описать как $\mu' = \kappa\mu$. Для decoy-state BB84 [1] это изменяет связь между числами отсчётов, однофотонными вкладами и фазовой ошибкой. Следовательно, наблюдаемая статистика должна интерпретироваться при тех же интенсивностях, которые физически формировали переданные состояния.

Сравниваются три сценария. В базовом сценарии атака отсутствует и $\mu' = \mu$. В сценарии неучёта атака изменяет фактические интенсивности, однако на этапе оценки параметров сохраняются номинальные значения μ; тем самым статистика сопоставляется с неверной моделью источника. В скорректированном сценарии протокол использует интенсивности, соответствующие максимально возможному сдвигу, либо их безопасные границы, поэтому полученная скорость является консервативной.

В расчёте для увеличения оптической мощности Алисы на 2,85 % неучтённая инжекция приводит к завышению скорости секретного ключа. При учёте сдвига интенсивностей скорость становится ниже оптимистической оценки; на расстояниях до 50 км она примерно в 1,5 раза меньше, чем в идеальном сценарии. Тем самым источник должен характеризоваться не только в штатном режиме: в оценку безопасности необходимо включать допустимый диапазон интенсивностей при возможном внешнем воздействии.

Заключение

Backflash и лазерная инжекция воздействуют на разные элементы протокола: первый побочный канал раскрывает часть событий регистрации, второй нарушает согласованность между реальным источником и моделью оценки параметров. Оба эффекта допускают консервативный учёт: исключение маркированных отсчётов для backflash и применение безопасных границ интенсивностей для laser seeding. Для рассмотренных параметров подавленный backflash даёт пренебрежимо малую потерю дальности, тогда как процентный сдвиг мощности источника уже требует явной коррекции оценки секретного ключа.

Список литературы

[1] A. Reutov, A. Tayduganov, V. Mayboroda, O. Fat’yanov. Entropy, 25(11), 1556 (2023).
[2] A. S. Trushechkin, E. O. Kiktenko, A. K. Fedorov. Phys. Rev. A, 96, 022316 (2017).
[3] S. Y. Hy et al. J. Appl. Phys., 76, 4479–4491 (1994).
[4] D. Gottesman, H.-K. Lo, N. Lütkenhaus, J. Preskill. Quantum Inf. Comput., 4, 325–360 (2004).

Низкопороговая генерация на модах шепчущей галереи в микродисковых лазерах InGaN/GaN

С. Д. Комаров [1✉], **Д.А. Масютин** [1], **Э.И. Моисеев** [1], **А.Г. Войнилович** [2], **Е.В. Луценко** [2], **А.Ф. Цацульников** [3], **А.В. Сахаров** [3,4], **Д.С. Артеев** [2,4], **А.Е. Николаев** [4], **Е.Е. Заварин** [2,4], **А.А. Пивоварова** [4], **Н.Д. Ильинская** [4], **И.П. Смирнова** [4], **Л.К. Марков** [4], **Н.В. Крыжановская** [1], **А.Е. Жуков** [1]

[1] НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, Россия;
[2] Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь;
[3] НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия;
[4] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
✉skomarov@hse.ru

Аннотация. На подложке Al_2O_3 созданы микродисковые лазеры с активной областью на основе квантовых ям InGaN/GaN диаметром 2-10 мкм. Во всех созданных микролазерах продемонстрирована генерация при комнатной температуре на модах шепчущей галереи в спектральном диапазоне 400-410 нм. Пороговая интенсивность накачки составляет от ~245 до ~1070 кВт/см^2 для лазеров разных диаметров, а оцененная добротность достигает ~5800.

Ключевые слова: микродисковые лазеры, моды шепчущей галереи, InGaN/GaN.

Введение

Система материалов III–N представляет большой интерес для создания компактных полупроводниковых лазеров видимого диапазона спектра, работающих при комнатной температуре. Среди различных типов микролазеров лазеры с резонаторами дисковой формы отличаются низкими порогами, высокой добротностью и относительной простотой изготовления. Распространенными способами снижения порога лазерной генерации для III-N микродисковых лазеров являются изготовление подвешенных дисков за счет селективного удаления жертвенных слоев и использование в эпитаксиальной структуре распределенных брэгговских отражателей, что значительно усложняет производство микролазеров. В данной работе низкопороговая лазерная генерация в микродисковых лазерах InGaN/GaN получена без применения указанных методов.

Материалы и методы

Эпитаксиальные гетероструктуры были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке Al_2O_3 (0001). Лазерная структура включала активную область в виде пяти квантовых ям $In_{0.1}Ga_{0.9}N$/GaN, волноводные слои GaN, два барьерных слоя AlGaN и буферный слой GaN. Микродисковые лазеры диаметром 2-10 мкм были сформированы методами фотолитографии и плазмохимического травления через никелевую маску. Спектры микро-ФЛ микролазеров исследовались при комнатной температуре при импульсной оптической накачке на длине волны 355 нм (20 нс, 10 кГц). Лазер накачки фокусировался объективом 50× в пятно диаметром 12 мкм с плоским профилем интенсивности. Излучение микролазеров собиралось тем же объективом, а регистрация спектров выполнялась с помощью монохроматора Andor Shamrock 500i и кремниевого детектора DU401 BVF с разрешением 0.06 нм.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены нормированные спектры микро-ФЛ микродисковых лазеров различного диаметра. В спектрах всех исследованных микролазеров наблюдаются узкие линии излучения в спектральной области 400-410 нм на фоне широкой полосы фотолюминесценции, что указывает на формирование мод в дисковом микрорезонаторе. Для подтверждения их лазерного характера были исследованы зависимости интегральной интенсивности излучения в области линии и ее FWHM от пиковой интенсивности накачки. Пример для микролазера с D = 6 мкм приведен на рисунке 2. При достижении ~245 кВт/см^2 наблюдается резкое увеличение темпа роста интегральной интенсивности и минимум FWHM линии (~0.08 нм), что свидетельствует о переходе в режим лазерной генерации.

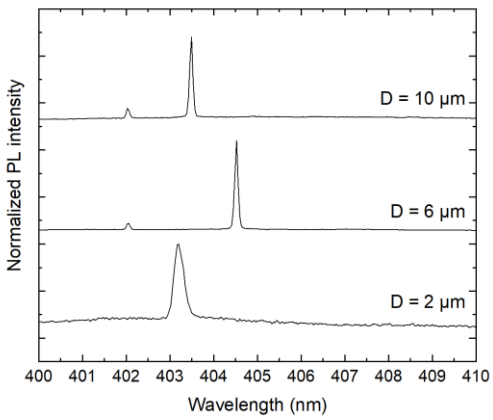


Рис. 1. Нормированные спектры микро-ФЛ микродисковых лазеров различного диаметра при накачке ~1.2·P_{th}.

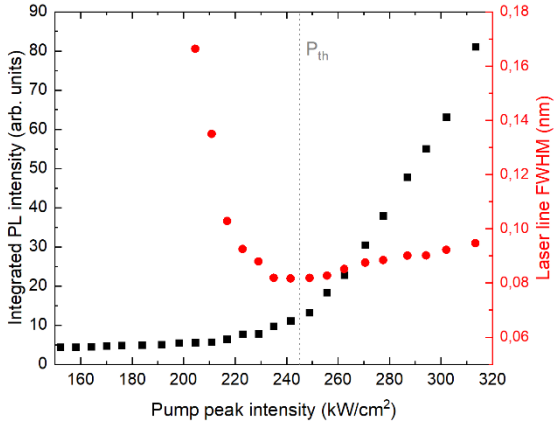


Рис. 2. Зависимости интегральной интенсивности лазерной линии и ее FWHM от пиковой интенсивности накачки.

Для идентификации типа наблюдаемых мод зависимость свободного спектрального диапазона (FSR) от диаметра микролазера хорошо описывается выражением, характерным для мод шепчущей галереи (рисунок 3):

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_{eff}\pi D}, \quad (1)$$

где λ – длина волны лазерной линии, n_{eff} – эффективный групповой показатель преломления и D – диаметр микролазера. Полученное значение n_{eff} – 3.6 хорошо соотносится с n_g для InGaN, что подтверждает генерацию на модах шепчущей галереи. Полученные для микролазеров различных диаметров значения пороговой интенсивности накачки и добротности, оцененной как $Q = \lambda/\Delta\lambda$, приведены на рисунке 4.

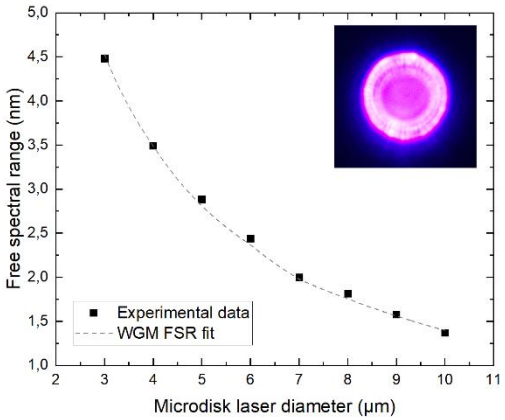


Рис. 3. Зависимость FSR от диаметра микролазера и ее аппроксимация. На вставке: микролазер диаметром 10 мкм.

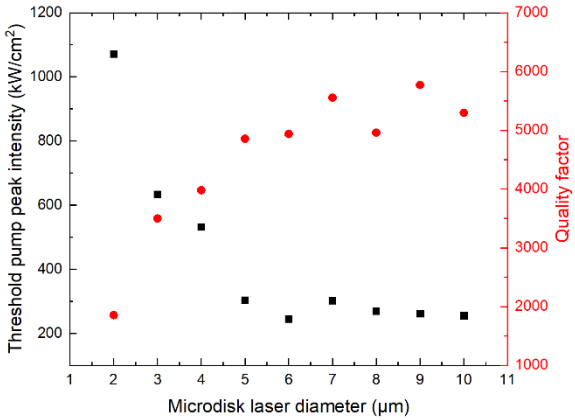


Рис. 4. Зависимости пороговой пиковой интенсивности накачки и добротности от диаметра микролазера.

Заключение

Для микродисковых лазеров диаметром от 2 до 10 мкм была продемонстрирована лазерная генерация на модах шепчущей галереи при комнатной температуре. Пороговая интенсивность накачки составляет от ~245 до ~1070 кВт/см^2, а добротность оценивается от ~1850 до ~5800 в зависимости от диаметра микролазера.

Благодарности

Работа подготовлена в ходе проведения исследования в рамках проекта «Международное академическое сотрудничество» НИУ ВШЭ.

Исследование характеристик детекторов терагерцового диапазона излучения на основе пленок углеродных нанотрубок.

Г.В. Зеленский[1] ✉, К. В. Шеин[2,4], Е.П. Кицюк[3], А.С. Кадочкин[3], А.В. Сыса[3], Г. Н. Гольцман[2], И. А. Гайдученко[2]

✉zelenskyglebbb@gmail.com

[1]МПГУ 119435, г. Москва, улица Малая Пироговская, д. 29/7, с. 1
[2]НИУ ВШЭ, 109028, г. Москва, Покровский бульвар, д. 11
[3]НПК «Технологический центр», г. Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, стр.7
[4]МГУ, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

Аннотация. Исследованы фотоэлектрические свойства детекторов на основе пленок углеродных нанотрубок в терагерцовом диапазоне (140 ГГц). Измерены транспортные характеристики, зависимость фотонапряжения от тока смещения и определена оптимальная рабочая точка для достижения максимальной вольт-ваттной чувствительности. Определен основной механизм детектирования при комнатной температуре (болометрический эффект).

Ключевые слова: болометр, углеродные нанотрубки, терагерцовый диапазон.

Введение.

В настоящее время освоение применения терагерцового диапазона электромагнитного излучения является перспективным направлением исследований. Так детекторы ТГц-излучения находят широкое применение в различных областях: в системах безопасности, медицинской диагностики, высокоскоростных системах связи, спектроскопическом анализе химического состава вещества и т.д. Среди различных существующих типов детекторов стоит выделить болометры – приборы, принцип действия которых основан на зависимости электрического сопротивления от температуры, изменяемой под действием падающего потока излучения.

Традиционные болометры, изготовленные из полупроводников и металлов зачастую ограничены по быстродействию из-за большой теплоемкости поглощающей области или требуют сильного охлаждения для достижения высокой чувствительности. В этом плане углеродные нанотрубки (УНТ), используемые в качестве чувствительного элемента болометра, представляют из себя исключительно перспективный материал. Благодаря своей уникальной структуре, пленки углеродных нанотрубок обладают крайне малой теплоемкостью и высокой теплопроводностью, что потенциально позволяет создавать детекторы с малым временем отклика [1].

Перспективой развития болометров на основе углеродных нанотрубок является возможность создания неохлаждаемых высокочувствительных матричных детекторов терагерцового диапазона излучения [2]. Понимание механизмов фотоотклика в таких структурах необходимо для оптимизации их рабочих параметров и достижения лучших характеристик вольт-ваттной чувствительности.

В данной работе были исследованы характеристики терагерцовых болометров на основе тонких пленок металлических УНТ.

Методика эксперимента

Топология антенны была рассчитана методами математического моделирования для длины волны 140 ГГц и выполнена стандартными методами микроэлектроники в формате «bow-tie» с симметричными областями из титана и золота толщиной 300 нм на кварцевой подложке. Исходные ОУНТ проходили сепарацию методом гель-хроматографии, многократную отмывку металлических ОУНТ от ПАВ добавлением изопропилового спирта, обработкой ультразвуком и центрифугированием с отделением осадка. Пленка металлических углеродных нанотрубок формировалась методом распыления аэрозоля из

суспензии полученных ОУНТ в изопропиловом спирте. Нанесение проводилось через металлическую маску, выполнялось 200 циклов прохода форсунки распылителя вдоль образца при одновременном нагреве столика до 150 °C для равномерной сушки слоев.

Для исследования зависимости фотонапряжения от тока смещения была собрана стандартная схема детектирования ТГц излучения показанная на рисунке 1. В качестве источника ТГц излучения использовался умножитель с коэффициентом умножения 12, на который подавался опорный сигнал 11.66 ГГц (Keysight N5191A). Излучение генератора модулировалось с использованием механического прерывателя с частотой 27 Гц. Измерение фотоотклика проводилась на частоте модуляции с помощью синхронного усилителя Lock-In Amplifier SR830, подключенного через адаптер смещения, для смещения по постоянному току использовался sourcemeter Keithley 2450.

Результаты и обсуждение

Зависимость фотоотклика U_{ph} от тока смещения I, полученная при облучении образца на частоте 140 ГГц, представлена на рисунке 2. При малых значениях тока (I < 40 мкА) наблюдается рост фотоотклика. При достижении тока смещения ≈ 60 мкА наблюдается максимум, после чего наблюдается спад сигнала, обусловленный разогревом пленки УНТ и соответствующий болометрическому сценарию фотодетектирования.

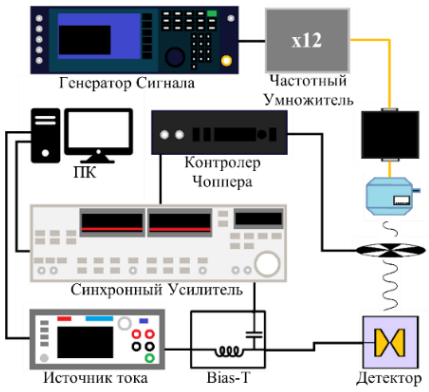


Рис 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

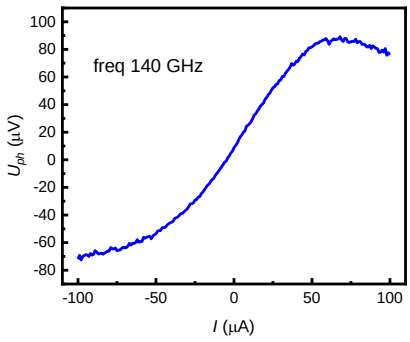


Рис 2. Зависимость фотонапряжения от тока смещения

Заключение

Был продемонстрирован ТГц детектор на основе пленок металлических УНТ с максимальным откликом порядка 80 мкВт при комнатной температуре. Разработанная технология изготовления детекторов является технологичной и масштабируемой, что в будущем может быть использовано для разработки матричных детекторов в системах ТГц видения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства просвещения РФ (YNLN-2026-0006).

Список литературы

[1] High-speed optical-waveguide integrated single-walled carbon nanotube bolometer Special Collection: Hybrid and Heterogeneous Integration in Photonics: From Physics to Device Applications P. P. An; V. V. Kovalyuk; Y. G. Gladush; A. D. Golikov; A. V. Semenov; S. A. Komrakova; R. V. Ozhegov; A. A. Mkrtchyan; D. V. Krasnikov; A. G. Nasibulin; G. N. Goltsman.

[2] Response of asymmetric carbon nanotube network devices to sub-terahertz and terahertz radiation I. Gayduchenko, A. Kardakova, G. Fedorov, B. Voronov, M. Finkel, D. Jiménez, S. Morozov, M. Presniakov, and G. Goltsman.

Исследование радиационной стойкости GaP/Si гетероструктурных солнечных элементов методами емкостной спектроскопии

О. П. Михайлов [1,2] ✉, А. В. Уваров [1], А. И. Баранов [1], В. А. Поздеев [1,3], Е.А. Вячеславова [1], А. А. Максимова [1,3], Э. Я. Ярчук [1,3], А. С. Гудовских [1,3]

[1] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

[2] Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

[3] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ oleg.mikhaylov.00@gmail.com

Аннотация. В работе исследованы гетероструктурные солнечные элементы, облученные электронным потоком, на основе подложек p-Si, легированных бором. В качестве широкозонного эмиттера использовалась тонкая плёнка n-GaP, выращенная методом плазменного атомно-слоевого осаждения. Были проведены измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и квантовой эффективности (КЭ). По ВАХ определены плотность тока короткого замыкания 16 мА/см² и напряжение холостого хода 470 мВ. Образцы были облучены электронами при флюенсах $5\cdot10^{14}$ см$^{-2}$ и $1\cdot10^{15}$ см$^{-2}$, выбранных в соответствии с условиями низких околоземных орбит для оценки возможности использования структур в космосе. После облучения повторно измерены ВАХ и КЭ. ВАХ показало уменьшение тока короткого замыкания примерно на 25%, а КЭ показала падение характеристики в длинноволновой области. В статье будут представлены результаты исследований с помощью спектроскопии глубоких уровней (НСГУ) и спектроскопии полной проводимости (СПП). Эти методы позволят выявить дефектные уровни в структуре образцов, что необходимо для понимания механизмов дефектообразования и последующего улучшения гетероструктур.

Ключевые слова: Гетероструктурные солнечные элементы, GaP, кремний, НСГУ, СПП.

Введение

Создание радиационно-стойких солнечных элементов является одной из ключевых задач космической фотоэнергетики, особенно для аппаратов, работающих на низких околоземных орбитах (НОО). На этих орбитах основным повреждающим фактором являются потоки электронов с энергиями до нескольких МэВ и флюенсами, накапливаемыми за срок активного существования спутника [1]. Традиционные кремниевые фотоэлементы на p–n переходе демонстрируют значительную деградацию параметров при облучении [2], что стимулирует поиск альтернативных гетероструктур. Одним из перспективных направлений является использование гетероперехода p-Si/n-GaP. Фосфид галлия (GaP) обладает широкой запрещённой зоной (≈2.26 эВ), что обеспечивает высокое пропускание в коротковолновой области спектра, и достаточно хорошее согласование постоянной решётки с кремнием (рассогласование ≈0.36%). Кроме того, метод плазменного атомно-слоевого осаждения (АСО) позволяет формировать тонкие, однородные плёнки GaP с контролируемой толщиной и низкой плотностью дефектов.

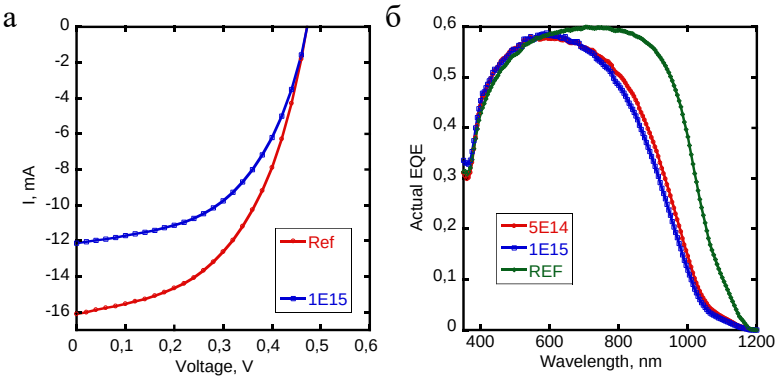
Материалы и методы

В качестве подложек использовались КДБ 0,8-1,2 односторонней полировки с ориентацией (100). Перед нанесением слоя GaP образцы были очищены от окисла в растворе HF. Далее для формирования тонких слоев GaP на поверхности Si использовали метод PEALD при температуре 380 °C [3]. Этот процесс состоит из воздействия прекурсоров на поверхность подложки в одном заданном цикле. Цикл повторяется заданное количество раз. В качестве источников атомов Ga и P использовали металлическое соединение триметилгаллия (TMG) и фосфин (PH3). Давление во время этапов осаждения

составляло 350 мТорр. Слой GaP был донорно легирован кремнием (смесь газов SiH4/H2). Далее на обратную сторону образцов был нанесён алюминий с последующим отжигом методом RTA при температуре 650ºC в течении 1 мин. А на лицевую сторону методом термического напыления были нанесены Ag/Au контакты в виде контактной сетки солнечного элемента.

1. Результаты и обсуждение

Для полученных солнечных элементов были измерены ВАХ и КЭ до и после облучения электронами с энергией 1 MeV и флюенсами $5 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ и $1 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$. Полученные графики изображены на рисунке 1а,б.



ВАХ измерялась двухзондовым методом при температуре 25°C. Кривая имеет типичную диодную форму с экспоненциальным ростом тока при увеличении напряжения. Ток короткого замыкания равен 16 мА, а напряжение холостого хода равно 480 мВ. Однако, в области напряжения холостого хода заметно влияние последовательного сопротивления. После облучения заметно падение тока короткого замыкания с 16 мА/см² до 12 мА/см². А график КЭ (рис.1б) показывает, что элемент эффективно поглощает и собирает носители в широком спектральном диапазоне в области ~500–900 нм, однако после облучения происходит падение характеристики в длинноволновой области, что указывает на ожидаемую деградацию подложки кремния, а не интерфейса GaP/Si. Для более детального анализа будут измерены НСГУ и СПП, которые позволят оценить дефектообразование и выявить причины падения электрических характеристик.

Заключение

Проведённые измерения ВАХ и спектральной зависимости КЭ показали, что исследуемая гетероструктура p-Si/n-GaP, сформированная методом атомно-слоевого осаждения, демонстрирует работоспособность для комических применений. После облучения заметно падение электрофизических характеристик примерно на 25%. В дальнейшем, после облучения образцов, планируется проведение измерений методами НСГУ и СПП для анализа энергетического спектра дефектов, их концентрации и влияния на электрические параметры структуры.

Благодарности

Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научно-исследовательский проект 0791-2026-0035).

Список литературы

[1] O.P. Mikhaylov, A.I. Baranov, A.A. Maksimova, A.V. Uvarov, E.A. Vyacheslavova, A.S. Gudovskikh. Capacitance studies of solar cells based on nanostructured ” black“ silicon with a passivating GaP layer, 59(4), 206–212 (2025).

[2] A.S. Gudovskikh, O.P. Mikhaylov, A.I. Baranov, E.I. Terukov. Deep-level transient spectroscopy of solar cells based on HJT architecture under influence of electron irradiation. St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics, 17(1.1), 160–164 (2024).

[3] Zhao Z., Zhang Z., Jing J., et al., Black silicon for near-infrared and ultraviolet photodetection: A review, APL Mater. 11 (2023) 021107.

Полупроводниковый оптический усилитель спектрального диапазона 1020-1075 нм с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs/GaAs

А.Ю. Мороз [1,2]✉, А.А. Харченко [1,3], А.М. Надточий[1,4], Н.Ю. Гордеев[3], М.В. Максимов[1,3]

[1] СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия;

[2] СПБПУ, Санкт-Петербург, Россия;

[3] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия;

[4] НИУ ВШЭ, Санкт-Петербург, Россия

✉moroz_ayu@spbstu.ru

Аннотация. Исследованы полупроводниковые оптические усилители с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs/GaAs. Получена зависимость выходной мощности от тока накачки и длины волны входного излучения. Входная мощность определялась косвенно по току прозрачности активной области. Максимальное значение коэффициента усиления составило 30 дБ в диапазоне длин волн 1020-1040 нм. При входных мощностях выше -20 дБм усилитель переходит в режим насыщения.

Ключевые слова: Квантовые яма-точки, полупроводниковые оптические усилители, коэффициент усиления.

Введение

Полупроводниковые оптические усилители (ПОУ) на основе квантовых точек InAs (КТ) применяются в оптических интегральных схемах благодаря быстродействию, компактности и совместимости с подложками GaAs. Их нелинейный отклик позволяет реализовывать перекрестную модуляцию сигнала (XGM) и логические элементы [1].

Однако, низкая поверхностная плотность КТ ограничивает модальное усиление. Структуры на основе квантовых яма-точек (КЯТ) обладают на порядок большим максимальным модальным усилением, чем КТ [2], что делает их перспективными для ПОУ.

Материалы и методы

Исследован ПОУ на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs с активной областью КЯТ $In_{0,4}Ga_{0,6}As$. Технология синтеза и оптические свойства КЯТ описаны в [3]. Структура выращивалась методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на вицинальной подложке GaAs. Активная область представляет собой 7 слоев КЯТ толщиной 1,2 - 2,4 нм, разделенных спейсерами GaAs толщиной 40 нм. Просветляющие покрытия на сколотые грани резонатора не наносились. Для подавления обратной связи использовалась специальная конструкция волновода: наклонные полосковый волновод шириной 20 мкм и длиной 1,6 мм.

Модулированное излучение перестраиваемого непрерывного лазера (990-1075 нм) вводилось в волновод ПОУ микрообъективом (100/0,85), мощность регулировалась аттенюатором. На частоте модуляции измерялась выходная мощность, а также индуцированное излучением напряжение на образце. По зависимости напряжения от тока накачки определялось значения тока, соответствующее режиму прозрачности активной области (ток прозрачности), по методике, описанной в [4]. Поскольку в режиме прозрачности активная область не усиливает и не поглощает излучение, выходную мощность при токе прозрачности можно принять равной вошедшей в волновод.

Результаты и обсуждение

Спектры коэффициента малосигнального усиления ПОУ при входной мощности -21 дБм, приведены на рисунке 1, (а). При увеличении тока накачки от 100 до 400 мА (0,3-1,2 кА/см^2) спектр расширяется в коротковолновую область, а коэффициент усиления растёт, достигая значения 30 дБ в спектральной полосе 1020-1040 нм. На рисунке 1, (б) представлены спектры коэффициента усиления при двух значениях входных мощностей: -21 дБм и -6 дБм при токе 400 мА. При увеличении входной мощности спектр расширяется, однако его максимальное значение падает на 10 дБ, что свидетельствует о работе прибора в режиме насыщения.

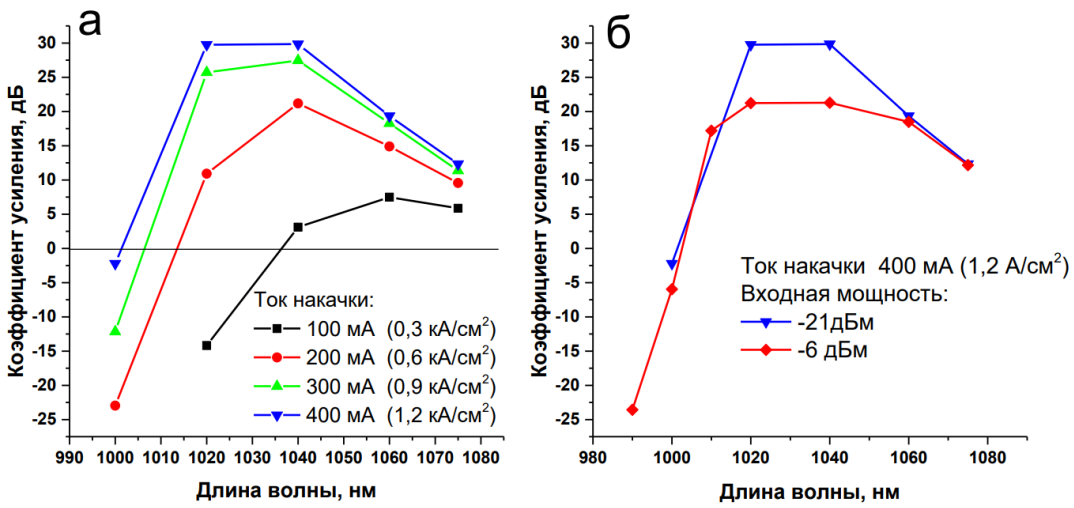


Рисунок 1. Спектры коэффициента малосигнального усиления исследуемого ПОУ при различных токах накачки (а) и входных мощностях (б).

На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента усиления от входной мощности. Она позволяет количественно оценить нелинейность ПОУ. При входных мощностях до -20 дБм ПОУ работает в линейном режиме и коэффициент усиления постоянен. При дальнейшем увеличении входной мощности, его значение снижается, а выходная мощность стремится к насыщению.

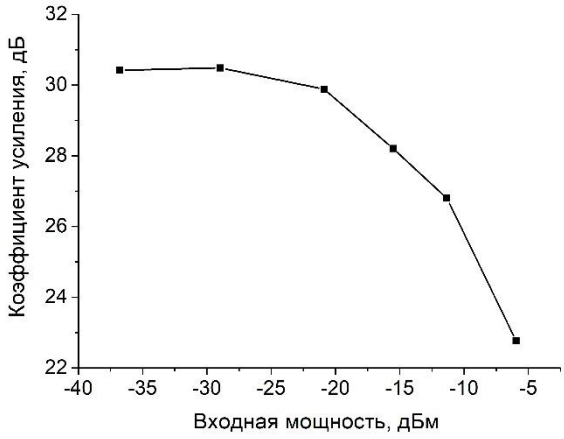


Рисунок 2. Зависимость коэффициента усиления от входной мощности на длине волны 1040 нм.

Заключение

Продемонстрирован рабочий прототип ПОУ на основе КЯТ, обладающий высоким коэффициентом малосигнального усиления, а также нелинейностью зависимости выходной мощности от входной, что демонстрирует перспективу применения ПОУ на основе КЯТ в фотонных интегральных схемах.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект №23-72-00038.

Список литературы

[1] J. Cui, K. E. Zoiros, A. Kotb. Nanomaterials, **16**(3), 202 (2026).

[2] A. M. Nadtochiy, N. Yu. Gordeev, A. A. Kharchenko, S. A. Mintairov, N. A. Kalyuzhnyy, Yu. S. Berdnikov, Yu. M. Shernyakov, M. V. Maximov, A. E. Zhukov. J. Light. Technol., **39**(23), 1 (2021).

[3] M. V. Maximov, A. M. Nadtochiy, S. A. Mintairov, N. A. Kalyuzhnyy, N. A. Kryzhanovskaya, E. I. Moiseev, N. Yu. Gordeev, Yu. M. Shernyakov, A. S. Payusov, F. I. Zubov, V. N. Nevedomsky, S. S. Rouvimov, A. E. Zhukov. Appl. Sci., **10**(3), 1038 (2020).

[4] P. A. Andrekson, N. A. Olsson, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan, D. Coblenz, H. Temkin. Electron. Lett., **28**(2), 171 (1992).

Анализ параметров усиления квантовых точек в коротких лазерных полосках

А.А. Образцова[1]✉, **Е.В. Баделина**[1], **Е.А. Беляева**[1], **А.И. Каримова**[1], **А.С. Драгунова**[1]
В.И. Войтович[1], **И.С. Махов**[1], **Н.В. Крыжановская**[1], **А.Е. Жуков**[1]
[1] НИУ Высшая школа экономики – Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, Россия
✉ aobraztsova@hse.ru

Аннотация. Экспериментально и теоретически исследована зависимость порогового тока лазера с квантовыми точками высокой плотности в широком диапазоне длин резонатора 45 мкм – 4 мм. Оптимальная длина лазера определена около 120 мкм, насыщенное усиление оценено 400 см$^{-1}$.

Ключевые слова: Квантовая точка, полупроводниковый лазер, оптическое усиление.

Введение

Оптическое усиление является важной характеристикой активной области полупроводникового лазера. Для массива квантовых точек (КТ) существует максимальное (насыщенное) усиление G_{sat}, когда все КТ заполнены носителями заряда [1]. Оно оказывает определяющее влияние на характеристики лазера, когда оптические потери велики, например, в коротком резонаторе. В связи с этим знание величины G_{sat} играет решающую роль при разработке микролазеров. В настоящей работе нами исследуется возможность получения количественной оценки насыщенного усиления в лазерах на основе плотных массивов КТ, формируемых не по механизму Странского-Крастанова, используя экспериментальные данные по величине порогового тока в полосках различной длины, в том числе 100 мкм, и ее анализа с помощью развитой феноменологической модели.

Материалы и методы

Гетероструктура, использованная для создания инжекционных лазеров, была синтезирована методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений на вициналной подложке GaAs (100). Она содержала 6 слоев КТ $In_{0.4}Ga_{0.6}As$, помещенных в волноводный слой GaAs, ограниченный эмиттерами AlGaAs n- и p-типа легирования. Плотность КТ в каждом из слоев оценивается в (3-4)×10^{11} см$^{-2}$. Полосковые лазеры имели ширину 50 мкм, заданную с фотолитографией и последующим травлением. Длина лазерных полосков, получаемых скалыванием, варьировалась от 45 мкм до 4 мм. Измерения порогового тока были выполнены при комнатной температуре в импульсном режиме накачки. Модель основана на следующих допущениях. Заполнение f_{QD} всех КТ носителями заряда одинаково и описывается распределением Ферми. Усиление $G = G_{sat}(2f_{QD} - 1)$. Концентрации электронов и дырок в волноводе равны и намного больше концентрации носителей заряда в КТ. Носители заряда рекомбинируют излучательно. Внутренние потери много меньше потерь на вывод излучения.

Результаты и обсуждение

Экспериментальная зависимость порогового тока от длины L лазерного полоска приведена на рис. 1. Лазерная генерация наблюдалась для всех L, включая минимальный исследованный размер 45 мкм. Пороговый ток при уменьшении длины резонатора снижается, а в наиболее коротких из исследованных лазеров вновь возрастает. Оптимальная длина резонатора составляет L_{opt}=100-150 мкм, а соответствующий ей минимальный пороговый ток I_{min} около 80-90 мА. Соответствующее значение плотности порогового тока составляет около 2 кА/см^2. При этом полный ток рекомбинации непосредственно в КТ не может превосходить нескольких сотен А/см^2 даже в случае их полного заполнения носителями заряда (с учетом их поверхностной плотности и времени жизни носителей заряда [2]). Это подтверждает наше предположение, что полный темп рекомбинации в основном определяется носителями заряда, заполняющими лазерный волновод.

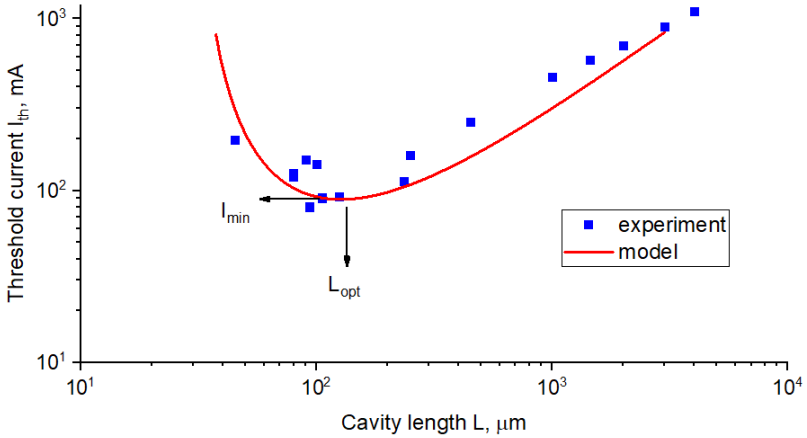


Рис. 1. Пороговый ток от длины полоска: эксперимент (символы) и модель (линия).

Для анализа экспериментальных результатов учтем, что потери на вывод излучения α обратно пропорциональны длине резонатора Фабри-Перо: $\alpha = r/L$ (коэффициент $r \approx 1/\ln(0.3)$ для сколотых граней). Усиление в режиме генерации равно оптическим потерям α, что позволяет связать для данного значения α установить заполнение КТ, а через него значение энергии Ферми и концентрацию носителей заряда в волноводе: $n_{WG} \approx N_{WG}\exp(-\delta)(1+q)/(1-q)$. Здесь $q = \alpha/G_{sat}$, N_{WG} – эффективная плотность состояний волновода, δ – отнесенная к тепловой энергии глубина локализации состояний КТ по отношению к волноводу. Пороговая плотность тока определяется темпом рекомбинации в волноводе: $j_{th} \propto n_{WG}^2$ (вкладом рекомбинации в самих КТ пренебрегаем), пороговый ток $I_{th} \propto j_{th}L$. С учетом приведенных соотношений, получаем выражение для анализа:

$$I_{th} = I_{WG}\left(\frac{1+q}{1-q}\right)^2\frac{1}{q}, \quad (1)$$

где I_{WG} – не зависящий от потерь параметр, величина которого зависит от ширины полоска, толщины волновода и коэффициента рекомбинации носителей заряда в волноводе. Зависимость I_{th} от L отражает как масштабирование размеров резонатора (играет решающую роль при малых α), так и рост заполнения волновода при больших α (в коротких резонаторах). Полагая $dI_{th}/d\alpha = 0$, находим оптимальные потери:

$$\alpha_{opt} = \left(-2+\sqrt{5}\right)G_{sat}, \quad (2)$$

соответствующие минимальному пороговому току $I_{min} = \left(11+5\sqrt{5}\right)I_0/2$. Оба параметра модели, G_{sat} и I_{WG}, могут быть определены независимо из экспериментальных значений I_{min} и $\alpha_{opt} = r/L_{opt}$ =95+/-20 см$^{-1}$. Расчетные значения порогового тока (линия на рис. 1) хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Заключение

Анализ экспериментальной зависимости порогового тока с помощью предложенной модели позволяет однозначно определить величину насыщенного усиления. Для исследованной активной области G_{sat} оценен около 400 см$^{-1}$. Полагая, что G_{sat} масштабируется с числом слоев КТ, модель позволяет определить конструкцию активной области для достижения минимального порогового тока для заданного уровня потерь (заданной длины резонатора).

Благодарности

Экспериментальные исследования выполнены с использованием УНУ «Комплексный оптоэлектронный стенд».

Список литературы

[1] L. V. Asryan, R. A. Suris, Semicond. Sci. Technol. 11, 554 (1996).
[2] K. A. Ivanov, A. M. Nadtochiy, N. V. Kryzhanovskaya, et al., J. Luminescence 255, 119620 (2023).

Поверхностно облучаемые фотодиоды для спектральной области λ=2 – 5 мкм на основе ДГС N-InAsSbP/InAsSb/P-InAsSbP

Р.Э. Кунков, А.А. Климов, С.А. Карандашев, Т.С. Лухмырина, М.А. Ременный, Усикова А.А.
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ
romunkov@yandex.ru

Аннотация. В работе сообщается о результатах разработки и исследования средневолновых широкополосных ИК фотодиодов на основе p-n гетероструктур с фоточувствительной областью $InAsSb_{0.08}$, освещаемых со стороны эпитаксиального слоя (англ. FSI -front-surface illuminated), с длинноволновой границей фотоответа $\lambda_{0.5}$ = 4.5 мкм (T = 296 K). Обсуждаются конструктивные решения обеспечивающие возможность использования разработанных фотоприемников для теплопеленгации. Выявлены причины, ограничивающие достижение максимальных значений квантовой эффективности в коротковолновой области спектра (λ = 2 мкм) и в области низких температур (T = 77 K). Показано, что предложенные решения по конструкции эпитаксиальной структуры и чипа фотоприемника на ее основе обеспечили достижение значений токовой чувствительности и обнаружительной способности на длине волны 4.0 мкм S_i = 1.9 А/Вт, D^* = $2.5 \cdot 10^9$ смГц$^{1/2}$/Вт (22 ^{0}C), соответственно.

Ключевые слова: твердый раствор InAsSb, средневолновый ИК фотодиод, FSI фотодиод, фотоприемник 3 – 5 мкм.

Введение

Фотоприёмники, работающие в областях длин волн 2 (3) – 5 мкм, являются ключевыми элементами: недисперсионных оптических датчиков углеводородов, углекислого, угарного газов; многокомпонентных газоанализаторов, работающих на принципах инфракрасной спектроскопии; низкотемпературных пирометров, тепловизионных систем и систем связи по открытому каналу. В связи с этим, актуальны как поиски новых подходов к созданию средневолновых приёмников ИК излучения, так и оптимизация уже опробованных технологий с целью улучшения характеристик ранее разработанных оптоэлектронных компонентов.

Одним из перспективных подходов к созданию фотоприёмников для вышеуказанных задач, является использование p-n гетероструктур на основе твёрдых растворов InAsSb, что связано с металлургической стабильностью полупроводников A3B5, доступностью подложек для их роста, и их относительно невысокой стоимостью.

В докладе сообщается о результатах работ по разработке, исследованию и внедрению средневолновых широкополосных ИК фотодиодов (ФД) на основе p-n гетероструктур с фоточувствительной областью $InAsSb_{0.08}$, освещаемых со стороны эпитаксиального слоя, с длинноволновой границей фотоответа $\lambda_{0.5}$ = 4.5 мкм (T = 296 K), работающих в интервале температур 200 (77) – 500 K.

Материалы и методы

Эпитаксиальные гетероструктуры N-InAsSb/ $InAsSb_{0.08}$/P-InAsSbP были получены методом ЖФЭ на подложках n^+-InAs (100). Постростовая обработка проводилась методами стандартной фотолитографии для получения чипов фотодиодов с вводом излучения через широкозонный слой P-InAsSbP (конструкция «FSI» - front-side illuminated), содержащих один фоточувствительный элемент или линейку из 14 элементов. Толщина чипа составляла около 50 мкм; были сформированы сплошной контакт к подложке n^+-InAs и разветвленный к слою P-InAsSbP. Чипы монтировались на подкристальную плату и далее на корпуса TO-18 или TO8.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены спектральные зависимости токовой чувствительности (а) и обнаружительной способности (б) при комнатной температуре, образцов фотоприемников:

- полученных ранее [1] - с фоточувствительной областью на основе градиентного слоя InAsSb, близкого к данной работе состава, толщиной t = 18 мкм и широкозонного контактного слоя P-InAsSbP толщиной 5 мкм;

- полученных в рамках данной работы: одиночных элементов с размером 390×390 мкм (DHS, фоточувствительная область InAsSb толщиной t = 4 мкм); одиночных элементов линейки фотоприемников с размером одиночного элемента 500×100 мкм (DHS, фоточувствительная область InAsSb толщиной t = 3 мкм).

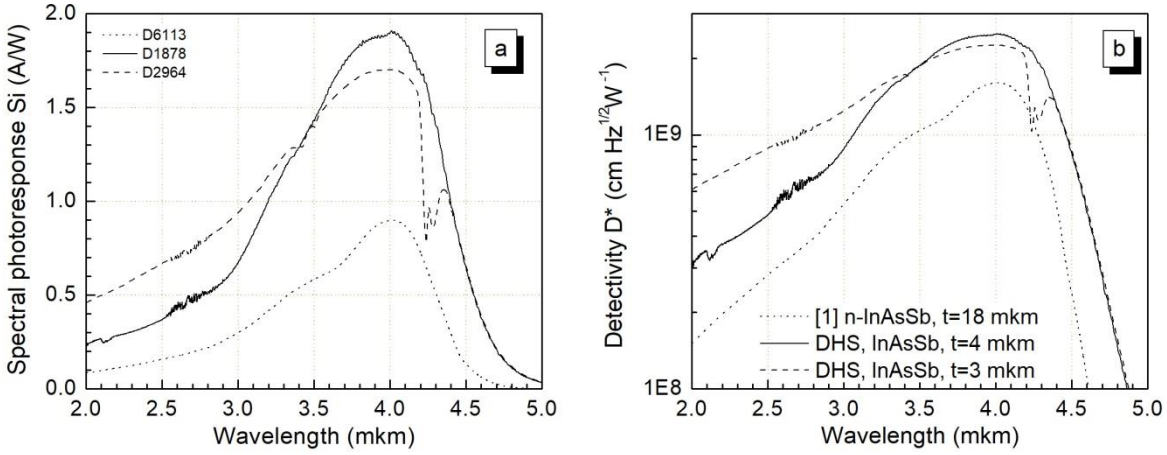


Рис.1. Спектры токовой чувствительности (а) и обнаружительной способности (б) при комнатной температуре, полученные ранее [1] и в данной работе

Моделирование фотоэлектрических характеристик средневолновых фотоприемников на основе p-n структур из твердых растворов арсенида индия, проведенное в данной работе показало, что использование достаточно толстых фоточувствительных градиентных слоев InAsSb [1], имеет следствием невысокую эффективность сбора фотогенерированных носителей как в области длин волн, соответствующих энергии наиболее узкозонного фоточувствительного слоя (λ=4 мкм), так и в коротковолной области спектра (λ = 2 мкм). Использование двойной гетероструктуры с фоточувствительной областью толщиной 3 – 4 мкм, содержащей градиент концентрации легирующей примести привело к увеличению внутренней квантовой эффективности до 85%, что обеспечило 2-х кратный рост токовой чувствительности и обнаружительной способности по сравнению с ранее разработанными фотоприемниками [1].

Заключение

Были разработаны средневолновые широкополосные ИК фотодиоды на основе p-n гетероструктур с фоточувствительной областью $InAsSb_{0.08}$, освещаемые со стороны эпитаксиального слоя, с длинноволновой границей фотоответа $\lambda_{0.5}$ = 4.5 мкм (T = 296 K) и исследованы их фотоэлектрические свойства. Благодаря оптимизации гетероструктуры, обеспечившей более эффективный сбор фотогенерированных носителей было получено увеличение токовой чувствительности и обнаружительной способности до 2-х раз по сравнению с ранее полученными результатами.

Список литературы

[1] Н. Д. Ильинская, А. Л. Закгейм, С. А. Карандашев [и др.], Поверхностно облучаемые фотодиоды на основе InAsSb (длинноволновая граница $\lambda_{0.1}$=4.5 мкм), работающие при температурах 25-80ºС // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, № 5. – С. 708-713.

Влияние конструкции InAlAs метаморфных буферных слоев на электрофизические характеристики кристаллов InGaAs фотодиодов ближнего ИК-диапазона

О. В. Баранцев [1]✉, Е. И. Василькова [1], Е.В. Пирогов [1], К.О. Воропаев [2], А.А. Васильев [2], Л.Я. Карачинский [1,3], И.И. Новиков [1,3], М.С. Соболев [1]

[1] СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия;

[2] АО «ОКБ Планета», Великий Новгород, Россия;

[3] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

✉ ovbarantsev@gmail.com

Аннотация. Исследованы электрофизические характеристики кристаллов фотодиодов $In_{0.83}Ga_{0.17}As/InP$, изготовленных на основе метаморфных гетероструктур с линейными и ступенчатыми буферными слоями InAlAs. По данным темновых вольт-амперных характеристик показано, что применение линейного профиля приводит к снижению уровня темнового тока прибора. Отсутствие насыщения обратного тока указывает на доминирование генерационно-рекомбинационного механизма проводимости.

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, метаморфные буферные слои, фотодетекторы ближнего инфракрасного диапазона, молекулярно-пучковая эпитаксия.

Введение

Фотодетекторы ближнего инфракрасного диапазона на основе InGaAs широко востребованы в ИК-оптоэлектронике [1]. Для расширения спектрального диапазона до 2.2 - 2.6 мкм используется поглощающий слой $In_{0.83}Ga_{0.17}As$. Однако рассогласование параметров кристаллической решетки (порядка 2.1%) между материалом активной области и подложкой InP приводит к образованию прорастающих дислокаций, увеличивающих темновые токи. Эффективное подавление этих дефектов при синтезе методом молекулярно-пучковой эпитаксии обеспечивается применением метаморфных буферных слоев на основе InAlAs. Способность МБС согласовать параметры решеток напрямую зависит от их конструкции. В связи с этим, целью данной работы является исследование влияния профиля InAlAs метаморфных буферных слоев на электрические характеристики кристаллов InGaAs фотодиодов ближнего ИК-диапазона.

Материалы и методы

Исследовались два типа метаморфных гетероструктур, выращенных на установке молекулярно-пучковой эпитаксии Riber MBE49. Обе гетероструктуры включали согласованный с подложкой слой InAlAs (~0.1 мкм), метаморфный буферный слой $In_yAl_{1-y}As$ (~2 мкм, легирование Si: $3\cdot10^{18}$ $см^{-3}$), активную область $In_{0.83}Ga_{0.17}As$ (~1.5 мкм, Si: $8\cdot10^{16}$ $см^{-3}$), барьерный слой $In_{0.83}Al_{0.17}As$ (~0.6 мкм, Be: $1.5\cdot10^{19}$ $см^{-3}$) и контактный слой $In_{0.83}Ga_{0.17}As$. В гетероструктуре R2782 буферный слой характеризовался линейным изменением доли y от 0.52 до 0.83, его рост завершался in situ высокотемпературным отжигом. В R2792 буферный слой имел ступенчатый градиент доли y от 0.52 до 0.85, сопровождавшийся понижением температуры после каждой из пяти ступеней. Методами ПЭМ и АСМ было показано, что линейный буферный слой обеспечивает меньшую плотность прорастающих дислокаций $\sim5\cdot10^{8}$ $см^{-2}$ и шероховатость RMS ~17.3 нм по сравнению со ступенчатым буферным слоем ($\sim5\cdot10^{9}$ $см^{-2}$, 18.2 нм соответственно) [2].

В работе представлены результаты измерений электрических характеристик описанных гетероструктур: темновой и фото-ВАХ в диапазоне приложенных напряжений −3…0.25 В и емкостных измерений при обратном смещении при комнатной температуре. Исследования проводились на кристаллах фотодиодов с одинаковой топологией (диаметр фоточувствительной области 140 мкм). Фототок в образцах возбуждался при освещении лампой накаливания с вольфрамовой нитью. Токовая чувствительность структуры R2792 была оценена с использованием вертикально-излучающего лазера с длиной волны генерации 1.55 мкм и оптической мощностью 2.09 мВт.

Результаты и обсуждение

ВАХ образцов приведены на рис. 1. Повышенная плотность дислокаций образца R2792 обуславливает в 2-3 раза больший обратный темновой ток по сравнению с R2782. Отсутствие насыщения обусловлено преобладающим генерационно-рекомбинационным механизмом тока через состояния в запрещенной зоне [3].

При освещении лампой накаливания для обоих кристаллов наблюдается рост обратного тока в диапазоне −1…0 В, связанный с фотогенерацией носителей заряда. При высоких напряжениях смещения −3…−1.5 В полный ток практически полностью определяется темновой компонентой вследствие опережающего роста генерационно-рекомбинационного тока. Таким образом, рабочий диапазон фотодиодов ограничен областью −1…−0.1 В. Токовая чувствительность R2792 при приложенном напряжении −1 В составила 0.52 А/Вт на длине волны 1,55 мкм.

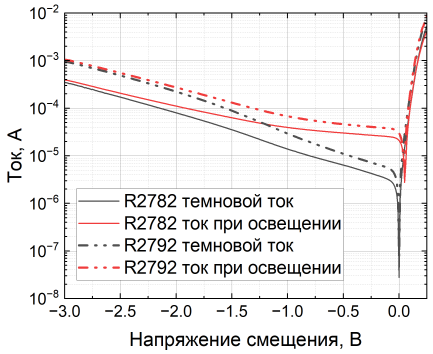


Рис. 1. Сравнение ВАХ кристаллов фотодиодов на гетероструктурах R2782 и R2792.

Вольт-фарадные измерения образца R2782 в диапазоне -1.5…0 В демонстрируют линейный участок зависимости $1/C^2$ (V), откуда оценена концентрация доноров в активной области $8.7 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$ и встроенный потенциал 0.40 В. Отклонение от линейности при обратных напряжениях свыше 1.5 В свидетельствует о вкладе ловушечных состояний.

Заключение

Переход от ступенчатого к линейному профилю позволяет снизить плотность прорастающих дислокаций на порядок: с $5 \cdot 10^9$ см$^{-2}$ до $5 \cdot 10^8$ см$^{-2}$, что приводит к снижению темнового тока фотодиодов. Однако вид ВАХ показывает, что определяющим для обеих структур остается генерационно-рекомбинационный механизм тока, обусловленный дислокационными состояниями. Он ограничивает рабочий диапазон фотодиодов в режиме обратного смещения, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации конструкции МБС.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания № FSRM-2026-0034.

Список литературы

[1] И.Д. Бурлаков, Л.Я. Гринченко, А.И. Дирочка, Н.Б. Залетаев. Успехи Прикладной Физики, **2**(2), 131-162, (2014).

[2] О.В. Баранцев, Е.И. Василькова, Е.В. Пирогов, П.А. Дементьев, В.Н. Неведомский, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, М.С. Соболев. НТВ СПбГПУ. Физико-математические науки, **18**(3.2), 172 (2025).

[3] Е. И. Василькова, О.В. Баранцев, А.И. Баранов, Е.В. Пирогов, К.О. Воропаев, А.А. Васильев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, М.С. Соболев. ФТП, **58**(7), 358 (2024).

Особенности технологии изготовления вертикально-излучающего лазера с длиной волны 850 нм

А.А. Васильев[1], К.О. Воропаев[1], И.О. Воропаева[1], Е.Д. Мазун[1], С.А. Блохин[2]
Л.Я. Карачинский[3], И.И. Новиков[3]
[1]АО "ОКБ-Планета", Великий Новгород, Россия
[2]Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
[3]ООО "Коннектор Оптикс", Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В данной работе описывается технология изготовления и характеристики отечественного вертикально-излучающего лазера на основе гетероэпитаксиальной структуры AlGaAs/GaInAs, выращенной на подложке GaAs, предназначенного для применения в оптических трансиверах.

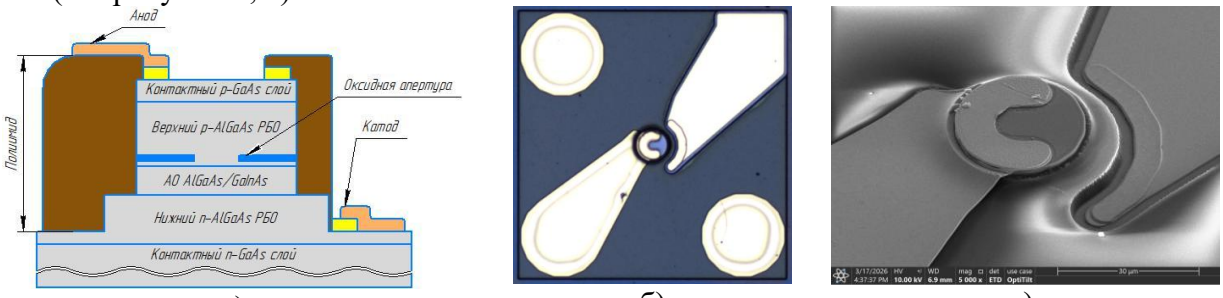
Ключевые слова: вертикально-излучающий лазер, гетероэпитаксиальная структура, мезаструктура, трансивер.

Введение

В настоящее время при построении телекоммуникационных сетей широко используются приемо-передающие устройства (трансиверы). Вертикально-излучающий лазер (ВИЛ) спектрального диапазона 850 нм является одним из ключевых компонентов для создания распространенного типа трансиверов формата SFP. На данный момент актуальные коммерчески доступные ВИЛ 850 нм обеспечивают скорость передачи данных свыше 25 Гбит/с [1], но при этом они выпускаются исключительно зарубежными компаниями, на отечественном рынке ВИЛ 850 нм до сих пор не были представлены.

Конструкция

Эпитаксиальная структура GaAs/AlGaAs/InGaAs ВИЛ 850 нм состоит из контактного слоя p-GaAs, верхнего $Al_{0,12}Ga_{0,88}As/Al_{0,9}Ga_{0,1}As$ РБО p-типа; апертурных слоев AlGaAs; микрорезонатора с активной областью на основе напряженных квантовых ям InGaAs; нижнего $Al_{0,12}Ga_{0,88}As/Al_{0,9}Ga_{0,1}As$ РБО n-типа и контактного слоя n-GaAs, примыкающего к нелегированной подложке GaAs (см. рисунок 1, а). В случае геометрии ВИЛ с легированными РБО непланарность рельефа может достигать от 8 до 10 мкм с точностью травления для ряда мезаструктур в диапазоне от 50 до 100 нм. По этой причине для повышения технологичности процесса было решено отказаться от планаризации. А именно, контактная площадка катода была сформирована на нижнем уровне кристалла ВИЛ (см. рисунок 1, в).



а) б) в)

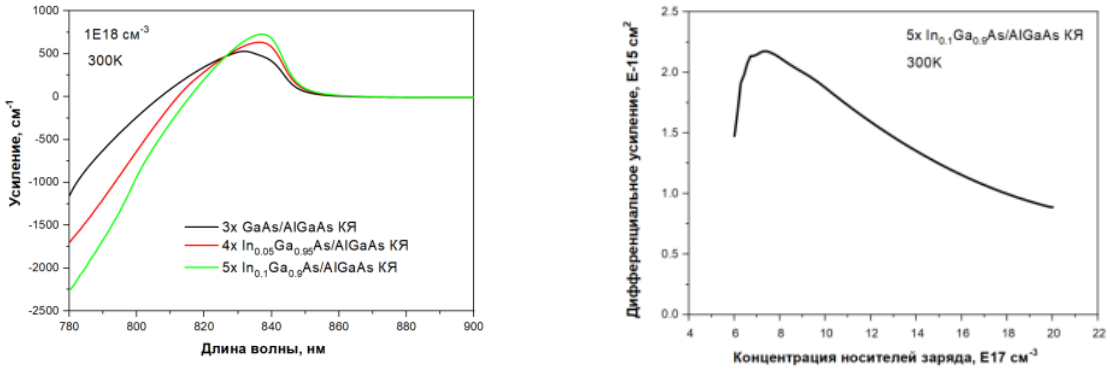
Рис.1. Изготовленный ВИЛ 850 нм: а) Схематическое сечение конструкции; б) Фотография с оптического микроскопа; в) Фотография РЭМ

При изготовлении ВИЛ 850 нм были подобраны режимы проведения таких технологических операций как: контактная фотолитография, вакуумное напыление слоев металлизации омических контактов и контактных площадок, жидкостное травление полупроводников и плазмохимическое травление полупроводников и диэлектриков.

Выбор состава активной области

На рисунке 2а приведены результаты расчетов спектров усиления активной области на основе (In)GaAs/AlGaAs квантовых ям спектрального диапазона 850 нм при концентрации носителей заряда ~1E18 $см^{-3}$. Увеличение концентрации In ведет к росту усиления при фиксированном уровне концентрации носителей заряда, позволяет снизить концентрацию носителей заряда, соответствующей точке просветления активной области.

На рисунке 2б представлены результаты расчетов дифференциального усиления от концентрации носителей заряда активной области (АО) на основе $In_{0.1}Ga_{0.9}As$/AlGaAs квантовых ям. Видно, что концентрация носителей заряда N_{tr}, при которой достигается просветление активной области, не превышает ~7E17 см$^{-3}$. Максимальное дифференциальное усиление реализуется вблизи N_{tr}, при более высокой концентрации носителей заряда, типичной для достижения лазерной генерации в ВИЛ, дифференциальное усиление заметно превышает ~$5 \cdot 10^{-15}$ см$^{-2}$, что крайне важно для быстродействия лазера.

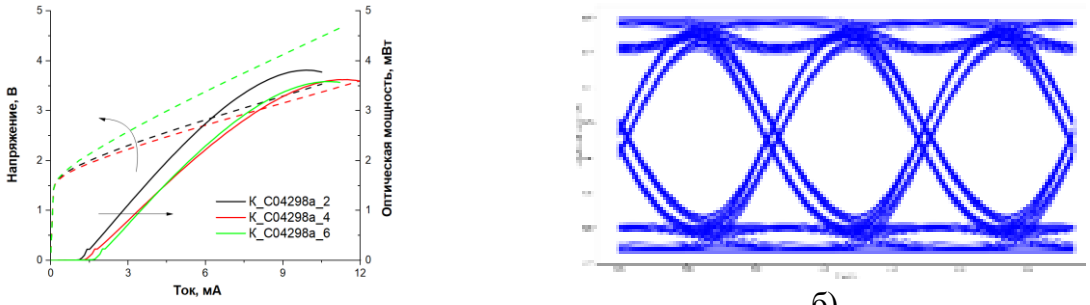


а) б)

Рис.2. а) Спектр усиления АО на основе (In)GaAs/AlGaAs квантовых ям 850 нм; б) АО на основе $In_{0.1}Ga_{0.9}As$/AlGaAs квантовых ям 850 нм: зависимость дифференциального усиления от концентрации носителей заряда

Характеристики

В результате изготовленные ВИЛ при комнатной температуре демонстрируют пороговые токи на уровне 1 мА. Максимальная выходная оптическая мощность составляет 3,8 мВт (рис. 3, а). Скорость передачи данных (в одном канале) не менее 15 Гбит/с при рабочем токе 10,5 мА (рис. 3, б).



а) б)

Рис.3. а) Ватт-амперная характеристика кристаллов ВИЛ; б) Глазковая диаграмма при скорости передачи данных 15 Гбит/с

Заключение

В рамках проведенных работ была разработана технология и отработаны отдельные технологические процессы для изготовления отечественных кристаллов ВИЛ 850 нм. Измеренные характеристики демонстрируют, что данная технология позволяет изготавливать приборы, потенциально пригодные для применения их в оптических системах, в том числе трансиверах, работающих со скоростью 10 Гбит/с. Работы выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (СОГЛАШЕНИЕ № 23-91-06200 от «18» декабря 2023 г.).

Список литературы

1. Cheng H.-T. и др. Recent Advances in 850 nm VCSELs for High-Speed Interconnects // Photonics. 2022. Т. 9, № 2. С. 107.

Применение полиимида в оптоэлектронике

Е. Д. Мазун, А.А. Васильев
JSC OKB-Planeta, Veliky Novgorod, Russia;
Yaroslav the Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia
e-mail: mazun.irina@mail.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается технология формирования полиимидного покрытия, применимая в производстве полупроводниковых компонентов. Продемонстрирована адаптация отечественного полиимида к планарной технологии, в качестве изолирующего слоя на примере pin-фотодиодов. Были проведены измерения вольт-амперных характеристик приборных структур с различными типами изолирующих слоев, которые продемонстрировали эффективность отработанного процесса изоляции.

Ключевые слова: Полиимид, вольт-амперная характеристика, pin фотодиод.

Введение

Среди различных классов термостойких полимеров полиимиды занимают одно из важнейших мест, благодаря превосходному сочетанию термических, электрических и физико-механических свойств. Они применяются при производстве во многих отраслях техники. В полупроводниковой технике полиимид нашел свое применение как межслойный диэлектрик, обеспечивающий низкую диэлектрическую проницаемость и планаризацию поверхности, так и в качестве пассивирующего слоя, защищающего кристалл от внешнего воздействия среды. К сожалению, на отечественном рынке не представлено полиимидов специализированных для использования в планарной технологии полупроводников.

Материалы и методы

Для проведения экспериментов был выбран полиимид марки АД-9103-30, так как с точки зрения его характеристик, включая вязкость, он может наносится методом центрифугирования. Нанесение осуществлялось при скорости 5500 об/мин на гетероэпитаксиальную на подложку GaAs, после чего следовал процесс имидизации пленки в муфельной печи. Имидизация проходила по режиму, представленному в таблице 1.

Таблица 1

Режим имидизации полиимида

Нагрев/выдержка при t, C°	Время, мин
65→100	20
100	15
100→150	30
150	30
150→250	40
250	15
250→300	30
300	30
300→350	30
350	30
Остывание до 150	~2 часа

В качестве маски под плазмохимическое травление выступала пленка Al толщиной 0,06 мкм, нанесенная методом электронно-лучевого испарения. Напыление осуществлялось при низкой температуре (до 40 °C), без вращения пластины.

Плазмохимическое травление осуществлялось в реакторе с источником-индуктивно-связанной плазмы (PEICP травление) в газовой смеси элегаза (SF_6) и кислорода (O_2).

После локального травления при помощи оптического профилометра осуществлялся контроль толщины сформированного полиимидного покрытия.

На поверхность пластины методом термического испарения напылили систему металлов V/Au и сформировали контактные площадки. С целью проверки адгезии, на пластине была проведена термозвуковая сварка золотой проволокой диаметром 20 мкм к контактным площадкам на полиимиде.

Вольт-амперные характеристики измерялись при помощи зондовых методов с использованием анализатора.

Результаты и обсуждения

Контроль травления полиимида осуществлялся по интерферометру (in situ). Методом профилометрии была определена толщина сформированного полиимидного покрытия, которая составила 3 мкм.

Перемычки из золотой проволоки проверялись на отрыв при помощи механического граммометра. Полученные результаты составили в среднем 3,5 гс, что демонстрирует возможность осуществления микросварки с использованием такого типа изоляции.

После отработки технологии на контрольных пластинах полиимид был нанесен на рабочие структуры широкоапертурных мезаструктурных InGaAs pin фотодиодов в качестве изолирующего материала. На рис.1 представлено сравнение полученных вольт-амперных характеристик (ВАХ) фотодиодов с полиимидом и с SiO_2 при комнатной температуре. Из представленного сравнения можно наблюдать существенно меньшие токи утечки при изоляции мезаструктуры полиимидом.

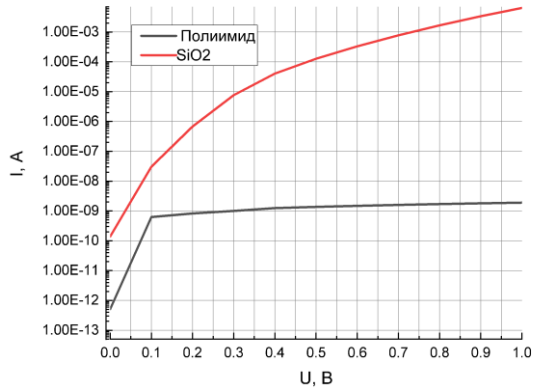


Рис.1. Темновая ВАХ pin-ФД с пассивацией полиимидом и с пассивацией SiO_2

Заключение

В ходе работы была отработана технология формирования полиимидного покрытия на основе отечественных материалов, применимая в производстве полупроводниковых компонентов. Определены температурные режимы имидизации и режимы плазмохимического травления. При помощи разработанной технологии достигнуто существенное снижение темновых токов у InGaAs pin фотодиодов, что демонстрирует актуальность проведенных работ.

Использование метода лазерной очистки при реставрации объектов культурного наследия с каменным декором из песчаника

Х. В. Шумилова [1,2]✉, **В. А. Парфенов** [3,4], **В.В. Данилова**[1,2]

[1] ООО «Реставрационная мастерская «Наследие», Санкт-Петербург, Россия;
[2]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;
[3] Санкт-Петербургский институт истории Российской Академии наук, Санкт-Петербург, Россия;
[4] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия;
✉ shumilova.h@rm-nasledie.com

Аннотация. Проведены исследования возможности использования технологии лазерной очистки при проведении работ по реставрации исторических памятников из песчаника. Эксперименты проводились с использованием импульсного волоконного иттербиевого лазера. Объектами исследования были модельные образцы камня и фрагменты наружного декора павильона Императорского (Царского) вокзала – памятника архитектуры начала XX века. Целью исследований являлся подбор параметров лазерного излучения, обеспечивающих высокую эффективность удаления загрязнений при исключении риска повреждения каменной поверхности.

Ключевые слова: лазерная очистка, волоконный лазер, культурное наследие, исторические памятники, реставрация, песчаник.

Введение

В последние десятилетия наблюдается все более активное использование лазеров при реставрации культурно-исторического наследия. Наиболее широкое применение получила технология лазерной очистки, которая используется для удаления природных наслоений и антропогенных загрязнений с поверхности памятников [1]. В настоящее время наиболее отработана методика очистки карбонатных пород камня – мрамора и известняка. В отношении обломочных осадочных пород, в частности, песчаника, необходима разработка индивидуальной методологии применения лазеров, что требует проведения целенаправленных научно-исследовательских работ.

В данной работе проводились экспериментальные исследования возможности очистки песчаника с помощью волоконного иттербиевого лазера. Благодаря обилию исторически разрабатываемых карьеров, простоте обработке песчаника и его сравнительно бюджетной стоимости, он широко использовался при создании скульптур, барельефов и малых архитектурных форм. Однако песчаник является хрупким, гигроскопичным материалом и подвержен интенсивному атмосферному выветриванию, из-за чего реставрация изготовленных из него памятников является сложной задачей. Традиционные механические, сорбционные и химические методы реставрационной очистки песчаника не всегда эффективны и могут сопровождаться рисками необратимого повреждения авторской пластики. С учетом этих обстоятельств лазерная очистка может рассматриваться как дополнительный и, в некоторых случаях, более предпочтительный способ расчистки поверхности каменного декора из песчаника, поскольку лазер предоставляет возможность деликатного и контролируемого воздействия на очищаемую поверхность. Однако, применению лазеров в реставрации памятников из песчаника посвящено очень малое количество публикаций ([1], [2]), что говорит о научной новизне исследований в этой области.

Материалы и методы

Объектами исследования в данной работе были фрагменты наружного декора объекта культурного наследия Российской федерации Павильона Императорского (Царского) вокзала из песчаника, построенное в 1912 г как часть комплекса сооружений императорской железной дороги в Царском селе.

Использованные для пробных расчисток образцы камня имели характерные для памятников атмосферной экспозиции природные наслоения и антропогенные загрязнения: черные сажисто-копотные и гипсовые корки, биологические пленки, высолы. Для очистки поверхности песчаника использовался импульсный волоконный иттербиевый лазер с длиной волны 1070 нм.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований были выбраны оптимальные параметры лазерного излучения, обеспечивающие высокую эффективность удаления загрязнений и исключающие риск повреждения каменной поверхности, а именно: средняя мощность – 15…20 Вт; частота импульсов – 15…20 Гц; длительность импульса – 150 нс; длина линии сканирования – 20 мм; скорость сканирования – 4000 мм/с.

Было установлено, что наилучшие результаты очистки с точки зрения эффективности удаления загрязнений и уменьшения механических повреждений очищаемой поверхности дает влажная лазерная очистка, при которой загрязненная поверхность песчаника предварительно увлажняется. Вода является хорошим проводником тепла, что позволяет уменьшать температуру в зоне лазерной обработки и тем самым снизить риск механических повреждений. При этом, вода в пористых черных корках и биологических плёнках в процессе лазерной очистки интенсивно нагревается, что приводит к быстрому термическому расширению молекул воды вплоть до вскипания и способствует дополнительной ~~и~~ абляции (распаду) частиц загрязняющего вещества (Рис.1 и 2).

Рис. 1. Императорский (Царский) вокзал, фрагмент декора входного портала. Процесс лазерной расчистки.

Рис. 2. Фрагмент декора окна. Участок пробной расчистки

Заключение

Проведенные эксперименты показали высокую эффективность очистки песчаника с помощью импульсно-периодического волоконного лазера с длиной волны 1070 мкм. Это позволяет сделать вывод о перспективности использования данного лазера, как одного из возможных способов расчистки поверхности, при проведении работ по реставрации исторических памятников из этого материала. Следует отметить, что выветрелая поверхность песчаника различных месторождений и разного срока межреставрационной эксплуатации требует подбора параметров лазерного излучения в пробных раскрытиях индивидуально для каждого памятника.

Список литературы

[1] M. Cooper. *Laser Cleaning in Conservation: An Introduction* (Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998).

[2] M. Jankowska, G. Sliwinski. Spectroscopic and surface analysis of the laser ablation of crust on historic sandstone elements. Radiation Physics and Chemistry, 68, 147–152 (2003).

Использование кремниевых квантовых точек для предотвращения нагрева солнечных элементов

Bi Jiachen[1], Yang Jin[2], Pang Haihong[1]
[1]The National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia
[2]University of Science and Technology Beijing, Beijing, China
✉bijiachen0921@gmail.com

Аннотация. В работе предложено нанесение кремниевых квантовых точек (SiQDs) на кристаллические кремниевые солнечные элементы для снижения перегрева и повышения эффективности. Пассивированные SiQDs обладают высоким квантовым выходом фотолюминесценции, поглощая ближний УФ-свет и преобразуя его в красный, что уменьшает термализационные потери. Они также стабильны и устойчивы к деградации. Через 50 минут облучения под солнечным симулятором у панелей с SiQDs возросли напряжение холостого хода, ток короткого замыкания и эффективность преобразования, что подтверждает перспективность SiQDs как слоя для понижающей-конверсии.

Ключевые слова: кристаллические кремниевые солнечные элементы, кремниевые квантовые точки, понижающая-конверсия, снижение температуры солнечного элемента

Введение

Производство электроэнергии с помощью солнечных элементов является ключевым источником чистой энергии. Повышение эффективности преобразования имеет решающее значение для фотоэлектрики. Однако фототермические эффекты приводят к тому, что более 70% солнечной энергии превращается в тепло, повышая температуру элемента. Это приводит к расширению кристаллической решётки фотоэлектрических материалов, уменьшению ширины запрещённой зоны, снижению напряжения холостого хода и, как следствие, падению эффективности преобразования [1].

Кремниевые квантовые точки (SiQDs) — новые флуоресцентные наноматериалы с отличными оптическими свойствами, регулируемой длиной волны излучения и согласованием показателя преломления с кремнием, что перспективно для фотоэлектрики [2]. По сравнению с органическими красителями и тяжёлыми металлами, SiQDs имеют лучшую эффективность флуоресценции, высокую стабильность и простой синтез. УФ-лучи – основной источник тепла для панелей. Как показано на рисунке 1, фотолюминесценция SiQDs позволяет преобразовывать УФ в видимый свет, снижая рабочую температуру и повышая эффективность солнечных элементов.

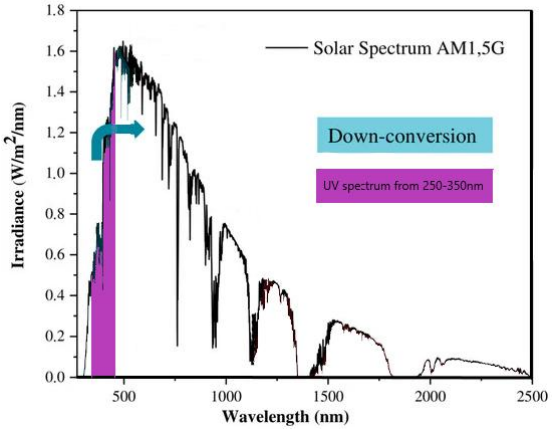


Figure 1 – Down-conversion of high-energy UV photons in the solar spectrum

Материалы и методы

В данном исследовании мы использовали порошок кремниевых квантовых точек диаметром от 3 до 5 нм, в качестве растворителя применяли гептан, концентрация раствора составляла 0,2 мг/мл. Методом центрифугирования нанесли раствор кремниевых квантовых точек на поверхность незагерметизированной солнечной батареи (400 мм × 400 мм) и на высокопрозрачное стекло. Толщина плёнки, измеренная с помощью эллипсометра, составила 150 нм. Наконец, под облучением солнечным симулятором в течение 50 минут были измерены электрические характеристики и рабочая температура фотоэлектрических панелей без покрытия и с покрытием из кремниевых квантовых точек.

Результаты и обсуждение

Измерения показали: у фотоэлектрической панели с квантовыми точками (образец 1) напряжение холостого хода и ток короткого замыкания выше, чем у непокрытой (образец 2), а рабочая температура через 50 минут на 5,1 K ниже. Ток короткого замыкания образца 1 существенно возрос благодаря фотолюминесценции, генерирующей красные фотоны, а также, вероятно, совпадению показателей преломления квантовых точек и кремния, что уменьшает отражение света и повышает поглощение фотонов.

Таблица 1

Параметры исследованных образцов

Time, min	Образец 1			Образец 2		
	Voc, mV	Isc, mA	T, K	Voc, mV	Isc, mA	T, K
0	625	263	299.7	614	218	299.7
10	588	268	329.8	576	222	331.1
20	581	271	330.1	565	223	335.8
30	577	270	332.3	557	227	337.9
40	566	275	334.7	541	234	339.0
50	566	282	334.6	538	233	339.7

Заключение

Исследование показало: панель с кремниевыми квантовыми точками имеет рабочую температуру на 5,1 K ниже, а напряжение и ток выше на 28 mV и 49 mA. Это доказывает, что данный метод снижает нагрев солнечных элементов. Далее нужно измерить оптические свойства плёнки для подтверждения уменьшения отражения и увеличения проникновения фотонов.

Благодарности

Данная работа была частично поддержана стипендиальной программой CSC (проект № 202308091430).

Список литературы

[1] LI R Y, SHI Y, WU M C, et al. Photovoltaic panel cooling by atmospheric water sorption-evaporation cycle. J. Nature Sustainability, **3**(8), pp.636-643 (2020).

[2] Pute Yang, Shangyu Hou, Xiaoqian Liu, Rong Yang, Zichen Wang, Qin Zhou, Silicon quantum dots-based non-enzymatic fluorescence sensor for ultrasensitive detection of methyl parathion. J. Results in Chemistry, **18**(1), 102713 (2025).

Низкотемпературное Ионно-Лучевое Напыление (IBS) Nio Для Лёгких И Гибких Перовскитных Солнечных Элементов

Пан Хайхун[1], Грень Д. Д.[1], Ле Тхай Шон [1], Д.С. Саранин[1]

[1]L.A.S.E – Лаборатория перспективной солнечной энергетики, 119049 Москва, Ленинский пр., 6

panghh0303@gmail.com

Аннотация: In this work, comprehensive studies of ultrathin NiO layers produced by ion beam sputtering (IBS) for p-type selective charge transport in p-i-n perovskite solar cells and modules were carried out. The use of a ceramic NiO target (3N) and optimization of sputtering parameters (power, oxygen flow) enabled elimination of high-temperature post-treatment of the films, which is a critical boundary condition for layer-by-layer fabrication of perovskite solar modules on flexible substrates (Tmax = 120 °C). Surface trap states characteristic of non-stoichiometric NiO were successfully passivated by employing oxygen plasma treatment and deposition of an organic self-assembled monolayer based on dibenzo-carbazole. On scaled modules fabricated using slot-die coating and vacuum-assisted drying, power conversion efficiencies exceeding 14% on glass substrates and over 9% on PET plastic substrates were achieved.

Ключевые слова: Перовскитные солнечные элементы, слой переноса дырок, ионно-лучевое распыление.

Введение

Перовскитные солнечные элементы остаются одним из наиболее перспективных направлений благодаря своему высокому потенциалу. Гибкие перовскитные элементы привлекают внимание благодаря широким возможностям применения. Однако традиционный растворный метод с центрифугированием и высокотемпературной обработкой непригоден для гибких устройств. Метод ионно-лучевого напыления (IBS) является альтернативным подходом, позволяющим получать однородные тонкие плёнки без высокотемпературной обработки.

Материалы и методы

В данной работе были изготовлены перовскитные солнечные элементы и модули структуры glass/ITO p-i-n, а также гибкие устройства на основе ITO p-i-n.Слой транспортировки дырок (HTL) на основе NiO_x толщиной 15–20 нм осаждался методом ионно-лучевого напыления с использованием керамической мишени NiO. После осаждения проводились отжиг при 110 °C и обработка кислородной плазмой в течение 90 секунд. Измерения проводились с использованием солнечного симулятора ABET 3000 класса AAA.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты показывают, что образцы на стеклянной подложке с плёнками NiO, осаждёнными методом IBS и подвергнутыми отжигу и плазменной обработке, демонстрируют несколько более низкие значения напряжения холостого хода, плотности тока короткого замыкания и эффективности преобразования энергии по сравнению с эталонными образцами, полученными методом центрифугирования из раствора, тогда как коэффициент заполнения несколько выше (рис. 1).

Для стеклянных образцов максимальные значения составляют: напряжение холостого хода — 1,02 В, плотность тока короткого замыкания — 20,54 мА/см², коэффициент заполнения — 71,59 %, эффективность — 14,67 %. Для гибких образцов

максимальные значения составляют: напряжение холостого хода — 0,99 В, плотность тока короткого замыкания — 16,13 мА/см², коэффициент заполнения — 57,65 %, эффективность — 9,22 %.

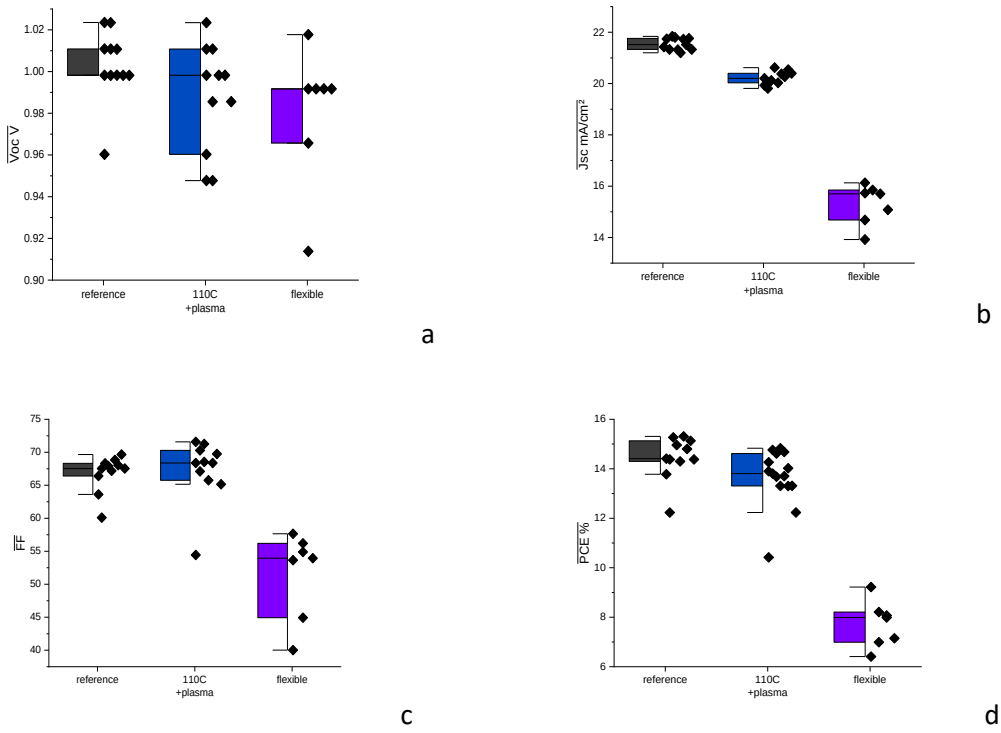


Рисунок 1.a — напряжение холостого хода;b — плотность тока короткого замыкания;c — коэффициент заполнения;d — эффективность (PCE) перовскитных солнечных элементов, изготовленных различными методами.

Заключение

Ультратонкие слои NiO, напылённые методом IBS, обеспечили низкотемпературное изготовление эффективных перовскитных p-i-n модулей, совместимых с лёгкими и гибкими подложками. Исключение высокотемпературных стадий обработки вместе с контролируемыми условиями напыления позволило формировать однородные плёнки при ограничении T_max = 120 °C, что актуально для архитектур на основе PET (толщиной 125 мкм). Ключевым вкладом стало применение обработки O2-плазмой, которая эффективно снизила плотность поверхностных дефектов в нестехиометрическом NiO за счёт насыщения кислородных вакансий, улучшения стехиометрии и подавления ловушечно-ассистированной рекомбинации на границе NiO/перовскит. Эта обработка улучшила выравнивание энергетических уровней и селективность переноса дырок, что привело к более эффективному извлечению заряда и снижению межфазных потерь. Дополнительная пассивация с помощью органического самосборного монослоя ещё больше стабилизировала интерфейс (Voc был улучшен до >1,0 В на элемент). Достигнутые эффективности, превышающие 9% на PET, подтверждают высокий потенциал данного подхода для лёгких, гибких и масштабируемых фотоэлектрических приложений.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку в рамках проекта № 24-62-00022.

Список литературы

1. Le T. S. и др. All-Slot-Die-Coated Inverted Perovskite Solar Cells in Ambient Conditions with Chlorine Additives // Solar RRL. John Wiley & Sons, Ltd, 2022. Т. 6, № 2. С. 2100807.
2. Le T. S. и др. Tailoring Wetting Properties of Organic Hole-Transport Interlayers for Slot-Die-Coated Perovskite Solar Modules // Solar RRL. 2024.

Исследование возможности использования лазерного 3D-сканирования для мониторинга деревянной скульптуры

В. Р. Бермас [1]✉, **Д. С. Кулешов** [1], **В. В. Парфенова** [2], **В. А. Парфенов** [1,3]

[1] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия;

[2] Государственный Русский музей

[3] Санкт-Петербургский институт истории РАН

✉bms.tech@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований изменения геометрических параметров деревянной скульптуры Луиса Гомеса «Естественное открытие» из собрания Государственного Русского музея. Контрольные измерения проводились с использованием лазерного 3D-сканирования с последующим построением высокоточных цифровых 3D-моделей. Сопоставление данных, полученных при первичном сканировании с результатами повторного измерения, позволило выявить и оценить величину деформаций скульптуры, возникших за контрольный интервал времени. Полученные результаты демонстрируют потенциал применения 3D-сканирования для мониторинга состояния объектов культурного наследия

Ключевые слова: лазерное 3D-сканирование, лазерная триангуляция, 3D-моделирование, скульптурный памятник, культурное наследие.

Введение

В настоящее время в области сохранения объектов культурно-исторического наследия существует необходимость в поиске новых высокоэффективных методов мониторинга их состояния. Традиционно эта задача решается методом фотографической съемки, но на современном этапе музейной работы необходимо использование объективных количественных методов оценки сохранности. Одним из возможных новых подходов является применение лазерного 3D-сканирования. Лазерное 3D-сканирование уже находит применение в сохранении объектов историко-культурного наследия [1], [2]. Оно позволяет получать высокоточные цифровые копии объектов, позволяющие зафиксировать мельчайшие детали поверхности, включая трещины, сколы и дефекты, возникшие в процессе бытования памятников. Разнообразие существующих типов 3D-сканеров позволяет решать различные задачи – от сканирования малых объектов (ювелирные изделия, монеты) до масштабных архитектурных форм. В данной работе были проведены экспериментальные исследования по проверке возможности применения 3D-сканирования для мониторинга скульптурных памятников из дерева. Постановка и решение такой задачи имеет научную новизну, поскольку в литературе имеется очень мало сведений об использовании сканирования для мониторинга памятников.

Материалы и методы

В экспериментах использовался лазерный 3D-сканер Shining 3D Einscan HX, обеспечивающий точность измерений до 0,04 мм и оснащённый проекционной системой из четырнадцати перекрёстных лазерных линий. Принцип работы данного прибора основан на методе лазерной триангуляции. Сканеры такого типа обеспечивают высокую точность измерений и не требуют предварительной подготовки поверхности, что особенно важно при работе с произведениями искусства. Объектом исследования была деревянная скульптура Луиса Гомеса «Естественное открытие» из коллекции Государственного Русского музея. На поверхности этой скульптуры имеется глубокая протяжённая трещина, динамика изменения которой представляет интерес с точки зрения мониторинга состояния сохранности этого памятника. В ходе проведенных исследований было проведено двукратное сканирование – сначала в исходном состоянии скульптуры, а затем с интервалом в один год. Это вполне достаточный интервал времени, в течение которого могли быть выявлены изменения глубины и ширины трещины, а также возможное появление новых дефектов. Для проведения сравнительного анализа двух моделей было

выполнено их совмещение с использованием ПО Geomagic Design X, что позволило визуализировать и оценить величину возникших изменений поверхности памятника.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований были сформированы градиентные карты отклонений формы поверхности скульптуры относительно ее исходного состояния и проведены количественные оценки изменения геометрии объекта. Было выявлено, что для большей части поверхности величина отклонений не превышают 0,5 мм, тогда как локальные расхождения могут составлять до 0,8 мм (см. Рис.1). Кроме того, зафиксировано увеличение ширины трещины до 0,4 мм (локально до 1 мм) и глубины до 1–2 мм (см. Рис.2). При этом пространственный профиль трещины скульптуры сохраняет исходную конфигурацию, что свидетельствует о локальном характере деформационных процессов.

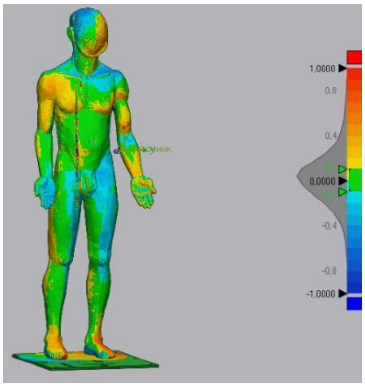


Рис. 1. Цветовая градиентная карта отклонений поверхности скульптуры по всей ее поверхности.

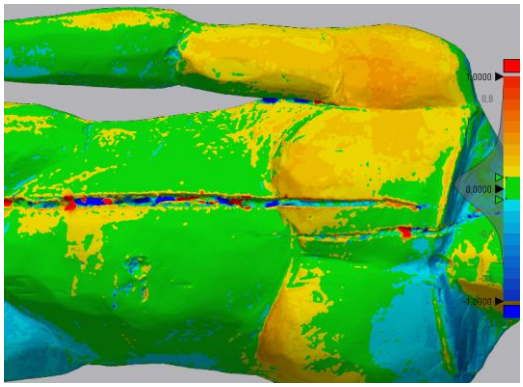


Рис. 2. Цветовая градиентная карта отклонений, наблюдаемых в области трещины.

Заключение

Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность применения лазерного 3D-сканирования для мониторинга состояния скульптурных памятников из дерева, в том числе, регистрации и оценки величины микродеформаций. Для данной конкретной скульптуры выявленные изменения формы поверхности могут быть обусловлены влиянием остаточных напряжений в древесине, вызванных структурной неоднородностью этого материала, а также изменениями температурно-влажностного режима в музее в течение контрольного интервала времени.

Список литературы

[1] A. Bentkowska-Kafel, L. Macdonald, R. Selma et.al. *Digital Techniques for Documenting and Preserving Cultural Heritage* (Arc Humanities Press, Kalamazoo and Bradford, 2017). Doi: 10.2307/j.ctt1xp3w16.

[2] Фрейдин А. Я., Парфенов В.А. Трехмерное лазерное сканирование и его применение для съемки архитектурных сооружений и реставрации памятников // Оптический журнал. - 2007 - №8, С. 44-49.

Исследование влияния обработки фокусированным ионным пучком на темновые характеристики волноводных фотодетекторов.

А.И. Каримова [1]✉, Н.А. Фоминых [1], И.С. Махов [1], И.С. Федосов [1], М.С. Солодовник [2], Н.Е. Солодовник [2], Н.А. Шандыба [2], Н.В. Крыжановская [1], А.Е. Жуков [1]

[1] НИУ ВШЭ, Санкт-Петербург, Россия;

[2] Южный федеральный университет, Таганрог, Россия;

✉@aikarimova@edu.hse.ru

Аннотация. Изучено влияние обработки фокусированным ионным пучком (ФИП) на темновые токи волноводных фотодетекторов на основе плотных массивов InGaAs/GaAs квантовых точек. Установлено, что ФИП-травление приводит к значительному увеличению плотности темнового тока, а также снижению энергии активации ФД по сравнению с ФД, полученными с помощью скалывания.

Ключевые слова: волноводные фотодетекторы, квантовые точки, темновой ток.

Введение

Для формирования оптоэлектронных схем помимо источников излучения требуются также его приемники. Для этого могут быть использованы волноводные фотодетекторы (ФД), в которых может осуществляться латеральный ввод излучения, а путь поглощения света представляет собой всю длину полоска [1]. В качестве светопоглощающей области в таких ФД интересно использование плотных массивов InGaAs/GaAs квантовых точек (КТ), рабочая длина волны которых может перекрывать спектральный 0.95-1.15 мкм [2]. Также для таких ФД ранее были продемонстрированы низкие значения плотности темнового тока (1.1 мкА/см^2 для напряжения обратного смещения -1 В) [1]. Важным аспектом выступает влияние повышения температуры на темновые токи таких ФД, так как в случае их интеграции в оптоэлектронные схемы рабочая температура может существенно увеличиваться от тепловыделения соседствующих элементов схемы. Кроме того, необходим прецизионный способ формирования волноводных ФД малого размера (порядка десятков-сотен мкм), который может быть осуществлен травлением структур фокусированнным ионным пучком (ФИП). Данная методика уже была успешно использована для создания коротких (длиной до 50 мкм) полосковых лазеров без ухудшения их рабочих характеристик [3]. Однако имплантация ионов при ФИП-травлении может отрицательно влиять на величину темнового тока, что остаётся слабо изученным к настоящему времени. В данной работе в широком интервале температур исследованы темновые характеристики волноводных ФД со светопоглощающей областью на основе плотных массивов InGaAs/GaAs КТ, полученных с помощью ФИП-травления и с помощью скалывания граней кристалла по плоскостям спайности.

Материалы и методы

Гетероструктуры были получены методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений на подложках n^+-GaAs, разориентированных на 6° относительно плоскости (100). Активная область представляла собой 6 слоев квантовых точек $In_{0.4}Ga_{0.6}As$/GaAs. Полосковые мезы шириной 50 мкм и высотой 5.5 мкм формировались с помощью фотолитографии и плазмохимического травления. *P*-контакты сверху мез формировались с помощью металлизация AgMn/Ni/Au. GaAs подложка была утонена и на ее тыльную сторону был нанесен AuGe/Ni/Au *n*-контакт. ФД из полосковых мез формировались с помощью скалывания граней кристалла (400 мкм × 50 мкм) и ФИП-травления (75 мкм × 50 мкм). Измерения темнового тока ФД проводились с помощью источника-измерителя Keithley 2401.

Результаты и обсуждение

Обратные ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФД, полученных с помощью скалывания и ФИП-травления, при комнатной температуре показаны на Рис. 1. Максимальное напряжение обратного смещения во время исследования достигало -10 В,

при этом электрического пробоя у исследованных ФД ещё не наблюдалось. Несмотря на значительную разницу в размере ФД, 400 мкм для ФД, полученного скалыванием, и 75 мкм для ФД, полученного с помощью ФИП-травления, темновой ток последнего был на 3-4 порядка больше на всем диапазоне исследованных напряжений обратного смещения. При изменении напряжения обратного смещения от 0 В до -1 В для ФД, полученных ФИП-травлением, наблюдался резкий участок роста темнового тока с 20 нА до 1 мкА, который не проявлялся для ФД, полученных скалыванием. Такое поведение ВАХ может свидетельствовать об изменении механизма возникновения темнового тока в ФД, полученном с помощью ФИП-травления, вероятно, из-за внедрения большого числа ионов Ga^+ в активные слои гетероструктуры.

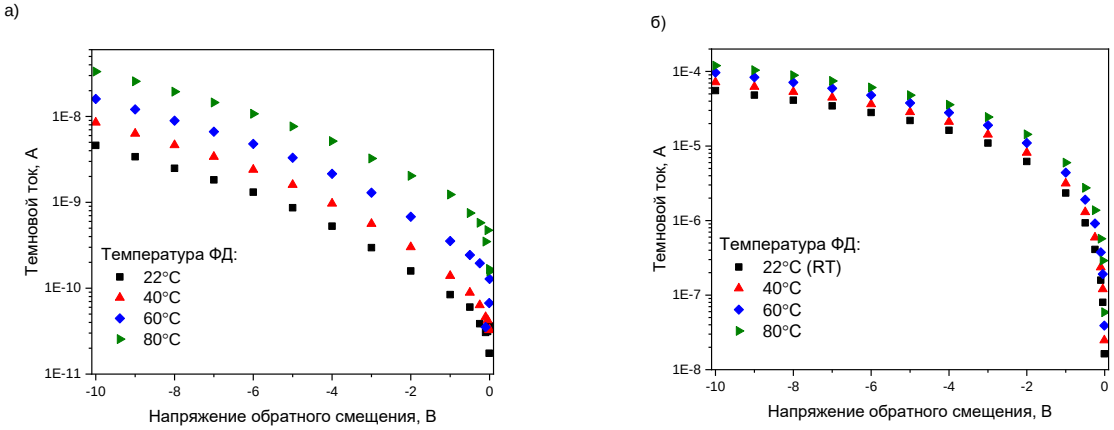


Рисунок 1 – Обратные ветви ВАХ, измеренные при различных температурах для ФД, полученного скалыванием граней кристалла (400 мкм × 50 мкм) (а) и полученного ФИП-травлением (б) (75 мкм × 50 мкм).

Затем были выполнены исследования обратной ветви ВАХ при различных температурах для каждого из ФД (Рис. 1). На основании изменений темнового тока при нулевом обратном смещении от температуры были построены кривые Аррениуса и с их помощью определена энергия активации 0.31 эВ для ФД, полученного скалыванием, и 0.1 эВ для ФД, полученного ФИП-травлением. Такое различие в энергии активации подтверждает наличие иного механизма образования темнового тока при использовании обработки с помощью ФИП.

Заключение

Исследованы волноводные ФД со светопоглощающей областью на основе InGaAs/GaAs квантовых точек, полученные скалыванием и ФИП-травлением. Продемонстрировано увеличение темнового тока на 3-4 порядка и появление другого механизма его возникновения при использовании ФИП-травления. Для ФД, полученного скалыванием, величина темнового тока не превышала 10^{-7} А при величине обратного смещения до -10 В даже при температуре 80°C.

Благодарность

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ. Обработка фокусированным ионным пучком выполнена за счет средств проекта № FENW-2025-0004 в Южном федеральном университете.

Список литературы

[1] Крыжановская Н. В. и др. Физика и техника полупроводников. – 2023. – Т. 57. – №. 3. – С. 202-206.

[2] X.M. Sun et al. Electron. Lett., 45(6), 329 (2009)

[3] Makhov I. et al. Optics Letters. – 2025. – Т. 50. – №. 2. – С. 387-390.

Metamorphic InGaAs photodiode with low dark current on a GaAs substrate for the 1.17 - 1.29 μm range

I.V. Samartsev ✉, B.N. Zvonkov

Research Institute of Physics and Technology, Nizhny Novgorod State University, Nizhniy Novgorod 603022, Russia

✉ samartsev@nifti.unn.ru

Abstract. This paper has reviewed the characteristics of photosensitive structures based on a digital-graded metamorphic buffer layer (MBL). A comparison of the characteristics of structures containing 16 and 23 pairs of alternating materials has been carried out.

It has been demonstrated that the structure containing 23 periods of InGaAs/GaAs in the MBL exhibits higher crystalline quality than the structure with a smaller number of layers. It has been established that the InGaAs/GaAs material interfaces in the digital-graded MBL have a blocking effect on threading dislocations. Consequently, increasing the number of InGaAs/GaAs periods in the MBL region will lead to more efficient stress relaxation and, thus, to lower residual strain and better quality of the functional material.

Keywords: MOCVD, nanomaterials, A^3B^5 semiconductors, infrared photodiodes.

Introduction

Photodiodes operating in the short infrared range (up to 3 μm) grown on GaAs substrates are interest as a replacement for devices currently used for this range grown on InP substrates. One of the directions of creating such photodiodes is the use of metamorphic buffers layers (MBL) [1, 2]. The practical implementation of metamorphic heterostructures on GaAs, the characteristics which would not be low to those of heterostructures on InP, is hindered by incomplete suppression of the threading of dislocations into active layers of the structure and the appearance of surface micro relief. Thus, it is current task to search for and optimize the MBL design in order to improve the crystal quality of the obtained heterostructures. In this paper, we present the results of the study of photosensitive heterostructures obtained by MOCVD on GaAs (001) substrates using digital-graded MBL.

Experimental samples

A modified method for forming a discrete metamorphic InGaAs layer on a GaAs substrate using metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) was examined.

The process of forming a discrete metamorphic buffer involved varying the thicknesses of alternating GaAs and InGaAs materials in opposite directions as the buffer layer grew, while the composition of the layers remained unchanged. At the initial growth stage, the thicknesses of the GaAs and $In_{0,3}Ga_{0,7}As$ layers were 62 nm and 3 nm, respectively. As the buffer layer grew, the GaAs thickness decreased and the $In_{0,3}Ga_{0,7}As$ thickness increased. At the final growth stage of the metamorphic buffer structure (MBL), the GaAs layer thickness was 3 nm, while the $In_{0,3}Ga_{0,7}As$ layer thickness was 62 nm.

Thus, the discrete MBL consists of multiple $GaAs/In_xGa_{1-x}As$ periods of varying thicknesses, where dislocation propagation is blocked at the heterointerfaces.

To investigate the effect of the number of periods on the structural and device characteristics of the resulting heterostructures, heterostructures and photodiodes fabricated on their basis were studied. These contained 16 and 23 periods in the discrete MBL (structures A1 and A2, respectively).

On the surface of the metamorphic layer, *p*-*i*-*n* structures were formed, consisting of the following layers: *n*-$In_{0,3}Ga_{0,7}As$: Si ($n \sim 10^{18}$ cm^{-3}), *i*-$In_{0,3}Ga_{0,7}As$, *p*-$In_{0,3}Ga_{0,7}As$: Zn ($p \sim 7 \times 10^{17}$ cm^{-3}). The design of structures is shown in Figure 1.

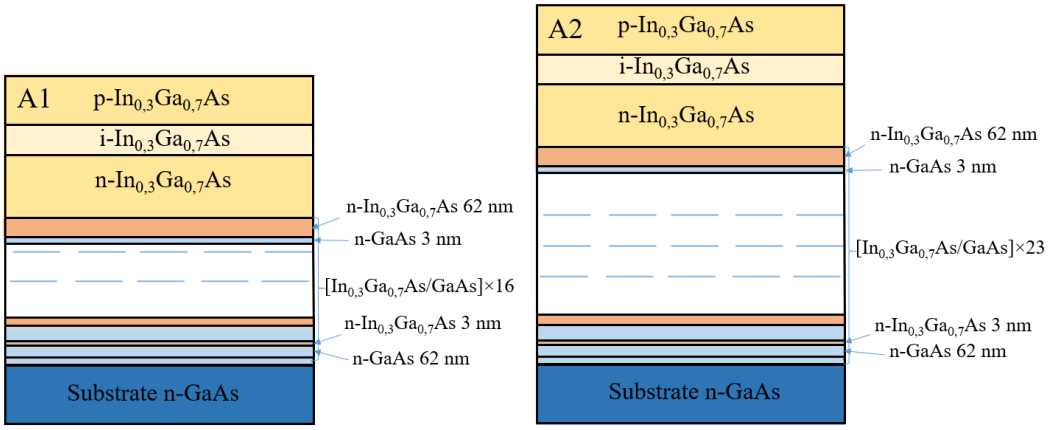


Figure 1. The design of the photosensitive structure.

Results and Discussion

Samples of photodiodes with a diameter of 560 μm and a mesa structure depth of 1.5 μm were fabricated to study the electrophysical characteristics of the obtained structures. I–V characteristic studies at room temperature showed that the photodiode samples have a dark current density of 4×10^{-4} A/cm^2 and 8×10^{-5} A/cm^2 at a voltage of −5 V for structures of types A1 and A2, respectively.

Fig. 2 shows a typical spectral dependence of the photocurrent for photodiodes based on structure A2 measured at room temperature.

The photodiodes had a photosensitivity range of 1,17–1,29 μm at the 10 % level of the maximum, which occurs at a wavelength of 1,24 μm. As can be seen from the figure, the photodiode exhibits no response at excitation wavelengths below 1,15 μm, which is likely due to the small contribution of absorption at these wavelengths to the photocurrent. It is probable that the layers of the structure absorbing in this range lie outside the space-charge region. Fig. 3shows the I-V characteristics typical for the studied photodiodes, measured at various temperatures in the range from 9 K to 290 K.

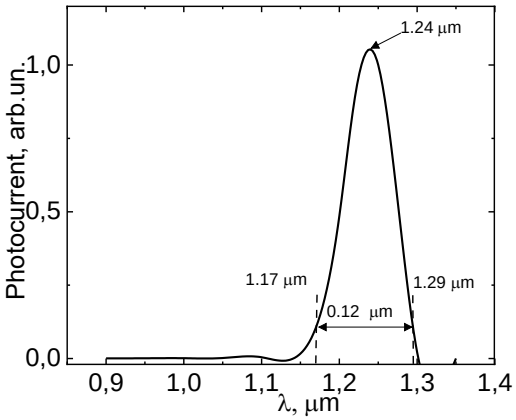


Figure 2.

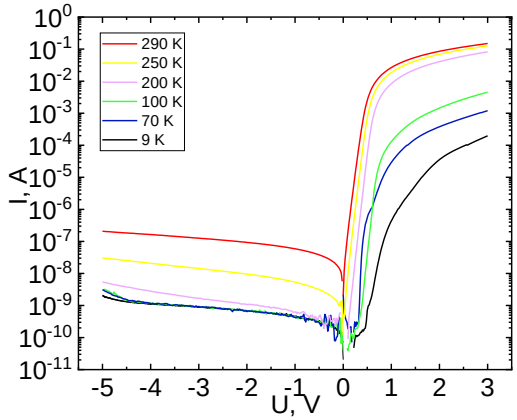


Figure 3.

Conclusion

The application of the new MBL design has enabled the fabrication of photodiodes for the 1,17–1,29 μm wavelength range with a relatively low dark current. For photodiodes with a mesa structure diameter of 560 μm, the dark current at room temperature and a reverse bias of −5 V was 2×10^{-7} A, which corresponds to a current density of 8×10^{-5} A/cm^2.

REFERENCES

1. **K. Swaminathan, L.-M. Yang, T. J. Grassman, et. al.,** Opt. Express. 19 (2011) 7280-7288.

2. **P. Jurczak, K.A. Sablon, M. Gutiérrez, et. al.**, Infrared Physics & Technology, 81 (2017) 320-324.

Исследование связанных микродисковых лазеров с квантовыми точками InGaAs/GaAs.

Е.А. Беляева[1]✉, Н.А. Фоминых[1], И.С. Махов[1], А.А. Пивоварова[1,2], Н.Д. Ильинская[2], Н.В. Крыжановская[1], А.Е. Жуков[1]

[1] НИУ ВШЭ, Санкт-Петербург, Россия;

[2] ФТИ им. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия;

✉eabeliaeva@edu.hse.ru

Аннотация: Исследованы спектральные и пороговые характеристики связанных микродисковых лазеров с активной областью на основе плотных массивов квантовых точек InGaAs/GaAs при отсутствии накачки одного из лазеров. Продемонстрирована возможность достижения одномодового режима лазерной генерации в микродисках диаметром 40 мкм в широком диапазоне токов накачки за счет связи с сопряженным микродисковым резонатором того же диаметра.

Ключевые слова: Микродисковые лазеры, квантовые точки, моды шепчущей галереи, связанные резонаторы

Введение

В настоящее время из-за необходимости обработки и передачи большого количества информации особый интерес вызывает использование оптического способа передачи данных. В частности, повышенное внимание уделяется разработке фотонных интегральных схем (ФИС) для передачи, хранения и обработки данных, а также для оптических вычислений [1]. Такие устройства потенциально могут обеспечить очень высокую эффективность использования занимаемой площади, энергоэффективность и скорость переключения (вплоть до 10^{15} Гц) [2]. Перспективными источниками излучения для ФИС являются лазеры на основе микродисковых (МД) резонаторов, поддерживающих распространение мод шепчущей галереи. Такие МД лазеры обладают узкими линиями лазерной генерации, высокой добротностью, а их излучение распространяется в плоскости подложки, что важно для реализации оптической связи на плате [3]. Важной задачей является возможность реализации управления характеристиками микролазеров, в частности, реализация одномодовой генерации. Одним из подходов к решению данной задачи является использование связанных МД лазеров [4]. В данной работе исследованы спектральные и пороговые характеристики оптически связанных МД лазеров при отсутствии накачки одного из лазеров.

Материалы и методы

Синтез гетероструктур выполнялся методом металлоорганической газофазной эпитаксии на подложках n^+-GaAs, разориентированных на 6° относительно плоскости (100). Активная область содержала 6 слоев плотных массивов квантовых точек InGaAs/GaAs. Одиночные МД мезы и пары МД мез, боковые грани которых касались друг друга, диаметром 40 мкм были сформированы с помощью электронной литографии и плазмохимического травления. Для формирования *p*-контактов сверху мез использовалась металлизация AgMn/Ni/Au. GaAs подложка была утонена и на ее тыльную сторону был нанесен AuGe/Ni/Au *n*-контакт. Выколотые микрочипы с полученными МД лазерами монтировались p-контактом вверх на медный теплоотвод. Контакт к верхним электродам осуществлялся вольфрамовыми микрозондами диаметром 15 мкм. Источником тока для накачки МД лазеров служил источник-измеритель Keithley 2400 Series SourceMeter. Сбор излучения микролазеров осуществлялся микрообъективом Mitutoyo M Plan Apo NIR 20x, после которого через оптоволокно излучение поступало на оптический анализатор спектра Yokogawa AQ 6370C.

Результаты и обсуждение

Были выполнены исследования спектральных и пороговых характеристик одиночного МД лазера, не связанного с другим. Начало лазерной генерации происходило на длине волны 1064 нм, величина порогового тока (I_{th}) равнялась 12 мА, что соответствует плотности порогового тока 0.95 кА/см^2. При токе накачки 14 мА спектр генерации имел многомодовый характер с участием 3 резонансов (рис. 1(а)). В случае микролазера, связанного с ненакачанным МД резонатором того же диаметра, наблюдались увеличение порогового тока до 14 мА (плотности порогового тока до 1.11 кА/см^2) и коротковолновый сдвиг длины волны лазерной линии на пороге генерации до 1060 нм (рис. 1(б)). Такое изменение спектральных и пороговых характеристик свидетельствует о росте оптических потерь в МД лазере, вызванном наличием оптической связи с ненакачанным микролазером. В результате оптической связи возможна реализация одномодовой генерации с коэффициентом подавления боковых мод 19 дБ в 40 мкм МД лазере вплоть до тока накачки, соответствующего $2\times I_{th}$.

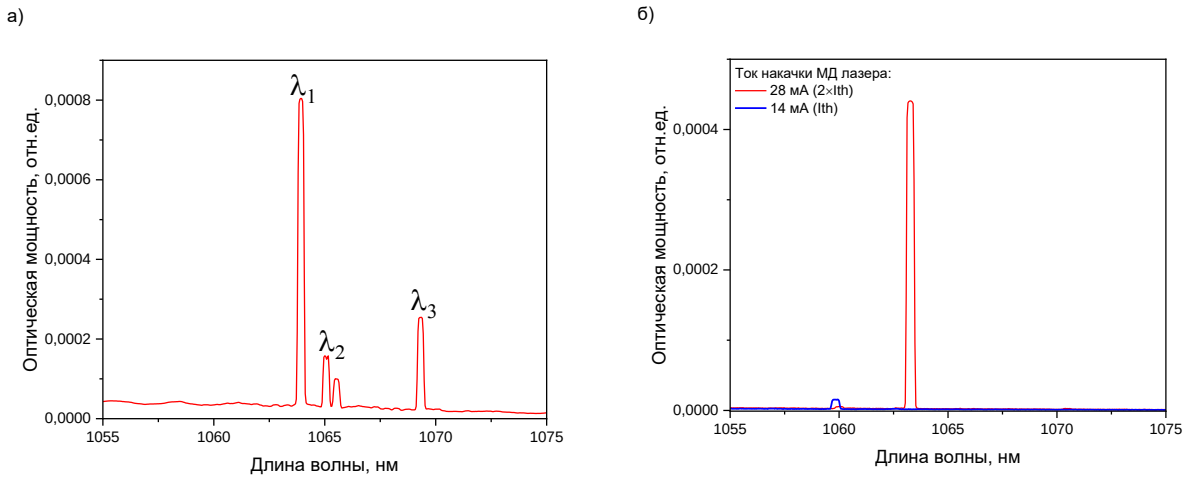


Рис. 1. Спектры лазерной генерации МД лазеров диаметром 40 мкм для одиночного микролазера при токе накачки 14 мА (а) и микролазера, связанного с ненакачанным МД лазером, при токе накачки равном I_{th} и $2\times I_{th}$ (б).

Заключение

Исследованы спектральные и пороговые характеристики МД лазеров с активной областью на основе плотных массивов квантовых точек InGaAs/GaAs, оптически связанных с пассивными резонаторами. Продемонстрирована возможность достижения одномодового режима лазерной генерации в 40 мкм микродисковых лазерах в широком диапазоне токов накачки при нагрузке их ненакачанным МД резонатором того же диаметра.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-72-20048, https://rscf.ru/project/25-72-20048/.

Список литературы

[1] P. Jiang, K.C. Balram. Optics Express **28** (8), 12262 (2020).

[2] M. Ossiander, K. Golyari, K. Scharl et al. Nature Communications **13**, 1620 (2022).

[3] J. Zhang, A.G. Shankar, X. Wang. Photonics **11** (3), 212 (2024).

[4] Z. Guo et al. Nanomaterials **9** (10), 1439 (2019).

Зависимость потоков излучения видимого и ближнего инфракрасного участков спектра светодиодных матриц от тока и температуры

И. В. Фролов [1,2], С. А. Зайцев [3], В. А. Сергеев [1], О. А. Радаев [1]✉

[1] УФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Ульяновск, Россия;

[2] Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия;

[3] Ульяновское конструкторское бюро приборостроения, Ульяновск, Россия

✉oleg.radaev.91@mail.ru

Аннотация. Установлено, что коэффициент К отношения потоков излучения светодиодной матрицы (СМ) в видимом диапазоне (380-760 нм) и ближнем инфракрасном (БИК, 760-900 нм) диапазонах спектра слабо зависит от тока при фиксированной температуре окружающей среды и практически линейно зависит от температуры при заданном токе. Полученные зависимости объясняются конкурирующими механизмами: температурным спадом интенсивности излучения кристаллов СМ в оптическом диапазоне и слабым ростом интенсивности излучения в БИК диапазоне. Коэффициент К может быть использован в качестве температурочувствительного параметра для бесконтактного контроля температуры кристаллов СМ при испытаниях и эксплуатации.

Ключевые слова: светодиодные матрицы, спектр излучения.

Введение

К качеству и надежности СМ, применяемых в бортовом светосигнальном и осветительном оборудовании летательных аппаратов, предъявляют жесткие требования. Качество СМ контролируют по пороговому току, по ватт-амперным и вольт-амперным характеристикам и др. [1, 2]. Одним из ключевых факторов, определяющих качество и надежность СМ, является температура, и задача определения параметров СМ, по которым можно оценивать температуру СМ в процессе испытаний и эксплуатации, является актуальной. В работе [3] выявлена положительная корреляция между тепловым сопротивлением СМ и отношением потока излучения СМ в БИК области спектра к потоку излучения в полном спектре. Цель работы – детальное исследование зависимостей потоков излучения СМ в видимом и БИК диапазонах спектра и их отношения от тока и температуры.

Материалы и методы

Исследованы СМ типа GW P9LR31.EM - DURIS S 8, состоящие из восьми последовательно соединенных светодиодов. Напряжения питания СМ составляет 24 В, максимальный ток 200 мА. Первоначально спектрорадиометром OL770 и фотометрическим шаром были измерены поток и спектр излучения при температуре 22 ºС и токе 200 мА. Температурные зависимости характеристик СМ проводились в термостате с выдержкой каждого значения температуры в течение 10 минут до наступления теплового равновесия. Температуры корпуса СМ измерялась термопарой, а световые характеристики СМ определялись по излучению, отраженному от пластины белого цвета с коэффициентом отражения 98% во всем диапазоне спектра. При этом отношение интенсивностей излучения СМ при 22 ºС и токе 200 мА в термостате и в фотометрическом шаре в исследуемом диапазоне длин волн 380-900 нм было постоянным.

По результатам измерения спектров излучения СМ рассчитаны потоки излучения в видимом (380-760 нм) и БИК (760-900 нм) диапазонах спектра при токе 200 мА и температурах 22, 80, 100, 120 ºС. При температуре 22 ºС световой поток СМ в видимом диапазоне принимал значения, полученные при токе 200 мА и температурах 80, 100, 120 ºС, при токах 160, 147 и 130 мА соответственно. При этих токах также были измерены спектры и рассчитаны потоки излучения СМ в видимом и БИК диапазонах спектра.

Результаты и обсуждение

С увеличением температуры интегральный световой поток видимой части спектра СМ уменьшается, а изменение потока излучения БИК диапазона имеет другую зависимость. Это связано с тем, что от температуры зависит не только часть спектра излучения, создаваемая кристаллом, но и часть спектра излучения люминофора.

Для исследованных СМ определно, что чем выше температура активной области светодиода и люминофора, тем больший вклад в общий энергетический поток излучения имеет участок спектра, лежащий в диапазоне длин волн от 760 до 900 нм. Для оценки относительного вклада различных составляющих в общий поток излучения рассчитан коэффициент, определяющий их соотношение:

$$К = \frac{\int_{380}^{760} I\,(\lambda) d\lambda}{\int_{760}^{900} I\,(\lambda) dI\,\lambda} = \frac{F_{VIS}}{F_{NIR}}. \quad (1)$$

Отношение потока излучения видимого диапазона к потоку излучения БИК диапазона при изменении тока и постоянной температуре окружающей среды остается практически постоянным (таблица 1).

Таблица 1

Зависимость отношения $K = \frac{F_{VIS}}{F_{NIR}}$ СМ при Т=22 °С от тока

Параметр	Ток, мА			
	200	160	147	130
Нормированный световой поток	1,0	0,84	0,79	0,7
К	299,8	300,2	305,5	300,5

В тоже время при увеличении температуры значение отношения радиометрического потока излучения видимого диапазона спектра к радиометрическому потоку излучения БИК диапазона заметно уменьшается (таблица 2).

Таблица 2

Зависимость отношения $К = \frac{F_{VIS}}{F_{NIR}}$ СМ при токе 200 мА от температуры

Параметр	Температура			
	22	80	100	120
Нормированный световой поток	1,0	0,84	0,79	0,7
К	300	265	261	252

Зависимость К(Т) является линейной, а относительный температурный коэффициент параметра К составляет 0,2%/К, что не уступает электрическим температурочувствительным параметрам светодиодов.

Заключение

Установлено, что отношение К потоков излучения СМ в видимом диапазоне (380-760 нм) и ближнем инфракрасном (760-900 нм) диапазонах спектра слабо зависит от тока при фиксированной температуре окружающей среды и практически линейно зависит от температуры при заданном токе. Полученные зависимости объясняются конкурирующими механизмами: температурным спадом интенсивности излучения кристаллов матрицы в оптическом диапазоне и слабым ростом интенсивности излучения в БИК диапазоне. Отношение К может быть использовано в качестве температурочувствительного параметра для бесконтактного контроля температуры кристаллов СМ при испытаниях и эксплуатации.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001).

Список литературы

[1] И. В. Фролов, В. А. Сергеев. *Диагностический контроль качества светодиодов по локальным параметрам электролюминесценции и фототока* (СОЛОН-Пресс, М., 2023) 160 с.

[2] Павлова А.А., Рамазанов А.Н., Кострин Д.К. Современные научные исследования и инновации, **12** (2016).

[3] Frolov I.V., Zaytsev S.A., Sergeev V.A., Radaev O.A., St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics, **18**(3.2), 218 (2025).

Активация вторичных эмиттеров из бериллиевой бронзы

А. А. Новиков [1✉], **Г. О. Созыкин** [1], **В. В. Давыдов** [1], **Н. А. Буренкова** [2]
[1] Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation;
[2] J.-S. Company «CRI «Electron», Saint Petersburg, Russian Federation;
✉aanovikov2004@yandex.ru

Аннотация. Разработана технология активации динодов из сплава БрБ2 для каротажных фотоэлектронных умножителей. Изучено поведение плёнки оксида бериллия при различных температурах. В частности, при 660-700°С наблюдается стабильный рост, независимо от времени образуется однородный по толщине слой. Достигнуто значение суммарного усиления потока электронов в динодной системе $4{,}5 \cdot 10^4$ при ускоряющем напряжении порядка 100 эВ.

Ключевые слова: Диноды, эмиссия, электроны, активация, оксид, эффективность.

Введение

Для каротажных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) материал динодов критически важен, поскольку прибор работает при вибрациях, ударах и повышенных температурах скважинной аппаратуры. Бериллиевая бронза обеспечивает высокую упругость и механическую прочность, поэтому геометрия динодной системы и межэлектродные зазоры сохраняются стабильными в длительной эксплуатации. Кроме того, этот сплав технологичен для точного изготовления тонких элементов и хорошо совместим с рабочими покрытиями, формирующими требуемый коэффициент вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ). В результате применения динодов из бериллиевой бронзы повышается долговременная стабильность усиления фотоэлектронного умножителя и надежность каротажных измерений.

Целью настоящей работы является разработка технологии активации динодов из сплава БрБ2 ГОСТ 1789-70 с формированием стабильной плёнки BeO, обеспечивающей требуемый КВЭЭ и устойчивость параметров ФЭУ в условиях каротажа.

Материалы и методы

Глубина проникновения первичных электронов в оксидный слой оценивалась посредством применения программы «CASINO» для установленного рабочего напряжения ФЭУ. Трассировка электронов, а также распределение потенциала по динодной системе ФЭУ были смоделированы в «COMSOL Multiphysics 6.2». Подготовка динодов к активации представляет собой механическую полировку с последующей химической полировкой в смеси кислот. Процесс активации всех образцов проводился в вакуумной системе. Вакуумная система состоит из вакуумной камеры из нержавеющей стали с внутренними нагревателями и термопарой, форвакуумного и безмасляного турбомолекулярного насоса.

Результаты и обсуждение

Выбор оптимального режима строился на анализе характеристик поверхности динодов, в частности, в измерении усиления динодной системы ФЭУ, собранной из активированных динодов. Параметры режимов активации, влияющие на морфологию, фазовый состав и дефекты кристаллической структуры оксидного слоя бериллия приведены в таблице 1. Зависимость температуры активации динодов от времени для каждого из них представлена на рисунке 1.

Таблица 1

Ключевые параметры процесса активации, влияющие на качество оксидного слоя бериллия

Контролируемые параметры	Диапазон значений
Парциальное давление кислорода, Па	0.01-1.00
Давление в камере между операциями, Па	$1 \cdot 10^{-2}$-$1 \cdot 10^{-4}$

Температура, °C	600-840
Время активации, мин	5-60
Скорость охлаждения, °C/мин	1-10
Время выдержки в вакууме при T=600°C, мин	0-120

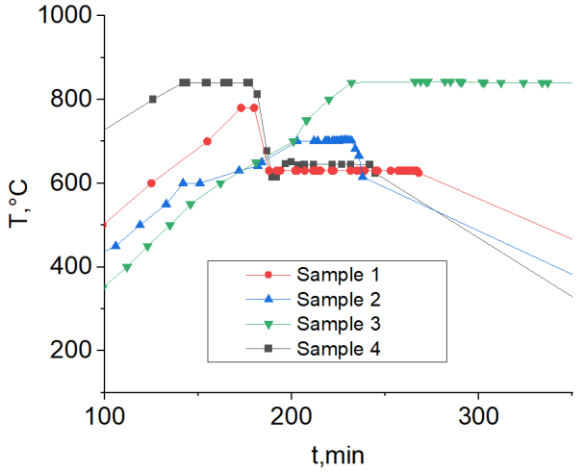


Рис. 1. Температура активации динодов. Парциальное давление кислорода 0,65 Па.

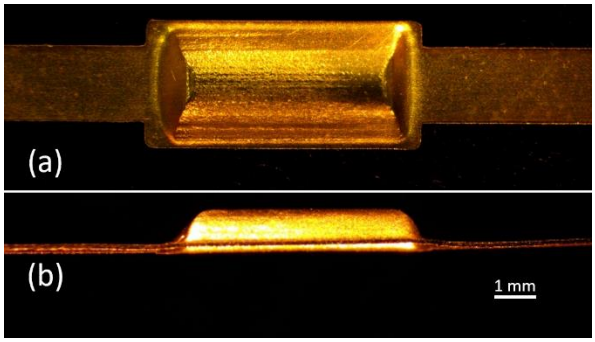


Рис. 2. Внешний вид динода: сверху (a), сбоку (b). Масштабная линейка на изображениях составляет 1 мм.

Выбранная с учётом габаритных размеров ФЭУ форма динодов – стандартная, корытообразная, с высокой эффективностью каскада – была реализована в выбранном сплаве формовкой пластичного материала, внешний вид образцов представлен на рисунке 2.

Усиление потока электронов в разрабатываемом ФЭУ составило $4{,}5 \cdot 10^4$ при рабочем напряжении питания 1500 В. Параметры оптимального режима активации: T=670°C, парциальное давление кислорода 0,65 Па, время активации – 15 мин.

При данной температуре достигается однородность покрытия по толщине. По мере роста оксидного слоя (при окислении до 600°C) скорость окисления снижается при постоянной температуре пропорционально квадратному корню из толщины оксида [1]. При превышении T=670°C нарушается топография слоя, предполагается, что окисление уже не ограничивается диффузией Be к поверхности через закрытый оксидный слой, а происходит непосредственно на границе раздела BeO–Be [2].

В исследовании используется распространенный на рынке сплав бериллиевой бронзы. Отличие его от статейных аналогов процентным соотношением бериллия и меди, а также наличием примесей, процентное соотношение которых чаще всего составляет не более 1% (Ni, Fe, Si, Al, Pb), обусловливает расхождение с параметрами активации динодов, выполненных из прецизионных лабораторных сплавов Cu-Be.

Заключение

В рамках исследования была изучена, составлена и реализована методика активации динодов, подобраны параметры режимов. Выбранный оптимальным режим позволяет получить качественный слой оксида бериллия, с возможностью получать необходимую толщину в зависимости от режима работы ФЭУ.

Список литературы

[1] Давыдов Д. А., Холопова О. В., Колбасов Б. Н. Образование и деградация оксидных плёнок на бериллии //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2010. – №2. – С.39-49.

[2] Roth J. et al. Oxidation of beryllium and exposure of beryllium oxide to deuterium plasmas in PICES B //Journal of nuclear materials. – 2013. – Т. 438. – С. S1044-S1047.

3D-оцифровка восковых печатей с использованием лазерного 3D-сканирования

Н. В. Башнин [1]✉, Д.С. Кулешов [2], М. А. Новикова[1], В. А. Парфенов [1,2]

[1] Санкт-Петербургский институт истории Российской Академии наук, Санкт-Петербург, Россия;
[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия
✉nvbashnin@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты экспериментов по оцифровке воскомастичных печатей русских епископов XVII – начала XVIII в. из Архива СПбИИ РАН с использованием лазерного 3D-сканирования. Данная работа является первым в отечественной практике опытом применения технологии лазерного сканирования для создания компьютерных 3D-моделей технологических элементов рукописных памятников. Полученные 3D-модели позволили с высокой точностью зафиксировать рельеф оттисков матриц печатей, что позволяет сделать вывод о перспективности применения предлагаемого подхода для документирования вислых печатей.

Ключевые слова: лазерное 3D-сканирование, воскомастичные печати XVII в., рукописные памятники, 3D-оцифровка, 3D моделирование, культурное наследие.

Введение

В последние годы технология лазерного 3D-сканирования находит все более широкое применение в области сохранения культурного наследия [1]. Результатом сканирования исторических объектов является создание их компьютерных 3D-моделей, которые позволяют зафиксировать их геометрическую форму и содержат высокоточные данные об их размерах. Благодаря этому, на сегодняшний день 3D-сканирование является самым точным и наиболее информативным способом документирования памятников. Кроме того, практическая ценность 3D-моделей заключается в возможности создания физических копий, а также их использования для проведения работ по реставрации и реконструкции поврежденных объектов при помощи методов компьютерного моделирования [2]. В настоящее время 3D-сканирование наиболее широко используется для оцифровки исторических зданий и скульптурных памятников. В данной работе проводилось сканирование средневековых российских печатей из воска, что по сведениям авторов является первым опытом использования лазерного сканирования для 3D-оцифровки технологических элементов рукописных памятников в нашей стране.

.

Материалы и методы

Объектами исследования служили три воскомастичных печати (оттиски на восковой капле матрицы) вологодских архиепископов с документов 1625 г., 1665 г. и 1712 г. (Рис. 1).

В настоящее время естественно-научные методы исследования все более активно внедряются в область исследования рукописных памятников. Это связано с тем, что рукописи являются не только носителем текстов, содержание которых важно с исторической точки зрения, но также и памятниками материальной культуры. Это делает их уникальным объектом для научных исследований, которые могут включать в себя как изучение комплекса технологий, соответствующих определенной исторической эпохе, так и их технологических элементов. Обычно фокус внимания специалистов направлен на исследование материальной основы документов (бумаги, пергамена, пергамента), чернил, пигментов красок и др. При этом печати являются малоизученными объектами. Что касается выбора конкретно тех печатей, сканирование которых проводилось в данной работе, то их выбор был обусловлен следующими обстоятельствами: 1) хорошая сохранность рельефа печатей; 2) длительный хронологический разрыв, что позволяет зафиксировать возможные изменения в особенностях изображений; 3) печати были созданы до и после церковной реформы Никона, что также могло стать причиной трансформации изображений.

Рис. 1. Фотографическое изображение печатей: слева – печать 1625 г., в центре – 1665 г., справа – 1712 г. (фото из Архива СПбИИ РАН. Кол. 12. Оп. 1. Ед. хр. 20, 31, 33)

С практической точки зрения постановка задачи исследований была связана с проверкой возможности 3D-оцифровки печатей для высокоточной визуализации тисненного изображения. Однако эта работа представляла также значительный научный интерес, поскольку предстояло выполнить сканирование объектов очень маленького размера с гладкой блестящей поверхностью, что всегда вызывает большие трудности в процессе самого сканирования и камеральной обработки полученных сканов.

Для оцифровки печатей использовался лазерный 3D-сканер ScanTech KSAN Magic II, обеспечивающий точность измерений до 0,03 мм. Полученные в процессе сканирования сканы подвергались пост-обработке, включавшей операции «очистки», сшивки и пространственного выравнивания.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментов были получены компьютерные 3D-модели всех печатей (изображение одной из них приведено на Рис. 2).

Рис. 2. Изображение 3D-печатей 1665 г. (слева) и 1712 г. (справа)

Полученные результаты показали высокую эффективность применения лазерного 3D-сканирования для оцифровки восковых печатей. Их 3D-визуализация позволяет легко читать тисненный текст и отчетливо видеть изображения. Кроме того, были определены точные значения размеров печатей.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ № 25-28-03213.

Список литературы

[1]. A. Bentkowska-Kafel, L. Macdonald, R. Selma et.al. *Digital Techniques for Documenting and Preserving Cultural Heritage* (Arc Humanities Press, Kalamazoo and Bradford, 2017). Doi: 10.2307/j.ctt1xp3w16.

[2]. V. Parfenov, S. Igoshin, D. Masaylo, A. Orlov, D. Kuliashou. Use of 3D Laser Scanning and Additive Technologies for Reconstruction of Damaged and Destroyed Cultural Heritage Objects. Quantum Beam Sci. 6, 11 (2022**)**. https://doi.org/10.3390/qubs6010011

Ионная миграция в перовските $MAPbBr_2I$: эффекты Хоука и Шоттки

В. С. Иванов[1]✉, **Д. С. Гец**[1]

[1] Физико-технический мегафакультет, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

✉vladimir.ivanov@metalab.ifmo.ru

Аннотация. Ионная миграция в перовскитах является ключевым механизмом деградации материала под действием внешних возбуждений. В составах со смешанным анионом она приводит к объемному эффекту Хоука и интерфейсному эффекту Шоттки. Каждый из них уменьшает эффективность фотоотклика перовскита. Данная работа демонстрирует разделение вкладов этих двух эффектов в деградацию перовскитных солнечных элементов на основе широкозонного перовскита со смешанным анионным составом $MAPbBr_2I$. Измерения тока короткого замыкания и импедансная спектроскопия показали, что эффект Хоука приводит к медленному уменьшению эффективности устройств вследствие формирования дефектов, а эффект Шоттки способствует резкому снижению эффективности из-за нарушения процесса разделения носителей заряда.

Ключевые слова: перовскиты, перовскитные солнечные элементы, ионная миграция, эффект Хоука, эффект Шоттки.

Введение

Перовскитные солнечные элементы демонстрируют высокие значения эффективности преобразования энергии, однако существование теоретического предела Шокли-Квиссера приводит к необходимости создания тандемных солнечных элементов – в которых две и более ячейки связаны друг с другом.

Создание полностью перовскитных тандемных солнечных элементов требует синтеза материала со значением ширины запрещенной зоны не менее 2 эВ для применения в качестве верхней ячейки [1]. Такому условию удовлетворяет состав $MAPbBr_2I$, но он является наиболее подверженным галогенидной сегрегации (эффект Хоука), индуцированной ионной миграцией [2]. Она проявляется в формировании локальных областей с одним типом аниона в объеме исходного материала под засветкой. На их границах возникают дефекты, приводящие к деградации материала. Миграция ионов также приводит к их накоплению. Накопленный заряд изменяет зонную структуру, нарушая свойство разделения носителей заряда – эффект Шоттки.

В данной работе демонстрируется разделение вкладов этих двух эффектов в фотодеградацию перовскитного солнечного элемента на основе $MAPbBr_2I$. Приводится простой способ нейтрализовать эффект Шоттки путем увеличения толщины транспортного материала PEDOT:PSS. Сохранение свойства разделения носителей заряда повышает время стабильного фотоотклика устройств в 200 раз с 15 секунд до 1 часа.

Материалы и методы

Синтез перовскита $MAPbBr_2I$ в данной работе проходил в инертной атмосфере перчаточных боксов. Соли-прекурсоры MAI и $PbBr_2$ с концентрацией 1,2 моль/л растворялись в смеси ДМФ и ДМСО. Архитектура перовскитных солнечных элементов была следующая: ITO/PEDOT:PSS/перовскит/C_{60}/BCP/Ag. В ходе работы менялась толщина PEDOT:PSS с 9 нм до 55 нм.

Измерения вольтамперных характеристик проводились с помощью источника-измерителя Keithley 2400. Для симуляции солнечного излучения использовался симулятор HAL-320. Измерения импедансов и емкостей было выполнено с помощью прецизионного измерителя LCR E4980A.

Результаты и обсуждение

В работе было проведено исследование влияния толщины дырочного транспортного слоя (ДТС) на стабильность фотоотклика устройств. Исследуемые толщины PEDOT:PSS: 9 нм, 13 нм, 20 нм, 43 нм и 55 нм. Во время продолжительной засветки симулятором солнечного излучения были измерены значения плотности тока к. з. На рисунке 1 а)

представлены результаты этих измерений. Показано, что время, за которое значение тока падает на 20% от своего начального (время T_{80}), растет с увеличением толщины. Для толстых слоев PEDOT:PSS отсутствует область резкого снижения тока в начале засветки. Накопление ионов на границах происходит значительно быстрее формирования дефектов, и резкое падение тока на первых секундах эксперимента является проявлением эффекта Шоттки. Увеличение толщины ДТС приводит к его подавлению: разделение носителей заряда не ухудшается, не происходит эффективного утонения транспортного слоя.

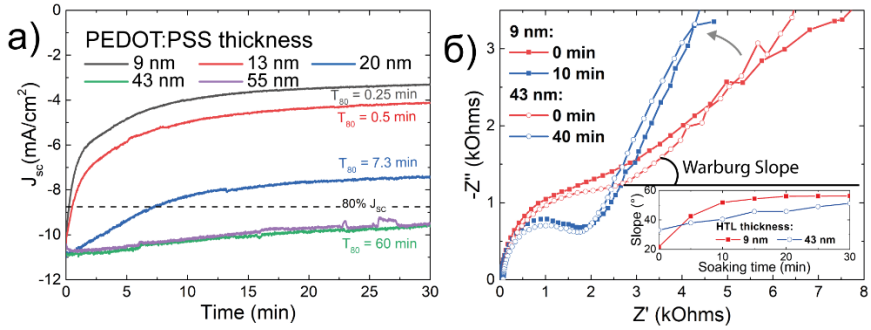


Рис. 1. а) Изменение тока КЗ под засветкой. б) Диаграммы Найквиста устройств с ДТС 9 нм и 43 нм во время засветки, на вставке изменение угла Варбурга во время засветки.

Для определения влияния ионной миграции на изменение фотостабильности в устройствах был применен метод импедансной спектроскопии. Устройства засвечивались в течение длительного времени, и каждые 5 минут измерялись импедансы. Полученные диаграммы Найквиста представлены на рисунке 1 б). Устройство с тонким PEDOT:PSS продемонстрировало быстрый рост угла наклона Варбурга (низкочастотная область) – за 10 минут кривая вышла на насыщение (вставка на рисунке 1 б)). Фотостабильная ячейка с ДТС толщиной 43 нм в течение 40 минут не продемонстрировала выход на насыщение. Угол Варбурга пропорционален низкочастотной емкости в устройстве и показывает степень накопления ионов. Его рост указывает на активную миграцию, накопление и последующий эффект Шоттки. Таким образом, увеличение толщины PEDOT:PSS в этих устройствах приводит к замедленному накоплению ионов и подавлению эффекта Шоттки, что увеличивает стабильность перовскитных солнечных элементов под продолжительной засветкой.

Заключение

Данная работа демонстрирует простой способ разделения вкладов эффектов Шоттки и Хоука в фотодеградацию перовскитных солнечных элементов, индуцированную ионной миграцией. Показано, что эффект Шоттки – накопление ионов и изменение зонной структуры – приводит к резкому снижению тока, а следовательно, и эффективности, устройства в течение первых минут засветки. Эффект Хоука, с другой стороны, проявляется в медленном снижении тока, связанном с формированием дефектов. Увеличение толщины ДТС позволяет нейтрализовать его эффективное утонение, обусловленное эффектом Шоттки, и приводит к повышению времени фотостабильного отклика устройства в 200 раз – с 15 секунд до 1 часа.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-62-00022).

Список литературы

[1] A. Rajagopal, Z. Yang, S. B. Jo, I. L. Braly, P. W. Liang, H. W. Hillhouse, A. K. Y. Jen. Highly efficient perovskite–perovskite tandem solar cells reaching 80% of the theoretical limit in photovoltage. Adv. Mat. 2017, 29 (34), 1702140.

[2] M. C. Brennan, S. Draguta, P. V. Kamat, M. Kuno. Light-induced anion phase segregation in mixed halide perovskites. ACS En. Lett. 2017, 3 (1), 204-213.

Оптоэлектронный логический элемент И/И-НЕ на основе термооптического эффекта в A_3B_5 микродисковом лазере

И. С. Федосов [1✉], **Н. А. Фоминых** [1], **И. С. Махов** [1], **Н. В. Крыжановская** [1]
[1] НИУ ВШЭ, Санкт-Петербург, Россия;
✉isfedosov@hse.ru

Аннотация. В данной работе изучено влияние разогрева микродискового (МД) лазера на его спектральные характеристики. Нагрев осуществлялся токовой накачкой МД лазера, находящегося на одном чипе с изучаемым прибором на расстоянии 330 мкм. Показано, что разогрев током «нагревателя» позволяет плавно перестраивать длину волны лазерной генерации с коэффициентом 4 пм/мА в диапазоне 200 пм. Выбором рабочей точки удалось реализовать одновременное вычисление логических функций «И» и «И-НЕ», выходным сигналом являлась интенсивность двух лазерных линий, отстоящих друг от друга на спектральном расстоянии 4 нм. При этом соотношение интенсивности логической «1» к интенсивности логического «0» на выходе достигало 14,8.

Ключевые слова: термооптический эффект, микродисковый лазер, логический элемент, управление модовым составом.

Введение

Микродисковые (МД) лазеры являются перспективными источниками излучения для применения в фотонных интегральных схемах (ФИС) благодаря компактности (диаметры вплоть до единиц мкм) и высокой добротности (~10^6), а также выводу излучения в латеральной плоскости [1]. При использовании в ФИС нескольких активных элементов возникает сложное нестационарное поле температуры, которое может влиять на рабочие параметры входящих в состав элементов. Известно, что при разогреве МД лазера, может наблюдаться красное смещение лазерной линии обусловленное температурным изменением показателя преломления, а также скачкообразный перескок генерации на другую моду резонатора из-за спектрального сдвига спектра усиления активной области [2]. Контроль температуры лазера может быть успешно использован для реализации логических операций при оптоэлектронных вычислениях [3]. В данной работе мы сфокусировались на изучении термооптического эффекта, обусловленного разогревом МД лазера активным элементом, находящимся на той же подложке, и возможности реализации логических функций «И» и «И-НЕ» с помощью этой системы.

Материалы и методы

Гетероструктура для создания микролазеров была получена методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений на вицинальной подложке n^+-GaAs. В качестве активной области были использованы 5 слоев квантовых точек $In_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$, помещённые в GaAs волноводный слой толщиной 790 нм. МД лазеры диаметром d = 30 мкм были сформированы с помощью электронной литографии и плазменного реактивно-ионного травления. В качестве нагревающего элемента был использован МД лазер, отстоящий от исследуемого на 330 мкм. На вершинах МД мез и на волноводе с помощью фотолитографии и металлизации AgMn/Ni/Au были сформированы изолированные омические контакты к слою p-эмиттера. Подложка была утонена до 100 мкм, на её нижнюю грань была нанесена металлизация AuGe/Ni/Au, которая служила в качестве n-контакта. Электролюминесценция (ЭЛ) исследовалась при температуре подложки 18ºС в режиме постоянного тока и после сбора объективом в оптоволокно направлялась на оптический анализатор спектра.

Результаты и обсуждение

Были измерены спектры ЭЛ МД лазера при различных токах «нагревателя» (I_m) и накачки (I_s). При отсутствии тока на нагревателе пороговый ток лазерной генерации составил $I_{s,th}$ = 9 мА. По известному коэффициенту сдвига длины волны генерации с температурой (80 пм/К) были определены температуры МД лазера при разных токах лазера и «нагревателя». Получено, что током «нагревателя» можно осуществлять плавную перестройку длины волны генерации, с коэффициентом 4 пм/мА, которая может быть использована для точного спектрального совмещения линии лазерной генерации с другими компонентами ФИС в диапазоне 200 пм. При этом разогрев прибора оказывается не более 2,5 К. Кроме того, при установке тока накачки (I_s = 15 мА) вблизи тока скачкообразного перехода генерации на другую моду резонатора (с L1 на L2, отстоящих на 4 нм), этот переход управляется током “нагревателя” (см. Рис. 1.). Возможность контроля интенсивности лазерной линии с помощью двух токов позволяет одновременно реализовать логические элементы «И» и «И-НЕ». В качестве логического «0» на входах были приняты токи I_{s0} = 14 мА и I_{m0} = 5 мА, а логической «1» – I_{s1} = 15 мА и I_{m1} = 25 мА. Выходным сигналом являлась интенсивность лазерной моды L1 для операции «И-НЕ» и L2 для операции «И», порог логической «1» был принят равным 10^{-5} нВт/нм, см. Рис. 2.

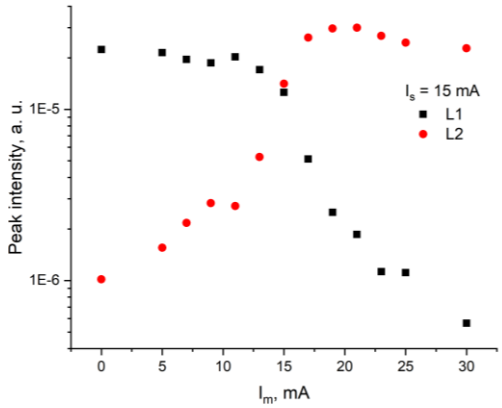


Рис. 1. Зависимость интенсивности мод L1 и L2 от тока нагревателя при токе накачке лазера 15 мА.

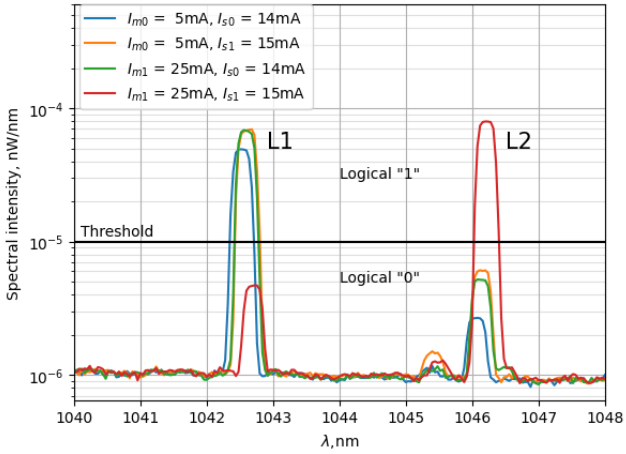


Рис. 2. Спектры ЭЛ при согласованном выборе рабочих точек. Мода L1 осуществляет логическую функцию «И-НЕ», мода L2 – «И».

Заключение

Были проведены экспериментальные исследования зависимостей температуры МД лазера от тока «нагревателя». Показано, что «нагреватель», находящийся на расстоянии 330 мкм, позволяет плавно подстраивать длину волны лазерной генерации с коэффициентом 4 пм/мА в диапазоне 200 пм. Выбором рабочей точки была осуществлена реализация логических функций «И» и «И-НЕ». Выходом логического элемента являлась интенсивность лазерной генерации, а входами – токовая накачка лазера и «нагревателя». При этом соотношение интенсивности логической «1» к интенсивности логического «0» на выходе достигало 14,8.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-72-20048, https://rscf.ru/project/25-72-20048/.

Список литературы

[1] Moiseev E.I., Kryzhanovskaya N.V. et al. Optics Letters. **43**(19), 4554 (2018).
[2] Федосов И.С., Фоминых Н.А. и др. ФТП. **59**(7), 388 (2025).
[3] Kim W., Ahn D., et al. Small Science. **4**(12), 2400264 (2024).

Распределенный контроль температуры обмоток трансформатора с помощью перестраиваемого полупроводникового лазера

А.М. Низаметдинов [1,2✉], **А.А. Черторийский** [1], **Н.В. Каштанов** [1,3]
[1] УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск, Россия;
[2]ООО "МЭлКон", Ульяновск, Россия;
[3]Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия
✉ anizametdinov@yandex.ru

Аннотация. Предложена система распределенного контроля температуры обмоток силового трансформатора на основе массива волоконных брэгговских решеток с одинаковой резонансной длиной волны и перестраиваемого полупроводникового лазера с температурной перестройкой. Опрос датчиков осуществляется серийным лазерным модулем без использования дорогостоящих спектроанализаторов. Экспериментально достигнута разрешающая способность 0.15…0.17 °C при времени сканирования 2.6 с.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, полупроводниковый лазер, температурная перестройка, распределенный датчик температуры, трансформатор.

Введение

Силовые трансформаторы требуют непрерывного контроля температуры обмоток, так как локальные перегревы ускоряют старение изоляции. Традиционные термопары и термисторы работают нестабильно в условиях сильных электромагнитных полей и агрессивной среды трансформаторного масла. Волоконно-оптические датчики температуры на основе брэгговских решеток (ВОБР) лишены этих недостатков [1…3]. Информационным параметром таких датчиков является сдвиг максимума длины волны отражения, пропорциональный изменению температуры. Однако используемые в настоящее время системы опроса ВОБР часто требуют применения дорогостоящих перестраиваемых лазеров или сложных спектральных анализаторов, что ограничивает их широкое внедрение. В работе предлагается простой и экономичный вариант распределенного контроля температуры обмоток трансформатора, использующий для опроса ВОБР серийный полупроводниковый лазер с температурной перестройкой длины волны [4,5].

Материалы и методы

В сердцевине стандартного одномодового оптического волокна с шагом 20 см сформированы брэгговские решетки на одну резонансную длину волны (~1548 нм при 20 °C). Для надежной работы волокна в трансформаторном масле применялось трехслойное покрытие: акрилат (защита от влаги), эластичный демпфирующий слой (защита от механических деформаций) и фторопласт (химическая стойкость). Волокно с решетками прокладывалось вдоль каждой ветви первичной и вторичной обмоток трансформатора, обеспечивая распределенный контроль температуры по всей длине обмоток. Опрос датчиков выполнялся лазерным модулем LDI-1550-DFB-1.25G. Длина волны лазера перестраивалась за счет изменения температуры излучающей структуры элементом Пельтье. Диапазон перестройки – 0.7 нм за цикл (нагрев + охлаждение) длительностью около 2.6 с. Информационным параметром о текущей длине волны служит падение напряжения на лазерном диоде (0.012 нм/мВ), что позволяет достичь разрешения 1.7 пм [5]. Система включает эталонную брэгговскую решетку, размещенную в заведомо холодной зоне.

Результаты и обсуждение

При нагреве обмоток спектры всех решеток смещаются в длинноволновую область. В результирующем спектре выделяются два края: коротковолновый (положение эталонного

датчика, неизменно) и длинноволновый (соответствует максимальной температуре на обмотках). Разность $\Delta\lambda$ линейно связана с максимальным перегревом ΔT_{max}.

На макете трансформатора получена температурная чувствительность решеток 9.98 пм / °C. Разрешающая способность метода – 0.15…0.17 °C. При имитации аварийной перегрузки зафиксировано увеличение $\Delta\lambda$, что свидетельствует о локальном перегреве. Положение эталонного пика оставалось стабильным, исключая ложное срабатывание от общего нагрева. Гистерезис при циклическом сканировании не превышает допустимых значений.

Заключение

Разработана и апробирована система распределенного контроля температуры обмоток трансформатора на основе массива ВОБР с идентичными длинами волн отражения и перестраиваемого полупроводникового лазера. Преимущества: простота, низкая стоимость, высокая разрешающая способность (до 0.17 °C), время цикла 2.6 с. Основное ограничение – малый диапазон перестройки (0.7 нм), что, однако, достаточно для рабочего диапазона температур трансформатора от 20 до 80 °C.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (FFWZ-2025-0005).

Список литературы

[1] R. Kashyap, *Fiber Bragg gratings* (San Diego, Academic press, 2009) 614 p.
[2] A. Othonos, K. Kalli, *Fiber Bragg gratings* (Norwood, Artech House, 1999) 422 p.
[3] H.K. Hisham, *Fiber Bragg grating sensors* (Boca Raton, CRC Press, 2019) 215 p.
[4] Ю.С. Борисов, А.М. Низаметдинов, О.В. Иванов, А.А. Черторийский, Квантовая электроника, **53**(4), 1 (2023).
[5] А.М. Низаметдинов, Ю.С. Борисов, О.В. Иванов, А.А. Черторийский, Датчики и системы, **3**, 23 (2024).

Исследование когерентных свойств полупроводниковых лазерных источников

В. Е. Пылаев [1✉], **Ю. С. Степанов**[1], **Д.П. Андреев** [1]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

✉me022@mail.ru

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование полупроводниковых лазерных источников с распределенной обратной связью. Измерены спектральные характеристики одночастотных полупроводниковых лазеров, наиболее часто встречающихся в составе SFP-модулей. Предложена высокочувствительная методика измерения длины когерентности лазерного излучения с использованием волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Экспериментально показано, что измеренное значение длины когерентности несколько больше величины, рассчитанной по спектру лазера.

Ключевые слова: Когерентность, лазер, спектр, интерферометр, волоконный световод.

Введение

Полупроводниковые лазерные источники находят широкое применение в высокоскоростных системах оптической связи, сенсорных системах. Наиболее востребованными при скоростях передачи 2,5 Гбит/с и выше являются лазеры с распределенной обратной связью (Distributed Feed Back – DFB) и с распределенными брэгговскими отражателями (Distributed Brag Reflector – DBR). В их структуре используется брэгговская дифракционная решетка для дополнительного уменьшения ширины линии генерации. Такие лазеры подходят для систем со спектральным уплотнением каналов, систем с когерентным детектированием, распределенных волоконно-оптических сенсорных систем. Одной из наиболее важных характеристик таких систем является длина когерентности. Увеличение длины когерентности, например, за счет сужения спектральной линии генерации, способствует увеличению дальности передачи, повышению оптического отношения сигнал-шум на приеме, росту динамического диапазона и т.д. Поэтому необходимо контролировать этот параметр применяемых полупроводниковых лазерных источников.

Целью исследования была апробация методики измерения длины когерентности на примере наиболее часто используемых полупроводниковых лазерных источников в составе SFP-модулей.

Материалы и методы

Спектральные характеристики описывают спектр лазерного излучения, т.е. распределение энергии (мощности) излучения по длинам волн или частотам. К ним относятся: центральная частота лазерного излучения ν_o; центральна длина волны лазерного излучения λ; ширина линии лазерного излучения $\Delta\lambda$; ширина огибающей спектра лазерного излучения; число спектральных линий излучения. Расстояние, на котором излучение может считаться когерентным, называется длиной когерентности. Если ширина спектра линии источника $\Delta\lambda$, а центральная длина волны – λ, то длина когерентности l_c в среде с показателем преломления n приблизительно равна:

$$l_c = \frac{\lambda^2}{n\Delta\lambda}$$

Измерение спектральных характеристик лазеров проводилось на экспериментальной установке, представленной на рис.1. В качестве тестируемых источников использовались SFP-модули. Типовой спектр лазера с распределенной обратной связью приведен на рис.2.

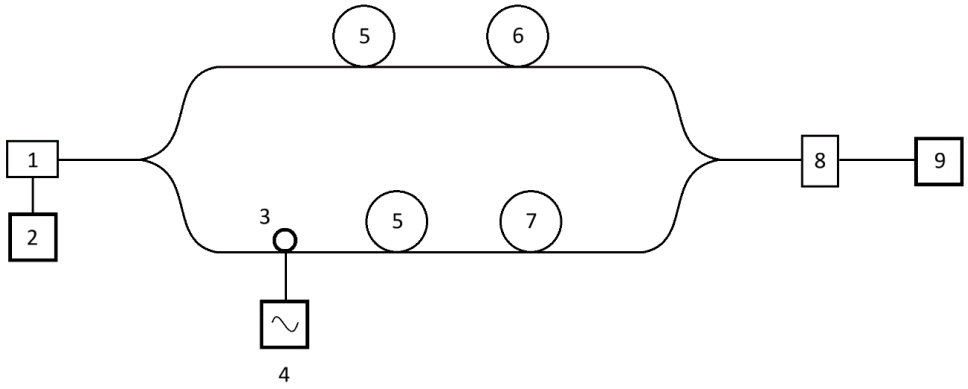


Рис. 1. Блок схема экспериментальной установки для измерения длины когерентности – интерферометр Маха-Цендера: 1 – лазер, 2 – анализатор оптического спектра, 3 – фазовый модулятор, 4 – генератор гармонического сигнала, 5 – стандартный волоконный световод (SSMF), 6, 7 – волоконные световоды разной длины, 8 – фотоприемник, 9 – осциллограф.

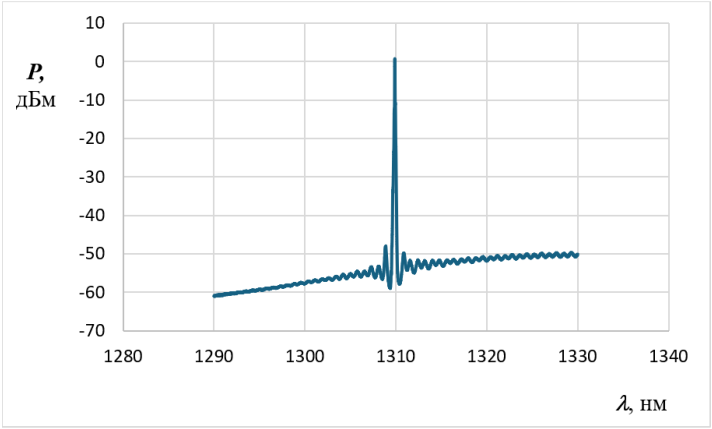


Рис. 2. Спектр лазера с распределенной обратной связью.

Для использованного в эксперименте лазера с распределенной обратной связью с шириной спектральной линии $\Delta\lambda=3*10^{-2}$ нм расчетное значение длины когерентности составило $l_c = 2$ см.

1. Результаты и обсуждение

Для эксперимента был собран волоконный интерферометр Маха-Цендера, принципиальная схема которого представлена на рис. 1. Первоначально при условии равенства длин плеч интерферометра регистрировалась интерференционная картина. Затем вносилась разность длин плеч интерферометра до достижения снижения контраста до минимального значения которая и принималась за искомую длину когерентности.

Измеренная в эксперименте длина когерентности лазера с распределенной обратной связью (рис. 2) составила $l_c = 15$ см, что хорошо согласуется с расчетным значением.

Заключение

Предложена и апробирована методика измерения длины когерентности полупроводниковых лазерных источников. Показано, что измеренные значения длины когерентности хорошо согласуются с результатами численной оценки по спектральным характеристикам, но превышают. Таким образом подтверждена необходимость прямого измерения.

Список литературы

[1] DWDM-системы. 5-е изд. Трещиков В. Н, Листвин В. Н. Техносфера. 2024.

[2] В. Дураев, С. Медведев, Одночастотные полупроводниковые РОС-лазеры, *Фотоника №6/48, 2014,* pp. 40–42.

Максимальный КПД одночастотных вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300 нм

П. Е. Копытов[1]✉, **Д. С. Папылев**[1], **В. В. Андрюшкин**[1], **А. Г. Гладышев**[2], **А. В. Бабичев**[1], **К. О. Воропаев**[3], **С. А. Блохин**[3], **Я. Н. Ковач**[3], **Л. Я. Карачинский**[1], **И. И. Новиков**[1], **С.-С. Тиэн**[4], **Д. Бимберг**[4], **А. Ю. Егоров**[1]

[1] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;

[2] ООО «Коннектор Оптикс», Санкт-Петербург, Россия;

[3] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия;

[4] Китайско-немецкий центр зелёной фотоники, Чанчуньский институт оптики, точной механики и физики, Китайская академия наук, Чанчунь, Китай

✉kopytovpe@itmo.ru

Аннотация. В данной работе приведены результаты исследования КПД вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300 нм, изготовленных комбинированным методом спекания и молекулярно-пучковой эпитаксии. Продемонстрировано, что максимальный КПД для одночастотных вертикально-излучающих лазеров диапазона длин волн 1300 нм, изготовленных с использованием комбинированного метода спекания и молекулярно-пучковой эпитаксии, достигается для лазеров с диаметром мезы заращенного туннельного перехода 6 мкм, и меняется от 30% при температуре 20 °C до 7% при температуре 100 °C.

Ключевые слова: вертикально-излучающий лазер, технология спекания пластин, молекулярно-пучковая эпитаксия, коэффициент полезного действия.

Введение

Сравнительно недавно появились оптические нейронные сети (ОНС), способные обрабатывать задачи глубоких нейронных сетей с высокой тактовой частотой, параллелизмом и передачей данных с малыми потерями. Однако существующими проблемами для ОНС являются высокое энергопотребление, низкая плотность вычислений, а также большая задержка. Однако уже в 2022 году была экспериментально продемонстрирована пространственно-временная мультиплексированная ОНС на основе массивов вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) микрометрового масштаба, которая одновременно преодолевает все эти проблемы [1]. При создании массивов ВИЛ микрометрового масштаба, для достижения эффективной работы устройств существенную роль играет энергоэффективность отдельного ВИЛ. В настоящей работе приводятся результаты исследования максимального КПД ВИЛ спектрального диапазона 1300 нм, изготовленных с использованием комбинированного метода спекания и молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

Материалы и методы

Гетероструктуры ВИЛ были изготовлены методом спекания гетероструктур брэгговских отражателей и гетероструктуры активной области с заращенным туннельным переходом (ЗТП). Полупроводниковые гетероструктуры брэгговских отражателей GaAs/AlGaAs на подложках GaAs и гетероструктура активной области InAlGaAs/InP на подложке InP были изготовлены методом МПЭ. Более подробное описание гетероструктуры и приборной конструкции ВИЛ приведено в работе [2].

Характеристики ВИЛ исследовались при непрерывном режиме накачки током. Для одновременной регистрации вольт- и ватт-амперных характеристик лазеров использовался стабилизированный источник тока. Выходная мощность оптического излучения лазеров регистрировалась с помощью фотоэлектрического измерителя мощности. Спектральные характеристики лазеров регистрировались анализатором оптического спектра с универсальным волоконным входом. КПД лазеров рассчитывался как отношение зарегистрированной оптической мощности, излучаемой лазером, к полной электрической мощности, подведенной к кристаллу лазера.

Результаты и обсуждение

На рис.1 представлена зависимость величины максимального КПД от температуры теплоотвода в диапазоне температур 20–100 °C для ВИЛ с различным размером мезы ЗТП. Лучшие значения максимального КПД демонстрирует ВИЛ с диаметром апертуры 6 мкм во всем исследованном температурном диапазоне. Значение максимального КПД составляет 30% при 20 °C и является одним из лучших известных значений. Так, например, как уже сообщалось в работе [1], максимальное КПД ВИЛ монолитной конструкции составляет всего 23,5% (температура 20 °C, диаметр апертуры 10 мкм). С повышением температуры теплоотвода, КПД ВИЛ заметно падает и при температуре 100 °C величина максимального КПД уже составляет около 7% для ВИЛ с диаметром мезы ЗТП 6 мкм. Такое поведение обусловлено как ростом внутренних оптических потерь из-за поглощения на свободных носителях заряда и межзонного поглощения в слоях туннельного перехода, так и падением эффективности токовой инжекции из-за усиления температурного выброса носителей заряда из активной области и безызлучательных процессов [2].

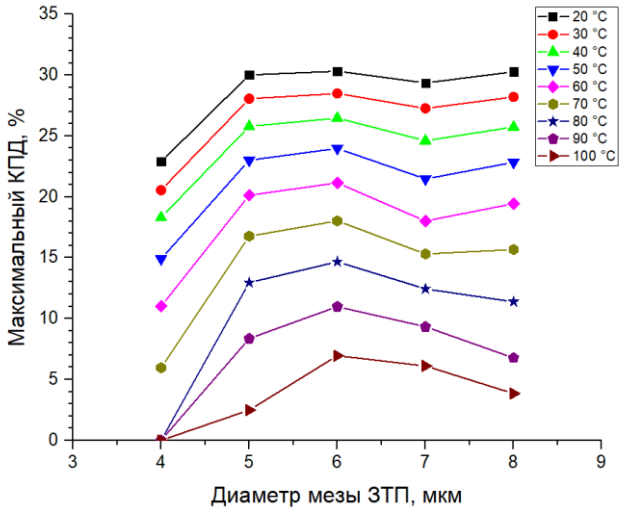


Рис. 1. Зависимость величины максимального КПД ВИЛ от размера мезы ЗТП при различных температурах теплоотвода в диапазоне от 20 до 100 °C.

Заключение

Продемонстрирована одночастотная генерация ВИЛ, излучающих на длинах волн вблизи спектрального диапазона 1300 нм с максимальным КПД на уровне 30%, который был зафиксирован для ВИЛ с диаметром мезы зараще нного туннельного перехода 6 мкм при температуре 20 °C. С повышением температуры теплоотвода до 100 °C, максимальный КПД существенно снижается. При этой температуре устойчивую работу в одночастотном режиме с максимальным КПД около 7% демонстрируют лазеры с диаметром мезы ЗТП 6 мкм, что, очевидно, является оптимальным размером для лазеров подобной конструкции с точки зрения достижения максимального КПД генерации лазерного излучения.

Благодарности

Работа авторов из Университета ИТМО по анализу статических характеристик лазеров поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № FSER-2025-0005).

Список литературы

[1] Z. Chen, A. Sludds, R. Davis III, I. I. Christen, L. Bernstein, L. Ateshian, T. Heuser, N. Heermeier, J.A. Lott, S. Reitzenstein, R. Hamerly, D. Englund. Nat. Photon., **17**, 723–730 (2023).

[2] S.A. Blokhin, A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, M.A. Bobrov, N.A. Maleev, V.V. Andryushkin, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, I.O. Zhumaeva, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, N.N. Ledentsov. EEE J. Quantum Electron., **58**(2), 1–15 (2022).

Исследование влияния поверхностного натяжения суспензии PEDOT:PSS и параметров нанесения на однородность покрытий

В. А. Поздеев [1,2] ✉, А. А. Максимова [1,2], А. В. Уваров [1], А. И. Баранов [1], А. С. Гудовских [1,2]

[1] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ pozdeev99va@gmail.com

Аннотация. Формирование плёнок PEDOT:PSS на поверхностях с различной смачиваемостью требует контроля растекания дисперсии. Однородность покрытий оценивается методами машинного зрения. Методика отрабатывается варьированием параметров нанесения и поверхностного натяжения дисперсии на модельных прозрачных подложках (стекло, оксидные слои), после применяется на нанотекстурированный (чёрный) кремний**, как без оксидных покрытий, так и со сформированными оксидными слоями**. Подход к переносу основан на сопоставлении критических поверхностных натяжений подложек и оптических метрик однородности.

Ключевые слова: PEDOT:PSS, spin-coating, поверхностное натяжение, однородность, машинное зрение, наноструктурированный кремний.

Введение

В гибридной фотовольтаике PEDOT:PSS широко применяется в качестве дырочно-селективного транспортного слоя и как прозрачный анод. Качество гетероперехода и, как следствие, эффективность и воспроизводимость характеристик устройств зависят от однородности интерфейса. Локальные дефекты покрытия могут приводить к образованию шунтирующих путей (снижение шунтирующего сопротивления) и усилению поверхностной рекомбинации носителей заряда, что снижает эффективность. Однородность покрытия, в свою очередь, определяется режимом нанесения и в том числе соотношением между поверхностным натяжением дисперсии PEDOT:PSS γ_l и смачиваемостью подложки, характеризуемой её критическим поверхностным натяжением γ_c по Зисману [1]. Использование прозрачных модельных подложек обеспечивает возможность количественного визуального контроля однородности покрытий при оптимизации параметров нанесения. Последующий перенос технологии на кремний, включая нанотекстурированный (чёрный) кремний как без покрытий, так и с нанесёнными оксидными слоями различной природы, реализуется через корректировку состава дисперсии с учётом различий в γ_c модельных и целевых подложек. Наноструктурирование кремния приводит к усилению его гидрофобности, что требует более тщательного контроля снижения поверхностного натяжения дисперсии PEDOT:PSS для обеспечения эффективного смачивания и заполнения наноструктуры поверхности с целью формирования однородного покрытия. Целью работы является создание методики количественной оценки однородности покрытий и последующего переноса отработанного режима нанесения с модельной подложки на кремний и наноструктурированный кремний.

Материалы и методы

В работе использовалась водная дисперсия PEDOT:PSS (Orgacon, высокопроводящая, 1.1% водная дисперсия без добавления ПАВ), поверхностное натяжение дисперсии регулировалось внесением спиртов или неионогенных ПАВ. Поверхностные натяжения дисперсий и критические поверхностные натяжения подложек рассчитывались по краевым углам смачивания [2]. Краевые углы смачивания измерялись кинетическим методом сидячей капли, описанным в работе [2]. Съемка образцов производилась с использованием цифровой камеры высокого разрешения в рассеянном контровом свете. Однородность покрытий оценивалась методами машинного зрения, включающими фильтрацию

изображений, анализ гистограмм интенсивности в градациях серого и бинаризацию по методу Оцу [3] для отделения покрытия от фона (рис. 1). Интенсивность изображения связана с локальной толщиной плёнки и калибруется по данным профилометрии и ступенчатых профилей, полученных путём локального механического нарушения покрытия. Для сравнения образцов используются инвертированные карты интенсивности (рис. 2), нормированные на измеренные значения толщины, что позволяет анализировать неоднородность покрытий по всей площади образца.

1. Результаты и обсуждение

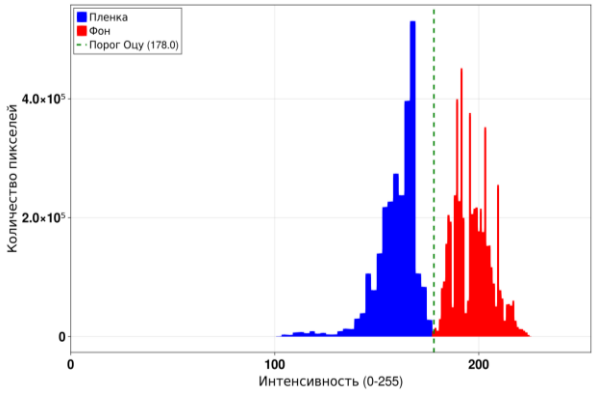


Рис. 1. Распределение интенсивностей снимка в градациях серого бинаризованное по методу Оцу для разделения покрытия и фона

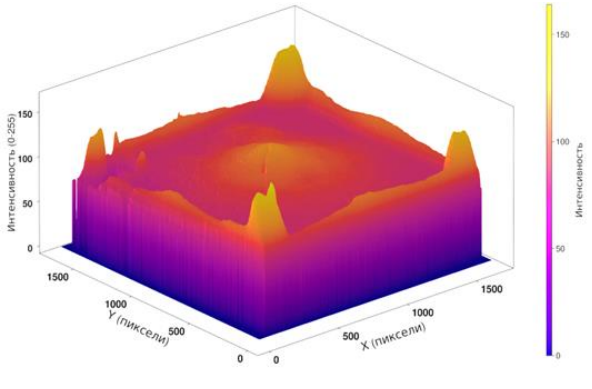


Рис. 2. Карта интенсивности покрытия (инвертирована) с выраженными краевыми эффектами (PEDOT:PSS, 1000 об/мин, 60 с, стекло).

Определены критические поверхностные натяжения используемых подложек по Зисману, а также зависимость поверхностного натяжения водной дисперсии PEDOT:PSS от объемной доли внесенных ПАВ и растворителей. На модельных прозрачных подложках для каждого состава дисперсии и режима центрифугирования рассчитаны стандартные метрики однородности (среднеквадратичное отклонение, асимметрия, эксцесс), что позволило выделить режимы нанесения с наименьшей неоднородностью по используемым метрикам.

Заключение

Разработана методика оценки однородности покрытий PEDOT:PSS на основе анализа изображений с использованием машинного зрения. Определены критические поверхностные натяжения модельных подложек и зависимость поверхностного натяжения дисперсии от добавок ПАВ и растворителей. Получены количественные метрики однородности для различных составов и режимов центрифугирования, что позволило выбрать оптимальные условия нанесения на прозрачных подложках. Показана возможность переноса режима на наноструктурированный кремний с учетом различий критического поверхностного натяжения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта Российского Научного Фонда «Высокоэффективные солнечные элементы на основе наноструктурированного «черного» кремния с оксидными пассивирующими слоями» № 24–79–10275 (https://rscf.ru/project/24-79-10275/)

Список литературы

[1] W. A. Zisman. Adv. Chem. Ser., 43, 1–51 (1964).

[2] V. A. Pozdeev, A. V. Uvarov, A. S. Gudovskikh, A. O. Monastyrenko. St. Petersburg State Polytechnical University J. Phys. Math., 17(3.2), 279–282 (2024).

[3] N. Otsu. IEEE Transactions on System Man Cybernetics, 9(1), 62–66 (1979).

Лазерный локатор для подводного обнаружения объектов

Мысь Д.А.

Аспирант, Санкт-Петербургский Политехнический университет имени Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

E-mail: dima.mys@mail.ru

Аннотация. Рост техногенного воздействия на природу ухудшает экологическое состояние водной среды, что требует эффективных методов контроля состояния подводных объектов (трубопроводов, кабелей, морских платформ) [1]. Традиционные системы подводного наблюдения, построенные по классической схеме с заливающим светом, имеют ограниченную дальность наблюдения (не более 0,7–0,8 Zб прозрачности воды), что связано с высоким поглощением и рассеянием света [2]. Рассеяние света создает помеху обратного рассеяния (ПОР), существенно снижающую контраст изображения.

Ключевые слова: подводное местоположение, лазерное излучение, отражение, поглощение, изображение, мощность излучения, водная среда, исследуемый объект.

Введение

Целью данной работы является разработка лабораторного макета лазерного локатора с использованием технологии пространственно-временной селекции для повышения дальности и качества подводного наблюдения. Для уменьшения потерь света подсветка объектов осуществляется в сине-зеленой области спектра (520–540 нм), где поглощение в прибрежных водах минимально. Суть метода заключается в использовании коротких наносекундных импульсов подсветки и синхронизированного затвора фотоприемника. Затвор закрыт во время распространения импульса до объекта, что исключает попадание ПОР на фотокатод, и открывается только в момент прихода отраженного сигнала [3].

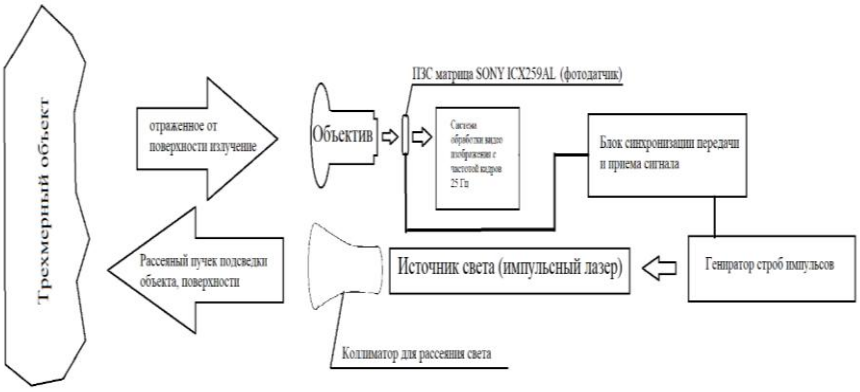


Рис. 1. Структурная схема подводного лазерного локатора.

Рассеянный луч лазера был направлен на стенку бассейна. Объектом исследования были плитка для бассейна и швы между плитками, а также переход от одного материала (плитка одного цвета (черная) - плитка другого цвета (белая)). Изображения были записаны на черно-белую ПЗС-матрицу на основе регистрации

отраженного лазерного излучения от стенки бассейна. Эти изображения показаны на рисунках 2 и 3.

1. Результаты и обсуждение

В результате были получены изображения и осциллограммы, подтверждающие возможность идентификации контуров подводных объектов.

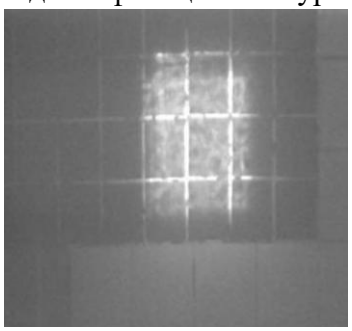


Рис. 2. Результат сьемки при направлении рассеянного пучка в центр перспективы (под прямым углом к стенке бассейна) исследуемого объекта.

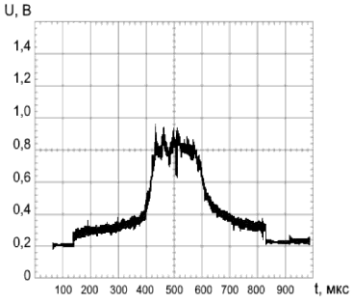


Рис. 3. Осциллограмма при направлении рассеянного пучка в центр перспективы (под прямым углом к стенке бассейна) исследуемого объекта.

Установлено, что интенсивность отраженного сигнала зависит от коэффициента поглощения поверхности (белая плитка отражает сильнее черной). Выявлена необходимость регулирования мощности лазерного излучения минимум на порядок для исключения засветки камеры при съемке высокоотражающих поверхностей.

Разработанная конструкция лазерного локатора позволяет получать качественные изображения подводных объектов и выявлять дефекты их поверхности. Для практического применения требуется доработка системы управления мощностью излучения и адаптация к различным условиям мутности воды.

Заключение

В результате эксперимента были получены фотографии, на которых видны контуры плитки бассейна и засветка камеры при смещении направления лазерного излучения. Анализ полученных результатов показывает, что разработанная конструкция лазерного локатора позволяет получить изображение объекта под водой. Качество изображения позволяет различать контуры на поверхности объекта и идентифицировать их. Также экспериментально доказано, что в лазерном локаторе необходимо обеспечить изменение мощности лазерного излучения как минимум на порядок для его эффективной работы без засветки на изображениях с исследуемого объекта.

Список литературы

[1] Davydov V. V., Dudkin V. I., Grebenikova N. M. On the Possibility of Express Recording of Nuclear Magnetic Resonance Spectra of Liquid Media in Weak Fields // Technical Physics. 2018. Vol. 63(12). P. 1845–1850.

[2] Nosov V. N., Kaledin S. B., Ivanov S. G. Remote Tracking to Monitor Ship Tracks at or near the Water Surface // Optics and Spectroscopy. 2019. Vol. 127(4). P. 669–674.

[3] Nikolaev D., Chetiy V., Dudkin V. Determining the location of an object during environmental monitoring in conditions of limited possibilities for the use of satellite positioning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 578(1). P. 012052.

Simulation based on optical properties of Halide Perovskite Solar Cells

Qinghao Song [1]✉, Aleksandra Furasova [1,2], Sergey Makarov[1,2]
[1] School of Physics and Engineering, ITMO University, Sanit Petersburg 197101, Russia
[2] Qingdao Innovation and Development Center, Harbin Engineering University, Qingdao 266000, Shandong, China
✉qinghao.song@metalab.ifmo.ru

Abstract. Lead halide perovskite solar cells (PSCs) are promising for indoor photovoltaics, where device performance strongly depends on optical properties. However, the lack of reliable optical constants for mixed perovskites limits accurate device modeling. Here, the complex refractive indices of representative perovskite films are experimentally determined by spectroscopic ellipsometry and implemented in electromagnetic simulations using CST Microwave Studio to calculate absorption, reflection, and transmission in full device structures. The results reveal composition-dependent optical responses, with $MAPbI_3$ showing enhanced absorption in the visible range relevant to indoor illumination. Corresponding devices achieve a maximum efficiency of 32.2% under a 4000 K LED at 2000 lux. This work links measured optical constants to device performance and provides a framework for designing perovskite solar cells for indoor applications.

Keywords: perovskite solar cells, low light, simulations
Funding: The research is supported by the Russian Science Foundation (project 24-79-10131)

Introduction

Lead halide perovskite solar cells (PSCs) show strong potential for indoor photovoltaics due to their high absorption [1,2] and tunable bandgap. Under low-light conditions, device performance is highly dependent on optical properties and spectral matching. However, reliable optical constants for mixed-halide perovskites remain limited, restricting accurate device design.

In this work, we determine the optical constants of representative perovskite films and implement them in electromagnetic simulations using CST Microwave Studio. By combining experiment, modeling, and device validation, we establish a link between composition-dependent optical properties and device performance under indoor illumination.

Materials and Methods

Perovskite thin films with compositions $MAPbI_3$, $Cs_{0.05}FA_{0.8}MA_{0.15}Pb(I_{0.85}Br_{0.15})_3$, and $MAPb(I_{0.95}Br_{0.05})_3$+PEAI were prepared on glass substrates. Spectroscopic ellipsometry was employed to measure the complex reflectance (Ψ, Δ), from which the optical constants (refractive index n and extinction coefficient k) were extracted using a Tauc–Lorentz model.

These experimentally obtained optical parameters were implemented in electromagnetic simulations using CST Microwave Studio. Full device structures were modeled to calculate absorption, reflection, and transmission (ART) spectra under optical illumination.

Results and Discussion

Ellipsometry-derived optical constants reveal distinct dispersion behaviors for different perovskite compositions despite similar bandgaps, indicating that composition significantly modifies light–matter interaction.

Based on these parameters, CST simulations provide ART spectra of complete device structures. The results show that $MAPbI_3$ exhibits stronger absorption in the 400–600 nm range, which is critical for indoor illumination, while mixed compositions display reduced absorption in this region and increased optical losses at longer wavelengths.

The ART analysis directly explains the observed device performance: $MAPbI_3$-based solar cells achieve higher efficiency under indoor conditions due to improved spectral utilization, reaching up to 32.2% at 2000 lux. In contrast, multi-cation compositions are more suitable for standard illumination but less effective under low-light environments.

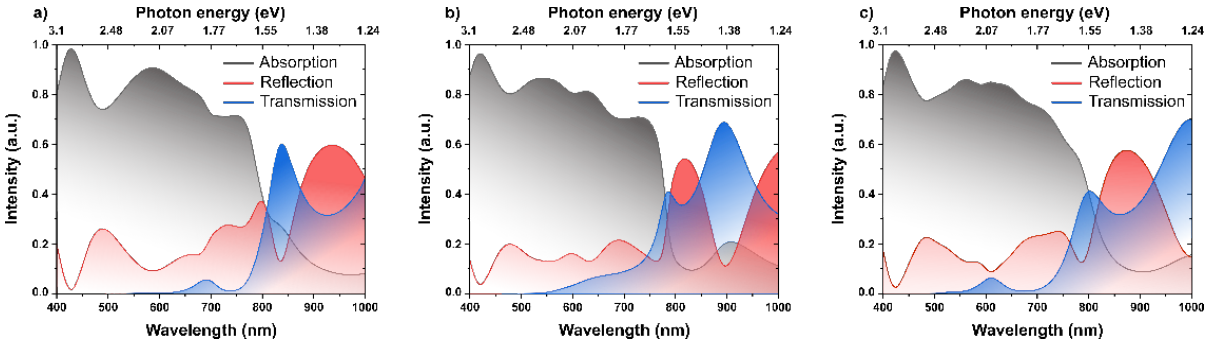


Figure 1 Simulation of absorption, transmission and reflection properties of perovskite solar cell devices with different chemical compositions of the semiconductor layer: a) $Cs_{0.05}FA_{0.8}MA_{0.15}Pb(I_{0.85}Br_{0.15})_3$, b) $MAPbI_3$, c) $MAPb(I_{0.95}Br_{0.05})_3$+PEAI

These findings demonstrate that composition-dependent optical constants determine the distribution of optical losses and absorption within the device, thereby governing performance under different illumination conditions.

Conclusion

This study establishes a measurement-driven simulation framework in which optical constants obtained from ellipsometry are directly integrated into device-level modeling. The resulting ART analysis provides a physically consistent explanation of composition-dependent performance in perovskite solar cells. $MAPbI_3$ is identified as the most suitable absorber for indoor photovoltaics due to its enhanced absorption in the visible range among these perovskites. This approach offers a practical pathway for the optical design and optimization of perovskite solar cells under low-light conditions.

Acknowledgments

The research is supported by the Russian Science Foundation (project 24-79-10131); Qinghao song thanks to the support by the program of China Scholarship Council.

REFERENCES

[1] Zhang, W., Guo, X., Cui, Z., Yuan, H., Li, Y., Li, W., Li, X., Fang, J.: Strategies for improving efficiency and stability of inverted perovskite solar cells. Advanced Materials **36**(37), 2311025 (2024)

[2] Kim, J.Y., Lee, J.-W., Jung, H.S., Shin, H., Park, N.-G.: High-efficiency perovskite solar cells. Chemical reviews **120**(15), 7867–7918 (2020)

Терагерцовая гибридная антенная сборка с металлическими и диэлектрическими элементами

П. Е. Нестеренко [1,2✉], **А. Н. Приходько** [1,2,3], **Н. Р. Нурмаматов** [1,2], **Г. Н. Гольцман** [1,2,3], **А. С. Шураков** [1,2]

[1] Научно-исследовательский институт телекоммуникаций, НИУ ВШЭ, Москва, Россия;
[2] Лаборатория квантовых детекторов, МПГУ, Москва, Россия;
[3] Группа квантово-оптических интегральных микросхем, РКЦ, Москва, Россия
✉pnesterenko@hse.ru

Аннотация. Практическое освоение терагерцового диапазона частот является сложной задачей с точки зрения снижения мощности компактных твердотельных источников и увеличения потерь на распространение волн в земной атмосфере. Для эффективной приемопередачи и дистанционного зондирования разрабатываются узконаправленные терагерцовые антенны. В данной работе продемонстрирована гибридная антенная сборка с центральной рабочей частотой 150 ГГц, состоящая из двухкаскадного делителя мощности на основе полого металлического волновода и кремниевой антенно-фидерной структуры. Расчеты и измерения согласованно дают коэффициент усиления сборки 15 дБи с относительным уровнем боковых лепестков −13 дБ.

Ключевые слова: терагерц, фотоника, делитель мощности, антенна.

Введение

Радиоустройства терагерцового (ТГц) диапазона (0.1–10 ТГц) постепенно переходят из области узкого научного применения в область прикладных задач широкого спектра, таких как беспроводная связь с высокой пропускной способностью и дистанционное неинвазивное зондирование [1], [2]. Однако ТГц излучение подвержено значительному затуханию в свободном пространстве из-за поглощения парами воды и кислородом [3]. Также существует проблема реализации компактных источников ТГц излучения с высоким уровнем выходной мощности и короткой дальней зоной. Это затрудняет стабильную приемопередачу ТГц радиосигнала в помещении. Одним из эффективных методов преодоления этой проблемы может стать применение компактных антенн с высокой направленностью. В данной работе представлена компактная гибридная антенная сборка с центральной рабочей частотой 150 ГГц.

Материалы и методы

Как показано на рис. 1, *a*, антенная сборка состоит из двухкаскадного делителя мощности в *H*-плоскости на основе полого металлического волновода прямоугольного сечения и кремниевой антенно-фидерной структуры. Геометрические параметры делителя мощности оптимизированы для согласования импедансов в его элементах, достижения высокой развязки между выходными портами и минимизации возвратных потерь по входу. Кремниевая антенно-фидерная структура состоит из четырех ячеек, объединенных тонкими перемычками. Каждая ячейка оснащена перфорированной дисковой резонансной антенной (ДРА), ленточным волноводом с клиновидным преобразователем мод. Для заданного диаметра ДРА оптимальный диаметр субволновых перфораций в прямоугольной сетке определяется максимальной симметричностью диаграммы направленности (ДН) и высоким коэффициентом усиления (КУ). Результаты расчета отношения ширин пучков в *E*- и *H*-плоскостях (γ) и КУ в дальнем поле представлены на рис. 1, *b*. Эффективная диэлектрическая проницаемость ДРА (ε_{eff}) вычисляется с использованием модифицированного приближения Максвелла-Гарнетта [4]. Измерения ДН антенной сборки производятся в дальнем поле с использованием поворотной платформы. Результаты измерений представлены на рис. 1, *c*.

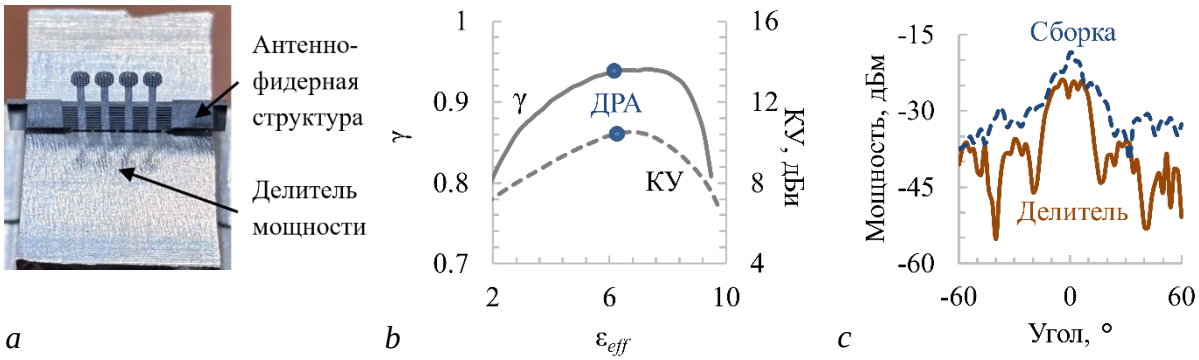


Рис. 1. *a* — гибридная антенная сборка с металлическими и диэлектрическими элементами, *b* — расчетные завимости симметричности ДН и КУ ДРА от диаметра перфораций, *c* — измеренные ДН делителя мощности и антенной сборки.

Результаты и обсуждение

Как видно из рис. 1, *b*, наибольшие значения КУ и γ наблюдается при $\varepsilon_{eff} \approx 6$. При этом для $\varepsilon_{eff} < 6$ зависимости КУ и γ от ε_{eff} более пологие, чем для $\varepsilon_{eff} > 8.5$. Диаметр перфораций всех ДРА в составе изготовленного образца антенной сборки соответствует $\varepsilon_{eff} \approx 6$.

Измерить напрямую вносимые и возвратные потери в портах разработанного делителя мощности затруднительно из-за сложности оснастить порты согласованными волноводными нагрузками в силу выбранной геометрии. Поэтому производилось моделирование матрицы параметров рассеяния и ДН с последующим ее измерением в дальнем поле. По результатам моделирования вносимые потери между входным и выходными портами были равны 6.04 дБ при уровне возвратных потерь около 28 дБ. ДН в *H*-плоскости имеет выраженный основной лепесток с КУ 11.86 дБи и уровнем боковых лепестков −12.81 дБ относительно основного лепестка. При этом ширина основного лепестка по уровню половинной мощности (ШПМ) равна 17°. В *E*-плоскости ШПМ составляет примерно 120°. Моделирование также показало, что использование сборки с антенно-фидерной структурой из четырех ячеек, на вход которых подается сигнал с выходов делителя мощности, обеспечивает выигрыш в КУ 3.42 дБ при практически неизменном уровне боковых лепестков −13 дБ. Это подтверждается экспериментом. Как показано на рис. 1, *c*, измерения демонстрируют увеличение КУ на 5 дБ и снижение уровня боковых лепестков на 1 дБ. При этом наблюдается асимметричность ДН, что мы, в свою очередь, связываем с дефектами изготовления делителя мощности и точностью позиционирования антенно-фидерной структуры в нем.

Подробное описание моделирования, изготовления и верификации характеристик гибридной антенной сборки планируются к представлению на конференции.

Благодарности

Исследование выполнено за счет Программы развития НИУ ВШЭ на 2025–2036 гг. в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» национального проекта «Молодежь и дети».

Список литературы

[1] ITU-R, Recommendation ITU-R M.2160-0, (2023).
[2] V. Petrov, D. Moltchanov, and Y. Koucheryavy, Proc. IEEE Int. Congr. Ultra Modern Telecommun. Control Syst. Workshops (ICUMT), 183–190 (2016).
[3] D. Moltchanov, E. Sopin, V. Begishev, A. Samuylov, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 24(2), 1072–1116, (2022).
[4] X.-D. Liu, Z.-L. Hou, B.-X. Zhang, K.-T. Zhan, P. He, K.-L. Zhang, W.-L. Song, Appl. Phys. Lett., 108(10), 1–10 (2016).

TCAD моделирование резистивного переключения элемента хранения ReRAM на основе оксида гафния

А. К. Козлов [1,2]✉, **Е. А. Ганыкина**[1,2], **А. А. Резванов**[1,2]
[1]МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия;
[2]АО «НИИМЭ», г. Зеленоград, Россия
✉akozlov@niime.ru

Аннотация. В данной работе представлены описание и реализация физико-математической модели резистивного переключения филаментарного типа на основе дрейф-диффузионной модели. Были получены основные характеристики элемента хранения резистивной памяти на основе оксида гафния.

Ключевые слова: Резистивная память; оксид гафния; дрейф-диффузия: Sentaurus TCAD.

Введение

В настоящее время традиционные виды памяти, такие как DRAM и Flash-память, сталкиваются с проблемами в современных прикладных задачах: ограничениями энергопотребления и масштабирования. В связи с этим потребовалась разработка новых видов памяти, таких как SCM — storage class memory, основанных на других физических принципах (MRAM, FeRAM, PCAM, ReRAM) [1]. ReRAM (резистивная память с произвольным доступом) основана на явлении скачкообразного изменения электрического сопротивления активного слоя при подаче внешнего сигнала [2]. Виду своих основных преимуществ: высокой масштабируемости, высокой скорости перезаписи (~нс) и низкому энергопотреблению (~10 пДж) [3], данный вид энергонезависимой памяти является наиболее перспективным. В данной работе рассматривался элемент хранения резистивного переключения ReRAM на основе оксида гафния, так как ранее уже были продемонстрированы успешные попытки получения ячеек с данным активным слоем с необходимыми параметрами [4, 6], а во-вторых, оксид гафния повсеместно используется в КМОП производстве [5].

Объект исследования

В данной работе исследуется стек Ti/HfO_2/TiN, для которого уже было продемонстрировано резистивное переключение филаментарного типа [4,6]. Однако, элемент хранения данного вида переключения обладает большим недостатком: стохастической природой резистивного переключения, которая не позволяет достоверно предсказывать основные характеристика элемента хранения ReRAM [4]. Для исследования резистивного переключения в таких структурах прибегают к описанию и реализации физико-математической модели. Феноменологическая модель данного типа переключения описывается разрывом и восстановлением проводящего канала за счет эволюции концентрации вакансий кислорода, которая обеспечивается благодаря дрейф-диффузии, термодиффузии, генерации и рекомбинации ионов кислорода и его вакансий.

Результаты и вывод

По результатам проведенного моделирования были получены распределения концентрации кислородных вакансий, кислорода, температуры, электрического поля, характерные напряжения переключения, вольт-амперная характеристика. Была приведено теоретическое обоснование полученным результатам.

.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда №23-91-06003, https://rscf.ru/project/23-91-06003/.

Список литературы

[1] Красников Г. Я., Орлов О. М., Макеев В. В. Исследование эффекта переключения и транспорта заряда в бесформовочном мемристоре на основе нитрида кремния с разными типами металла верхнего электрода //Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2020. №. 1. С. 42–46

[2] Резванов А. А. [и др.]. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В КАЧЕСТВЕ БУФЕРНОГО СЛОЯ В МЕМРИСТОРНЫХ СТРУКТУРАХ //Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2022. № 1. С. 69–86.

[3] Алексеева Л. Г. [и др.]. Мемристор-новый наноразмерный элемент многоуровневой нейроподобной логики //Биотехносфера. — 2016. — №. 3—4 (45—46). — С. 73—78.

[4] Govoreanu B. [et al.]. 10×10nm2 Hf/HfOx crossbar resistive RAM with excellent performance, reliability and low-energy operation // International Electron Devices Meeting. 2011. P. 31.6.

[5] Егоров К.В. Резистивное переключение в структурах металл-изолятор-металл на основе оксида гафния и оксида тантала, формируемых атомно-слоевым осаждением: дис. … канд. физ.-мат. наук. М., 2019.

[6] Cabout T. [et al.]. Role of Ti and Pt electrodes on resistance switching variability of HfO2-based resistive random access memory //Thin Solid Films. – 2013. – Т. 533. – С. 19-23.

Моделирование отклика сенсора диоксида азота на основе TiO_2-SnO_2 пленок

В. А. Давиденко[1]✉, В. В. Петров[1]

[1]Institute of Nanotechnologies, Electronics, and Equipment Engineering, Southern Federal University, Taganrog, 347922, Russia

✉vadavidenko@sfedu.ru

Аннотация. В работе проведено моделирование отклика сенсоров диоксида азота (NO_2) на основе наноразмерных плёнок TiO_2-SnO_2 (толщина 150 и 650 нм) в температурном диапазоне 50-200°C. Расчётные данные величин отклика сенсора с учётом эффективного коэффициента диффузии D_{eff} полностью совпали с экспериментальными значениями, что подтверждает, что в плёнках TiO_2-SnO_2 одновременно действуют два механизма диффузии: диффузия Кнудсена и поверхностная диффузия.

Ключевые слова: тонкая пленка, сенсор газа, диоксид олова, диоксид титана, коэффициент диффузии.

Введение

Известно, что сенсоры диоксида азота на основе тонких композитных наноразмерных пленок оксидов диоксида олова и титана (TiO_2-SnO_2) демонстрируют высокий отклик при температурах 50-200°C [1]. Эффективность работы такого датчика определяется несколькими факторами: свойствами газочувствительного материала TiO_2-SnO_2, рабочей температурой сенсора, а также процессами диффузии молекул диоксида азота (NO_2) к центрам адсорбции [2].

Материалы и методы

В данной работе для анализа величины отклика сенсора газа (S) в зависимости от концентрации молекул газа ($C_{A,s}$) было использовано выражение, предложенное в [2]:

$$S = \frac{R_a}{R_g} = 1 + \frac{\alpha C_{A,s}}{L\sqrt{\frac{k}{D_k}}} \tanh\left(L\sqrt{\frac{k}{D_k}}\right) \quad (1)$$

где R_a, R_g – сопротивление датчика до и после воздействия молекул газа; D_k – коэффициент диффузии Кнудсена; T – рабочая температура; M – молекулярная масса газа; r – радиус пор; k – постоянная скорости реакции; α – коэффициент чувствительности; L – толщина пленки.

Для моделирования были использованы результаты отклика сенсора газа для конструкции сенсора, у которого измерительные электроды находятся под слоем газочувствительного материала, полученные в [1]. Толщина пленки TiO_2-SnO_2 при этом составляла 150 нм (сенсор 4). Кроме этого, был изготовлен сенсор газа на основе такой же пленки, но с большей толщиной пленки, равной 650 нм (сенсор 33). Для всех сенсоров были проведены эксперименты по исследованию величины отклика по отношению к одним и тем же концентрациям NO_2 при одних и тех же рабочих температурах.

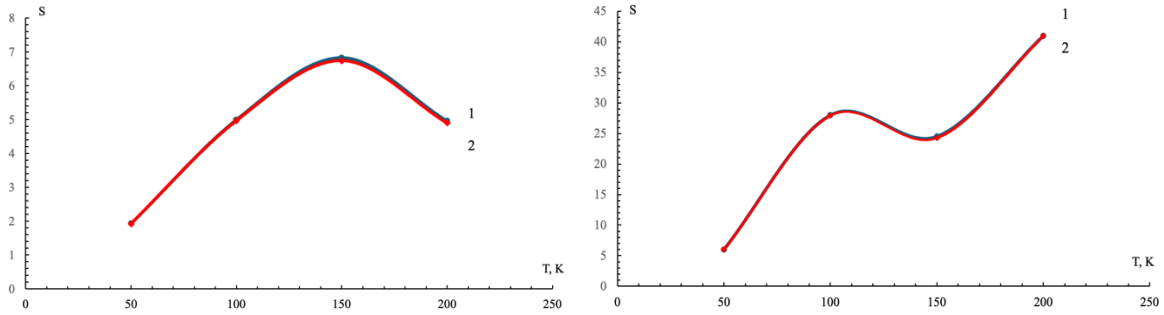
Анализируя величину отклика сенсоров на основе пленок TiO_2-SnO_2 было замечено, что величина отклика зависит не только от диффузии молекул газа по механизму Кнудсена, но и может протекать по нескольким механизмам, а именно по механизмам диффузии Кнудсена и поверхностной диффузии [3].

Таким образом, целью данного исследования было моделирование величины отклика сенсора газа при условии, что в процессе диффузии молекул NO_2 в пленках TiO_2-SnO_2 участвуют два механизма диффузии - диффузия Кнудсена и поверхностная диффузия.

Результаты и обсуждение

При исследовании формула (1) была модифицирована путем введения эффективного коэффициента диффузии (D_{eff}), представляющего суперпозицию коэффициента диффузии Кнудсена и поверхностной диффузии (D_{sur}). Для расчетов были приняты следующие значения коэффициентов диффузии (D_k = 1,6-1,7·10^{-7} м/$с^2$, D_{sur} = 8,5-9,9·10^{-4} м/$с^2$; D_{eff} = 1,6-

$1{,}9 \cdot 10^{-7}$ м/с^2). На рисунке 1 представлен график зависимости величины отклика сенсоров 4 33 от рабочей температуры для значений, полученных в рамках эксперимента и рассчитанных по формуле (1) с D_{eff}.



а) сенсор 4 б) сенсор 33

Рис. 1. Температурная зависимость величины отклика сенсоров на основе TiO_2-SnO_2 пленки: 1) синяя кривая, 2) красная кривая

Используя эффективный коэффициент диффузии (D_{eff}) видно, что расчитанные значения отклика сенсоров газа (кривая 2), полностью совпадают со значениями на экспериментальной кривой (кривая 1).

Таким образом, в работе показано, что величину отклика сенсоров диоксида азота на основе наноразмерных плёнок TiO_2-SnO_2 определяют два механизма диффузии молекул NO_2 – поверхностная диффузия и диффузия Кнудсена.

Заключение

В работе исследован отклик сенсоров диоксида азота на основе наноразмерных плёнок TiO_2-SnO_2 (толщина 150 и 650 нм) при температурах 50-200°C. Проанализированы факторы, влияющие на эффективность датчиков: свойства материала, температура и процессы диффузии молекул NO_2. Выражение для расчета величины отклика сенсора газа модифицировано путём введения эффективного коэффициента диффузии (D_{eff}), объединяющего два механизма коэффициентов диффузии молекул NO_2 в TiO_2-SnO_2 плёнках – поверхностную диффузию и диффузию Кнудсена. В результате показано хорошее совпадение расчётных данных с экспериментальными значениями.

Таким образом, моделирование отклика сенсора газа подтвердило предположение, что в пленках TiO_2-SnO_2 действуют два механизма диффузии молекул диоксида азота – диффузия Кнудсена и поверхностная диффузия.

Благодарности

Данное исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации; государственное задание в области научной деятельности (проект № FENW-2025-0003).

Список литературы

[1] Petrov, V. V., Starnikova, A. P., Volkova, M. G., Khubezhov, S. A., Pankov, I. V., Bayan, E. M. Excellent room-temperature NO_2 gas-sensing properties of TiO_2-SnO_2 composite thin films under light activation. Nanomaterials 15(11), 871 (2025). DOI: 10.3390/nano15110871

[2] Sakai, G., Matsunaga, N., Shimanoe, K., Yamazoe, N. Theory of gas-diffusion controlled sensitivity for thin film semiconductor gas sensor. Sensors and Actuators, B: Chemical, 80(2), 125-131 (2001). DOI: 10.1016/S0925-4005(01)00890-5

[3] McWhorter, D. Flux equations for gas diffusion in porous media. The Groundwater Project. 45 (2021). DOI: 10.21083/978-1-77470-003-7

Взаимодействие между магнонными модами в редкоземельных ортоферритах

А.И. Брулев [1, 2✉], Р.М. Дубровин [1], И.А. Елисеев [1], Р.В. Писарев [1]
[1] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия;
[2] ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
✉a.i.brulev@mail.ioffe.ru

Аннотация. Взаимодействие связанных магнонных мод в антиферромагнетиках открывает новые возможности для нелинейного управления намагниченностью, однако механизмы такого взаимодействия исследованы недостаточно. В данной работе методом поляризационной спектроскопии комбинационного рассеяния света с угловым разрешением исследована равновесная спиновая динамика монокристаллов $TbFeO_3$ и $TmFeO_3$ при комнатной температуре. Обнаружено нарушение правил отбора, в запрещённых поляризационных геометриях регистрируется ненулевая интенсивность рассеяния на квази-ферромагнитной и квази-антиферромагнитной модах. Это указывает на взаимодействие магнонных мод в редкоземельных ортоферритах, приводящее к смешиванию состояний поляризаций рассеянного излучения.

Ключевые слова: Антиферромагнетики, редкоземельные ортоферриты, комбинационное рассеяние света, магноны.

Введение

Антиферромагнетики привлекают внимание как основа для устройств спинтроники нового поколения благодаря возможности работы на терагерцовых частотах. Особый интерес представляют редкоземельные ортоферриты $RFeO_3$, ромбические антиферромагнетики, сочетающие разнообразие магнитных структур и явлений, таких как взаимодействие Дзялошинского–Мории, линейный магнитоэлектрический эффект, мультиферройность и другие [1]. Вследствие взаимодействия Дзялошинского–Мории акустический магнон расщепляется на квази-ферромагнитную (qFM) и квази-антиферромагнитную (qAFM) моды с характерными частотами ≈ 10 и ≈ 20 см$^{-1}$ в центре зоны Бриллюэна. Нелинейное взаимодействие между этими модами теоретически предсказано, однако его экспериментальные проявления остаются малоизученными [2]. Традиционным методом исследования этих возбуждений является спектроскопия комбинационного рассеяния света, поляризационные зависимости интенсивности которого несут информацию о симметрии мод и их взаимодействии [3, 4]. Однако для магнонных возбуждений в ортоферритах такие зависимости детально ранее не анализировались. Целью настоящей работы является анализ поляризационных зависимостей интенсивности комбинационного рассеяния света на магнонах в редкоземельных ортоферритах для выявления признаков взаимодействия между магнонными модами.

Материалы и методы

В данной работе методом поляризационной спектроскопии комбинационного рассеяния света исследована равновесная спиновая динамика монокристаллов $TbFeO_3$ и $TmFeO_3$ при комнатной температуре, что существенно ниже температуры Нееля подрешётки железа (T_N ≈ 650 К). При комнатной температуре в обоих ортоферритах реализуется магнитная структура $Г_4$, вследствие чего правила отбора для рассеяния на магнонах совпадают, что позволяет проводить сравнительный анализ. Возбуждение осуществлялось гелий-неоновым лазером с длиной волны 633 нм. Спектры измерялись во всех конфигурациях линейных поляризаций вдоль кристаллографических осей *a*, *b*, *c* пространственной группы *Pbnm*. Угловые зависимости получены вращением поляризаций при фиксированной конфигурации эксперимента.

Результаты и обсуждение

На спектрах для обоих ортоферритов идентифицированы qFM и qAFM моды, ±12 и ±18 см$^{-1}$ для $TbFeO_3$, ±14 и ±24 см$^{-1}$ для $TmFeO_3$ (Рис. 1). Угловые зависимости интенсивности качественно совпадают для обоих ортоферритов. Ключевым результатом

работы является обнаруженное экспериментально нарушение поляризационных правил отбора для магнонных мод. Наблюдается ненулевая интенсивность рассеяния в геометриях, где, согласно симметрии, она должна быть строго равна нулю.

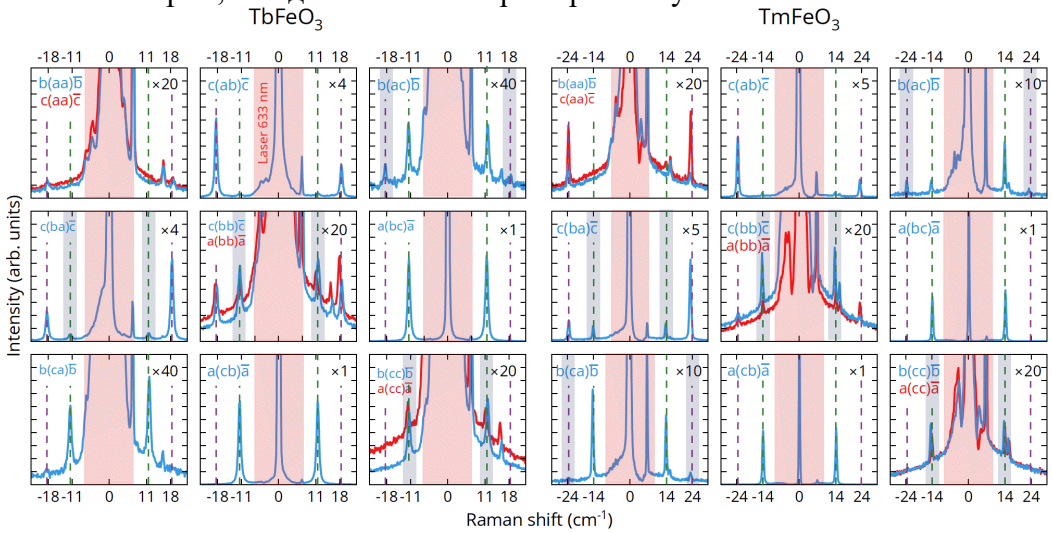


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния на квази-ферромагнитной (qFM) и квази-антиферромагнитной (qAFM) модах в $TbFeO_3$ (слева) и $TmFeO_3$ (справа) при температуре 293 K при ориентации поляризаций вдоль трех кристаллографических осей *a*, *b* и *c*. Красным выделена область возбуждающего лазера. Синим цветом показаны спектральные области с ненулевой интенсивностью рассеяния в «запрещённых» ориентациях.

Для проверки инструментального происхождения нарушений проведено моделирование с учётом деполяризации, двупреломления кристалла и наклона нормали поверхности относительно оси светового пучка. Моделирование улучшает согласие с экспериментом, однако не воспроизводит наблюдаемые угловые зависимости полностью, что исключает сугубо инструментальное объяснение и указывает на взаимодействие между qFM и qAFM модами.

Заключение

Методом поляризационной спектроскопии комбинационного рассеяния света с угловым разрешением в монокристаллах $TbFeO_3$ и $TmFeO_3$ обнаружено нарушение поляризационных правил отбора для комбинационного рассеяния на магнонах. Показано, что наблюдаемые угловые зависимости не могут быть объяснены исключительно инструментальными эффектами. Совпадение характера нарушений в обоих ортоферритах указывает на универсальный механизм взаимодействия qFM и qAFM мод. Полученные результаты открывают перспективу для дальнейших исследований равновесной и неравновесной спиновой динамики в редкоземельных ортоферритах.

Благодарности

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект № FSWR-2024-0003).

Список литературы

[1] A.V. Kimel, A.K. Zvezdin. Photonics Insights, **1**(2), C03 (2023).
[2] Z. Zhang, F.Y. Gao, Y.-C. Chien, Z.-J. Liu, J.B. Curtis, E.R. Sung, X. Ma, W. Ren, S. Cao, P. Narang, A. von Hoegen, E. Baldini, K.A. Nelson. Nat. Phys., **20**(5), 788 (2024).
[3] R.M. Dubrovin, E.M. Roginskii, V.A. Chernyshev, N.N. Novikova, M.A. Elistratova, I.A. Eliseyev, A.N. Smirnov, A.I. Brulev, K.N. Boldyrev, V.Yu. Davydov, R.V. Mikhaylovskiy, A.M. Kalashnikova, R.V. Pisarev. Phys. Rev. B, **110**(13), 134310 (2024).
[4] R.M. Dubrovin, A.I. Brulev, N.R. Vovk, I.A. Eliseyev, N.N. Novikova, V.A. Chernyshev, A.N. Smirnov, V.Yu. Davydov, A. Wu, L. Su, R.V. Mikhaylovskiy, A.M. Kalashnikova, R.V. Pisarev. Phys. Rev. B, **112**(17), 174419 (2025).

Экспериментальная демонстрация и оценка предотвращения блокировок в сетях 6G субтерагерцового диапазона

В. М. Ушаков [1,2]✉, **М. И. Ершова** [1,2], **А. А. Гайдамака** [1], **А. С. Шураков** [1,2], **Е. А. Кучерявый** [1]

[1] Научно-исследовательский институт телекоммуникаций, НИУ ВШЭ, Москва, Россия;
[2] Лаборатория квантовых детекторов, МПГУ, Москва, Россия;
✉ ushakov.v.m@hse.ru

Аннотация. В то время как сети пятого поколения преимущественно функционируют в диапазоне 3–6 ГГц, для сетей 6G рассматривается использование миллиметрового (30–300 ГГц) и субтерагерцового (100–300 ГГц) диапазонов, что обусловлено наличием значительных частотных ресурсов и возрастающей потребностью в сверхвысоких скоростях передачи данных. Переход к этим диапазонам сопровождается рядом трудностей, одной из которых является высокая чувствительность к блокировке сигнала. В работе экспериментально исследуется метод поиска луча в субтерагерцовом беспроводном канале в условиях блокировки отраженного сигнала от фазово-сконфигурированной отражательной поверхности (ФСОП).

Ключевые слова: 6G, субтерагерцовый диапазон, фазово-сконфигурированная отражательная поверхность, блокировка сигнала.

Введение

Современные сети 5G преимущественно функционируют в диапазоне 3–6 ГГц, тогда как для систем 6G рассматривается использование миллиметрового и субтерагерцового диапазонов благодаря большому доступному частотному ресурсу. Одной из сложностей использования этих частот является подверженность сигналов затуханию при блокировке [1], и даже небольшие перемещения пользователя вызывают значительные потери уровня сигнала из-за высокой направленности передачи, что ухудшает устойчивость соединения [2]. Борьба с блокировкой должна носить комплексный характер, включая ее проактивное предсказание [3] и принятие мер для предотвращения потери сигнала с пользовательским устройством. В работе исследуется возможность сохранения соединения за счет использования альтернативного отраженного пути распространения сигнала с применением фазово-сконфигурированной отражательной поверхности (ФСОП), описанной ранее в [4], в условиях недоступности основного отраженного пути.

Материалы и методы

Экспериментальная установка включала направленный передатчик Tx, приемник Rx, ФСОП и дополнительную отражающую поверхность (ДОП). Передаваемый модулированный сигнал формировался на частотах 11–13,5 ГГц и после умножения частоты на 12 передавался на несущих 132–162 ГГц. На приемной стороне сигнал регистрировался детектором на основе диода Шоттки с последующим синхронным усилением. Как показано на рис. 1, приемник Rx располагался в двух положениях, обозначенных как п1 и п2. В первом эксперименте ФСОП являлась единственным отражающим элементом, а поиск луча выполнялся итерационным алгоритмом перестройкой несущей частоты с выбором той, что соответствует максимуму принимаемого сигнала. Во втором эксперименте основной отраженный путь подвергался блокировке, после чего исследовалась передача сигнала по альтернативному отраженному пути. В качестве дополнительной отражающей поверхности использовались медная пластина и газобетон. Различные положения приемника соответствовали двум направлениям приема сигнала.

Результаты и обсуждение

Как видно из рис. 2, в первом эксперименте частотная зависимость принимаемого сигнала имеет выраженный максимум при 136 ГГц. Это указывает на возможность поиска

луча за счет перестройки несущей частоты и выбора рабочей частоты для основного отраженного пути. Во втором эксперименте после блокировки исходного пути для медной пластины наблюдается отчетливый максимум при 158 ГГц, тогда как для газобетонной поверхности выраженный максимум не формируется, и отклик остается близким к уровню шумов. Следовательно, использование альтернативного отраженного пути определяется не только геометрией распространения, но и отражающими свойствами поверхности. Смещение частоты максимума с 136 до 158 ГГц показывает, что при переходе к альтернативному пути требуется частотная перенастройка.

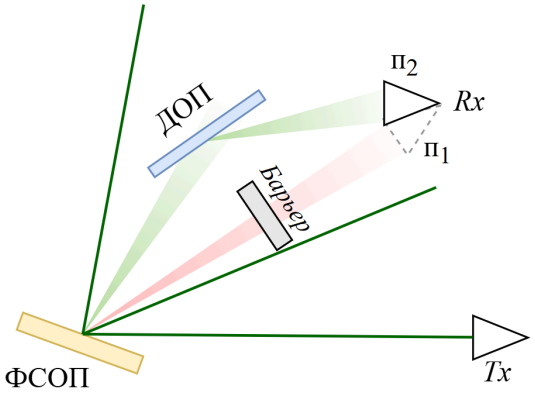


Рис. 1. Схема рассматриваемых экспериментов: положение 1 соответствует основному отраженному пути, положение 2 - альтернативному отраженному пути при блокировке исходного канала.

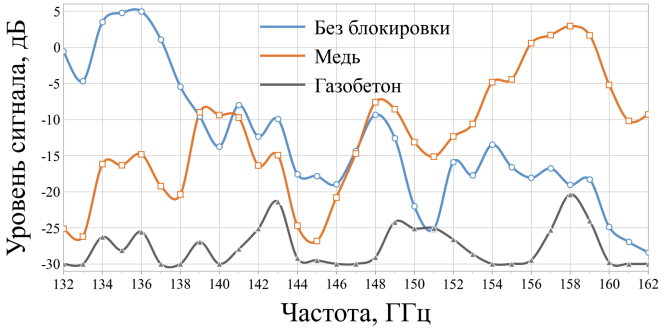


Рис. 2. Зависимость относительного уровня мощности от частоты для незаблокированного сигнала и для альтернативных путей с отражением от медной и газобетонной поверхностей.

Заключение

Показано, что ФСОП может использоваться не только для формирования основного отраженного пути, но и для поиска луча и адаптации канала при блокировке. При наличии эффективной отражающей поверхности, например, медной пластины, сигнал может быть восстановлен по альтернативному пути, тогда как для газобетона этот эффект выражен значительно слабее. Полученные результаты подтверждают перспективность частотной перестройки как механизма поиска луча и предотвращения потери связи при блокировке в субтерагерцовых системах.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-79-10279-П (в части разработки частотно-селективной поверхности) и Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ (в части радиофизических измерений).

Список литературы

[1] A. Shurakov, D. Moltchanov, A. Prikhodko, A. Khakimov, E. Mokrov, V. Begishev, I. Belikov, Y. Koucheryavy, G. Gol'tsman. Computer Communications, **201**, 48 (2023).

[2] D. Moltchanov, V. Beschastnyi, D. Ostrikova, Y. Gaidamaka, Y. Koucheryavy. Proc. 2021 IEEE Global Commun. Conf. (Madrid, Spain, 2021) p. 01.

[3] F. Zhinuk, A. Gaydamaka, D. Moltchanov, Y. Koucheryavy. IEEE Commun. Lett., **28** (7), 1703 (2024).

[4] A.A. Razakova, A.N. Prikhodko, A.V. Lvov, A.S. Shurakov, G.N. Gol'tsman. St. Petersburg State Polytech. Univ. J. Phys. and Math. **17** (3.1), 345 (2024).

Исследования эффективной диэлектрической проницаемости жидкостей в СВЧ-диапазоне методом классической молекулярной динамики

Е.В. Мартыненко✉, В.Д. Бурцев, Д.С. Филонов
Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation
✉martynenko.ev@phystech.edu

Аннотация В работе рассматривается и проверяется на модельных системах (воде и этиловом спирте при нормальном атмосферном давлении) метод моделирования спектра диэлектрической проницаемости. Для спирта получена частотная зависимость его диэлектрической проницаемости при температуре 300К, для воды получены зависимости в диапазоне температур 27–95 °C.

Ключевые слова: молекулярная динамика, измерение диэлектрической проницаемости, эффективные материальные параметры

Введение

С развитием технологий спутниковой связи все более перспективным становится применение жидких кристаллов в антенных системах [1]. Подбор жидкокристаллической смеси, обладающей необходимыми параметрами в СВЧ-диапазоне (например, большим градиентом диэлектрической проницаемости и малыми потерями), возможно проводить с помощью молекулярного моделирования [2]. Такой подход позволяет исследовать эффективные материальные параметры новых составов, не требуя при этом их синтеза.

В данной работе рассматривается метод получения частотной зависимости диэлектрической проницаемости, основанный на классической молекулярной динамике. С его помощью были получены спектры воды и этилового спирта. Полученные результаты были сверены с экспериментальными данными [7, 10], что позволило оценить точность подхода.

Методы

С помощью классической молекулярной динамики (реализованной программой LAMMPS) были получены траектории молекул длительностью 50 нс. Система из 512 молекул с периодическими граничными условиями была приведена в равновесное состояние в каноническом и затем в изотермо-изобарическом ансамбле. Параметры потенциалов взаимодействий атомов, упругости и длины связей были получены с помощью OPLS-AA [3] в случае спирта и взяты из модели TIP3P [4] в случае воды. Было установлено, что на результирующие значения диэлектрической проницаемости значительно влияет усечение дальнодействия потенциалов Кулона и Леннарда-Джонса. При получении итоговых спектров использовались неограниченный потенциал Кулона и усеченный до 12 Å потенциал Леннарда-Джонса. Кроме того, при моделировании воды длины и углы связей в молекулах были зафиксированы алгоритмом SHAKE [5], что приблизило значение статической диэлектрической проницаемости к полученному из открытых источников экспериментальному [7, 10]. Из-за ограничений этого алгоритма, к спирту такой подход не применялся. Из траекторий были получены спектры диэлектрической проницаемости с помощью соотношения флуктуации-диссипации.

Результаты и обсуждение

Тренд полученной зависимости диэлектрической проницаемости от частоты для воды (рис. 1) схож с экспериментальными данными: пик резонансного поглощения находится на соответствующих частотах, а на больших частотах действительная компонента диэлектрической проницаемости стремится к 1. Стоит также отметить, что с ростом температуры значение статической диэлектрической проницаемости падает. Отличие полученных значений от экспериментальных вплоть до 15% могут объясняться недостатками выбранной модели, а именно отсутствием учета поляризации (частичные

заряды не изменяются) [8], влиянием гибкости связей [9], отсутствием дополнительной точки для учета реального распределения частичного заряда в атоме кислорода [8], или недостаточными длительностью и размером ячейки моделирования.

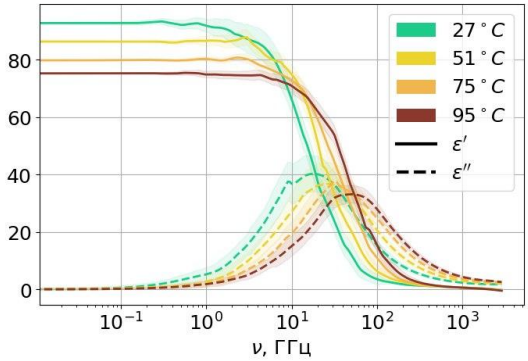


Рис. 1. Спектры диэлектрической проницаемости воды при разных температурах

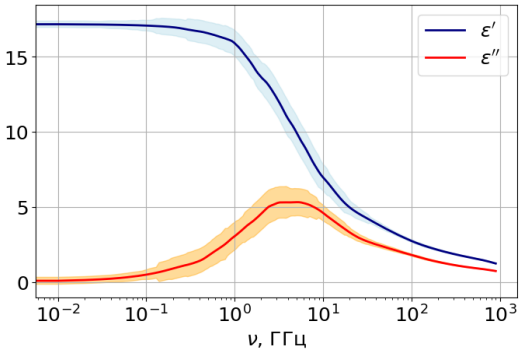


Рис. 2. Спектр диэлектрической проницаемости этилового спирта при нормальных условиях

Заключение

С помощью предложенного метода получения спектра диэлектрической проницаемости веществ были получены спектры для воды и этилового спирта, соответствующие экспериментальным данным. Предполагается, что этот метод возможно применить к моделированию свойств жидких кристаллов в СВЧ-диапазоне.

Благодарности

Работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда в рамках проекта №25-29-01550.

Список литературы

[1] P. Yaghmaee, O.H. Karabey, B. Bates, C. Fumeaux, R. Jakoby. Int. J. Antennas Propag., **2013**(1), 824214 (2013).
[2] M.R. Wilson, G. Yu, T.D. Potter, M. Walker, S.J. Gray, J. Li, N.J. Boyd. Crystals, **12**(5), 685 (2022).
[3] M.J. Robertson, J. Tirado-Rives, W.L. Jorgensen. J. Chem. Theory Comput., **11**(7), 3499 (2015).
[4] A. Price, C.L. Brooks. J. Chem. Phys., **121**(20), 10096 (2004).
[5] J.-P. Ryckaert, G. Ciccotti, H.J.C. Berendsen. J. Comput. Phys., **23**(3), 327 (1977).
[6] S. Carlson, F.N. Brünig, P. Loche, D.J. Bonthuis, R.R. Netz. J. Chem. Phys., **152**(20), 204505 (2020).
[7] A. Andryieuski, A. Lavrinenko et al. Sci. Rep., **5**, 13535 (2015).
[8] C. Vega, J.L.F. Abascal. Phys. Chem. Chem. Phys., **13**(44), 19663 (2011).
[9] L.M. Yan, C. Sun, H.T. Liu. Adv. Manuf., **1**(2), 160 (2013).
[10] H.-Y. Yao, Y.-C. Wang, T.-H. Chang. J. Mol. Liq., **353**, 118755 (2022).

Двунаправленный датчик скорости потока газа на основе технологии МЭМС

Стекольщиков Е. В.[✉ 1,2], **Лях М. А.**[1,2], **Уваров И. В.**[2]

[1]*Ярославский государственный университет имени П.Г. Демидова, Физическо-технический факультет, Ярославль, Россия*

[2] *Отдел микротехнологий - Ярославль ОФТИ им. К.А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт», Ярославль, Россия*

[✉]*e-mail: stekolshikov.egor.ru@gmail.com*

Аннотация. Представлен калориметрический датчик скорости потока газа на основе платиновых проводников длиной 1 мм и толщиной 130 нм, вывешенных над каналом в кремнии. Вывешивание выполнено методом плазмохимического травления кремния, исключающим обрыв проводников под действием капиллярных сил. Чувствительность датчика составляет 6.7 мВ/(м/с) для направления *X* и 6.0 мВ/(м/с) для направления *У* в диапазоне скорости потока 0 – 3 м/с при мощности нагрева 10 мВт.

Ключевые слова: МЭМС, датчик потока газа, двунаправленный датчик, платина, плазменное травление.

Введение

Тепловые МЭМС-датчики потока газа отличаются малыми размерами, низким энергопотреблением и высокой чувствительностью. Калориметрические датчики регистрируют перепад температур на фронте и спаде теплового облака, создаваемого нагревателем [1]. Чувствительный элемент (ЧЭ) содержит несколько вывешенных над каналом проводников и обеспечивает высокое быстродействие благодаря их малой теплоемкости. Предложена технология вывешивания платиновых проводников методом плазмохимического травления кремния. Исследована чувствительность датчика в двух взаимно перпендикулярных направлениях потока азота и азимутальная характеристика в потоке воздуха.

Материалы и методы

ЧЭ содержит две группы перпендикулярно расположенных проводников длиной 1 мм, вывешенных над каналом глубиной 180 мкм (рис. 1). В каждой группе центральный проводник шириной 10 мкм выполняет функцию нагревателя, а боковые шириной 2 мкм служат терморезисторами для измерения скорости потока. Нагреватель создает тепловое облако, которое смещается под действием потока. Возникающая разность температур терморезисторов преобразуется электронной схемой, измеряющей их сопротивление, в выходной сигнал, содержащий информацию о скорости и направлении потока.

Изготовление ЧЭ проводили на кремниевых пластинах диаметром 100 мм. После термического окисления и вскрытия окон в SiO_2 формировали Ti/Pt-проводники методом взрывной фотолитографии. Далее выполняли двухстадийное травление кремния: анизотропное травление в Bosch-процессе (плазма SF_6/C_4F_8) на глубину 180 мкм и последующее изотропное травление (плазма SF_6) для полного освобождения проводников.

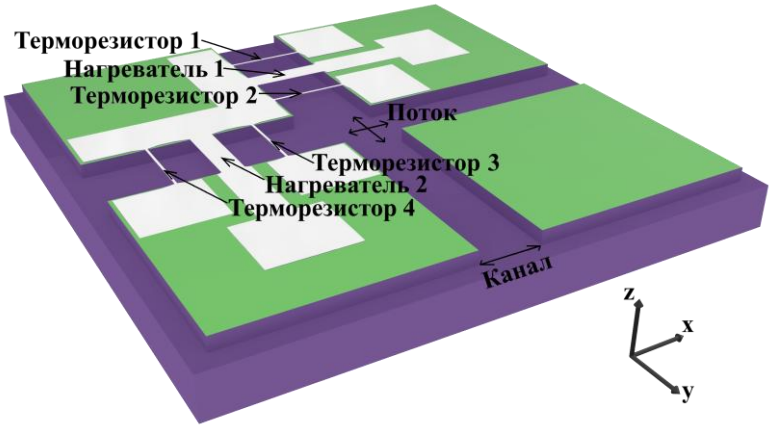


Рис. 1. Схематичное изображение ЧЭ двунаправленного датчика потока газа

Результаты и обсуждение

Чувствительность датчика представляла собой угловой коэффициент зависимости выходного сигнала пары терморезисторов ΔU от скорости потка V (рис. 2, а). Зависимость сохраняла линейный характер до скорости потока около 3 м/с. Чувствительность составляла 6.7 мВ/(м/с) и 6.0 мВ/(м/с) для направлений X и Y соответственно. Несовпадение чувствительности в разных направлениях было обусловлено технологическим разбросом характеристих терморезисторов. Чувствительность датчика была сопоставима с известными аналогами [2], однако достигалась при существенно меньшей мощности нагрева.

Азимутальная характеристика (рис. 2, б) предствляла собой зависимость выходных сигналов ортогональных пар терморезисторов от угла α, под которым поток набегает на датчик. За начало отсчёта принимали ось X. Каждая группа проводников имела область нечувствительности шириной около 60°, характеризующуюся малым изменением ΔU при изменении α. Однако область нечувствительности одной группы соответсвовала зоне высокой чувствительности другой группы. Таким образом, датчик охватывал все 360°.

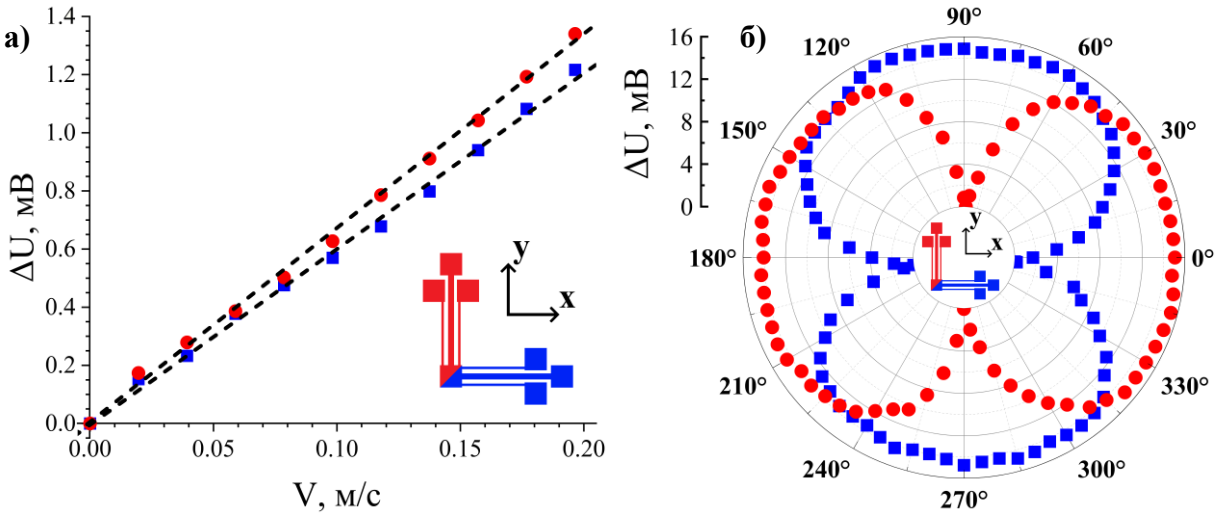


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала датчика от скорости потока (а) и азимутальная характеристика датчика (б)

Заключение

Результаты испытаний подтвердили эффективность предложенной конструкции датчика потока газа и технологии его изготовления. Комбинация двух ортогональных пар терморезисторов позволяла измерять модуль скорости потока в диапазоне от 0 до 3 м/с и его направление в диапазоне от 0 до 360°. Представленный датчик является перспективным для измерения свойств газов и определения направления звуковых волн.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

[1] Z. Gong, W. Di, Y. Jiang, Z. Dong, Z. Yang, H. Ye, H. Zhang, H. Liu, Z. Wei, Z. Tu, D. Li, J. Xiang, X. Ding, D. Zhang, H. Chen, Flexible calorimetric flow sensor with unprecedented sensitivity and directional resolution for multiple flight parameter detection. Nature Communications. 2024. V. 15. P. 3091.

[2] S. Kim, T. Nam, S. Park, Measurement of flow direction and velocity using a micromachined flow sensor. Sens. Actuators A. Phys. 2004. V. 114. N. 2–3. P. 312–318.

Полностью кремниевая фокусирующая пластина D-диапазона

М. И. Ершова [1,2]✉, **С. Б. Лаптева** [1], **Н. Р. Нурмаматов** [1,2], **Г. Н. Гольцман** [1,2,3], **А. С. Шураков** [1,2]

[1] Научно-исследовательский институт телекоммуникаций, НИУ ВШЭ, Москва, Россия;
[2] Лаборатория квантовых детекторов, МПГУ, Москва, Россия;
[3] Группа квантово-оптических интегральных микросхем, РКЦ, Москва, Россия.
✉ mershova@hse.ru

Аннотация. В беспроводных субтерагерцовых каналах связи потребуется реализация энергоэффективных способов формирования сверхнаправленного пучка и его управления. Высокие потери на распространение в сочетании с ограниченной выходной мощностью приемопередатчиков ведут к созданию антенных систем, способных быть адаптивными в условиях нестабильности среды, которые приводят к смещению пучка и потерям мощности сигнала. Для будущих систем важно правильно определить оптимальную диаграмму направленности, чтобы скомпенсировать влияние рассогласования тракта. Данная работа посвящена проектированию и изготовлению фокусирующей пластины для исследования диаграммообразования с помощью колец Френеля. Компактная и недорогостоящая полностью кремниевая пластина в составе монолитной интеграции с диодными элементами позволит реализовать электронное управление диаграммой направленности в широком угловом диапазоне на несущих частотах около 150 ГГц.

Ключевые слова: субтерагерцовый диапазон, фокусирующая пластина, диаграммообразование, управление пучком.

Введение

Ожидается, что следующие поколения систем связи будут развертываться в субтерагерцовом диапазоне частот (0.1–0.3 ТГц) [1]. Эффекты распространения электромагнитных волн в данной части спектра склоняют к необходимости в направленных приемопередающих модулях и манипулировании пучком в составе беспроводных систем. Проблемы, ранее обозначенные в разработке пятого поколения (5G) связи – блокировка пучка малыми и средними объектами, а также пользовательская микромобильность, вызванная биомеханикой человека, – приобретают первостепенное значение. Фазированные антенные решетки становятся сложны в интеграции с приемопередающими модулями из-за миллиметровых размеров. Соответственно, при освоении нового частотного диапазона требуется создание простых в реализации антенных систем, совместимых с энергоэффективными способами формирования пучка и его управления, исследуемых совместно с методами машинного обучения. Данная работа посвящена проектированию и изготовлению компактной, недорогостоящей полностью кремниевой фокусирующей пластины, которая может войти с состав интегрального диаграммообразующего устройства.

Материалы и методы

Проектирование фокусирующей пластины и теоретический анализ основных характеристик осуществлялись путём электромагнитного моделирования с помощью уравнений Максвелла. Для расчета радиусов колец использовалась теория зон Френеля, в которой происходит разбиение волнового фронта на зоны с переменной фазой. Радиус m-й зоны Френеля, r_m, рассчитан для дистанции передатчик – фокусирующая пластина, равной 1.5 мм, и пластина – приемник, равной 60 см. Изготовленная структура, изображенная на рисунке 1, получена методом лазерной литографии под «lift-off» и Bosch-травления кремния.

В ходе эксперимента пластина размером 17 × 17 мм центрировано размещалась на расстоянии 1.5 мм от волноводного тракта WR6.5 (сечение 1.6 × 0.8 мм). Сигнал несущей частоты 132–162 ГГц от генератора фокусировался на пластине и регистрировался

квадратичным детектором. Измерение диаграмм направленности пластины выполнялось в дальнем поле пластины в диапазоне ±60° при расстояниях 60 и 120 см.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 приведены графики диаграммы направленности, рассчитанной (т) и полученной экспериментально (э) фокусирующей пластины с коэффициентом усиления 13 дБи, шириной пучков по полуспаду мощности 32° и уровнем боковых лепестков 6–10 дБ на несущих частотах 148 и 155 ГГц. С повышением частоты в диапазоне 132–162 ГГц пучок все больше принимает гауссову форму, а увеличение расстояния засветки в 2 раза (э2), как видно на графике, не влияет на форму главного лепестка.

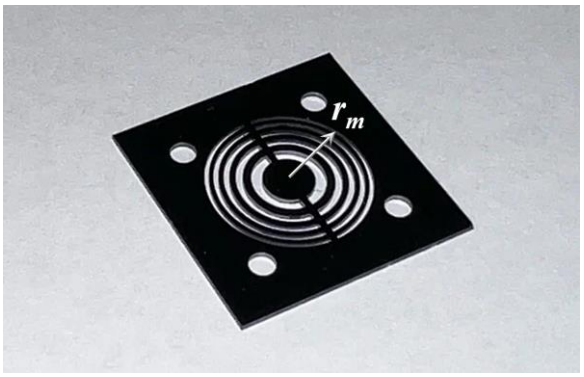


Рис. 1. Фотография фокусирующей пластины с обозначением радиусов колец.

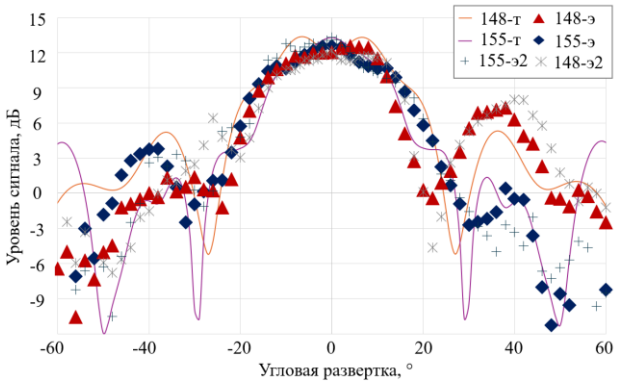


Рис. 2. Диаграммы направленности субтерагерцовой фокусирующей пластины.

В работе экспериментально подтверждена возможность формирования пучка с помощью полностью кремниевой фокусирующей пластины на несущих частотах 148 и 155 ГГц. Предложенная конструкция обеспечивает ширину пучка по полуспаду мощности 32° при коэффициенте усиления 13 дБи и уровнем боковых лепестков 6–10 дБ, сохраняя форму главного лепестка при изменении расстояния в дальнем поле. Компактная фокусирующая пластина, интегрированная с диодными элементами в составе беспроводного приемопередающего модуля, может найти применение в устройствах, способных поддерживать режимы одно- и многолучевой передачи, а также интегрироваться в интеллектуальные антенные системы диаграммообразования, работающих как в отраженном, так и в проходящем свете [2,3].

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Список литературы

[1] International Telecommunication Union, Report ITU-R M.2541-0 (Geneva, Switzerland, 2024).

[2] A. Shurakov et al. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., **25**(2), 706-710 (2026).

[3] S. Gharsalli et al. Progress in Electromagnetics Research B, 116 (2026).

Электрофизические свойства гибридных графен-нанотрубных пленок, функционализированных наночастицами оксидов металлов

М. М. Слепченков [1✉], **В. В. Шунаев** [1], **П. В. Барков** [1], **О. Е. Глухова** [1,2], **А.В. Куксин** [3], **А.Ю. Герасименко** [2,3]

[1] ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»;

[2] ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия

[3] Национальный исследовательский университет электронной техники МИЭТ, Москва, Россия

✉slepchenkovm@mail.ru

Аннотация. В работе проводится исследование электрофизических свойств функционализированных наночастицами оксидов металлов гибридных пленок, образованных ковалентно связанными листом графена и вертикально ориентированными одностенными углеродными нанотрубками типа «зигзаг». В качестве оксидов металла рассматриваются оксиды алюминия Al_2O_3, титана TiO_2 и гафния HfO_2. Используя метод функционала плотности в приближении сильной связи с самосогласованным вычислением заряда, рассчитаны электронно-энергетические и электрические характеристики исследуемых гибридных пленок с различной концентрацией наночастиц оксидов металлов. В рамках формализма Ландауэра-Буттикера дается предварительная численная оценка электрической проводимости функционализированных гибридных углеродных пленок.

Ключевые слова: углеродные гибридные пленки, оксиды металлов, электрическая проводимость.

Введение

Благодаря своим многообещающим структурным и физическим свойствам углеродные нанотрубки (УНТ) и графен являются объектом многих фундаментальных и прикладных исследований на протяжении десятков лет [1]. Успешные попытки синтеза гибридного углеродного наноматериала на основе УНТ и графена стимулировали развитие исследований, направленных на выявление свойств и поиск потенциального применения графен-нанотрубных гибридов [2]. Используя методы атомистического моделирования, в данной работе проводится прогностический анализ влияния оксидов металлов на электронно-энергетические и электропроводные характеристики гибридных углеродных пленок, образованных листом графена и бесшовно соединенными с ним одностенными УНТ (ОУНТ) типа «зигзаг» с индексами хиральности (16,0). В качестве оксидов металлов рассматриваются наночастицы оксида алюминия Al_2O_3, оксида титана TiO_2 и оксида гафния HfO_2.

Материалы и методы

Для получения атомистических моделей гибридных углеродных квази-2D пленок графен-ОУНТ (16,0) с бесшовным соединением графена и ОУНТ применялся оригинальный метод автоматизированного построения атомных сеток бесшовных соединений произвольной формы из углеродных наноструктур [3]. Уточнение геометрических параметров супер-ячейки проводилось путем реоптимизации атомной структуры супер-ячейки с помощью квантового метода функционала плотности в приближении сильной связи с самосогласованным вычислением заряда SCC DFTB [4]. Электропроводность исследуемых структур рассчитывалась в рамках формализма Ландауэра–Буттикера [5]

$$G = 2\,e^2/h \int_{-\infty}^{\infty} T(E) F_T(E - E_F) dE\,, \qquad (1)$$

где e^2/h — квант проводимости, T(E) — усредненная функция пропускания электронов, E_F — уровень Ферми электродов, F_T — функция теплового уширения энергетических уровней. Расчеты выполнялись при температуре 300 К.

Атомная структура супер-ячейки квази-2D углеродной пленки с бесшовным соединением графена и ОУНТ (16,0) представлена на рис. 1. Для расчетов были выбраны кристаллические ячейки Al_2O_3 кубической сингонии с пространственной группой Fd-3m, TiO_2 тетрагональной сингонии с пространственной группой $I4_1/amd$ и HfO_2 моноклинной сингонии с пространственной группой $P2_1/c$. Кристаллические ячейки оксидов металлов были взяты из международной базы данных Materials Project (https://next-gen.materialsproject.org/). Для каждой рассматриваемой наночастицы оксидов металлов был получен кластер с минимально возможным числом атомов, характеризующийся энергетической устойчивостью.

1. Результаты и обсуждение

Рассматривались случаи адсорбции четырех кластеров наночастиц оксидов металлов на поверхности гибридной углеродной пленки (максимально возможная концентрация для выбранной супер-ячейки). На рис. 2 в качестве примера показана структура углеродной пленки графен-ОУНТ(16,0) с 4 кластерами HfO_2. Установлено, что по сравнению с положением уровня Ферми углеродной пленки графен-ОУНТ(16,0) уровень Ферми гибридной структуры графен/ОУНТ(16,0)/Al_2O_3 сместился вниз по оси энергий, в то время как для структур графен-ОУНТ/TiO_2 и графен-ОУНТ/HfO_2 уровень Ферми сдвигается вверх по оси энергии, свидетельствуя о появлении дополнительных уровней в валентой зоне. Электропроводность структуры графен/ОУНТ(16,0)/Al_2O_3 составляет 0.02 мСм, оставаясь того же порядка величины, что и для пленки графен/ОУНТ(16,0) (0.07 мСм), а электропроводности структур графен-ОУНТ(16,0)/TiO_2 и графен-ОУНТ(16,0)/HfO_2 составляют 0.05 мСм и 0.12 мСм соответственно.

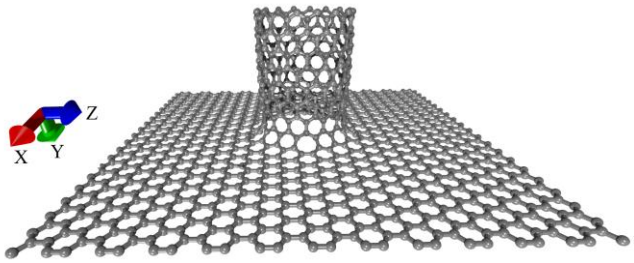


Рис. 1. Супер-ячейка квази-2D гибридной углеродной пленки графен/ОУНТ (16,0).

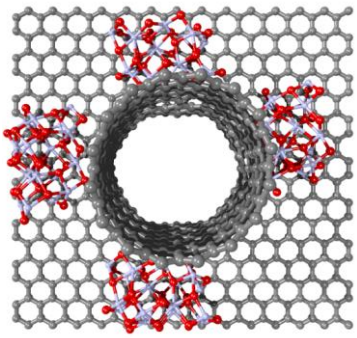


Рис. 2. Супер-ячейка композитной пленки графен-ОУНТ (16,0) с 4 кластерами HfO_2.

Заключение

Таким образом, электрофизическими свойствами гибридной углеродной пленки можно управлять за счет адсорбции наночастиц оксидов металлов на ее поверхности, варьируя типом и количеством наночастиц.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-79-10316.

Список литературы

[1] M. V. Kharlamova, C. Kramberger, A. I. Chernov. Nanomaterials, **13**(7), 126 (2023).
[2] S. Pyo, Y. Eun, J. Sim, K. Kim, J. Choi. Micro and Nano Syst. Lett, **10**(1), 9 (2022).
[3] G. Zhang, O.E. Glukhova. Comput. Mater. Sci., 184, 109943 (2020).
[4] M. Elstner, G. Seifert. Phil. Trans. R. Soc. A, **372**, 20120483 (2014).
[5] S. Datta, Coherent transport, в Quantum Transport: Atom to Transistor (New York, Cambridge University Press, 2005) pp. 217–251.

Применение плоских и объемных метаповерхностей для защиты наземной радиоаппаратуры от помех в дальней зоне

В. О. Игнатович [1✉], **Н. Н. Кисель** [1]

[1] Southern Federal University, Taganrog, Russia;

✉vignatovich@sfedu.ru

Аннотация. В данной работе рассматриваются вопросы зеркального отражения от метаповерхности в сравнении с отражением от сплошного металлического листа в широком диапазоне частот от 4 до 40 ГГц. Рассмотрены различные варианты исполнения плоских метаповерхностей, проанализирована зависимость амплитуды поля обратного рассеяния от толщины подложки. Снижение значений с ростом толщины подложки не зафиксировано. Рассмотрены четыре варианта исполнения металлических элементов на верхнем слое. В заключении выполнено моделирование 3D-метаповерхности с квазислучайным распределением толщин подложки. 3D-метаповерхность способна выполнять широкополосное снижение поля обратного рассеяния без нанесения металлических элементов на верхнем слое.

Ключевые слова: метаповерхности, 3D-метаповерхности, дальняя зона, обратное рассеяние, помехоустойчивость.

Введение

В течение нескольких лет набирает обороты изучение земных орбит и ближнего космоса. Параллельно идет активное развитие технологий спутниковой связи. Поэтому вопросы передачи сигналов между орбитальными системами и наземной аппаратурой становятся актуальными. Особенно актуальна задача снижения влияния паразитного излучения в дальней зоне для прецизионных задач, в частности – в области радиоастрономии. Развитие технологий связи в миллиметровых волнах и ТГц-диапазоне частот идет небыстро, поэтому исследователи продолжают находить технические решения, позволяющие совершенствовать стандарты беспроводной связи в СВЧ-диапазоне. Одной из технологий, обладающих потенциалом в данной области, являются метаповерхности. Метаповерхности имеют широкий спектр возможных применений и могут решать различные электродинамические задачи – управление фазовым фронтом поля, диффузное рассеяние падающей волны, частотная селекция, поляризационная конверсия и др. Особый интерес для изучения представляют 3D-метаповерхности, которые представляют собой управляемые покрытия, в которых присутствует неоднородность толщины подложки. Существует запрос на применение поверхностей, на верхний слой которых не требуется наносить металлические элементы. Причина – отсутствие долгосрочных эффектов, вызванных диффузией на границе раздела сред. Применение метаповерхностей в задаче снижения уровня помех в дальней зоне будет рассмотрено в настоящей работе.

Материалы и методы

В данной работе рассматриваются вопросы зеркального отражения от метаповерхности в сравнении с отражением от сплошного металлического листа в широком диапазоне частот от 4 до 40 ГГц. В постановке задачи будем исходить из того, что частота помехового сигнала остается неизвестной. Задача сводится к снижению уровня обратного рассеяния при облучении поверхности плоской падающей волной. Для анализа каждого варианта было выполнено два моделирования – моделирование рассеяния падающего электромагнитного поля на поверхности и моделирование распространения электромагнитного поля на металлическом листе. Анализировать качество снижения уровня обратного рассеяния возможно через RCS Reduction. В качестве метода решения электродинамической задачи использовался метод конечных разностей во временной области, представленный в САПР CST Studio Suite. В качестве материала для подложки был использован кремний, материал металлических элементов – графен. Конфигурация металлических элементов на верхнем слое обуславливает частотные свойства поверхности по причине смещения резонансной частоты поверхности в исследуемом диапазоне. Для проведения были смоделированы четыре геометрии металлических элементов –

разомкнутый кольцевой резонатор и три патча сложной формы. В завершении работы было выполнение моделирование 3D-метаповерхности с квазислучайным распределением толщин подложек ячеек. Целью является сравнение эффективности применения 3D-метаповерхности и плоских метаповерхностей в задаче снижения поля обратного рассеяния.

1. Результаты и обсуждение

Был проведен анализ зеркального отражения от однородной метаповерхности без патчей. Проведено исследование влияния толщины подложки на уровень обратного рассеяния поверхности. Толщина подложки, как параметр, не оказывает существенного влияния на амплитуду поля обратного рассеяния поверхности. Значения амплитуды поля обратного рассеяния не изменились. Изменение толщины подложки оказывает влияние на частотные свойства, но эффекты не носят системный характер. Также был проведен анализ влияния конфигурации металлических элементов на верхнем слое плоских метаповерхностей на уровень обратного рассеяния. Удалось выяснить, что снижение поля обратного рассеяния не превышает 5 дБ в широком диапазоне частот. В узких областях спектра шириной от 250 МГц до 1 ГГц у каждой плоской метаповерхности наблюдаются резонансы, в пределах которых уровень обратного рассеяния резко снижается. Форма и размер металлических элементов в данных случаях определяют значение резонансной частоты. Моделирование рассеяния поля на 3D-метаповерхности дало следующие результаты. Зафиксировано широкополосное снижение амплитуды поля обратного рассеяния. Данное свойство не зафиксировано при анализе плоских метаповерхностей. Среднее снижение амплитуды поля обратного рассеяния на 3D-метаповерхности превышает аналогичное снижение на плоских метаповерхностях минимум на 5 дБ, даже при отсуствии металлических элементов на верхнем слое.

Заключение

Метаповерхности как способ подавления помех в дальней зоне продемонстрировали свою актуальность в задачах беспроводной связи, радиоастрономии и ряде других. В отдельных задачах 3D-метаповерхности могут быть более актуальны, чем плоские поверхности, в частности – в агрессивных средах, способствующих диффузии материалов. 3D-метаповерхности будут иметь практическое применение в задачах управления фазой и поляризацией поля. Данные вопросы уже активно рассматриваются. Вопросы поляризационной конверсии с применением 3D-метаповерхности планируются к рассмотрению в последующих работах.

Благодарности

Моделирование проведено при поддержке кафедры Антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления ЮФУ

Список литературы

[1] Glybovski S. B. et al. Metasurfaces: From microwaves to visible //Physics reports. –2016. – T. 634. – pp. 1-72.

[2] Simovski C., Tretyakov S. An introduction to metamaterials and nanophotonics. – Cambridge University Press, 2020.

[3] Caloz C., Achouri K. Electromagnetic metasurfaces: Theory and applications. –John Wiley & Sons, 2021.

Устройство управления характеристик антенной системы на основе метаповерхности

Г.В. Антошкин ✉, **В.Д. Бурцев**, **Д.С. Филонов**
«Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Долгопрудный, Российская Федерация
✉ antoshkin.gv@mipt.ru

Аннотация. В работе предложено оригинальное схемотехническое конструкторское решение, обеспечивающее формирование управляющих сигналов для переключаемой отражательной метаповерхности на основе жидких кристаллов. Разработанное устройство позволяет прикладывать регулируемое напряжение к электродам, за счет чего достигается контролируемое изменение диэлектрической проницаемости и, как следствие, фазового отклика метаповерхности. Показано, что предложенный подход позволяет создавать перестраиваемые антенные системы с низким энергопотреблением, высокой скоростью перенастройки и отсутствием механических узлов. Описываемый подход может быть применен при проектировании телекоммуникационных устройств с электрическим управлением лучом.

Ключевые слова: жидкий кристалл, метаповерхность, формирование луча.

Введение

В последние десятилетия наблюдается стремительное развитие систем беспроводной связи, радиолокации и когнитивных радиоэлектронных систем, требующих создания антенных устройств с динамически перестраиваемыми характеристиками [1]. Особый интерес в этой области представляют метаповерхности с подложкой из жидких кристаллов из-за возможности изменения диэлектрической проницаемости посредством прилагаемого напряжения. Важным элементом системы формирования и управления лучом является устройство формирования воздействующих сигналов, обеспечивающее независимое приложение регулируемого напряжения к каждому элементу метаповерхности. Это позволяет формировать градиент диэлектрической проницаемости и, как следствие управлять лучом. Отсутствие в настоящее время выпускаемых серийно лабораторных многоканальных драйверов для жидкокристаллических структур стало толчком к разработке собственного электронного устройства.

Методы

Опираясь на характеристики серийно выпускаемых формирователей сигналов для жидкокристаллических структур из области оптики (оптические аттенюаторы, устройства вращения поляризации) и работы в сфере антенн на жидких кристаллах [2] были сформированы требования к устройству. На первом этапе была спроектирована электрическая схема (рис.1) для управления одним элементом отражающей метаповерхности, предназначенной для работы в Ku-диапазоне. Управление жидким кристаллом достигается подачей на электроды однополярного или биполярного напряжения с частотой до нескольких килогерц, при этом время реакции зависит от толщины и марки кристалла, и, как правило, составляет не более 1-2 секунд.

Схема включает в себя два 12-разрядных цифроаналоговых преобразователя (ЦАП) DD1 и DD2. Их выходы подключены к операционным усилителям (ОУ) DA1 и DA2, включенным по неинвертирующей и инвертирующей схемам соответственно. В схеме применяются распространённые четырехканальные ОУ с максимальным напряжением питания 36В OPA4197 (Texas Instruments). Таким образом, на выходе DA1 может быть сформировано напряжение от 0 до 33В, а на выходе DA2 – от -33 до 0В. Для переключения между напряжениями ОУ используется широко применимый полевой транзистор BSS138, а управление его затвором осуществляется при помощи транзисторной оптопары. Управление сигналом прямоугольной формы с частотой в диапазоне от 0.5 до 300 Гц, как и цифровое управление ЦАП, осуществляется микроконтроллером. Схема потребляет три напряжения: ±30 В и +3.3В, — формируемые внешним блоком питания. Реализация количества управляемых каналов более 4 возможна путем масштабирования приведенной

схемы. На одной четырехслойной печатной плате размещается 4 ЦАП и управляющий микроконтроллер STM32L010F4P6 (STMicroelectronics). На двусторонний штыревой соединитель выведены цепи всех питающих напряжений и шинный интерфейс I2C, позволяющий параллельно объединить до 128 однотипных плат (до 512 независимых каналов).

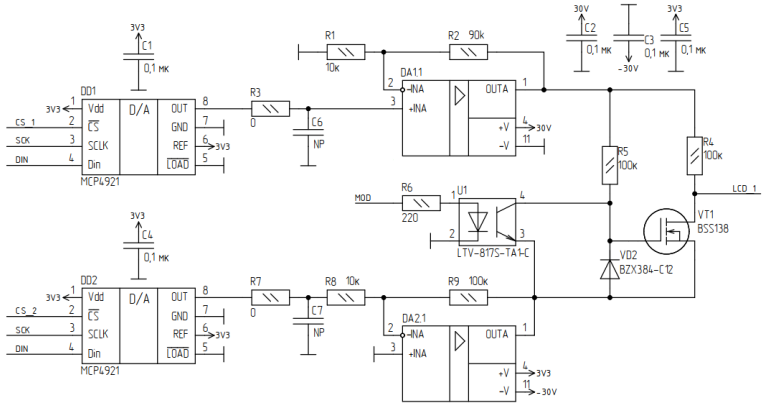
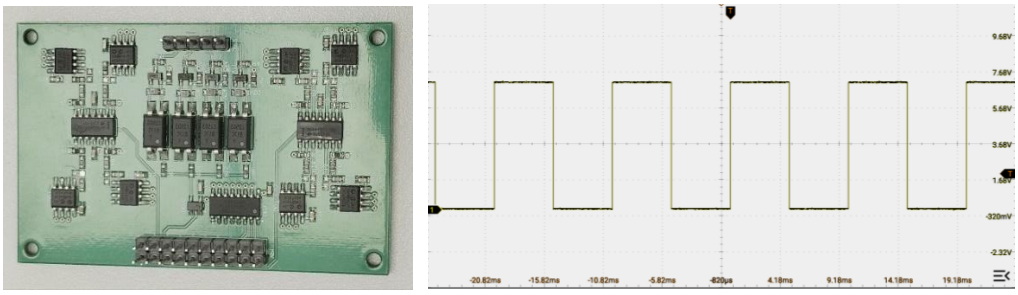


Рис.1. Фрагмент схемы формирования управляющего сигнала.

Результаты и обсуждение

На рис. 2(а) показано фото собранного четырехканального модуля. В качестве управляющего контроллера использовалась отладочная плата NUCLEO-F103RB (STMicroelectronics). На рис. 2(б) показан пример сформированного сигнала с параметрами Vmin = 0В, Vmax = 7В, f = 100 Гц с резистивной нагрузкой на выходе 100 кОм



а б

Рис.2. Внешний вид собранного модуля на 4 канала (а) и сформированный сигнал (б).

Заключение

В работе предложена конструкция устройства, обеспечивающего управление многоканальными жидкокристаллическими структурами. Показано, что устройство способно формировать сигналы в требуемом диапазоне напряжений, что позволит использовать его для проведения исследований с различными структурами. Возможность масштабирования позволяет реализовать раздельное формирование управляющих сигналов.

Благодарности

Работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда в рамках проекта №25-29-01550.

Список литературы

[1]. Ma, S.; Li, X.-N.; Li, Z.-D.; Ding, J.-J. Electronic Beam Steering Metamaterial Antenna with Dual-Tuned Mode of Liquid Crystal Material. Sensors 2023, 23, 2556.

[2]. H. L. Margaryan et al., “Optimizing of Control Signal Shape for Improving of Time Characteristics of Liquid Crystal Based Devices,” Molecular Crystals and Liquid Crystals, vol. 561, no. 1, pp. 170–176, 2012.

Влияние флуктуаций показателя преломления на распространение света в диэлектрическом двухмерном волноводе

И.В. Бабичек [1]✉, **М.Ю. Барабаненков**[1,2]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия;

[2] Акционерное общество «Научно-исследовательский институт микроэлектроники», Зеленоград, Россия

✉babichek.iv@phystech.edu

Аннотация. В работе исследуется влияние случайных объёмных флуктуаций показателя преломления на распространение оптического излучения в планарном волноводе. С использованием формализма уравнения Дайсона и приближения Бурре получены аналитические выражения для поправки к постоянной распространения моды. Получены выражения для поправки к эффективному показателю преломления и коэффициенту затухания.

Ключевые слова: Здесь приводятся 3-5 ключевых слов.

Введение

В интегральной фотонике минимизация потерь распространения излучения остаётся ключевой задачей. Основным механизмом потерь выступает рассеяние на технологических неоднородностях показателя преломления, возникающих при производстве структур [1]. Эти неоднородности могут иметь объёмный характер или поверхностный. Для их количественного описания необходим строгий статистический подход, гарантирующий сохранение энергии. В данной работе применяется формализм уравнений Дайсона и Бете–Солпитера совместно с оптической теоремой в теории многократного рассеяния волн [2-4]. Цель данной работы — получение аналитических выражений для поправки к эффективному показателю преломления одномодового планарного волновода при наличии мелкомасштабных случайных неоднородностей.

Материалы и методы

Среднее поле в волноводе описывается скалярным волновым уравнением, в которое входит массовый оператор, учитывающий влияние рассеивающей среды на среднюю волну.

$$(\nabla^2 + k^2 - M)\langle\psi\rangle = 0$$

В приближении Бурре (первый порядок разложения) массовый оператор выражается через функцию Грина невозмущённого волновода G0 [5] и корреляционную функцию флуктуаций диэлектрической проницаемости B:

$$M(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}') = G_0(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')B(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')$$

$$B(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}') = k^4\sigma^2 \exp\left(-\frac{(r-r')^2}{l^2}\right)$$

где σ, l — глубина модуляции показателя преломления и длина корреляции флуктуаций.

Данный формализм удовлетворяет оптической теореме [2], т.е. закону сохранения энергии, в первом порядке разложения, что является необходимым условием физической корректности модели.

Результаты и обсуждение

Был рассмотрен 2D волновод в координатах x(поперечная), z(продольная). Поправки к показателю распространения m-й моды получаются из уравнения

$$\beta^2 - \beta_m^2 + M_{mm}(\beta) = 0$$

где $M_{mm}(\beta)$ — Фурье-образ массового оператора по продольной координате в проекции на m-ю поперечную моду:

$$M_{mm}(q) = \iint \psi_m(x)\widetilde{M}(x,x',q)\psi_m^*(x')dxdx'$$

$$\widetilde{M}(x,x',q)=\int M(x,x',z,z')e^{-iq(z-z')}d(z-z')$$

Для действительной и мнимой части массового оператора получены следующие выражения (v.p. — интеграл в смысле главного значения по Коши):

$$\mathrm{Re}\,M_{mm}(q)=\frac{\sigma^2\sqrt{\pi}l}{2\pi}\left(\sum\nolimits_n O_{mn}I_n(q)+\int_{-\infty}^{+\infty}O_{m\beta}I_\beta(q)d\beta\right)$$

$$\mathrm{Im}\,M_{mm}(q)=-\frac{\sigma^2\sqrt{\pi}l}{4}\left(\sum\nolimits_n O_{mn}D_n(q)+\int_{-\infty}^{+\infty}O_{m\beta}D_\beta(q)d\beta\right)$$

$$O_{mn}(q)=\iint\psi_m(x)\psi_m^*(x')\psi_n(x)\psi_n^*(x')\exp\left(-\frac{(x-x')^2}{l^2}\right)dxdx'$$

$$I_n(q)=v.p.\int dq'\,\frac{e^{-(q-q')^2l^2/4}}{q'^2-\beta_n^2}$$

$$D_n(q)=\frac{1}{|\beta_n|}\left(e^{-(q-\beta_n)^2l^2/4}-e^{-(q+\beta_n)^2l^2/4}\right)$$

Выражения с индексом бета получаются заменой β_n на β.

Тогда поправка первого порядка к постоянной распространения m-й моды волновода:

$$\Delta\beta_m\approx\frac{M_{mm}(\beta_m)}{2\beta_m}$$

В частности:

$$\Delta n_{eff}=\frac{\mathrm{Re}\,M_{mm}(\beta_m)}{2k_0^2n_{eff}}$$

$$\alpha_{total}=\frac{\mathrm{Im}\,M_{mm}(\beta_m)}{2\beta_m}=-\frac{2}{d}$$

где d — коэффициент экстинкции, имеющий размерность длины.

Данный подход позволяет получить выражения и для других систем, например для кольцевого резонатора, с помощью замены функции Грина на подходящую. Метод применим в приближении малых неоднородностей $kl\ll 1$. Пренебрежение поляризационным членом уравнения Гельмгольца ограничивает применимость результатов случаем объёмных неоднородностей. Расчёт рассеяния на поверхностных неоднородностях и его влияние на характеристики устройств интегральной фотоники (резонаторы и интерферометры) будет приведён в следующих работах.

Заключение

На основе уравнения Дайсона для средней функции Грина выведена формула для поправки к постоянной распространения мод планарного волновода со случайными объёмными неоднородностями. Показано, что в приближении Бурре затухание моды определяется мнимой частью диагонального матричного элемента массового оператора с учётом вклада всех состояний спектра. Полученное выражение удовлетворяет оптической теореме в первом порядке разложения, что подтверждает физическую корректность расчёта потерь. Результаты могут применяться для оценки допустимых уровней технологических неоднородностей в интегрально-оптических волноводах и планарных световодах технологии кремний на изоляторе.

Список литературы

[1] K.K. Lee, D.R. Lim, L.C. Kimerling, J. Shin, F. Cerrina. Opt. Lett., **26**, 1888 (2001).

[2] Ю.Н. Барабаненков, В.М. Финкельберг. ИВУЗ, Радиофизика, **11**, 719 (1968).

[3] Yu.V. Gulyaev, Yu.N. Barabanenkov, M.Yu. Barabanenkov, S.A. Nikitov. Phys. Rev. E., **72**, 026602 (2005).

[4] Ю.Н. Барабаненков. УФН, **117**, 50 (1975).

[5] А.А. Егоров. Вестник РУДН, Серия Физика. **13**, 5 (2005)

Суб-терагерцовый оптоэлектронный модулятор на основе перфорированного кремния

П. В. Рожкова [1,2✉], **А. Н. Приходько** [1,2,3], **Г. Н. Гольцман** [1,2,3], **А. С. Шураков** [1,2]

[1] Научно-исследовательский институт телекоммуникаций, НИУ ВШЭ, Москва, Россия;

[2] Лаборатория квантовых детекторов, МПГУ, Москва, Россия;

[3] Группа квантово-оптических интегральных микросхем, РКЦ, Москва, Россия

✉prozhkova@hse.ru

Аннотация. В последние несколько десятилетий область применения суб-терагерцовой техники существенно расширилась. С повышением рабочих частот, появляется необходимость в устройствах способных обрабатывать высокие частоты без существенного ухудшения сигнала с минимальными потерями при передаче, а также способных преобразовывать оптические сигналы и осуществлять амплитудно-фазовую модуляцию. В этом случае востребованы суб-терагерцовые фотонные интегральные схемы, позволяющие эффективно перейти от традиционной электроники к оптоэлектронике. В данной статье мы описываем оптоэлектронный модулятор на кремниевом волноводе в диапазоне 130-160 ГГц. Вносимые потери модулятора во всем исследуем диапазоне не хуже чем -5.4 дБ. На центральной рабочей частоте 145 ГГц вносимые потери составили -1.8 дБ, а возвратные потери составили -24 дБ. При оптическом возбуждении полупроводника наблюдается контрастная модуляция с коэффициентом ослабления до 19 дБ.

Ключевые слова: преобразователь мод, модуляция сигнала, субтерагерцовый диапазон.

Введение

В последние несколько десятилетий область применения суб-терагерцовой техники существенно расширилась. С повышением рабочих частот, появляется необходимость в устройствах способных обрабатывать высокие частоты без существенного ухудшения сигнала с минимальными потерями при передаче, а также способных преобразовывать оптические сигналы и осуществлять амплитудно-фазовую модуляцию. [1]. Для быстро развивающейся области терагерцовых технологий синергия электронной и фотонной обработки суб-терагерцовых сигналов — один из наиболее перспективных вариантов. В связи с чем, востребованы суб-терагерцовые фотонные интегральные схемы (ФИС), позволяющие эффективно перейти от традиционной электроники к оптоэлектронике. С переходом к ФИС появляется возможность сделать передачу данных быстрее, энергоэффективнее и надежнее. ФИС на основе кремния (Si) позволяют создавать суб-ТГц схемы с многочисленными пассивными и активными компонентами, взаимодействующими через диэлектрические среды с низкими потерями и способными осуществлять амплитудно-фазовую модуляцию. Как ранее сообщалось в [2], мы продолжаем проектирование ФИС на основе кремниевых волноводов и расширяем рабочую полосу устройства. В данной работе мы описываем оптоэлектронный модулятор на перфорированном кремниевом волноводе для диапазона частот 130-160 ГГц с центральной рабочей частотой в 145 ГГц. Проведены расчеты для оценки вносимых потерь и влияния оптически возбужденного полупроводника.

Материалы и методы

Электромагнитная модель оптоэлектронного модулятора представляет собой диэлектрическую волноводную платформу на основе Si с апериодической решеткой, покрытой металлом. Металлизация задана через граничные условия конечной проводимости. Ширина сердцевины волновода составляет 720 мкм, а ширина щелевой линии — 11.7 мкм. Структура возбуждается волновыми портами размером 1.6 × 0.8 мм. Расположением портов задается направление моды. Моделирование осуществляется с помощью решений уравнения Максвелла методом конечных элементов. Для оптимизации времени расчетов была добавлена симметрия в H-плоскости волноводной структуры. При

симуляции фотовозбуждения полупроводника размер зоны составил 1 мм × 11.7 мкм, поверхностное сопротивление составило 167 Ом/□ [3]. Рассматриваемая электромагнитная модель представлена на Рис.1.

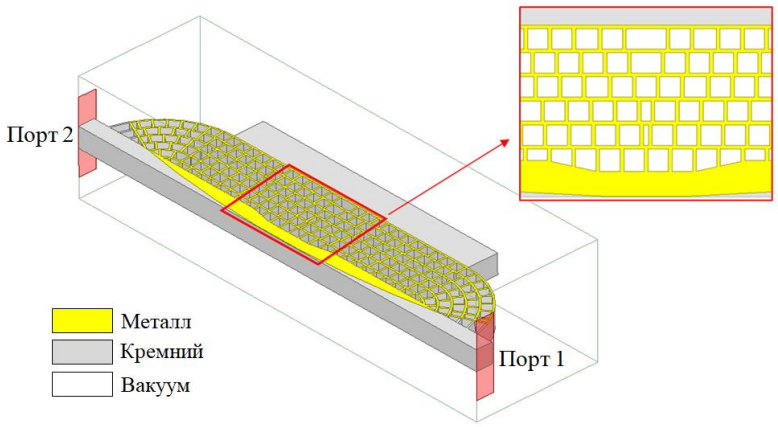


Рис. 1 Электромагнитная модель оптоэлектронного модулятора.

Результаты и обсуждение

Моделирование было проведено для диапазона частот от 130 ГГц до 160 ГГц. Для оценки вносимых и возвратных потерь структуры был проведен анализ матриц параметров рассеяния (S-параметров). По итогам моделирования, вносимые потери структуры (дБ(S21)) без фотовозбуждения полупроводника не хуже чем -5.4 дБ, в то время как возвратные потери (дБ(S11)) практически во всем спектре не хуже чем -13.7 дБ, что показано на Рис.2.

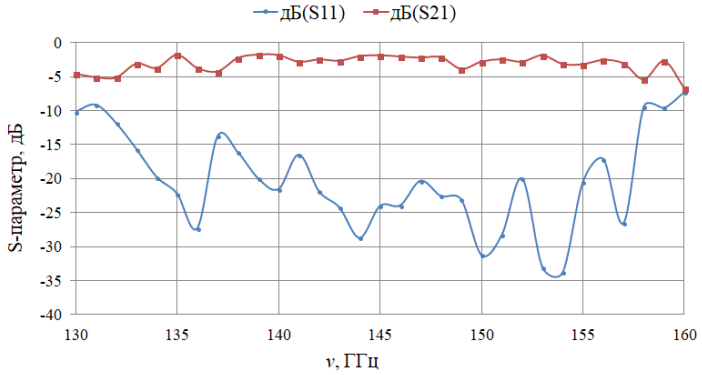


Рис. 2 S-параметры структуры без оптического возбуждения полупроводника.

На центральной рабочей частоте $\nu = 145$ ГГц вносимые потери составляют -1.8 дБ, в то время как возвратные потери составляют -24 дБ. При моделировании структуры при фотовозбуждении полупроводника наблюдается контрастная модуляция с коэффициентом ослабления до 19 дБ. Сравнение расчетных и измеренных характеристик будет представлено на конференции.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Программы развития НИУ ВШЭ на 2025–2036 гг. в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» национального проекта «Молодежь и дети».

Список литературы

[1] Alkhlefat, Y., Esmail, M. A., Ragheb, A. M., Idrus, S. M., Iqbal, F. M., & Alshebeili, S. A. IEEE Access, **12**, 133521-133531 (2024).

[2] Shurakov, A., Belikov, I., Prikhodko, A., Ershova, M., & Goltsman, G. Applied Sciences, **13**(10), 5892 (2023).

[3] Sasao K., Monnai Y. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, **10**(3), 256-259 (2020).

Различия резистивного отклика на пары изопропанола, этанола и воды для карбоксилированных и амидированных углеродных нанотрубок

А. В. Ромашкин ✉
Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Москва, Россия;
✉romaleval@gmail.com

Аннотация. Исследовались резистивные отклики на этанол, 2-пропанол и влажность нанослоев карбоксилированных (CCNT) и амидированных (ACNT) углеродных нанотрубок, аэрозольно нанесенных из дисперсий. Для ACNT отклик на спирты и H_2O приводил к снижению сопротивления, а для CCNT — к росту, но управление проводимостью полем затвора имело *p*-тип как для ACNT, так и CCNT. Из анализа концентрационных зависимостей отклика адсорбция спиртов существенно различна для этих УНТ, отличающихся лишь типом функциональных групп. Отклик на спирты при фоновой влажности приводил к росту сопротивления для ACNT и CCNT. Такое поведение позволит распознавать спирты на фоне влажности воздуха группой таких сенсоров.

Ключевые слова: углеродная нанотрубка, адсорбция, спирт, резистивный отклик.

Введение

Наноуглеродные материалы с различными функциональными группами позволяют реализовать сенсорные структуры, существенно отличающиеся по знаку [1] и величинам резистивных сенсорных откликов [2], что может быть использовано для создания массива сенсоров, решающих задачи распознавания газов, включая различные спирты даже на фоне влажности воздуха [1,3]. Однако направленная функционализация заданным типом функциональных групп и исследование различий сенсорных свойств нанослоев, отличающихся лишь типом функциональных групп, остается актуальной задачей, особенно для малоизученных амидированных углеродных нанотрубок [4].

Материалы и методы

Исследовались резистивные сенсорные отклики (S) на этанол, 2-пропанол (etOH, IPA, с концентрацией (C) в диапазоне 1,5-1800 ppm) и влажность (H_2O, 4,5-23000 ppm) нанослоев карбоксилированных (CCNT) и амидированных (ACNT) углеродных нанотрубок (Carbon Solutions), аэрозольно нанесенных из дисперсий с последующим удалением остаточного растворителя [4], с схожим сопротивлением (~1-2 МОм/□) и ТКС (~0,5 %/°C). Концентрация аналита формировалась подачей регулятором расхода газа подготовленной смеси газов при фоновой влажности воздуха (RH ~0 %, либо RH ~30 %) из емкости [3], а также ее разбавлением потоком сухого воздуха. Для анализа механизмов различия S оценивалось изменение зарядов атомов функциональных групп УНТ (19,0) и потенциала у их основания (метод DFT, модель B3LYP, базис SBKJC, программа Firefly).

Результаты и обсуждение

Исходя из анализа полученных зависимостей $S(C)$ для etOH, IPA и H_2O были оценены отклики для C ~200 ppm (рис. 1 а, б, в). Отношение S_{IPA}/S_{etOH} оказалось существенно изменяющимся (~0,67 для ACNT и ~0,54 для CCNT), причем при RH ~30 % это отношение также существенно изменяется между ACNT и CCNT (~0,66 и ~0,73). Отношение откликов на спирты к отклику на H_2O изменяется еще существеннее. Зависимость $S(C)$, особенно с учетом области малых C лучше описывается для ACNT с использованием суммы двух функций по модели адсорбции Ленгмюра, а для CCNT — с использованием степенной функции (модель Фрейндлиха), что и отражает существенные различия S_{IPA}/S_{etOH} между ACNT и CCNT и механизме адсорбции и сенсорного отклика этих двух типов УНТ, отличающихся лишь типом функциональных групп. Оценки изменения потенциала ($\Delta\varphi$) в основании COOH- и $CONH_2$-группы при адсорбции H_2O (рис. 1 г, д) хорошо коррелируют с схожим по модулю, но противоположным по знаку S для ACNT и CCNT в сухом воздухе, хотя механизм резистивного отклика слоя УНТ

остается неясным, поскольку как CCNT [3], так и ACNT, исходя из измеренных ВАХ при RH ~0 % и RH ~30 % на воздухе, демонстрируют *p*-тип управления проводимости полем затвора, и для выявления этого механизма необходимы дальнейшие исследования. Отклик же при фоновой RH ~30 % проходил с ростом сопротивления и для CCNT и для ACNT, что с учетом анализа $S(C)$ указывает на снижение вклада COOH- и $CONH_2$-групп и увеличение влияния нефункционализированных областей УНТ. Такое поведение и различия отношения S_{IPA}/S_{etOH} для ACNT и CCNT позволят реализовать распознавание спиртов на фоне влажности воздуха группой таких сенсоров.

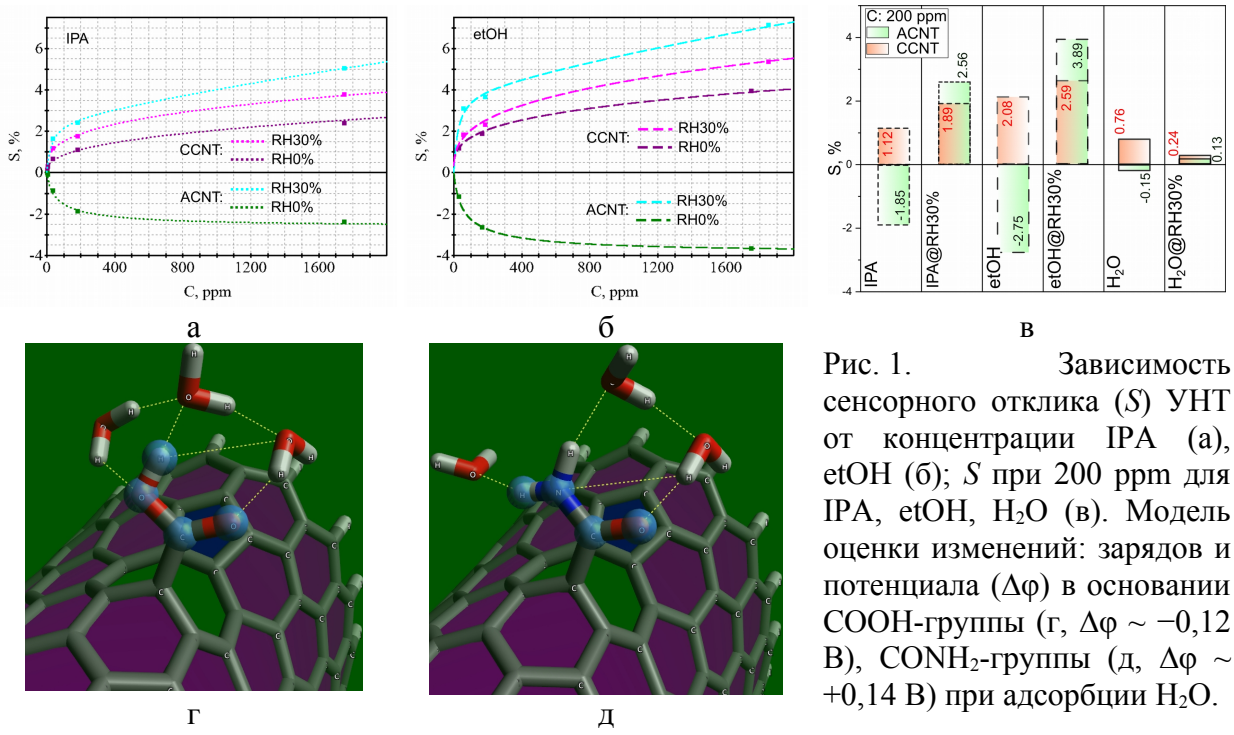


Рис. 1. Зависимость сенсорного отклика (S) УНТ от концентрации IPA (а), etOH (б); S при 200 ppm для IPA, etOH, H_2O (в). Модель оценки изменений: зарядов и потенциала ($\Delta\varphi$) в основании COOH-группы (г, $\Delta\varphi \sim -0{,}12$ В), $CONH_2$-группы (д, $\Delta\varphi \sim +0{,}14$ В) при адсорбции H_2O.

Заключение

Слои ACNT и CCNT, сформированные аэрозольным распылением, могут быть использованы в сенсорной матрице для распознавания спиртов даже во влажном окружающем воздухе благодаря различиям отклика между этими типами УНТ, отличающимися лишь типом функциональных групп. Однако для выявления механизмов отличий резистивного отклика ACNT и CCNT необходимо проведение дальнейших исследований как путем моделирования, так и измерения проводимости и оптических свойств при воздействии различных газов-аналитов в том числе в бескислородной среде.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FSMR-2026-0006.

Список литературы

[1] M. K. Rabchinskii, V. V. Sysoev, A. S. Varezhnikov, M. A. Solomatin, N. S. Struchkov, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, **15**(23), 28370 (2023).

[2] J. Prakash, P. T. Rao, S. Ghorui, J. Bahadur, V. Jain, K. Dasgupta. Sensors and Actuators B: Chemical, **359**, 131606 (2022).

[3] N. S. Struchkov, A. V. Romashkin, M. K. Rabchinskii, S. D. Saveliev, P. D. Cherviakova, et al. Sensors and Actuators B: Chemical, **417**, 136088 (2024).

[4] A. V. Romashkin, R. Y. Rozanov, A. S. Vishnevskiy, A. E. Mitrofanova, A. N. Stebelkov, et al. St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics, **82**(3.1), 12 (2025).

Терагерцовый пространственный модулятор на основе арсенида галлия

А. Н. Приходько [1,2,3], **И. И. Беликов** [1,2], **А. В. Львов** [1,2], **В. С. Ездаков** [1], **Г. Н. Гольцман** [1,2,3], **А. С. Шураков** [1,2]✉

[1] Лаборатория квантовых детекторов, МПГУ, Москва, Россия;
[2] Научно-исследовательский институт телекоммуникаций, НИУ ВШЭ, Москва, Россия;
[3] Группа квантово-оптических интегральных микросхем, РКЦ, Москва, Россия
✉alexander@rplab.ru

Аннотация. Развитие терагерцовой электроники (диапазона от 100 ГГц до 10 ТГц) является технологическим катализатором дальнейшего прогресса в области беспроводной связи. Особый интерес представляют устройства управления амплитудой и фазой сигналов в свободном пространстве. В данной работе описан пространственный модулятор сигнала с центральной рабочей частотой 140 ГГц. Модулятор разработан как монолитное устройство на основе арсенида галлия в виде решетки логопериодических антенн отражательного типа с варакторной нагрузкой. В работе представлен анализ влияния свойств используемых материалов на радиофизические характеристики разработанной конструкции.

Ключевые слова: оптика свободного пространства, модуляция сигнала, терагерцовый диапазон.

Введение

В последние годы существенно расширилась сфера практических применений терагерцовой радиоаппаратуры. Она, в частности, востребована в системах беспроводной связи нового поколения в спектральных диапазонах выше 100 ГГц [1]. В них важную роль играют реконфигурируемые интеллектуальные поверхности [2] – пассивные антенные решетки, используемые для поддержания устойчивой направленной связи через незеркальные отражения с целью отработки эффектов блокировки и микромобильности. В данной работе мы представляем результаты разработки монолитного терагерцового пространственного модулятора, который может быть использован в качестве ключевого элемента реконфигурируемой интеллектуальной поверхности.

Материалы и методы

Модулятор разработан и изготовлен как монолитное устройство на основе арсенида галлия в виде решетки из 16 экранированных логопериодических антенн с варакторной нагрузкой, как показано на Рис. 1. Элементарная ячейка имеет форму близкую к кубической с размерами, приближенными к четверти длины волны радиосигнала.

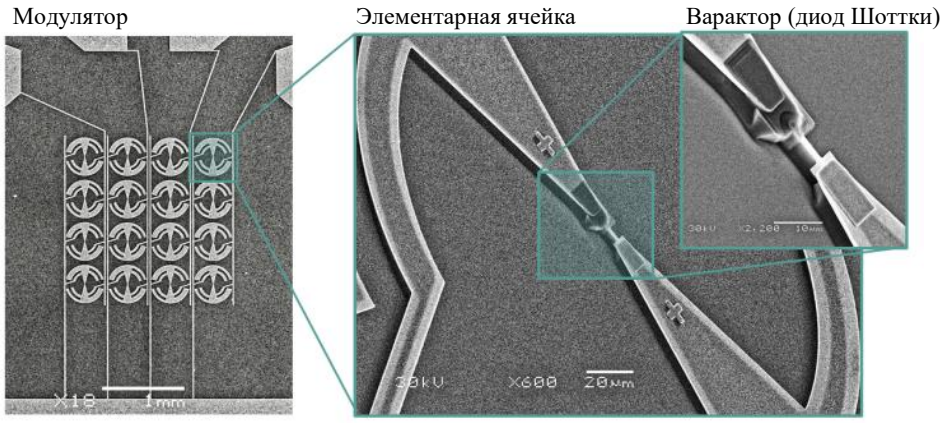


Рис. 1. Снимок с электронного микроскопа образца управляемого напряжением пространственного модулятора сигнала с центральной рабочей частотой f = 140 ГГц.

Для исследования отражательных свойств разработанной ячейки мы использовали трехмерное численное моделирование S-параметров в сочетании с анализом порта Флоке.

В отличие от [3], антенна нагружена фактической слоевой структурой варактора, что автоматически обеспечивает учет его паразитных параметров. Проводимости материалов соответствуют используемым технологическим процессам изготовления в чистой зоне. Влияние нелинейных свойств варактора учитывается через внедрение управляемой напряжением ширины обедненной области. Под контактом Шоттки создана цилиндрическая обедненная область. Ее верхняя и нижняя грани, контактирующие с металлом и полупроводником, электрически соединены через прямоугольный элемент, определенный как RC цепь с параллельно включенными сопротивлением $R = \mathrm{Re}(Y_{sc})^{-1}$ и емкостью $C = \mathrm{Im}(Y_{sc})\,\omega^{-1}$, где $\omega = 2\pi f$. Зависимость проводимости контакта Шоттки Y_{sc} от приложенного напряжения V_{sc} подчиняется уравнению (1) [4].

$$\mathrm{Y}_{sc}(V_{sc}) = \frac{I_s}{\eta V_t}\exp\left(\frac{V_{sc}}{\eta V_t}\right) + i\omega\frac{\pi d_{sc}^2}{4}\sqrt{\frac{\varepsilon q N_d}{2(\psi_{bi}-V_{sc})}},$$
$$\text{где } \psi_{bi} = \eta V_t \ln\left(\frac{\pi d_{sc}^2}{4}\frac{A_R T^2}{I_s}\right) - (\eta-2)V_t \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \qquad (1)$$

Здесь V_t – тепловое напряжение, q – заряд электрона, T – температура, A_R – постоянная Ричардсона, ε и N_c – диэлектрическая проницаемость и плотность состояний в зоне проводимости арсенида галлия. Технологически обусловленные параметры варактора: диаметр контакта Шоттки d_{sc} = 3 мкм, концентрация легирующей примеси в арсениде галлия $N_d = 4\times10^{17}$ см$^{-3}$, ток насыщения I_s = 10 пА, коэффициент неидеальности η = 1.5.

Результаты и обсуждение

Отметим, что если пренебречь диссипативными эффектами в ячейке, то расчеты показывают следующее. Устанавливая угол падения линейно поляризованного радиосигнала больше или меньше 60°, можно переключаться между двумя альтернативными режимами работы модулятора. Режим с выраженной фазовой модуляцией (ФМ) наблюдается при углах падения в пределах ±60°, а вне этого диапазона доминирует амплитудная модуляция (АМ). При этом достигается предельный диапазон контроля фазы 300° и глубина модуляции 20 дБ. Ситуация меняется, если учесть диссипативные эффекты. Теперь модулятор работает в смешанном режиме с диапазоном контроля фазы и глубиной модуляции до 120° и 16 дБ соответственно. Обнаруженные особенности работы модулятора согласуются с результатами предварительных измерений с использованием векторного анализатора цепей, оснащенного модулем расширения частотного диапазона 110-170 ГГц. Сравнение расчетов и измерений будет также представлено на конференции.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-79-10279-П (в части проектирования) и Программы развития НИУ ВШЭ на 2025–2036 гг. в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» национального проекта «Молодежь и дети» (в части изготовления и тестирования).

Список литературы

[1] International Telecommunication Union, *Report ITU-R M.2541-0* (Geneva, Switzerland, 2024).
[2] F. Yang, P. Pitchappa, N. Wang. Micromachines, **13**(2), 285 (2022).
[3] A. Shurakov, A. Razakova, A. Lvov, I. Belikov, A. Prikhodko, G. Goltsman. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., **24**(1), 88-92 (2025).
[4] A. Shurakov, P. Rozhkova, I. Belikov, A. Lvov, N. Nurmamatov, A. Prikhodko, G. Goltsman. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., **25**(2), 706-710 (2026).

Планарная антенна X-диапазона, интегрированная с транзистором

А. В. Львов [1,2✉], **Г. Н. Гольцман** [1,2,3], **А. С. Шураков** [1,2]
[1] Лаборатория квантовых детекторов, МПГУ, Москва, Россия;
[2] Научно-исследовательский институт телекоммуникаций, НИУ ВШЭ, Москва, Россия;
[3] Группа квантово-оптических интегральных микросхем, РКЦ, Москва, Россия
✉alvov@hse.ru

Аннотация. Антенные системы для современной беспроводной связи должны быть совместимы с технологией приемопередачи с множеством входов и множеством выходов. При этом использование пассивных антенных решеток при ретрансляции сигнала приводит к снижению дальности связи или требует существенного увеличения передаваемой мощности. В этой статье мы сообщаем о разработке планарной антенны диапазона частот 6-9 ГГц, интегрированной с транзистором. Результаты моделирования радиофизических свойств антенны как функции параметров транзистора и схемы его включения подтверждены измерениями. Сформулированы выводы о перспективах использования антенны в качестве фазовращателя и усилителя отражательного и проходного типа.

Ключевые слова: планарная антенна, X-диапазон, транзистор, фазовращатель, усилитель.

Введение

Задача повышения скорости передачи данных и емкости канала связи является крайне актуальной в сфере развития сетей беспроводной связи. Выигрыш в пропускной способности канала беспроводной связи без повышения несущей частоты можно обеспечить за счет увеличения числа модуляционных состояний или применения антенных систем с множеством входов и множеством выходов [1]. В качестве альтернативы последним можно также использовать реконфигурируемые интеллектуальные поверхности с поддержкой многопользовательского соединения [2]. Они представляют собой амплитудно- и фазово-сконфигурированные антенные решетки, работающие как умные ретрансляторы сигнала в отраженном или проходящем свете. При этом использование пассивных решеток, основанных на диодах переменной емкости, ввиду потерь на отражение в диэлектрике и омических потерь в диоде приводит к снижению дальности связи или требует заметного увеличения передаваемой мощности при заданной чувствительности приемника. В данной работе мы представляем результаты исследования радиофизических свойств конструкции антенны X-диапазона, интегрированной с транзистором, как фазовращателя и усилителя беспроводного сигнала.

Материалы и методы

На Рис. 1 представлено фото изготовленного образца антенны и схемы включения транзисторной нагрузки, на рис. 2. приведены результаты электромагнитного моделирования и измерений $S11$-параметра в диапазоне частот 6-9 ГГц.

Моделирование произведено с использованием численного решения уравнений Максвелла и анализа порта Флоке (порт 1, распределенный) на всех заданных частотах и аналитической параметризации электрической цепи нагрузки (порт 2, сосредоточенный) в режиме со-моделирования для развертки емкостей эмиттерного перехода C_e и коллекторного перехода C_c. В случае $C_e = 0$ фактически реализован режим диодной нагрузки антенны. Измерения выполнены с использованием векторного анализатора цепей Планар серии Кобальт С4220, оснащенного коаксиально-волноводным переходом и напечатанным на 3D-принтере пластиковым держателем образца. Образец изготовлен с помощью фрезеровально-гравировального станка для производства печатных плат с числовым программным управлением. В качестве подложки использован материал FSD888T, в качестве нагрузки – транзистор Infineon BFP420H6327XTSA1 в корпусе для поверхностного монтажа.

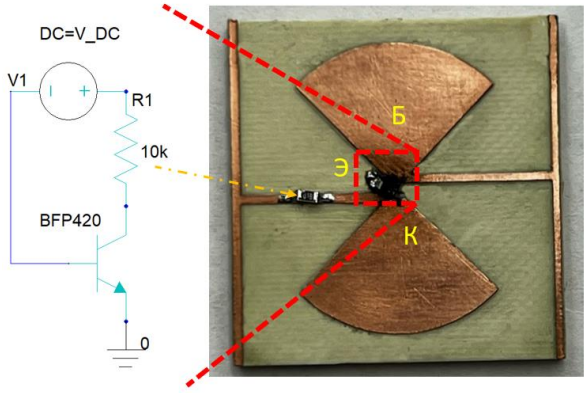


Рис. 1. Фото изготовленного образца антенны. Вставка – схема включения транзисторной нагрузки.

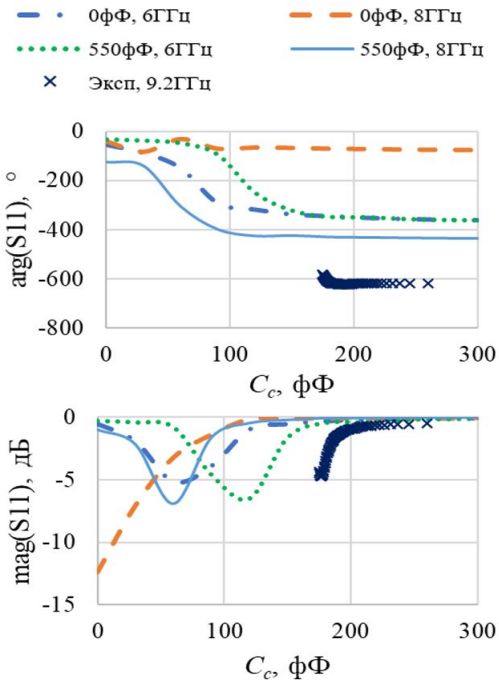


Рис. 2. Результаты моделирования и измерений.

Результаты и обсуждение

В режиме управляемого напряжением фазовращателя с диодной нагрузкой разработанная антенна обеспечивает выигрыш в потерях на отражение в сравнении с опубликованной нами ранее конструкцией с использованием экранированной логопериодической спирали [3]. При этом замена диода на транзистор обеспечивает дальнейшее снижение потерь и расширение диапазона рабочих частот. Согласно результатам моделирования и предварительных измерений при использовании усилительного каскада с общей базой и замене транзистора на BFP840FESDH6327XTSA1 возможно реализовать усиление беспроводного сигнала 6-10 дБ в диапазоне 6-9 ГГц. При этом создание усилителя отражательного или проходного типа требует объединения 2 антенн разработанной конструкции, одна и которых будет нагружена на усилительный каскад с компактной RLC обвязкой. Итоговая конструкция усилителя беспроводных сигналов и результаты измерений его характеристик будут представлены на конференции.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10279-П.

Список литературы

[1] Yang, Y., Wang, C. X., Huang, J., & Thompson, J. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, **42**(6), 1519-1533 (2024).

[2] Wang, J., Gong, S., Wu, Q., & Ma, S. IEEE Transactions on Wireless Communications, **22**(10), 6914-6929 (2023).

[3] Lvov A.V., Shurakov A.S., Goltsman G.N., St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics., **18**(3.2), 315–318 (2025).

Терагерцевый монолитный интерферометр Маха-Цендера на основе кремниевых волноводов без подложки

Д.Г. Фудин [1]✉, С.В. Селивертсов [1,2,4,5], А.К. Кожуховский [1] , Г.Н. Гольцман [3,6]

[1]Московский Педагогический Государственный Университет, Москва, Россия;

[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

[3] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия;

[4] Университет науки и технологий МИСИС, Лаборатория фотонных газовых сенсоров, Москва, Россия;

[5]Научно-исследовательский институт телекоммуникаций МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва, Россия;

[6] Российский Квантовый Центр, Москва, Россия

✉dg_fudin@student.mpgu.edu

Аннотация

В работе представлена конструкция монолитного интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ) для субтерагерцового диапазона (0.12–0.15 ТГц), реализованного на базе высокоомного кремния. Ключевой особенностью устройства является использование диэлектрических волноводов без подложки, подвешенных на кремниевой раме. Данное решение позволяет минимизировать диэлектрические потери и реализовать пассивное выполнение математических операций (умножение на весовой коэффициент) для аналоговых нейронных сетей систем связи 6G.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, интерферометр Маха-Цендера, диэлектрический волновод, высокоомный кремний, аналоговые вычисления.

Введение

Развитие систем связи стандарта нового поколения и аппаратных нейронных сетей требует создания компактных и энергоэффективных компонентов терагерцового (ТГц) диапазона [1]. Одной из ключевых задач является реализация перемножения сигнала на весовой коэффициент. В данной работе предлагается решение на основе монолитного интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ), работающего по принципу геометрического сдвига фаз.

Материалы и методы

На Рис. 1 представлена схема интерферометра. Устройство изготовлено из пластины высокоомного кремния (удельное сопротивление более 3 кОм·см) толщиной 400 мкм. Геометрия волноводов (ширина 585 мкм) рассчитана на работу в диапазоне частот 0.1265–0.1455 ТГц [2]. Для устранения потерь на излучение в подложку и минимизации поглощения была применена технология создания структур без подложки: волноводные каналы полностью отделены от основания и удерживаются в воздухе тонкими кремниевыми перемычками (100 мкм на 500 мкм), соединяющими их с внешней жесткой рамой. Такая архитектура обеспечивает распространение волны в режиме полного внутреннего отражения на границе кремний-воздух.

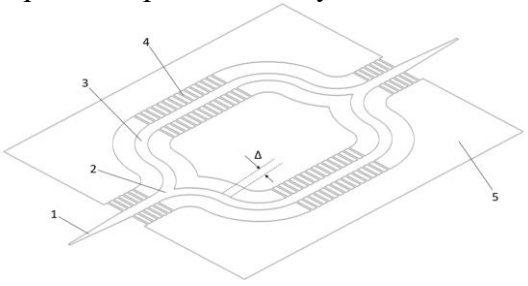


Рис. 1. Схематичная 3D-модель кремниевого монолитного интерферометра без подложки со статическим фазовращателем на основе волноводной линии задержки: 1 – тейпер, согласующий схему с источником и детектором; 2 – Y-образный делитель пучка 50:50; 3 –

безоболочечный кремниевый волновод; 4 – массив поддерживающих волновод перемычек; 5 – кремниевая рамка.

Результаты и обсуждение

В ходе проектирования и моделирования устройства была определена оптимальная конфигурация для работы в субтерагерцовом диапазоне. Выбор высокоомного кремния и безоболочечной структуры волноводов позволил минимизировать потери энергии на поглощение и рассеяние. Расчеты показывают, что использование системы фиксированных линий задержки в плечах интерферометра обеспечивает стабильный сдвиг фазы без необходимости внешнего управления.

На Рис. 2 представлен график зависимости пропускания интерферометра от полуразности длин плеч. При разности геометрической длины плеч в 500 мкм (для частоты 145,5 ГГц) реализуется режим деструктивной интерференции, что соответствует нулевому весовому коэффициенту в аналоговой вычислительной схеме. Использование конусных переходов длиной 3,4 мм позволяет достичь высокого коэффициента передачи сигнала из внешнего тракта в волноводную структуру.

Экспериментальные испытания подтвердили, что предложенная конструкция подвеса волновода на перемычках шириной 100 мкм сохраняет высокую добротность системы. Это обеспечивает высокую избирательность и значительный динамический диапазон выходного сигнала (глубину модуляции), что критически важно для точности воспроизведения весовых коэффициентов в нейронных сетях.

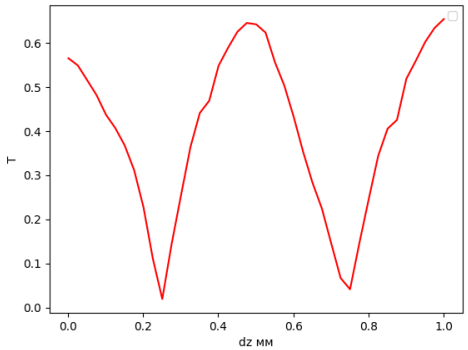


Рис. 2. Зависимость пропускания T от полуразности длин плеч dz.

Заключение

В работе предложена и исследована реализация монолитного интерферометра Маха-Цендера на основе высокоомного кремния для частоты 145,5 ГГц. Главным преимуществом данной разработки является отсутствие активных управляющих элементов и металлизации, что делает устройство полностью энергонезависимым и устойчивым к внешним воздействиям. Полученные результаты подтверждают возможность интеграции таких интерферометров в сложные матричные структуры для аппаратной реализации нейронных сетей и систем связи стандарта 6G.

Список литературы

[1] Liao, K., Dai, T., Yan, Q., Hu, X., Gong, Q. ACS Photonics, **10**(7), 2001–2010 (2023).
[2] Seliverstov, S., Svyatodukh, S., Kozhukhovsky, A., Fudin, D., Lazarenko, P., Terekhov, D., Prokhodtsov, A., Nevzorov, A., Kitsyuk, E., Prikhodko, A., Shurakov, A., Kovalyuk, V., Goltsman, G. Opt. Mater., 117216 (2025).

Моделирование отражающего мета-атома на базе жидких кристаллов

И.О.Драгомерецкий [1]✉, **В.Д.Бурцев** [1], **Д.С.Филонов** [1]

[1] Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation

✉dragomeretskii.io@phystech.edu

Аннотация. В работе предложена топология элемента динамической отражательной метаповерхности Ku-диапазона частот. Сканирование отражённым лучом достигается при помощи управления диэлектрической проницаемостью жидких кристаллов, заключённых в подложке мета-атома. Результаты численного моделирования показывают возможность управления фазой отражённой волны в диапазоне от 0° до 353°.

Ключевые слова: жидкий кристалл, мета-атом, аномальное отражение.

Введение

Одним из перспективных направлений развития антенных систем для спутниковой связи являются метаповерхности, позволяющие сканировать лучом за счет управления амплитудой и фазой отражённой волны на субволновом масштабе. Из текущего уровня техники известны различные виды таких систем, включая стационарные метаповерхности [1], структуры на основе жидких кристаллов [2] и сосредоточенных элементов [3].

В данной работе рассматривается отражающий мета-атом на основе жидких кристаллов, работающий в Ku-диапазоне частот. Задача управления фазой отраженной волны достигается при помощи управления диэлектрической проницаемостью жидкого кристалла в подложке мета-атомов.

Методы

Согласно [4], угол аномального отражения метаповерхности θ может быть описан формулой:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{1}{k}\frac{d\varphi}{dx} + sin\alpha\right), \quad (1)$$

Где α — угол падения, k — волновое число, а φ — фаза отражённой от выбранного участка метаповерхности волны. Следовательно, управление фазой отражения позволяет варьировать направление отражённой волны. Для решения данной задачи была спроектирован мета-атом, основанный на структуре, описанной в работе [2]. Он состоит из тонкого (~$5\cdot10^{-3}\lambda$) слоя жидкого кристалла, заключенного между сплошным металлическим заземляющим слоем и электродом крестообразной формы на верхней стороне (см. рис. 1 (а)). Управление диэлектрической проницаемостью осуществляется приложением напряжения между электродом и заземляющим слоем, расположенными на внутренних поверхностях стекол кюветы.

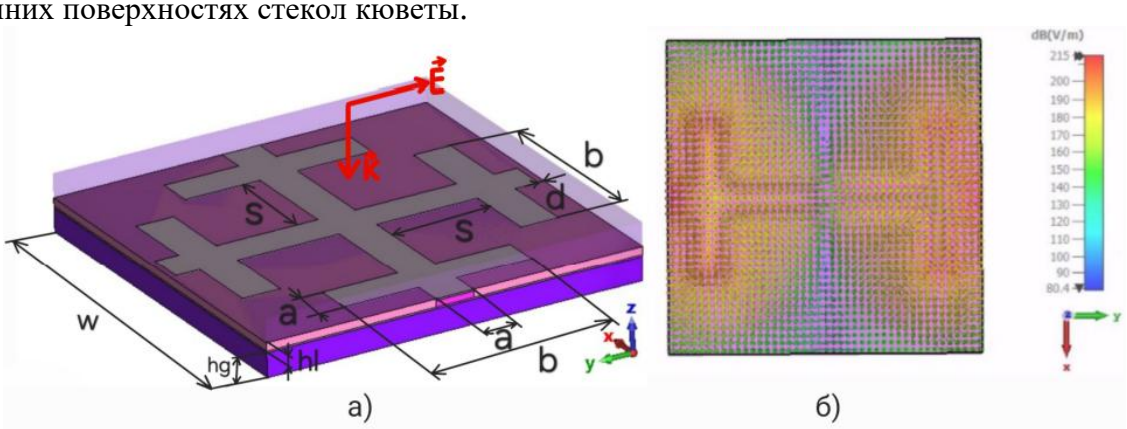


Рисунок 1. а) Схема единичного мета-атома, б) Электрическое поле используемой собственной моды структуры. s = 1.28мм, a = 0.4мм, d = 0.058мм, w = 4мм, hg = 0.5мм, hl = 0.1мм, b = 2мм.

Для исследования свойств электромагнитных полей в численном моделировании было применено приближение бесконечной периодической структуры вдоль осей X и Y к границам мета-атома. Возбуждение осуществлялось плоской волной с линейной поляризацией вдоль оси X, распространяющейся вдоль оси Z. В результате расчёта были получены значения фазы комплексных коэффициентов отражения при разных значениях диэлектрической проницаемости, а также определена основная используемая мода структуры (рис. 1 (б)).

Результаты и обсуждение

Численное моделирование было проведено для диапазона модуля диэлектрической проницаемости ε жидкого кристалла от 2.4 до 3.2 с тангенциальными потерями, изменяющимися, соответственно, от 0.022 до 0.07. Полученные фазово-частотные характеристики коэффициента отражения мета-атома в зависимости от абсолютных значений диэлектрической проницаемости жидкого кристалла (рис.2(а)) позволили рассчитать максимально достижимую разность фаз между при различных ε (рис. 2 (б)). Максимальная разность фаз в 353° достигается на частоте 14.72 ГГц в диапазоне частот, равном 0.62 ГГц.

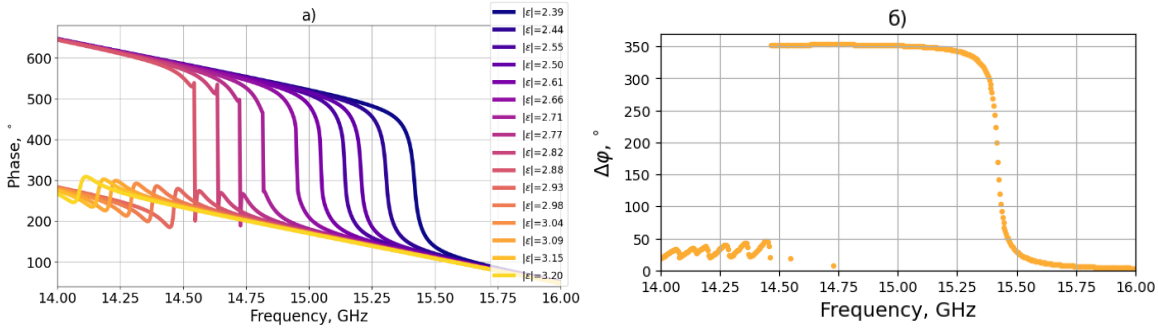


Рис.2. а) ФЧХ метаэлемента для разных значений диэлектрической проницаемости, б) максимальная разность фаз для разных ФЧХ.

Анализ резонансов, проявляющихся в резком перепаде фазы на 2π на рисунке 2 а), показал, что собственная мода (рис. 1 (б)), имеет добротность порядка 180, что означает возможность получения значительного перепада фазы в узком диапазоне частот даже при малом изменением ε.

Заключение

Предложенная в работе топология отражающего мета-атома позволяет реализовывать управление фазой отражённой волны в диапазоне от 0° до 353° за счет изменения диэлектрической проницаемости тонкой жидкокристаллической подложки в Ku-диапазоне. Следовательно, она может рассматриваться как перспективный структурный элемент для построения отражательных метаповерхностей с динамическим сканированием лучом.

Благодарности

Работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда в рамках проекта №25-29-01550.

Список литературы

[1] S. Sun, K.-Y. Yang, C.-M. Wang, T.-K. Juan, W. T. Chen, C.-Y. Liao, Q. He, S. Xiao, W.-T. Kung, G.-Y. Guo, L. Zhou. Nano Lett., **12**(12), 6223 (2012).

[2] J. Wu, Z. Shen, S. Ge, B. Chen, Z. Shen, T. Wang, C. Zhang, W. Hu, K. Fan, W. Padilla, Y. Lu, B. Jin, J. Chen, P. Wu. Appl. Phys. Lett., **116**(13), 131104 (2020).

[3] D. Sievenpiper, J. Schaffner. Electron. Lett., **38**(21), 1237 (2002).

[4] N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, Z. Gaburro. Science, **334**(6054), 333 (2011).

Топологические краевые состояния высокого порядка в квадратной решётке из разомкнутых кольцевых резонаторов с дипольным и квадрупольным откликом

А. Д. Розенблит [1]✉, **Н. А. Олехно** [1]

[1] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

✉alina.rozenblit@metalab.ifmo.ru

Аннотация. В настоящей работе рассматривается димеризованная квадратная решётка, состоящая из двух типов разомкнутых кольцевых резонаторов, электрическое поле которых на частоте фундаментального собственного состояния отвечает электрическому диполю либо квадруполю. Взаимодействие таких резонаторов приводит к формированию чередующихся по фазе эффективных связей между узлами решётки, и, в результате, к возникновению топологических краевых и угловых состояний. Рассматриваемая модель реализована экспериментально в виде метаповерхности, работающей в гигагерцовом диапазоне частот.

Ключевые слова: фотонный топологический изолятор, топологические состояния высокого порядка, разомкнутый кольцевой резонатор

Введение

Топологические краевые состояния высокого порядка в фотонике – это локализованные на границах периодических структур электромагнитные колебания, размерность которых более, чем на единицу меньше размерности структуры и существование которых обусловлено симметрийными свойствами её элементарной ячейки [1]. Одной из классических моделей топологического изолятора высокого порядка является модель Беналказара-Берневига-Хьюза, которая содержит чередующиеся по фазе эффективные связи между резонаторами [2]. Данная модель была экспериментально реализована в виде массива оптических волноводов [3] и металл-диэлектрических резонаторов [4]. Однако, предложенные реализации отличаются сложностью изготовления, а также ограниченными возможностями для создания механически перестраиваемых и трёхмерных фотонных топологических изоляторов.

Материалы и методы

Методами численного моделирования в программном пакете CST Microwave Studio исследованы собственные состояния разомкнутых кольцевых резонаторов двух типов, рис. 1(а,б). Первый тип резонатора представлен в виде разомкнутого кольцевого резонатора с внешним диаметром $2R$=13.5 мм, шириной кольца t=1 мм и шириной зазора w=1.5 мм. Разомкнутый кольцевой резонатор второго типа с внешним диаметром $2R$=13.5 мм и шириной кольца t=1 мм включает в себя два симметрично расположенных зазора с шириной w=1.3 мм, нагруженными конденсаторами с ёмкостью C=0.2 пФ. Далее, проводится численное моделирование собственных колебаний конечной структуры, элементарная ячейка которой состоит из двух параллельных резонаторов первого типа и двух взаимно ортогональных резонаторов второго типа, рис. 1(в). Центры резонаторов располагаются в вершинах квадрата со стороной a, а расстояние между резонаторами соседних ячеек описывается периодом b.

Рассматриваемая метаповерхность реализована экспериментально в виде массива с периодами a=28 мм и b=23 мм размером 10×10 резонаторов, изготовленных в виде печатных плат. С помощью автоматического сканера проведены измерения пространственного распределения коэффициента прохождения вблизи метаповерхности между приёмной и передающей антеннами, подключёнными к векторному анализатору цепей.

Результаты и обсуждение

Рассматриваемые разомкнутые кольцевые резонаторы двух типов поддерживают фундаментальные собственные колебания на одинаковой частоте f=1.67 ГГц. При этом для резонатора первого типа наблюдается противофазное распределение электрического поля

E_y в нижней и верхней половинах резонатора, которое соответствует полю электрического диполя, рис. 1(а). Электрическое поле резонатора второго типа демонстрирует антисимметричное распределение относительно осей x и z, которое соответствует электрическому квадруполю, рис. 1(б). Чередование резонаторов с дипольным и квадрупольным откликом в периодической структуре, элементарная ячейка которой представлена на рисунке 1(в), обеспечивает чередование синфазных и противофазных колебаний электрических полей соседних резонаторов, что формирует положительные и отрицательные эффективные связи между узлами решётки. Результаты численного моделирования собственных колебаний такой структуры конечного размера демонстрируют существование топологических краевых и угловых состояний на частотах запрещённой зоны при значениях периодов a=28 мм и b=23 мм.

Экспериментально измеренные пространственные распределения коэффициента прохождения, характеризующие вертикальную компоненту электрического, демонстрируют локализацию поля вдоль края системы на частоте f=1.54 ГГц, а также вблизи углового резонатора на частоте f=1.56 ГГц, рис. 1(г,д). Наблюдаемые распределения электрических полей отвечают топологическим краевым и угловым состояниям.

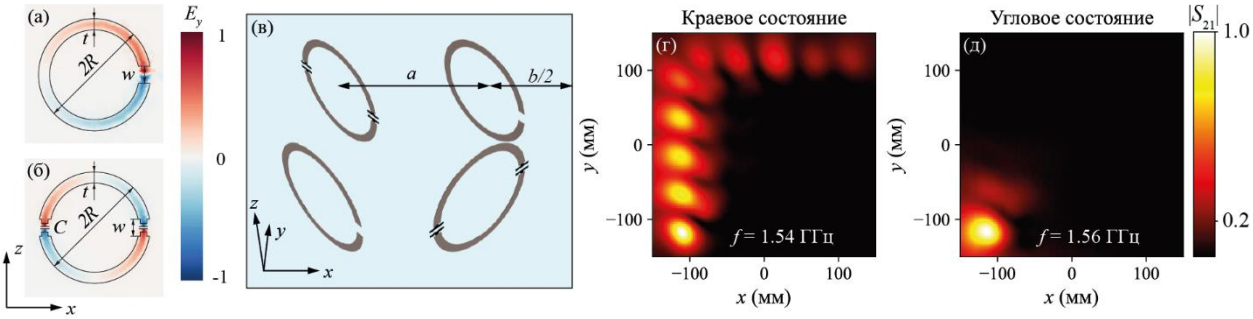


Рис. 1. (а) Разомкнутый кольцевой резонатор с диаметром $2R$, шириной кольца t и шириной зазора w. Цветом показано распределение электрического поля E_y на частоте собственного колебания f=1.67 ГГц при следующих параметрах: $2R$=13.5 мм, t=1 мм и w=1.5 мм. Панель (б) аналогична (а), но для разомкнутого кольцевого резонатора с диаметром $2R$=13.5 мм, шириной кольца t=1 мм, двумя зазорами шириной w=1.3 мм и конденсаторами с ёмкостью C=0.2 пФ. (в) Элементарная ячейка с периодами a и b. (г, д) Экспериментально измеренные распределения вертикальной компоненты электрического поля над массивом из 10×10 резонаторов с периодами a=28 мм и b=23 мм на частоте (г) краевого f=1.54 ГГц и (д) углового f=1.56 ГГц состояний.

Заключение

В данной работе предложена метаповерхность, состоящая из разомкнутых кольцевых резонаторов с дипольным либо квадрупольным откликом и поддерживающая топологические краевые и угловые состояния на частотах запрещённой зоны. Результаты численного моделирования подтверждаются экспериментальными исследованиями массива из резонаторов, изготовленных в виде печатных плат. Предложенная реализация отличается технологичностью, позволяет интегрировать нелинейные компоненты для динамического управления, а также расширяет потенциал создания механически перестраиваемых и трёхмерных топологических изоляторов.

Благодарности

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 25-22-00768.

Список литературы

[1] M. Kim, Z. Jacob, J. Rho. Light Sci. Appl., **9**(1), 130 (2020).
[2] W. A. Benalcazar, B. A. Bernevig, T. L. Hughes, Science, **357(**6346), 61—66 (2017).
[3] J. Schulz, et. al., Nat. Commun., **13**(1), 6597 (2022).
[4] R. Huang, et. al., Phys. Rev. Lett., **135**(21), 216603 (2025).

Контактное сопротивление и ресурс МЭМС-переключателя при разных токах коммутации

И. А. Белозеров[1,2]✉, А. Н. Куприянов[1,2], И. В. Уваров[1,2]
[1]Обособленное подразделение «Отдел микротехнологий» – Ярославль
ОФТИ им. К.А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт», Ярославль, Россия,
[2]Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия;
✉belozerov.ftian@bk.ru

Аннотация. МЭМС-переключатели представляют значительный интерес для систем связи и радиолокации, однако они до сих пор не находят широкого применения по причине ненадежной работы контактов. В работе рассмотрен метод снижения контактного сопротивления за счет увеличения числа подвижных электродов. Изготовлен резистивный МЭМС-переключатель с пятью кантилеверами. Измерено его контактное сопротивление и ресурс в зависимости от коммутируемого тока. Продемонстрировано снижение сопротивления по сравнению с изделием на основе одного кантилевера. Ресурс переключателя составлял десятки тысяч циклов коммутации при токе от 1 до 400 мА. Увеличение числа кантилеверов не оказало существенного влияния на ресурс. Наблюдался перенос материала с одной контактной поверхности на другую.

Ключевые слова: МЭМС-переключатель, кантилевер, контактное сопротивление, коммутируемый ток, сила прижима.

Введение

Переключатели, изготовленные по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), имеют широкие перспективы применения в СВЧ электронике [1]. Малые вносимые потери, высокая изоляция, компактные размеры и низкое энергопотребление делают их идеальными устройствами для систем беспроводной связи и радиолокации. Однако МЭМС-переключатели до сих пор не нашли широкого применения по причине недостаточной надежности. В частности, резистивные ключи выходят из строя вследствие быстрого роста контактного сопротивления или залипания. Для решения этих проблем подвижная часть должна обеспечивать надежный прижим и размыкание контактов. Недавно был разработан ключ на основе миниатюрного кантилевера, демонстрирующий стабильную работу на протяжении нескольких десятков тысяч коммутаций без корпусирования [2]. Однако контактное сопротивление составляло 4-7 Ом и требовало снижения с целью сокращения вносимых потерь. Для решения этой задачи было предложено увеличить число кантилеверов и тем самым расширить площадь контакта. Такой подход не требует изменения технологии изготовления ключа. В настоящей работе представлен МЭМС-переключатель с пятью кантилеверами, включенными в цепь параллельно. Исследовано его сопротивление и ресурс в зависимости от коммутируемого тока.

Материалы и методы

МЭМС-переключатель показан на рисунке 1. Он содержал пять идентичных кантилеверов длиной 50 мкм и шириной 60 мкм. Кантилеверы приводились в движение одновременно путем подачи напряжения на общий управляющий электрод и приходили в контакт с общим коммутируемым электродом. Форма кантилеверов и электродов была подобрана по специальной методике и обеспечивала наибольшую силу прижима при заданной длине и ширине подвижной части [3]. Переключатель изготавливали на термически окисленной кремниевой пластине по технологии поверхностной микрообработки. Материалом контактов служил рутений.

Переключатели были испытаны в холодном режиме без корпусирования. Управляющее напряжение составляло 90 В, ключ срабатывал с частотой 40 Гц. Коммутируемый сигнал представлял собой постоянное напряжение величиной 5 В, а ток I варьировали от 1 до 400 мА путем изменения нагрузочного сопротивления R_{Load}. Контактное сопротивление R_C измеряли с помощью резистивного делителя.

Результаты и обсуждение

Зависимость контактного сопротивления от числа циклов коммутации показана на рисунке 2. При токе 1 и 10 мА сопротивление в среднем составляло около 10 Ом, однако для I = 10 мА оно имело более стабильную величину. Это объяснялось зависимостью точности измерений от отношения R_{Load} к R_C. При токе 90 мА сопротивление составляло 3-5 Ом. Ключ с одним кантилевером обеспечивал 4-7 Ом в аналогичных условиях [2]. Уменьшение сопротивления было обусловлено увеличенной суммарной площадью контактов изделия с пятью кантилеверами. Для I = 400 мА наблюдали R_C = 1 Ом, что являлось минимально необходимой величиной для достижения приемлемых вносимых потерь. Спад сопротивления с ростом тока объяснялся повышением температуры контактов и размягчением материала, приводящим к увеличению площади контакта.

Ресурсные испытания проводили на 10-ти переключателях для каждого значения тока. В среднем ключи выдерживали 120, 68, 160 и 56 тысяч циклов коммутации для I = 1, 10, 90 и 400 мА соответственно. Переключатели выходили из строя вследствие роста сопротивления или залипания. Доминирующим механизмом деградации контактов был перенос материала с поверхности контактного выступа на площадку коммутируемого электрода. Для I = 400 мА контактные площадки полностью разрушались в результате плавления, что объясняло относительно невысокий ресурс ключа в этом режиме. Переключатель на основе одного кантилевера выходил из строя спустя 100 тысяч циклов при токах 1 и 100 мА. Таким образом, увеличение числа кантилеверов не оказало существенного влияния на ресурс. Вероятно, он был ограничен другими факторами, которые предстоит выяснить в ходе дальнейшей работы.

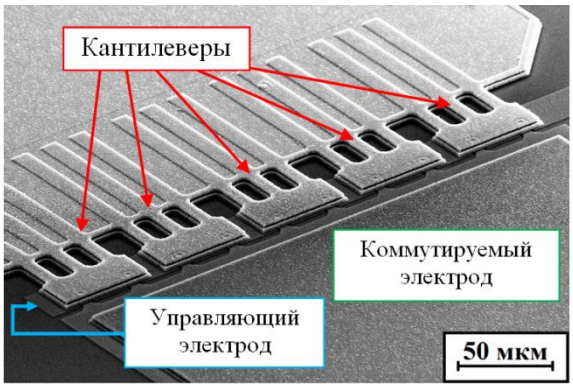


Рис. 1. Изображение МЭМС-переключателя, полученное с помощью растрового электронного микроскопа.

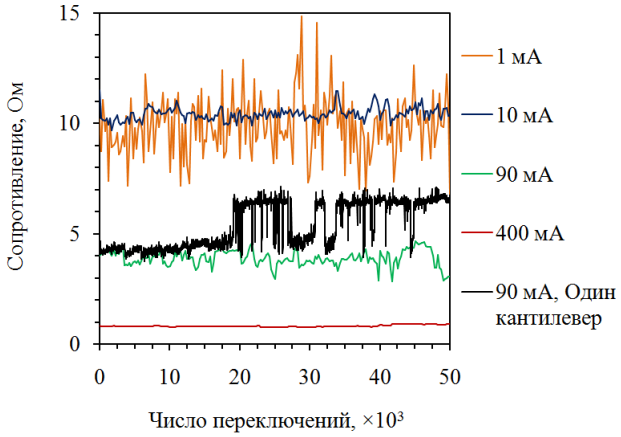


Рис. 2. Зависимость контактного сопротивления от числа циклов при разных токах коммутации.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 25-19-20107, а также в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

[1] Kurmendra, R. Kumar. Microsyst. Technol., **27**, 2525 (2021).
[2] I.V. Uvarov, I.A. Belozerov, M.O. Morozov. Russian Microelectronics, **54** (8), 1108 (2025).
[3] I.V. Uvarov, I.A. Belozerov. Micro, **4** (1), 1 (2023).

Импедансометрия электродных материалов на основе сульфидов переходных металлов: количественный анализ кинетики электрохимических реакций

И. Ю. Богуш [1]✉, Т.А Моисеева [1], Н.К. Плуготаренко [1], Т.Н. Мясоедова [1]

[1] Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Таганрог, Россия

✉inlys@sfedu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследований методом электрохимической импедансной спектроскопии электродов на основе сульфидов железа и никеля, полученных методом гидротермального синтеза. Показано, что электроды на основе NiS характеризуются повышенным сопротивлением переносу заряда (0,964 Ом), обусловленным формированием гетерофазной структуры и агломерацией кристаллитов. При этом материал на основе FeS демонстрирует более низкое сопротивление переносу заряда (0,619 Ом) и отсутствие диффузионных ограничений за счет более однородного фазового состава и более эффективного протекания электрохимических реакций на границе раздела электрод-электролит.

Ключевые слова: сульфиды металлов, никель, железо, суперконденсаторы, импедансная спектроскопия, электродные материалы.

Введение

На сегодняшний день одними из наиболее перспективных направлений исследований являются разработки в области электрохимических устройств накопления энергии, направленные на повышение удельной мощности и быстродействия современных систем хранения электрической энергии [1]. Исследования суперконденсаторов остаются актуальными как в теоретическом, так и в прикладном аспектах, в частности с точки зрения создания высокоэффективных источников питания для автономной электроники и систем рекуперации энергии. Уникальное сочетание высокой электронной проводимости и псевдоемкости сульфидов переходных металлов позволяет использовать их для формирования электродных материалов с возможностью ускоренного протекания электрохимических реакций [2]. Поскольку электрохимические характеристики сульфидов никеля и железа определяются скоростью переноса заряда на границе раздела электрод-электролит и параметрами двойного электрического слоя, которые напрямую зависят от фазового состава и морфологии активного материала, их точное количественное описание требует детального импедансного анализа. Таким образом, целью данной работы является определение кинетических параметров электрохимических процессов и установление влияния структурных неоднородностей на сопротивление переносу заряда в электродах на основе NiS и FeS.

Материалы и методы

Сульфиды NiS и FeS синтезировали гидротермальным методом из растворов соответствующих солей металлов и тиомочевины при 210 °C в течение 20 ч. Электроды формировали путем нанесения суспензии активного материала с ПВДФ (90:10) в N-метилпирролидоне на никелевую пену с последующей сушкой при комнатной температуре. Электрохимические исследования проводили методом импедансной спектроскопии в диапазоне частот 10 мГц – 100 кГц в растворе 1М KOH.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показаны спектры электрохимического импеданса изготовленных электродов. Моделирование импедансных зависимостей осуществлялось путем подбора эквивалентных электрических схем с использованием пакета прикладных программ Zview 4.2. Для обоих образцов оптимальное описание экспериментальных данных получено при использовании схемы R_1+Q_2/R_2+CPE_3, где R_1 — сопротивление электролита, Q_2 — элемент постоянной фазы, описывающий двойной электрический слой, R_2 — сопротивление переносу заряда, Q_3 — элемент постоянной фазы, характеризующий низкочастотные процессы. Коэффициенты детерминации составили $R^2 > 0,986$, а относительная погрешность

определения параметров элементов схем не превышала 6%, что свидетельствует о высокой достоверности проведенного моделирования.

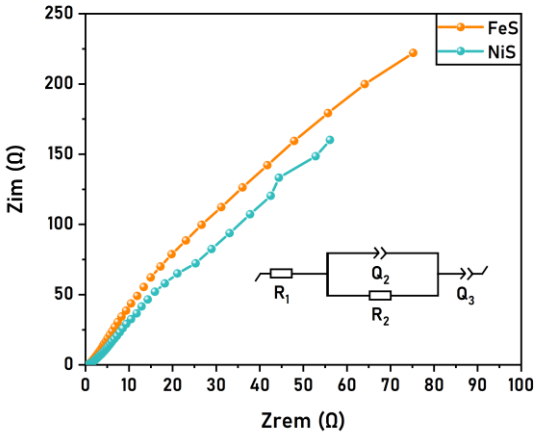


Рис. 1. Спектры электрохимического импеданса электродов суперконденсаторов

Сопротивление электролита R_1 для полученных материалов находится в диапазоне 0,515–0,669 Ом, что характеризует сопоставимые омические потери в системе электрод/электролит. Значения параметра P_2 для элементов Q_2 составляют 0,71–0,72, что указывает на отклонение емкостного отклика от идеального и отражает неоднородность распределения тока по поверхности электродов.

Ключевым параметром, определяющим кинетику электрохимических процессов, является сопротивление переносу заряда R_{ct} (элемент R_2). Для образца FeS установлено значение R_{ct} = 0,619 Ом, тогда как для образца NiS сопротивление переносу заряда составляет 0,964 Ом. Более низкое значение R_{ct} для FeS свидетельствует о более благоприятных условиях для протекания фарадеевских реакций на границе раздела электрод-электролит. Отсутствие элемента Варбурга в эквивалентных схемах для обоих материалов указывает на то, что в исследованном частотном диапазоне диффузионные ограничения не являются лимитирующей стадией электрохимического процесса.

В низкочастотной области спектры обоих образцов демонстрируют наклонные линии, характерные для емкостного поведения, при этом параметр P_3 элемента Q_3 для FeS несколько ближе к единице, что может свидетельствовать о более однородном распределении потенциала в пористой структуре данного электрода.

Заключение

Методом импедансной спектроскопии установлено, что электроды на основе сульфидов железа и никеля, синтезированные гидротермальным методом, описываются эквивалентной схемой R_1+CPE$_2$/R_2+CPE$_3$ с высокой достоверностью аппроксимации (R^2 > 0,986). Сопротивление переносу заряда для образца FeS (0,619 Ом) существенно ниже, чем для NiS (0,964 Ом), что указывает на более оптимальное протекание электрохимических процессов в случае использования сульфида железа. Отсутствие диффузионных ограничений в исследованном частотном диапазоне для обоих материалов свидетельствует о том, что лимитирующей стадией является перенос заряда на границе раздела фаз. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации состава и морфологии электродных материалов на основе сульфидов переходных металлов.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-00514, https://rscf.ru/project/25-23-00514/ в Южном федеральном университете.

Список литературы

[1] Wang, G., Zhang, L. and Zhang, J. Chemical Society reviews, **41**(2), 797 (2012).
[2] Moiseeva, T. A., Bogush, I. Y., Il'in, O. I., Yatsenko, A. N., Kalusulingam, R., Myasoedova, T. N. ChemEngineering, **10**(2), 29 (2026).

Фотолюминесценция и фотоотражение гетероструктур HgTe/CdHgTe с «узкими» квантовыми ямами

М. С. Ружевич ✉, **И. В. Чуманов**[1], **Д. Д. Фирсов** [1], **О. С. Комков** [1], **К. Д. Мынбаев** [2], **В. С. Варавин** [3], **Н. Н. Михайлов** [3]

[1] СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия;

[2] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия;

[3] ИФП СО РАН, Новосибирск, Россия

✉max.ruzhevich@niuitmo.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследований оптических свойств гетероструктур HgTe/CdHgTe с «узкими» (шириной до 3 нм) квантовыми ямами методами ИК Фурье-спектроскопии. Путем совместного использования методов фотолюминесценции и фотоотражения определены энергии уровней в квантовых ямах.

Ключевые слова: CdHgTe, гетероструктуры, фотолюминесценция, фотоотражение.

Введение

В последнее время гетероструктуры (ГС) на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) с квантовыми ямами (КЯ) рассматриваются как альтернатива материалам группы А3В5 для изготовления лазеров, работающих в инфракрасном (ИК) диапазоне. В работе представлены результаты исследования ГС, рассчитанных на генерацию излучения в диапазоне длин волн $\lambda = 5{-}7$ мкм. Такие источники стимулированного излучения востребованы для определения концентрации различных газов, что важно для задач экологии и медицины.

Генерация на нужной длине волны реализуется благодарю подбору параметров ГС, таких как ширина КЯ и состав $Cd_xHg_{1-x}Te$ (мольная доля CdTe) в ямах и барьерных слоях. Ввиду того что оптимальные температуры роста HgTe и CdTe различаются более чем на 100 ℃, а плавный переход от одного материала к другому в процессе роста невозможен, «идеальная» ГС (чистый HgTe в ямах и чистый CdTe в барьерах) на практике не реализуема. В реальных ГС слои выращиваются на основе КРТ с $x \approx 0.6–0.8$ в барьерных слоях и с $x \approx 0–0.09$ в КЯ. Это позволяет повысить пороговую энергию оже-рекомбинации благодаря достижению квазигиперболического закона дисперсии [1]. Исследования оптических характеристик ГС в настоящей работе проводились методами ИК Фурье-спектроскопии, применение которых для подобных объектов только набирает популярность [2]. Помимо фотолюминесценции (ФЛ), в данной работе представлены результаты исследований свойств ГС методом фотоотражения (ФО), позволяющего повысить точность определения энергии оптических переходов.

Материалы и методы

ГС с множественными КЯ были выращены на подложке (013)GaAs с буферными слоями ZnTe и CdTe [3]. По краям от области с КЯ были выращены спейсерные слои толщиной $d \approx 4–5$ мкм на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x \approx 0.7–0.8$. Состав слоев в ГС контролировался *in situ* методом эллипсометрии и *ex situ* методом энерго-дисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) с помощью электронного микроскопа TESCAN MIRA 3, оснащенного приставкой ULTIM MAX 100 производства компании Oxford Instruments. Ключевые параметры исследованных ГС приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Параметры гетероструктур

Образец	Количество квантовых ям	Ширина квантовых ям, нм	Состав барьерных слоев, x_{CdTe}
0424	10	2.8	0.81
0428	10	3	0.92
0429	3	2.7	0.73

Для регистрации спектров ФЛ и ФО использовался спектрометрический комплекс на базе фурье-спектрометра Vertex 80. Для повышения соотношения сигнала к шуму применялся режим с пошаговым перемещением зеркала интерферометра. Для отсечения фонового теплового излучения использовалось синхронное усиление сигнала, при котором излучение лазера (длина волны λ = 809 нм), необходимого для возбуждения сигнала в ФЛ и для модуляции в ФО, механически модулировалось на частоте f = 1 кГц. Температура образцов, помещенных гелиевый криостат замкнутого цикла Janis CCS-150, варьировалась в интервале T = 13–300 K. Сигнал регистрировался фотоприемником на основе КРТ.

Результаты и обсуждение

Спектры ФЛ и ФО были получены для всех трех ГС. На рисунках 1 и 2 приведены спектры ФЛ и ФО соответственно для ГС 0424 при T = 13 K. Искажение на спектре ФЛ в области ~0.29 эВ связано с поглощением излучения в атмосфере на молекулах CO_2. Энергия пика ФЛ на рис. 1 составила ~312 мэВ, полуширина – ~38 мэВ, что позволило предположить, что пиков было несколько. При повышении температуры спектр ФЛ смещался в высокоэнергетическую (ВЭ) сторону, и множественные пики становились явно различимы. При T = 300 K можно было выделить не менее двух пиков с энергиями ~349 мэВ и ~388 мэВ, при этом интенсивность второго пика оказалась сопоставимой с основным низкоэнергетическим (НЭ) пиком. В ВЭ части спектра наблюдались особенности, которые можно связать как с поглощением в атмосфере, так и с проявлением переходов с более высоких состояний в КЯ. Методом ИК ФО для ГС 0424 при T = 13 K были обнаружены пики с энергиями ~325 мэВ и ~347 мэВ (рис. 2). Таким образом, совместное использование методов ФЛ и ФО позволило определить энергии переходов на различные уровни в КЯ. Аналогичные результаты были получены и для других ГС.

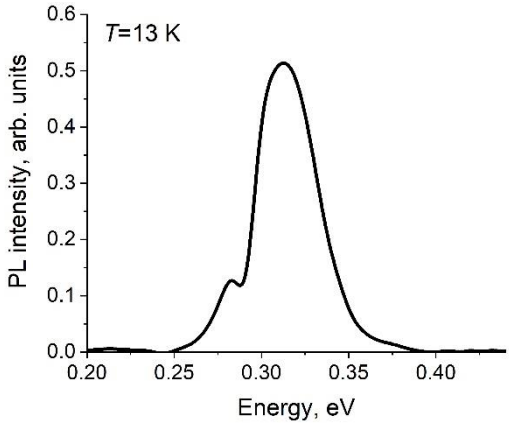


Рис. 1. Спектр ФЛ ГС 0424 при T = 13 K

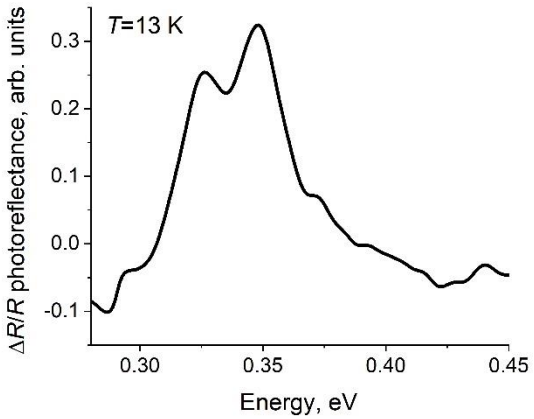


Рис. 2. Спектр ФО ГС 0424 при T = 13 K

Заключение

В работе представлены результаты исследований оптических свойств ГС HgTe/CdHgTe с «узкими» (до 3 нм) квантовыми ямами. Методами ИК Фурье-спектроскопии определены энергии оптических переходов. Показана перспективность совместного использования ФЛ и ФО для описания зонной структуры ГС на основе КРТ.

Список литературы

[1] G. Alymov, V. Rumyantsev, S. Morozov, V. Gavrilenko, V. Aleshkin, D. Svintsov. ACS Photonics, **7**, 98 (2019).

[2] J. Shao, X. Chen, M. Wang, W. Lu. Acta Physica Sinica, **74**(1), 017801 (2025).

[3] В.А. Швец, Н.Н. Михайлов, Д.Г. Икусов, И.Н. Ужаков, С.А. Дворецкий. Оптика и спектроскопия, **127**(8), 318 (2019).

Исследование возможности применения новой конструкции полевых транзисторов для повышения энергоэффективности монолитных интегральных схем приемного тракта радиометра

В. Г. Тихомиров [1], **С. В. Чижиков** [2✉], **А. Г. Гудков** [3], **И. А. Сидоров** [3], **А. Е. Синев** [1], **Е. А. Тертышная** [1], **Г. А. Гудков** [3,4]

[1] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия;

[2] Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия;

[3] МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

[4] ООО «НПИ ФИРМА «ГИПЕРИОН», Москва, Россия

✉chigikov95@mail.ru

Аннотация. Высокое потребление тока усилительными каскадами в миниатюрном корпусе радиометрического приемника с существующими на сегодняшний день этими микросхемами приводит к значительному искажению картины реального поля внутренних температур и влажности почвы. Существующая проблема может быть решена путем создания новых активных элементов из специализированных монолитных СВЧ-чипов - малошумящих транзисторов, для которых при проектировании гетероструктур будут учтены требования высокой энергоэффективности. В статье представлены результаты численного моделирования новой конструкции транзистора для использования в составе монолитных интегральных схем энергоэффективного малошумящего усилителя миниатюрного радиометра.

Ключевые слова: радиометрический приемник, МИС СВЧ, энергопотребление, энергоэффективность.

Введение

К усилительному тракту радиометрического приемника предъявляются чрезвычайно высокие требования по миниатюрности, точности определения температуры и влажности почвы, рекордно низкому уровню собственных шумов в микроволновом диапазоне и др.

Низкий уровень принимаемых радиометрическим приемником сигналов приводит к необходимости обеспечения усиления приемного тракта порядка 80 дБ при минимальных уровнях собственных шумов. Для построения такого тракта требуется несколько микросхем с суммарным потреблением тока в рабочем режиме порядка сотен миллиампер. Такое потребление тока усилительными каскадами в миниатюрном корпусе радиометра, при использовании даже самых современных микросхем, приводит к значительному повышению температуры внутри корпуса и последующему нагреву радиометрического приемника с искажением картины реального поля температур и влажности почвы. Существующая проблема может быть решена путем создания новых активных элементов - специализированных монолитных СВЧ-микросхем на малошумящих транзисторах, для которых уже при проектировании гетероструктур будут учитываться требования высокой энергоэффективности, в первую очередь низкое тепловыделение в окружающее пространство, низкий уровень шума и достаточное усиление [1].

Материалы и методы

Для решения проблемы повышения энергоэффективности приемного тракта мобильного радиометра в последние годы нашей научной группой проведены исследования, которые привели к появлению новых конструкций малошумящих транзисторов в МИС СВЧ, что позволило существенно повысить характеристики радиометра, питающегося от автономного источника ограниченной емкости. Развитием выбранного направления стало исследование возможности применения совершенно новой конструкции гребенчатых полевых транзисторов на сверхрешетках (Superlattice Castellated Field Effect Transistors, SLCFET) для использования во входных каскадах МИС СВЧ (Рис. 1) [2].

Такие приборы исследуются сейчас ведущими мировыми научными центрами [3,4] в основном с целью повышения удельной выходной микроволновой мощности и снижения сопротивления канала. Основное внимание уделяется эффектам «горячих» электронов, нелинейности выходной характеристики и гистерезису на передаточной характеристике. Однако такая конструкция имеет потенциал и с точки зрения повышения эффективности управления током в канале за счет расположения затворного электрода более чем в одной плоскости. Для выяснения возможности применения подобных конструкций транзисторов было проведено численное моделирование с использованием ранее полученных и верифицированных результатов [1,5].

Результаты и обсуждение

Проведено численное моделирование упрощенного варианта новой конструкции гребенчатых полевых транзисторов на сверхрешетках.

Расчеты показали возможность резкого увеличения крутизны передаточной характеристики новой конструкции без существенного роста токопотребления единичным транзистором (Рис. 2).

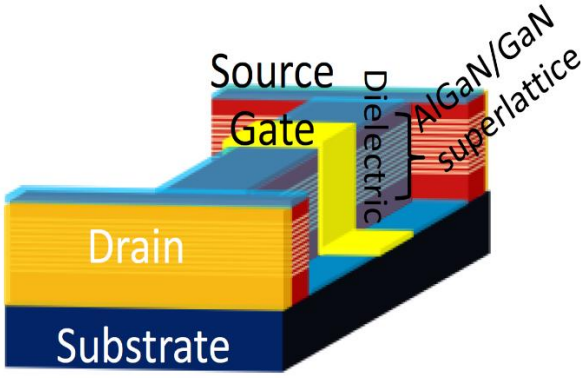


Рис. 1. Схематический вид гетероструктурной конструкции SLCFET [4].

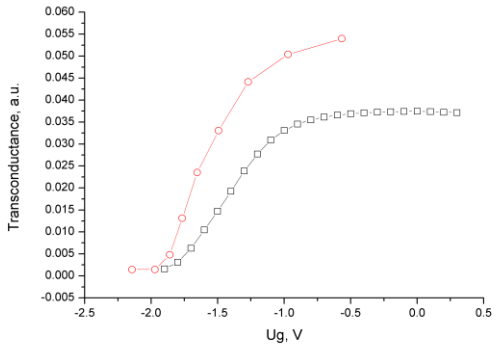


Рис. 2. Рассчитанные характеристики крутизны передаточной характеристики транзистора традиционной и новой конструкции. Красные линии – конструкция SLCFET, черные линии – традиционная конструкция.

Заключение

Показана возможность существенного повышения коэффициента усиления входных каскадов малошумящего усилителя без роста энергопотребления за счет увеличения крутизны передаточной характеристики гетероструктурного полевого транзистора новой конструкции. Анализ выявил необходимость оптимизации самой гетероструктуры и всей конструкции транзистора для использования всех потенциальных преимуществ нового прибора.

Список литературы

[1] V. G. Tikhomirov, S. V. Chizhikov, A. G. Gudkov, R. S. Ignatovich, G. A. Gudkov. St. Petersburg Polytech. Univ. J.: Phys. Math. **16** (3.1) 463-467 (2023).

[2] R. S. Howell, B. Novak, T. Vasen, P. Shea, J. Chang, S. Afroz. IEEE Microw. Wirel. Technol. Lett., **33**, 839–842 (2023).

[3] A. S. Kumar, S. Dalcanale, M. J. Uren, J.W. Pomeroy, M. D. Smith, J. A. Parke, R. S. Howell, M. Kuball. Nat. Electronics, **8**, 510-517 (2025).

[4] A. K. Shaji, M. J. Uren, J. W. Pomeroy, M. D. Smith, S. Afroz, T. Vasen, M. Kuball. IEEE Electron Device Lett., **44** (11), 1821-1824 (2023).

[5] V. G. Tikhomirov, A. G. Gudkov, S .V. Agasieva, D. D. Dynaiev, M. K. Popov, S. V. Chizhikov. J. Phys. Conf. Ser., **1410,** 012191 (2019).

Оптическое детектирование радиальной динамики частиц, локализованных в квадрупольных электродинамических ловушках

А. А. Кропотов [1]✉, **В. В. Рыбин**[1], **С.С. Рудый**[1], **Д. П. Щербинин** [1]
[1] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
✉arseniy.kropotov@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе предлагается новый метод регистрации динамики заряженных микрочастиц, локализованных в линейных квадрупольных ловушках Пауля. Предлагаемый подход позволяет проводить регистрацию динамики частицы в радиальной плоскости ловушки, с использованием сигнального лазерного излучения, направленного вдоль принципиальной оси ловушки. Лазерное излучение частично рассеивается на осциллирующей частице, позволяя сформировать нестационарную интерференционную картину в задней фокальной плоскости оптической системы лазерного детектирования. Анализ пространственного распределения интенсивности интерференционной картины с помощью квадрантного фотодетектора в свою очередь позволяет восстанавливать траекторию движения частицы. Предложенный подход характеризуется высоким пространственным и временным разрешением, и будет востребован при проведении исследовательских работ в области сенсорики и неравновесной физики.

Ключевые слова: левитодинамика, лазерное детектирование, ловушки Пауля, квадрупольные ловушки.

Введение

Электродинамические ловушки являются универсальным инструментом для удержания и исследования одиночных заряженных частиц от атомарных ионов до микрочастиц [1, 2]. В последние годы электродинамические ловушки получили распространение в таких областях исследований, как прецизионная метрология, физика неравновесных и хаотических систем [1, 3, 4], макромасштабные квантовые эффекты и аналоговые вычисления [1, 2].

Линейные электродинамические ловушки представляют собой систему электродов (стержневых и торцевых), создающих электрическое поле, способное удержать заряженные частицы в ограниченном пространстве. Стержневые электроды, направленные вдоль принципиальной оси ловушки, создают переменное поле, при взаимодействии с которым движение частицы становится ограниченным в радиальной плоскости – плоскости перпендикулярной принципиальной оси ловушки. Ограничение движения частицы вдоль принципиальной оси достигается за счет взаимодействия частицы с полем торцевых электродов. В квадрупольных ловушках при локализации в буферном газе аксиальная динамика частиц оказывается вырожденной и не представляет интереса для исследования. В то же время динамический режим частиц в радиальной плоскости, обусловленный взаимодействием с нестационарным полем стержневых электродов, характеризуется суперпозицией всех сил в системе и может быть существенно нелинейным [3, 4]. Движение локализованной частицы в радиальной плоскости ловушки определяется действием возвращающей силы ловушки и диссипативными силами в системе, которые в общем случае нелинейны; проявлением стохастических эффектов при взаимодействии с молекулами буферного газа и резонансных эффектов при совпадении частот микродвижений и секулярных мод. Более того, именно радиальная динамика, ввиду своей принципиальной нелинейности, оказывается высокочувствительной к внешним воздействиям, что открывает новые горизонты для разработки сенсорных платформ для детекции малых сил и ускорений.

Основная часть

Наибольший интерес при работе с описанной левитодинамической системой представляет радиальная динамика локализованных частиц. Для регистрации движения частиц в простейшем случае могут использоваться микроскопические оптические схемы с

высокоскоростными камерами в качестве детекторов, однако такие подходы имеют ряд существенных ограничений. Основное ограничение связано с дифракционным пределом оптических микроскопов, не позволяющим разрешать низкие амплитуды осцилляций локализованных частиц. Частота кадров видео камер обратно пропорциональна разрешению кадра, что накладывает дополнительные ограничения при регистрации динамики движения частиц. Кроме того, высокоскоростные камеры продуцируют большой объем избыточной информации.

В настоящей работе для одновременного достижения высокого пространственного и временного разрешения движения локализованной частицы используется оптическая система на основе методов лазерного детектирования. При прохождении сфокусированного лазерного излучения через область локализации часть излучения рассеивается на частице. При этом в задней фокальной плоскости оптической системы формируется картина интерференции падающего и рассеянного излучений [5]. Так как движение частицы в лазерном пучке нестационарно, распределение интерференционных полос так же будет нестационарным, а смещение полос будет скоррелировано с движением частицы. Для регистрации смещения интерференционной картины, в работе применялся квадрантный детектор с высокоскоростным аналого-цифровым преобразователем. Регистрация радиальной динамики частиц предполагает распространение сигнального лазерного излучения перпендикулярно радиальной плоскости ловушки, вдоль её принципиальной оси. В рамках настоящей работы была предложена конфигурация квадрупольной ловушки с кольцевыми торцевыми электродами, которые, с одной стороны, позволяют ограничить аксиальное движение частицы, а с другой не препятствуют прохождению сигнального лазера. В работе приводятся результаты исследования динамических режимов движения локализованных микрочастиц в радиальной плоскости квадрупольной ловушки, восстановлены траектории их движения и определен спектральный состав их трансляционных осцилляций по соответствующим осям.

Заключение

В работе предложен метод регистрации радиальной динамики заряженных микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке Пауля, позволяющий обеспечить высокое пространственно-временное разрешение движения частицы. Предложенный метод основан на анализе нестационарной интерференционной картины, формируемой рассеянным на частице лазерным излучением. Разработанный подход открывает новые перспективы для создания высокочувствительных сенсорных платформ и исследований в области неравновесной физики.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-22-00694.

Список литературы

[1] Gonzalez-Ballestero, C., Aspelmeyer, M., Novotny, L., Quidant, R., Romero-Isart, O. Science, **374**(6564), eabg3027 (2021).
[2] Millen, J., Monteiro, T. S., Pettit, R., & Vamivakas, A. N. Rep. Prog. Phys., **83**(2), 026401 (2020).
[3] Rybin, V., Semynin, M., Rudyi, S., Ivanov, A., & Shcherbinin, D. Phys. Rev. A, **112**(3), 033501 (2025).
[4] Rybin, V., Rudyi, S., & Rozhdestvensky, Y. Int. J. Non-Linear Mech., **147**, 104227 (2022).
[5] Gittes F., Schmidt C. F. Opt. let, **23**(1), 7-9 (1998).

Электрофизические характеристики полимерных нанокомпозитов на основе эпоксидной смолы с углеродными наноструктурами и магнитными частицами

Н. П. Кузьмин [1], В. А. Сергеев [1], И. В. Фролов [1]✉, О. А. Радаев [1], М. В. Бузаева [2]

[1] УФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Ульяновск, Россия;

[2] Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

✉ilya-frolov88@mail.ru

Аннотация. Исследованы электрофизические характеристики нанокомпозитных материалов из эпоксидной смолы с многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ), графеном и магнитными частицами (МЧ). Показано, что при увеличении концентрации наночастиц от 0 до 0,11% диэлектрическая проницаемость нанокомпозитов с МУНТ и МЧ, измеренная на частоте 1 МГц, возрастает на 10%, а нанокомпозита с графеном – на 15%. При этом комплексное сопротивление нанокомпозитов с МУНТ уменьшается на 12%, у нанокомпозитов с графеном и МЧ – на 20 %. Дальнейшее увеличение концентрации наночастиц до 0,45% приводит к слабым изменениям диэлектрической проницаемости и комплексного сопротивления.

Ключевые слова: полимерные нанокомпозиты, углеродные наночастицы, магнитные частицы, электрофизические характеристики.

Введение

Полимерные нанокомпозитные материалы в настоящее время находят широкое применение в радиоэлектронике. Так введение углеродных нанотрубок в небольших концентрациях (0,01 – 2 %) в полимерную матрицу позволяет существенно улучшать свойства обычных полимерных материалов: повышать электро- и теплопроводность, улучшать механические характеристики [1, 2]. Включение проводящих наночастиц в полимер придает материалу экранирующие свойства, а чувствительность к изменениям влияющих величин позволяет использовать полимерные нанокомпозиты при разработке датчиков [3]. Таким образом, исследование свойств нанокомпозитных материалов является актуальной задачей.

Материалы и методы

Исследованы электрофизические характеристики нанокомпозитных материалов на основе матрицы из эпоксидной смолы ЭД-22 с тремя типами наночастиц (НЧ): многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ), полученные методом MOCVD, графеном (графеновые нанопластины RG-S1 производства ООО «Русграфен») и магнитными частицами (МЧ). Микрогранулы магнетита в полимере размером 5-30 мкм измельчали в шаровой мельнице в течение 10 мин до высвобождения магнетита (Fe_3O_4) из гранулы и получения наноразмерных частиц.

Равномерное распределение НЧ и точность дозирования в эпоксидную смолу обеспечивалось путем их диспергирования (в соотношении Т : Ж равном 1 : 10) в растворителе (CCl_4) и последующего ультразвукового воздействия (5 мин, частота 22 кГц, ультразвуковой диспергатор ИЛ 100-6/4). Суспензию рассчитанного объема помещали в вытяжной шкаф до полного испарения растворителя. К оставшимся на дне емкости наночастицам добавляли смолу рассчитанной массы и механически перемешивали в течение 2 мин. После введения отвердителя бисфенола А смолу заливали в силиконовые формы. Отверждение проводили при комнатной температуре в течение 24 часов. Были получены образцы с содержанием НЧ: 0,0; 0,055; 0,11; 0,45 масс.%.

Измерения проводились на анализаторе иммитанса Е7-29. Измерялись зависимости емкости и модуля импеданса в диапазоне частот от 50 кГц до 15 МГц. Диэлектрическая проницаемость рассчитывалась из результатов измерения емкости на основе выражения для емкости плоского конденсатора. Комплексное сопротивление |Z| нормировалось на толщину образца d.

Результаты и обсуждение

Определено, что при увеличении концентрации наполнителя до 0,11% диэлектрическая проницаемость нанокомпозитов с графеном и МЧ возрастает на 10%, а нанокомпозита с МУНТ – на 15 %. При дальнейшем увеличении концентрации наполнителя диэлектрическая проницаемость нанокомпозитов с графеном и МЧ уменьшается, а диэлектрическая проницаемость нанокомпозита с МУНТ слабо возрастает (рис. 1). При увеличении концентрации наполнителя до 0,11% комплексное сопротивление нанокомпозитов с МУНТ уменьшается на 12%, у нанокомпозитов с графеном и МЧ – на 20 %. Дальнейшее увеличение концентрации наночастиц до 0,45% приводит к слабым изменениям комплексного сопротивления (рис. 2).

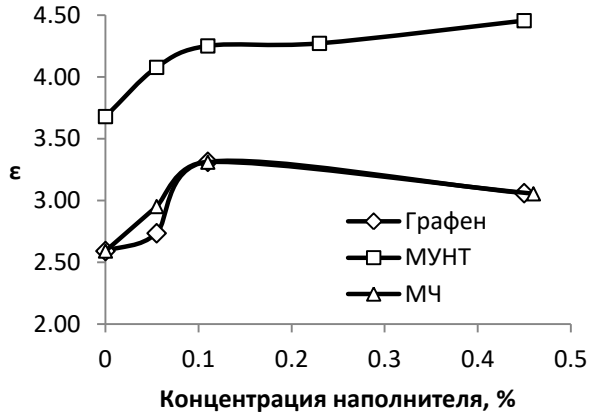


Рис. 1. Диэлектрическая проницаемость нанокомпозитов с различной концентрацией наполнителя на частоте 1 МГц

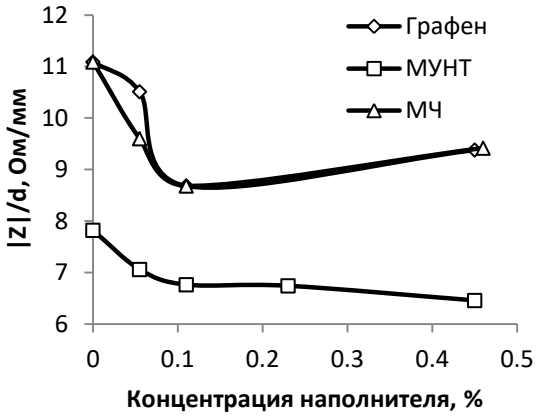


Рис. 2. Модуль импедансса нанокомпозитов с различной концентрацией наполнителя на частоте 1 МГц, нормированный на толщину образца

Заключение

Полученные результаты показывают, что наиболее существенное изменение электрофизических характеристик нанокомпозитных материалов из эпоксидной смолы с МУНТ, графеном и МЧ происходят при увеличении концентрации наполнителя в пределах 0 – 11%. Слабые изменения характеристик при дальнейшем увеличении концентрации, вероятно, связаны с превышением порога перколяции и образованием в пластине проводящей сетки из наночастиц, что согласуется с результатами измерений коэффициентов ослабления и отражения СВЧ излучения и температуропроводности образцов из эпоксидной смолы с МУНТ [4, 5].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН (FFWZ-2025-0010).

Список литературы

[1] Yan, T., Wu, Y., Yi, W., & Pan, Z. Sensors and Actuators A: Physical, **327**, 112755 (2021).

[2] Shukla, P., & Saxena, P. Polymer nanocomposites in sensor applications: a review on present trends and future scope. Chinese Journal of Polymer Science, **39**(6), 665-691 (2021).

[3] Kushwaha, C. S., Singh, P., Shukla, S. K., & Chehimi, M. M. Materials Science and Engineering: B, **284**, 115856 (2022).

[4] Бузаева М.В., Анисимов В.Г., Борисов Ю.С., Фролов И.В., Сергеев В.А., Хайруллова Р.М. *Актуальные проблемы физической и функциональной электроники* (Ульяновск, УлГТУ, 2025), с. 219–221.

[5] Vasin S.V., Kuzmin N.P., Sergeev V.A., Buzaeva M.V. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics,18 (3.1), 135 (2025).

Влияние диаметра рабочей камеры на перемещение и развиваемую силу взрывного актюатора

П. С. Шлепаков [1]✉, **И. В. Уваров** [1], **В. Б. Световой** [2]

[1] Обособленное подразделение «Отдел микротехнологий» - Ярославль ОФТИ им. К.А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт», Ярославль, Россия;

[2] Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия;

✉p.shlepakov@bk.ru

Аннотация. Микрофлюидные устройства представляют интерес для биотехнологий и медицины, но их широкому применению препятствует отсутствие компактных и эффективных актюаторов. Недавно был представлен актюатор объемом менее 1 мм^3, использующий взрыв водород-кислородной смеси в качестве рабочего принципа. Такой актюатор демонстрирует быстрое срабатывание и большую развиваемую силу, но имеет невысокую рабочую частоту. Повысить частоту удалось за счет увеличения размера рабочей камеры, однако влияние этого параметра на другие характеристики не было изучено. В настоящей работе показано, что увеличение диаметра от 0,5 до 0,75 мм не оказывает влияния на ход мембраны и развиваемую силу. Расширение камеры до 1 мм сокращает перемещение в 3 раза в результате возбуждения колебательных мод высокого порядка.

Ключевые слова: электрохимический актюатор, электролиз переменной полярности, взрыв, перемещение, развиваемая сила.

Введение

Появление микрофлюидных систем открыло новые возможности в анализе веществ, исследовании клеток и диагностике заболеваний [1]. Однако широкое применение таких систем ограничивается отсутствием компактных и эффективных актюаторов, перемещающих жидкость. Недавно был представлен актюатор нового типа, использующий взрыв водород-кислородной смеси в качестве рабочего принципа [2]. Актюатор представляет собой рабочую камеру с электролитом и двумя электродами, закрытую гибкой мембраной. Методом электролиза переменной полярности в камере создается микропузырь, содержащий смесь водорода, кислорода и нанокапель. Наличие последних приводит к взрывному расширению микропузыря, толкающему мембрану. Такой принцип работы обеспечивает большое перемещение за короткое время при объеме устройства менее 1 мм^3. За счет увеличения размера рабочей камеры была на порядок повышена частота срабатывания устройства [3], но влияние этого параметра на ход мембраны и развиваемое усилие не было изучено. В работе исследованы перемещение и сила актюатора в зависимости от диаметра камеры.

Материалы и методы

Актюатор изготавливали на термически окисленной кремниевой пластине. Стенки рабочей камеры высотой 48 мкм формировали в слое фоторезиста SU-8. Камера была закрыта гибкой мембраной из полидиметилсилоксана толщиной 50 мкм и заполнена одномолярным раствором сульфата натрия в дистиллированной воде. Диаметр камеры d составлял 0,5, 0,75 и 1 мм. Внутри камеры находились двухслойные электроды Al/Ru толщиной 500/150 нм. Один электрод заземляли, а на второй с помощью специально изготовленного генератора подавали серию импульсов напряжения переменной полярности частотой 500 кГц. Электролиз создавал нанопузыри водорода и кислорода. По достижении их критической концентрации они сливались в микропузырь, взрывающийся и толкающий мембрану. При амплитуде импульсов в пределах 11-12 В взрыв происходил в течение 20 мс. Генератор отслеживал момент взрыва и подавал сигнал на фотокамеру, закрепленную на оптическом микроскопе. Фотография мембраны сверху позволяла оценить размер микропузыря и его форму. По фотографиям сбоку измеряли ход мембраны. Для измерения развиваемой силы на мембране размещали шар диаметром 1 мм и массой 4,1 мг. Силу рассчитывали по высоте подброса шара.

Результаты и обсуждение

Фотография актюатора в момент взрыва представлена на рис. 1. Мембрана формирует темный силуэт и тень. Зависимость перемещения мембраны и развиваемого усилия от диаметра камеры представлено на рис. 2. Перемещение центра мембраны составляло 76±3 и 65±20 мкм для $d = 0{,}5$ и 0,75 мм соответственно. Средние значения были близки и совпадали в пределах погрешности, но для $d = 0{,}75$ мм наблюдался заметно больший разброс. Он объяснялся попеременным возбуждением первой и второй колебательных мод мембраны. С ростом d собственные частоты мембраны уменьшались, что увеличивало вероятность возбуждения высших мод. По этой причине перемещение мембраны диаметром 1 мм составляло лишь 19 ± 4 мкм.

Для устройств с рабочей камерой $d = 0{,}5$; 0,75 и 1 мм среднее усилие составляло 0,21±0,01; 0,20±0,01 и 0,15±0,01 Н соответственно. Актюаторы с диаметром рабочей камеры 0,5 и 0,75 мм равны по усилию в пределах погрешности. В обоих случаях распределение широкое. Распределение для $d = 1$ мм самое узкое, следовательно такой актюатор создавал относительно стабильное усилие. Форма колебаний мембраны диаметром 1 мм соответствовала высшей моды, при которой перемещение осуществлялось по центру и периметру камеры. Для такой мембраны зафиксировано меньшее усилие, так как шар перед взрывом соприкасался по центру камеры, а отклонения мембраны по периметру не действовали на него и не учитывались. Исходя из осциллограмм тока, начальный размер микропузыря одинаков для всех камер исследуемых диаметров, поэтому величина усилия так же не зависит от диаметра.

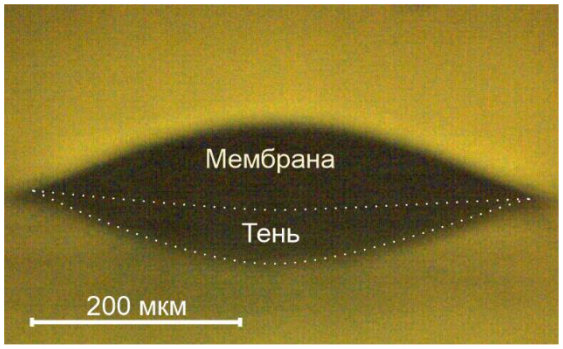


Рис. 1. Фотографии мембраны диаметром 0,5 мм в момент взрыва, сделанная под углом 3° к поверхности образца.

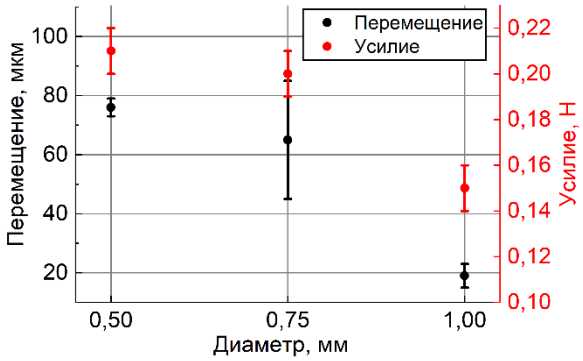


Рис. 2. Зависимость перемещения и развиваемой силы актюатора от диаметра камеры.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 25-29-00292.

Список литературы

[1] P. P. Behera, N. Kumar, M. Kumari, S. Kumar, P. K. Mondal, R. K. Sens. Diagn., **2**(6), 1437-1459 (2023).

[2] I. V. Uvarov, P. S. Shlepakov, V. B. Svetovoy. Adv. Mater. Technol., **9**(18), 2400690, (2024).

[3] P. S. Shlepakov, I. V. Uvarov, V. B. Svetovoy. Russ. Microelectron., **54** (8), 1147–1149, (2025)

Расчет рабочих характеристик МЭМС-переключателя последовательно-шунтирующего типа для диапазона частот 0.4-10 ГГц

М. О. Морозов[1,2]✉, **И. В. Уваров**[1]

[1]Обособленное подразделение «Отдел микротехнологий» – Ярославль ОФТИ им. К.А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт», Ярославль, Россия

[2]Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия

✉matvey19991@mail.ru

Аннотация. В современных системах связи высокие радиочастотные характеристики коммутационных элементов критически важны. Удовлетворить возрастающим требованиям способны переключатели на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС). Они используют последовательный или шунтирующий принципы переключения, оба из которых обеспечивают низкие вносимые потери, но позволяют достичь высокой изоляции лишь в узком диапазоне частот. В настоящей работе для расширения рабочего интервала использовано сочетание этих принципов. Характеристики МЭМС-переключателя рассчитаны методом конечных элементов. Рабочий диапазон составляет 0.4-10 ГГц и превышает диапазон частот стандартных МЭМС-ключей более чем на 5 ГГц. Изоляция в этом диапазоне находится в пределах от 46 до 63 дБ.

Ключевые слова: МЭМС-переключатель, изоляция, вносимые потери, метод конечных элементов.

Введение

Современные системы связи предъявляют все более высокие требования к коммутационным элементам. Соответствовать новым критериям способны МЭМС-переключатели, представляющие собой миниатюрные электромеханические реле. Такие устройства используют последовательный или шунтирующий принципы переключения. В первом случае подвижный электрод замыкает разрыв сигнального проводника линии передач [1], а во втором – замыкает сигнальный и заземленный проводники [2]. Как правило, последовательные ключи работают на частотах от 0 до 4 ГГц, а шунтирующие – на частотах выше 4 ГГц. Ограничение диапазона связано с тем, что высокая изоляция достигается лишь в узком интервале частот. Расширить рабочий диапазон позволяет сочетание последовательного и шунтирующего принципов коммутации. В настоящей работе рассмотрен последовательно-шунтирующий МЭМС-переключатель на основе миниатюрного электростатического актюатора [3]. Исследованы его радиочастотные характеристики в диапазоне 0.1-10 ГГц.

Материалы и методы

Переключатель представляет собой сапфировый чип размерами 3x3x0.46 мм. На поверхности кристалла сформирована копланарная линия передач из алюминия толщиной 3.6 мкм. В нее встроены четыре кантилевера длиной 50 мкм, как показано на Рис. 1. Под кантилеверами располагаются управляющие электроды, подача напряжения на которые приводит кантилеверы в контакт с тонкопленочным конденсатором $Ru/SiO_2/Ru$ толщиной 100/50/100 нм. Ключ находится в замкнутом состоянии, когда кантилеверы, закрепленные на сигнальном проводнике (последовательные кантилеверы), касаются конденсатора. В этом случае сигнал проходит по линии передач с минимальными потерями. Ключ размыкается, когда последовательные кантилеверы возвращаются в исходное положение, а кантилеверы, закрепленные на заземленных проводниках (шунтирующие кантилеверы), приходят в контакт с конденсатором. Разрыв сигнального проводника препятствует прохождению низкочастотного сигнала, а заземление верхней обкладки конденсатора изолирует выход от входа на высоких частотах.

Рабочие характеристики переключателя были рассчитаны методом конечных элементов. Модель содержала $3x10^5$ элементов тетраэдрической формы. Изгиб кантилеверов под действием электростатической силы не моделировали. Смену состояния

ключа осуществляли путем изменения высоты контактных выступов с 0.40 до 0.85 мкм, а контактное сопротивление 5 Ом, характерное для выбранного актюатора, задавали путем подбора удельного сопротивления материала выступов.

Результаты и обсуждение

СВЧ-характеристики переключателя представлены на Рис. 2. На низких частотах вносимые потери были велики, что являлось особенностью последовательного ключа со встроенным конденсатором. Однако они быстро уменьшались с ростом частоты и достигали приемлемой величины 0.5 дБ на частоте 0.4 ГГц. Минимум потерь, составляющий 0.4 дБ, находился на частоте 1.8 ГГц. Уровень 0.5 дБ снова достигался на частоте 10 ГГц. Изоляция в диапазоне 0.4-10 ГГц составляла 46-63 дБ. Она ухудшалась с ростом частоты, но оставалась на высоком уровне по сравнению с другими МЭМС-ключами. Такой результат был достигнут благодаря комбинации последовательной и шунтирующей конфигураций. Этот подход не только расширил рабочий диапазон более чем на 5 ГГц по сравнению с последовательными и шунтирующими ключами, но также увеличил изоляцию более чем на 10 дБ. Такие характеристики делают представленный ключ перспективным для широкополосных СВЧ устройств. Важно отметить, что рабочий интервал 0.4-10 ГГц определялся именно вносимыми потерями. Уменьшение контактного сопротивления за счет подбора материала контактов или изменения конструкции актюатора существенно сократит потери и еще более расширит этот диапазон.

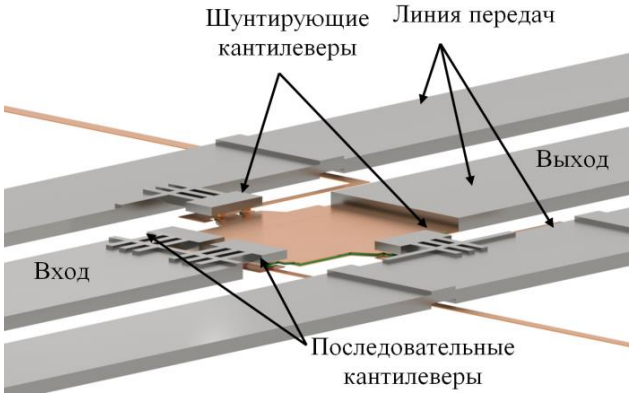


Рис. 1. Схематичное изображение ключа.

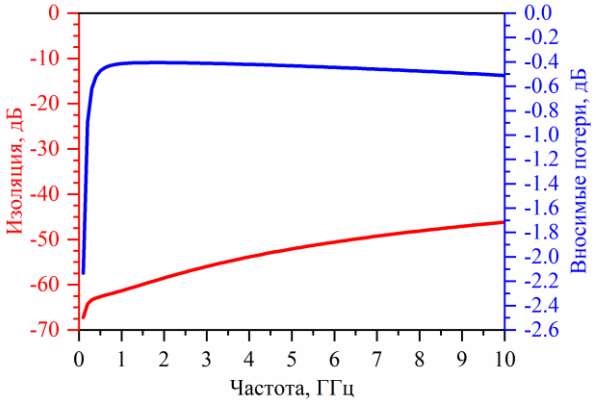


Рис. 2. Зависимость радиочастотных характеристик ключа от частоты коммутируемого сигнала.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

[1] D. Bansal, A. Bajpai, P. Kumar, M. Kaur, K. Rangra. J. Micro/Nanolithogr., MEMS, MOEMS., **15**(4), 045001 (2016).

[2] D. Bansal, A. Kumar, A. Sharma, P. Kumar, K. J. Rangra. Microsyst. Technol., **20**(2), 337 (2014).

[3] I. A. Belozerov, I. V. Uvarov. St. Petersburg Polytech. Univ. J. Phys. Math., **83**(3.2), 168 (2025).

Субтерагерцовый волноводный монолитный аттенюатор без подложки на основе материала с фазовой памятью GST

А. К. Кожуховский [1] ✉, С. В. Селиверстов [1,2,4,5], Д. Г. Фудин [1] и Г. Н. Гольцман [3,6]

[1] Московский Педагогический Государственный Университет, Москва, Россия;
[2] Лаборатория фотонных газовых сенсоров, Университет науки и технологий «МИСИС», Москва, Россия;
[3] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия;
[4] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;
[5] Научно-исследовательский институт телекоммуникаций, НИУ ВШЭ, Москва, Россия;
[6] Российский Квантовый Центр, Москва, Россия
✉ak_kozhukhovskii@student.mpgu.edu

Аннотация: Ускоренное развитие терагерцовой (ТГц) фотоники и искусственного интеллекта обуславливается потребностью в высокоскоростной обработке данных. Традиционная электроника ограничена высоким энергопотреблением, что делает использование интегральных фотонных схем с метаматериалами более перспективным. Ранее было показано, что материал с фазовой памятью GST позволяет изменять коэффициент пропускания волноводного монолитного аттенюатора без подложки с нанесённым на его поверхности слоем GST за счет изменения состояния фазы при нагреве. В предыдущих работах использовалось нагревание в печи. В данной работе продемонстрировано, что изменение толщины слоя GST мало влияет на результат. При этом уменьшение толщины позволит использовать оптический лазер для локального нагрева, что сделает конечное устройство более автономным.

Ключевые слова: терагерцовые интегральные схемы, материал с фазовой памятью, GST

Annotation: It has been demonstrated that a phase-memory material (GST) allows for modulating the transmission of a substrate-free monolithic waveguide attenuator with a GST layer deposited on its surface by changing its phase state upon heating. In this paper, we report that reducing the GST layer thickness does not significantly affect the result. This solution enables local heating of the material using an optical laser, allowing for more autonomous operation of the device.

Keywords: Terahertz photonics, artificial neuro network, GST

Введение

Опубликованные ранее экспериментальные результаты демонстрируют, что изменение фазы GST приводит к изменению коэффициента пропускания в ТГц диапазоне [1-2]. Изменение фазового состояния слоя GST толщиной 170 нм, нанесённого на поверхность волноводного монолитного полностью кремниевого аттенюатора без подложки, осуществлялось за счёт нагрева структуры в печи потоком аргона. Данный подход имеет принципиальное ограничение, связанную с автономностью конечного устройства. Целью данного исследования является демонстрация того, что уменьшение толщины слоя GST не приводит к существенной деградации коэффициента пропускания, но открывает возможность использования оптического лазера для локального изменения фазового состояния GST за счёт нагрева.

Материалы и методы

Было проведено электромагнитное численное моделирование с помощью программного обеспечения ANSYS HFSS. Для этого была создана модель волноводной структуры со следующими параметрами: ширина волновода 585 мкм, толщина 400 мкм,

длина 7.5 мм. В модели задавалась диэлектрическая проницаемость высокоомного кремния в 11.9. Участок GST задавался параллелепипедом на поверхности волновода с площадью верхней и нижней граней в 585×7500 мкм^2. Толщина слоя варьировалась от 20 нм до 170 нм с шагом 50 нм. Исследовался спектр $|S_{21}|$ параметра в диапазоне частот от 130 ГГц до 150 ГГц.

Вычисления производились для двух фазовых состояний материала GST. В соответствии с работой [1] диэлектрическая проницаемость в аморфном состоянии в диапазоне 0.1 - 0.5 ТГц задавалась выражением $\varepsilon_a = 264.7 + 35.29i$, для кристаллического состояния $\varepsilon_c = 517.64 + 158.82i$ в том же диапазоне.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования представленные на Рис. 1 продемонстрировали малую разницу коэффициента пропускания при изменении толщины слоя нанесенного материала GST. Средняя разница $|S_{21}|$ параметра на частоте 140 ГГц в аморфном состоянии составляет около 0.116 dB, а в кристаллическом состоянии около 0.696 dB при той же частоте излучения. Данный метод качественно подтверждает возможность использования слоя GST меньшей толщины, достаточной для перевода фазового состояния с помощью излучения лазера.

а) *б*)

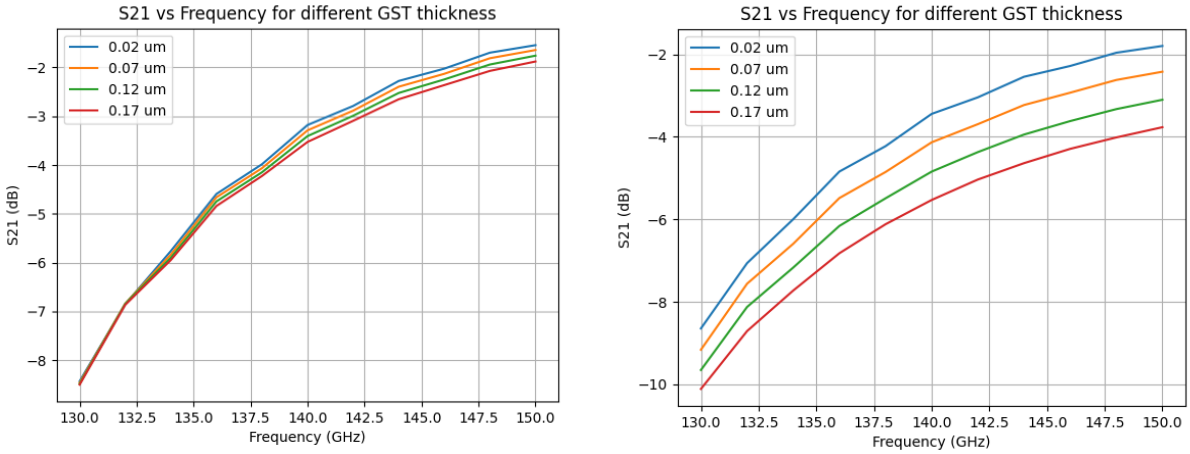


Рис.1 *а*) – Зависимость параметра $|S_{21}|$ от частоты при разной толщине нанесенного слоя GST в аморфном состоянии, *б*) – Зависимость параметра $|S_{21}|$ от частоты при разной толщине нанесенного слоя GST в кристаллическом состоянии

Заключение

Результаты численного моделирования подтверждают, что уменьшение толщины слоя GST на поверхности волноводных монолитных аттенюаторов без подложки не приводит к существенной деградации коэффициента пропускания. При этом открывается возможность для использования оптического лазера для локального изменения фазового состояния GST. Данный результат будет способствовать развитию ТГц фотоники, поскольку позволит упростит задачу компактных устройств, предназначенных для управления трафиком или вычислений.

Список литературы

[1] Makino, K., Kato, K., Saito, Y., Fons, P., Kolobov, A. V., Tominaga, J., ... & Nakajima, M. (2019). Terahertz spectroscopic characterization of Ge 2 Sb 2 Te 5 phase change materials for photonics applications. *Journal of Materials Chemistry C*, *7*(27), 8209-8215.

[2] Seliverstov, S., Svyatodukh, S., Kozhukhovsky, A., Fudin, D., Lazarenko, P., Terekhov, D., ... & Goltsman, G. (2025). Hybrid terahertz photonic integrated circuits based on Ge2Sb2Te5 phase change material atop of silicon waveguides. *Optical Materials*, 117216.

Внеплоскостная терагерцевая эмиссия, обусловленная анизотропией в композиционно упорядоченном двумерном сплаве ДПМ

Э. О. Чиглинцев [1]✉, К.В. Шевякова [1,2], Ф.А. Шуклин [1], А.И. Чернов [1,2]

[1] Центр фотоники и двумерных материалов, Московский физико-технический институт (МФТИ), г. Долгопрудный, Россия

[2] Российский квантовый центр, Сколково, Россия

✉ chiglintsev.eo@phystech.edu

Аннотация. В работе исследуется необычный механизм терагерцевой (ТГц) эмиссии в двумерном сплаве дихалькогенида переходного металла (ДПМ) $Mo_{0.5}W_{0.5}Se_2$, при котором излучение по нормали к поверхности индуцируется внутриплоскостными фототоками. Методами ТГц-спектроскопии разделены вклады оптического выпрямления и фототоковой динамики. Показано, что доминирующая роль фототоков обусловлена внутренними латеральными полями, возникающими из-за композиционной неоднородности и формирования наноразмерных гетеропереходов в структуре сплава. Подобное направление ТГц-эмиссии принципиально отличает исследуемые сплавы от чистых ДПМ. Это открывает возможности для реализации терагерцевых источников с новой геометрией ТГц излучения, основанных на сплавах ДПМ, позволяя при этом сохранить уникальные физические свойства, присущие чистым дихалькогенидам.

Ключевые слова: терагерцовая эмиссия, Ван-дер-Ваальсовые материалы, ДПМ.

Введение

Двумерные дихалькогениды переходных металлов — перспективные материалы для оптоэлектроники благодаря сильному свето-материальному взаимодействию [1]. В чистых ДПМ терагерцевая эмиссия обусловлена оптическим выпрямлением или фототоками, вызванными внеплоскостными полями изгиба зон [2]. Последний механизм обычно ограничивает излучение направлениями, параллельными поверхности. Сплавы ДПМ позволяют управлять шириной запрещенной зоны [3] и обладают сложной наноструктурой с композиционной неоднородностью [4]. В частности, в сплавах наблюдаются полосовые домены и латеральные гетеропереходы II рода [5]. Такая архитектура способна генерировать внутренние электрические поля непосредственно в плоскости материала.

Материалы и методы

Исследуемый кристалл $Mo_{0.5}W_{0.5}Se_2$ толщиной ~250 мкм приведён на рисунке 1, а. Для измерений выбран однородный участок 3x5 мм² без видимых дефектов.

Эксперименты по ТГц-эмиссии проводились с использованием второй гармоники (515 нм) Yb-усилителя (1030 нм, 1 кГц, 20 фс) для возбуждения образца выше края зоны проводимости. Линейно поляризованный пучок с флюенсом 7,3 мДж/см² фокусировался в пятно диаметром 1,2 мм. Образец был закреплен на вращающемся основании для изменения полярного угла, а полуволновая пластина позволяла варьировать угол поляризации накачки. Излучение собиралось параболическими зеркалами и детектировалось методом электрооптического детектирования в кристалле ZnTe (0,5 мм). Сеточный поляризатор использовался для выделения Y-компоненты ТГц-поля.

1. Результаты и обсуждение

Центральным объектом исследования стали пики временных профилей терагерцевого (ТГц) электрического поля при вращении полярного угла образца (рисунок 1, а) и угла вращения поляризации возбуждения (рисунок 1, б), полученные методом ТГц-спектроскопии.

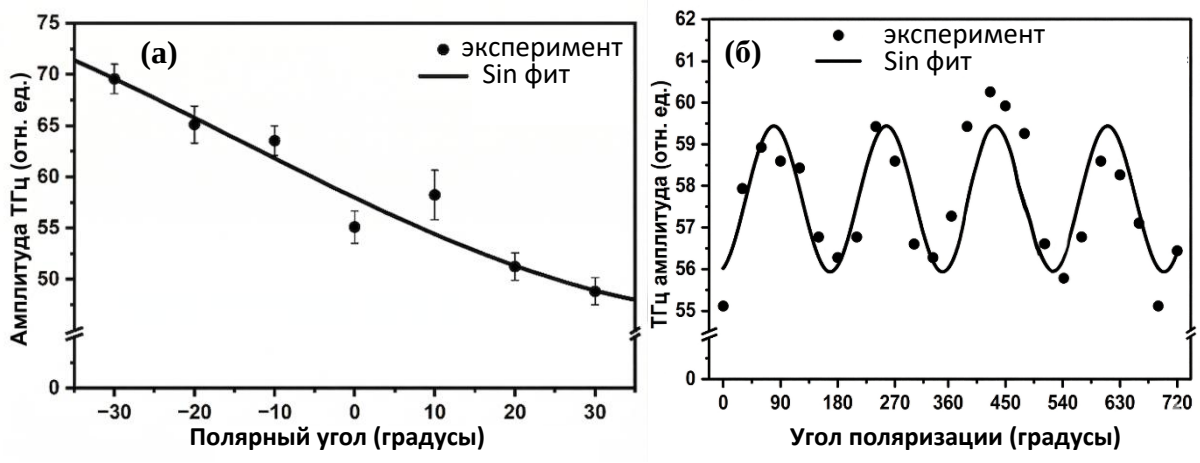


Рисунок 1. Зависимость пика ТГц амплитуды от (а) полярного угла образца и (б) угла поляризации накачки.

В отличие от чистых соединений, в сплаве $Mo_{0.5}W_{0.5}Se_2$ наблюдается ненулевой сигнал при нулевом полярном угле, что подтверждает наличие внеплоскостной компоненты эмиссии. Последнее так же подтверждается зависимостью измеренного ТГц пика от угла поляризации при нулевом полярном угле. Экспериментальные данные аппроксимируется формулой $\sin 2\Theta + C$, где Θ угол поляризации, а C – сдвиг по оси ординат. Первое слагаемое отвечает за нелинейный вклад в ТГц эмиссию, а сдвиговое слагаемое – за внутриплоскостной токовый механизм.

Заключение

В работе показано, что ТГц-эмиссия в сплаве $Mo_{0.5}W_{0.5}Se_2$ определяется механизмом, отличным от чистых ДПМ. При возбуждении выше запрещенной щели доминирует ТГц излучение, обусловленное внутриплоскостными фототоками. Эти токи вызваны внутренними полями, возникающими из-за наноразмерной неоднородности и латеральных гетеропереходов II рода. Излучение по нормали к поверхности открывает новый путь генерации ТГц-волн. Результаты подтверждают потенциал сплавов ДПМ для управления сверхбыстрым откликом и утверждают ТГц-спектроскопию как чувствительный метод анализа структуры и электронных свойств этих систем

Список литературы

[1] S. Li, H. Wang, J. Wang, H. Chen, and L. Shao, “Control of light–valley interactions in 2D transition metal dichalcogenides with nanophotonic structures,” *Nanoscale*, vol. 13, no. 13, pp. 6357–6372, 2021, doi: 10.1039/D0NR08000D.

[2] K. Si *et al.*, “Terahertz surface emission from layered semiconductor WSe2,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 448, pp. 416–423, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.apsusc.2018.04.117.

[3] M. Zhang *et al.*, “Two-Dimensional Molybdenum Tungsten Diselenide Alloys: Photoluminescence, Raman Scattering, and Electrical Transport,” *ACS Nano*, vol. 8, no. 7, pp. 7130–7137, Jul. 2014, doi: 10.1021/nn5020566.

[4] A. Azizi *et al.*, “Spontaneous Formation of Atomically Thin Stripes in Transition Metal Dichalcogenide Monolayers,” *Nano Lett.*, vol. 16, no. 11, pp. 6982–6987, Nov. 2016, doi: 10.1021/acs.nanolett.6b03075.

[5] P. Bampoulis, K. Sotthewes, M. H. Siekman, and H. J. W. Zandvliet, “Local Conduction in $Mo_x W_{1-x} Se_2$: The Role of Stacking Faults, Defects, and Alloying,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 10, no. 15, pp. 13218–13225, Apr. 2018, doi: 10.1021/acsami.8b01506.

Разработка модели интегрально-оптического волновода трапецеидального поперечного сечения

Д. А. Хрошин✉, **А. Б. Устинов**
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia;
✉ Daniil.Khroshin@gmail.com

Аннотация. В работе излагается теория, позволяющая описывать дисперсию в волноводе трапецеидального поперечного сечения. Показано, что учёт этой особенности приводит к смещению спектра электромагнитных волн, из-за чего, в частности, увеличивается глубина проникновения поля направляемой моды в оболочку, окружающую волновод.

Annotation. The thesis presents a theory describing electromagnetic wave dispersion in a waveguide with a trapezoidal cross-section. It is shown that accounting the slope of the side walls leads to a shift in the electromagnetic wave spectrum, resulting in an increase in the penetration depth of the guided mode field into the cladding.

Ключевые слова: спектр электромагнитных волн, интегрально-оптические волноводы, кремний на изоляторе.

Введение

При изготовлении интегрально-оптических микроволноводов итоговая форма поперечного сечения волновода может отличатся от прямоугольной, склоняясь к трапецеидальной [1]. В силу этой особенности, классические методы расчёта дисперсии для волноводов прямоугольного сечения дают неточный результат, а их дальнейшее использование при разработке фотонных интегральных схем может привести к ошибке. Целью данной работы является разработка теории, описывающей спектр электромагнитной волны в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах длин волн, распространяющейся в волноводе трапецеидального сечения.

Постановка задачи и метод расчёта

Моделирование спектра электромагнитных волн, распространяющихся в трапецеидальном интегрально-оптическом волноводе, проводилось для геометрии, отображенной на рисунке 1.

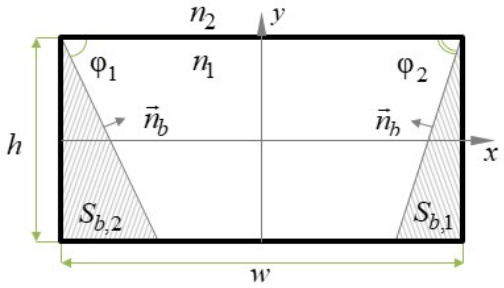


Рис. 1. Геометрия задачи

В качестве объекта моделирования был взят волновод с материалом сердцевины (n_1) из Si_3N_4, окруженный (n_2) SiO_2.

Расчёт делился на два этапа. Сначала считалась дисперсионная характеристика прямоугольного волновода по методу Маркатили, а затем, с помощью теории возбуждения [2], была вычислена модифицированная фазовая постоянная β'_m, где m – порядковый номер моды. Выражение для β'_m имело следующий вид:

$$\beta'_m = \beta_m + ic_{mm}, \quad (1)$$

где β_m – фазовая постоянная прямоугольного волновода (рис.1), а c_{mm} – коэффициент связи, учитывающий заштрихованные на рисунке 1 области, как возмущение прямоугольного волновода. Коэффициент связи выражается характерным для теории возбуждения методом, подробно описанным в [2]. Для наглядного представления

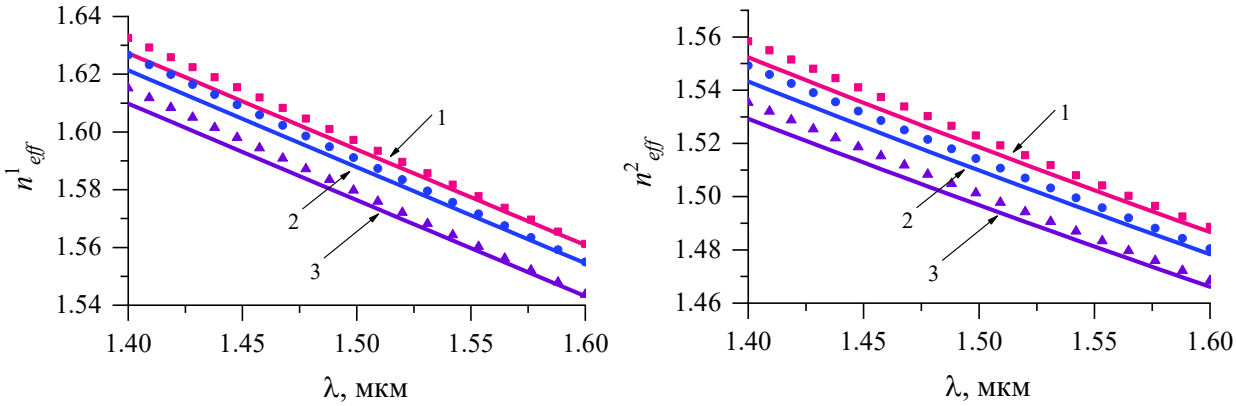
результатов моделирования, значения β'_m были переведены в термины эффективного показателя преломления n^m_{eff} при помощи следующего выражения

$$n^m_{eff} = \beta'_m / k_0. \quad (2)$$

В (2) k_0 – это волновое число в свободном пространстве.

Результаты моделирования

В ходе расчёта было принято: $\varphi_1 = \varphi_2 \equiv \varphi$. Результаты моделирования представлены на рисунке 2(*а*, *б*). Вычисления проводились для мод низшего типа – квази-TE (n^1_{eff}) и квази-TM (n^2_{eff}), при следующих параметрах: w = 1750 нм, h = 770 нм, $\varphi = 90^o$ (рис.2, кривая 1), $\varphi = 80^o$ (рис.2, кривая 2), $\varphi = 70^o$ (рис. 2, кривая 3). Сплошными линиями отмечены зависимости, полученные для показателей преломления $n_1 = 2$, $n_2 = 1.44$, а символы отображают решения, достигнутые при дополнительном учёте дисперсии электромагнитного излучения в материалах сердцевины и оболочки.



(*а*) (*б*)

Рис. 2. Зависимость эффективного показателя преломления от длины волны для квази-TE моды (*а*) и квази-TM моды (*б*), с учётом (символы) и без учёта (сплошные) материальной дисперсии

Результаты проведённых расчётов свидетельствуют о том, что отклонение угла наклона боковых стенок интегрального волновода от значения 90° вызывает смещение дисперсионных кривых в область меньших волновых чисел. Данный эффект указывает на ухудшение локализации поля направляемой моды внутри волновода, что, в свою очередь, приводит к увеличению потерь за счёт излучения и её большего перекрытия с шероховатой границей раздела сердцевины и оболочки. Кроме того, учёт материальной дисперсии микроволноводов оказывает влияние на наклон дисперсионных характеристик, то есть на групповую скорость волн, для всех рассматриваемых значений угла наклона боковых стенок.

Заключение

Полученные результаты демонстрируют необходимость учёта отклонения формы поперечного сечения от прямоугольной при расчёте дисперсии электромагнитных волн, так как описанные эффекты могут играть ключевую роль при разработке нелинейных фотонных интегральных схем на основе из нитрида кремния.

Благодарности

Работа поддержана Минобрнауки (грант № FSEE-2025-0008).

Список литературы

[1] M. H. P. Pfeiffer, et al. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, **24** (4), P. 1–11. (2018).

[2] А. А. Барыбин. *Электродинамика волноведущих структур. Теория возбуждения и связи волн*. – М.: Физматлит. 2007 – 512 с.

Spin-coating deposition of graphene oxide films from multicomponent suspensions for flexible electronics

Раянова К.А. [1✉], **Комаров И.А.** [1,2]

[1] Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, 107023;

[2] Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Russian Federation, 142432

✉raanovakamilla@gmail.com

Аннотация. Разработка новых устройств гибкой и органической электроники требует новых материалов. Среди множества материалов, включая органические полупроводники, нанотрубки и фуллерены, одним из наиболее перспективных является оксид графена. В зависимости от степени восстановления пленки оксида графена могут выступать как полупроводник или проводник. В работе мы улучшили смачиваемость полимерных подложек суспензиями оксида графена путем добавления органических растворителей. Пленка из суспензии 0,93 мг/мл с разбавителем для эмалевых красок была успешно осаждена и восстановлена для создания транзистора BGTE. Восстановленная пленка проявила свойства полупроводника n-типа с подвижностью 2–8×10⁻³ см²/В·с.

Keywords: Contact angle, Graphene oxide, Reduced graphene oxide, Thin films, Transistor.

Funding: The research was done with financial support from the Russian Science Foundation project No. 25-23-01416, https://rscf.ru/project/25-23-01416/»

Introduction

Flexible electronics requires new materials beyond conventional semiconductors. Among them, reduced graphene oxide (rGO) is promising due to tunable conductivity via controlled reduction of oxygen functional groups [1, 2]. However, deposition of uniform GO films on hydrophobic polymer substrates like PET is challenging due to poor wettability of aqueous GO suspensions. We addressed this by adding organic solvents (NMP, DMA, lacquer thinners) selected based on Hildebrand solubility parameters ($\delta T \approx 22–33$ MPa$^{1/2}$) [3]. All additives improved wettability and enabled spin-coating of macro-uniform GO films. Using lacquer thinner as optimal additive, we fabricated locally laser-reduced rGO transistors with n-type mobility of 2–8×10⁻³ cm²/V·s, suitable for flexible electronics and biosensors.

Materials and Methods

Initial GO water suspension (3.11 mg/mL) was synthesized by modified Hummers method. Organic additives: N-methylpyrrolidone (NMP, ultrapure, EKOS-1, Russian Federation), dimethylacetamide (DMA, ultrapure, EKOS-1, Russian Federation), Thinner for lacquer paints (LT, Tamiya Ink., Japan) and thinner for lacquer paints with a retarder (LTr, Tamiya Ink., Japan) were mixed with GO suspension at ratios from 1:9 to 5:5 (GO concentrations: 0.31–1.87 mg/mL). PET film (125 µm) served as substrate, pre-cleaned with isopropanol.

GO films were formed by spin-coater (EZ4, LEBO Science) at 1000 rpm for 60 s, followed by vacuum drying at 110 °C for 30 min. For transistor fabrication, Gate (Al) and Source/Drain (Ag) electrodes (~100 nm) were deposited by thermal evaporation. Gate was passivated by anodic Al oxidation at 30 V. GO film was locally reduced using a 445 nm laser (200 mW, 30 MHz) with 30 ms spot exposure (~35–37 mJ/cm²). Raman spectra were recorded on Renishaw InVia spectrometer. FTIR spectra were collected on Nicolet iS10 in ATR mode. I–V curves were measured on Keithley 4200A. Film thickness was measured by AFM (NTEGRA PRIMA) in semi-contact mode.

Result and Discussion

Contact angle increased with GO concentration, typical for nanoparticle dispersions. All organic additives improved PET wettability compared to pure water. Lacquer thinner was optimal due to short drying time (<400 s), whereas NMP and DMA required >20 min, necessitating substrate heating. Uniform films formed at GO concentrations of 0.9–1.3 mg/mL (SEM and optical microscopy).

For transistor fabrication, GO film (1.3 mg/mL with LT) was spin-coated on passivated Al gate, then locally reduced by 445 nm laser (~35–37 mJ/cm²) in nitrogen flow. Reduced GO areas are shown in fig. 1 (black regions). Raman spectra confirmed partial reduction: characteristic D, G, and 2D bands were observed (Fig. 2). Sharp 2D peak indicated defect healing, while lower 2D intensity vs. fully reduced GO suggested partial reduction with band gap opening. FTIR spectra (Fig. 3) showed residual functional groups (C=O at ~1720 cm^{-1}, aromatic C=C at 1582 cm^{-1}), further confirming partial reduction.

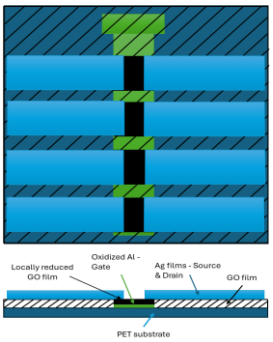


Fig. 1. Scheme of rGO transistor the top view and cross-section

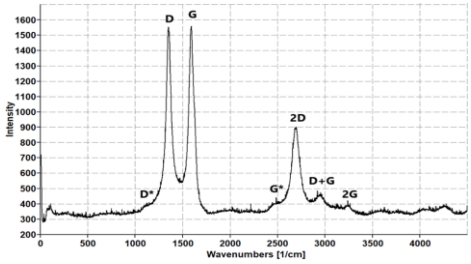


Fig. 2. Raman spectra of locally reduced graphene oxide in transistor channel.

Ag source/drain electrodes (~100 nm) were deposited post-reduction. CV measurements on 20 transistors revealed n-type conductivity (Fig. 4), consistent with rGO reduced at 250–450°C. Field-effect mobility was 2-8×10-3 cm2/V*s-1 - lower than fully optimized rGO but comparable to partially reduced GO. Lower mobility is attributed to incomplete reduction. Residual carboxyl groups are advantageous for biosensor functionalization.

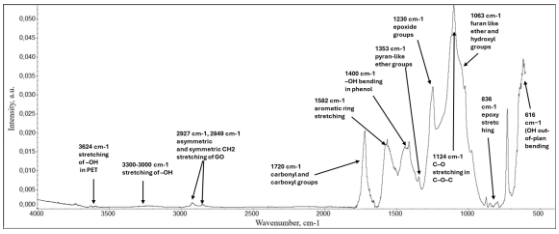


Fig. 3. FTIR spectra of locally reduced graphene oxide in transistor channel.

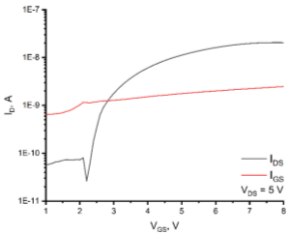


Fig. 4. Transfer CV curve of rGO transistor. IDS – Drain-Source Current, IGS – Gate-Source current, VDS - Drain-Source voltage, VDS - Gate-Source voltage.

Conclusion

Adding organic solvents to aqueous GO suspensions effectively controls PET substrate wettability. Lacquer thinner is optimal for spin-coating, enabling macro-uniform GO films at ~1 mg/mL. Laser-reduced GO films function as n-type semiconductors with mobility 2-8×10-3 cm2/V*s-1. Despite modest mobility, partially reduced rGO with residual functional groups is promising for flexible biosensors and chemical sensors.

References

[1] Rowley A., Stehle Y., Kilby L., Bashant C. Graphene Oxide Membranes: Controlled Laser Reduction for Sensing Applications. C — Journal of Carbon Research 9 (2023) 74.

[2] Chua C.K., Pumera M. Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint. Chemical Society Reviews. 43 (2014) 291-312.

[3] Bei-Bei F., Zhao-Hui W., Wen-Hua S., Yi W., Jia-Cheng W., Yu-Fo L., Hong-Li S., Min L., Lin M. Performance of graphene dispersion by using mixed surfactants. Materials Research Express. 7 (2020) 095009.

Омические контакты Ni/Au и Ni/Ti/Au к p-GaP

С. Н. Хруль [1✉], **О. А. Синицкая** [1], **А. К. Кавеев** [2], **Е. В. Никитина** [1,2]
[1] Академический университет им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия;
[2] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
✉sonyahrul545@mail.ru

Аннотация. Для создания оптоэлектронных приборов на основе твердых растворов GaPN(As) с верхним слоем p-GaP:Be, выращенных на кремниевой подложке, требуется формирование омических контактов с низким удельным сопротивлением ρ_c. В данной работе представлены результаты исследования зависимости ρ_c от температуры отжига T=300–450°C для двух типов омических контактов Ni/Au (10/100 нм) и Ni/Ti/Au (10/10/100 нм) к слою p-GaP с использованием метода CTLM.

Ключевые слова: омические контакты, p-GaP, CTLM-тест

Введение

Разбавленные нитриды AIIIBV, такие как GaPN(As), представляют интерес для интеграции с кремниевой фотоникой благодаря возможности согласования параметра решетки с кремнием [1]. В приборах на основе GaPN(As) контакт к верхнему сильно легированному слою p-GaP должен обладать низким удельным сопротивлением, что требует оптимизации состава металлизации и режимов термической обработки. Целью данной работы является исследование удельного контактного сопротивления двух типов омических контактов в зависимости от температуры быстрого отжига.

Материалы и методы

В работе была выращена p-i-n гетероструктура на основе твердых растворов GaP/GaPNAs с верхним слоем p-GaP толщиной 300 нм и уровнем легирования порядка 10^{19} $см^{-3}$, выращенная методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложке Si(001).

Формирование контактов Ni/Au (10/100 нм) и Ni/Ti/Au (10/10/100 нм) производилось методом обратной фотолитографии. Для нанесения металлизации были использованы электронно-лучевой и термический методы вакуумного испарения.

Для исследования зависимости $\rho_c(T)$ проводились измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) до и после отжига контактов на установке Jipelec JetFirst 100 в атмосфере азота при температурах 300-450°C с шагом 50°C и длительностью 30 с.

Для оценки ρ_c использовался метод CTLM (Circular Transmission Line Model) [2-3]. На основе линейной аппроксимации зависимости полного сопротивления, измеряемого между контактными площадками R_t от ln(R/r), где R=500 мкм – внешний радиус круга, r = 440,400,…,80 мкм – внутренний радиус, рассчитывались длина передачи (L_T) и поверхностное сопротивление полупроводника (R_S) по формуле:

$$R_t = \frac{R_s}{2\pi}\left[ln\frac{R}{r} + L_T\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r}\right)\right] \quad (1)$$

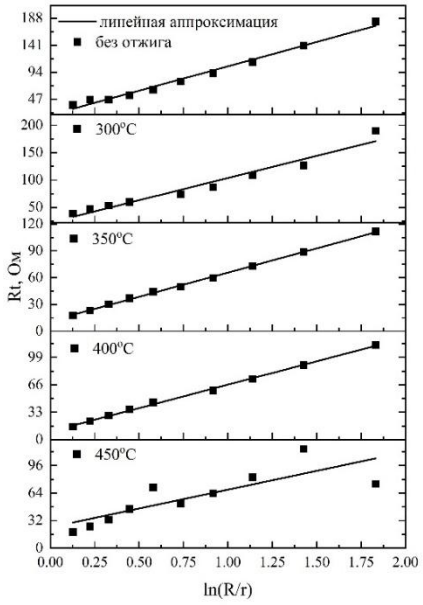
Для определения удельного контактного сопротивления использовалась формула

$$\rho_c = R_s L_T^2 \quad (2)$$

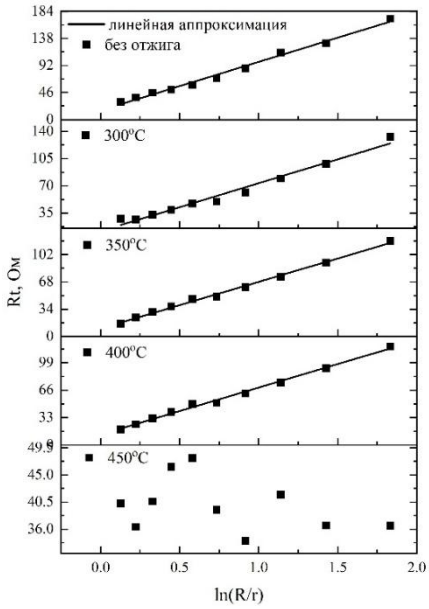
Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена зависимость полного сопротивления R_t от ln(R/r), полученная по ВАХ для двух типов контактов, отожженных при температуре 300–450°C.

Значения ρ_c для различных контактов и температур отжига приведены в таблице 1.



a)



b)

Рис. 1. График зависимости R_t от ln(R/r) контактов Ni/Au (*a)* и Ni/Ti/Au (*b)* при разных температурах отжига

Таблица 1

Результаты расчета удельного контактного сопротивления при различных температурах отжига

T, °C	Без отжига	300	350	400	450
ρ_c, Ом·см^2 (Ni/Au)	$4.34 \cdot 10^{-3}$	$6.17 \cdot 10^{-3}$	$2.34 \cdot 10^{-3}$	$1.72 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$
ρ_c, Ом·см^2 (Ni/Ti/Au)	$2.93 \cdot 10^{-3}$	$2.17 \cdot 10^{-3}$	$1.67 \cdot 10^{-3}$	$2.69 \cdot 10^{-3}$	–

Для контакта Ni/Au минимальное $\rho_c = 1.72 \cdot 10^{-3}$ Ом·см^2 достигалось при температуре отжига 400°C. При повышении температуры до 450°C ρ_c увеличилось до $1.30 \cdot 10^{-2}$ Ом·см^2, что указывает на более высокую устойчивость контакта Ni/Au к воздействию высоких температур по сравнению с Ni/Ti/Au.

Для контакта Ni/Ti/Au минимальное значение удельного контактного сопротивления $\rho_c = 1.67 \cdot 10^{-3}$ Ом·см^2 достигалось после отжига при 350°C. При дальнейшем повышении температуры до 400°C и выше наблюдался рост ρ_c, что может свидетельствовать о начале деградации контакта.

Заключение

В данной работе было исследовано влияние быстрого термического отжига при 300–450°C на удельное контактное сопротивление ρ_c двух типов контактов к p-GaP. Было показано, что для Ni/Au модель CTLM применима во всем диапазоне температур, а минимальное ρ_c достигается при 400°C. Для Ni/Ti/Au при 450°C зависимость R_t от ln(R/r) нелинейна, что делает расчет ρ_c в рамках модели CTLM некорректным.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-00032.

Список литературы

[1] Mohamed Henini, Dilute Nitride Semiconductors, 1st Edition, Elsevier Science. (2004)

[2] J.L. Gu et al. Ti/Ni/Ti/Au Ohmic contact and Schottky transformation to Al-doped ZnO thin films, J. Alloy. Comp., 556, 62 (2013).

[3] Y. Pan et al., Low specific contact resistivity nickel to silicon carbide determined using a two contact circular test structure, *2014 International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS)* (Udine, Italy, 2014), pp. 79–82.

Зависимость состава двумерных наноструктур тройных соединений III-V от шага и радиуса отверстий при селективной эпитаксии

А. Е. Мельников[1]✉, В.Г. Дубровский[1]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, Россия
✉ e-mail: arsenymelnikovws@mail.ru

Аннотация. Построена теоретическая модель состава нитевидных нанокристаллов (ННК) тройных соединений III-V с замещением атомов группы III при селективной эпитаксии в зависимости от радиуса отверстий и расстояния между их центрами (шага). Показано, что в кинетическом режиме формирования ННК увеличение шага и уменьшение радиуса приводит к отклонению распределения «пар-кристалл» от линейного закона $x = z$. Причиной эффекта является различие диффузионных длин адатомов группы III на поверхности маски.

Ключевые слова. Селективная эпитаксия, моделирование**,** планарные нитевидные нанокристаллы, тройные соединения III-V**.**

Введение

Метод селективной эпитаксии в одномерных и двумерных регулярных массивах канавок или отверстий в оксидной маске является перспективным для синтеза ННК, нанопластин и структур более сложной архитектуры на основе полупроводниковых соединений III-V [1,2]. В настоящей работе проведён анализ состава тройных ННК $A_xB_{1-x}C$ (где элементы A и B относятся к III группе, а элемент C — к группе V) при селективной эпитаксии.

Материалы и методы

Синтез осуществляется из атомарных газовых потоков I_A, I_B, I_c в регулярном двумерном массиве отверстий, имеющих радиус R и шаг P. Стационарный состав образующегося раствора $A_xB_{1-x}C$ однозначно задается диаграммой состава «пар — кристалл [3]. Данная диаграмма дает связь между долей атомов A ННК x и в газовой фазе (паре) z, определяемой согласно

$$z = \frac{I_A}{I_A + I_B}. \quad (1)$$

При исследовании процесса селективной эпитаксии в условиях, обогащенных по группе V, рост ННК и его состав лимитирован прямым попаданием атомов A и B в отверстия и их диффузионными потоками с поверхности маски. Решение задачи для трёх рассматриваемых диффузионных потоков имеет вид [3]:

$$z = \frac{x + g(x)}{c + (1-c)x}, \quad (2)$$

где $g(x)$ − функция, описывающая отраженные потоки.

При высоких пресыщениях пара влияние отражённых потоков пренебрежимо мало. Тогда распределение (2) сводиться к однопараметрической формуле Лэнгмюра-МакЛина:

$$x = \frac{cz}{1 + (c-1)z}. \quad (3)$$

Здесь c есть кинетический коэффициент, описывающий различие в диффузионном транспорте адатомов A и B в ННК и зависящий от радиуса двумерного отверстия (R), характерного расстояния $P/2 - R$, и диффузионных длин адатомов III группы (λ_A и λ_B):

$$c = \frac{1+(2\lambda_A/R)F_A}{1+(2\lambda_B/R)F_B}, \tag{4}$$

$$F_s = \frac{I_1[(P/2-R)/\lambda_s]K_1(R/\lambda_s) - K_1[(P/2-R)/\lambda_s]I_1(R/\lambda_s)}{I_1[(P/2-R)/\lambda_s]K_0(R/\lambda_s) + K_1[(P/2-R)/\lambda_s]I_0(R/\lambda_s)}, \; s = A, B. \tag{5}$$

Результаты и обсуждение

Зависимость состава от радиуса 2D-отверстия R при фиксированном шаге P представлена на Рисунке 1. При уменьшении значения радиуса до величины менее 500 нм становятся заметны отклонения от линейного распределения $x = z$. Зависимость шага P при фиксированном радиусе R представлена на Рисунке 2. Видно, что при увеличении значения шага до значений больше 1 мкм также наблюдаются отклонения от линейного распределения. Эффект связан с неполным сбором адатомов A и B с поверхности маски при $(P/2 - R)/\lambda_s \sim 1$ и $(P/2 - R)/\lambda_s \gg 1$, когда становится существенным различие в их диффузионных длинах.

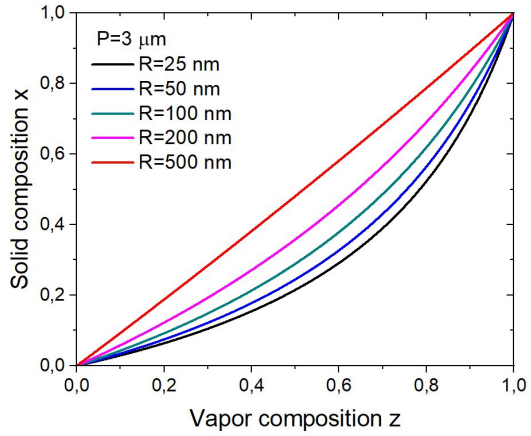


Рисунок 1. Распределение пар-кристалл планарных ННК $A_xB_{1-x}C$ в кинетическом режиме при $\lambda_A = 1000$ нм, $\lambda_B = 4000$ нм, фиксированным шагом $P = 3$ мкм и различных значениях радиус R от 25 до 500 нм.

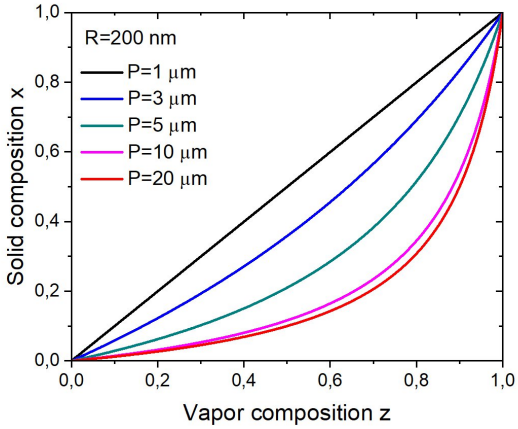


Рисунок 2. Распределение пар-кристалл планарных ННК $A_xB_{1-x}C$ в кинетическом режиме при $\lambda_A = 1000$ нм, $\lambda_B = 4000$ нм, фиксированном радиусе $R = 200$ нм и различных значениях шага P от 1 до 20 мкм.

Заключение

Таким образом, построена аналитическая модель для расчета распределений пар-кристалл в ННК тройных соединений III-V в зависимости от параметров R и P при селективной эпитаксии в регулярных массивах отверстий.

Список литературы:

[1] X. Yuan, D. Pan, Y. Zhou, X. Zhang, K. Peng, B. Zhao, M. Deng, J. He, H. H. Tan, C. Jagadish. Appl. Phys. Rev. 8, 021302 (2021).

[2] M. Zendrini, V. G. Dubrovskii, A. Rudra, D. Dede, A. Fontcuberta i Morral, V. Piazza ACS Appl. Nanomat. 7, 19065 (2024).

[3] V. G. Dubrovskii, E. D. Leshchenko. Phys. Rev. Mater., 7, 074603 (2023).

Эпитаксиальные пленки Al на подложках Si, полученные методом молекулярно-пучковой эпитаксии, для создания плазмонных нанолазеров

В. В. Лендяшова [1,2✉], **Т. Шугабаев** [1,2], **А. А. Калиничев** [2], **А. М. Даутов** [1,3], **Г. Э. Цырлин** [1-3], **В. О. Гридчин** [1-3], **И. В. Илькив** [1-3]

[1] Академический университет им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия;
[2] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;
[3] Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия
✉erilerican@gmail.com

Аннотация. Методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках Si(111) выращена серия тонких (30 нм) пленок алюминия при криогенных температурах. Исследовано влияние потока материала на морфологию поверхности. Установлено, что оптимальный поток $5.5 \cdot 10^{-8}$ Торр обеспечивает получение атомарно-гладких пленок со среднеквадратичной шероховатостью 0.48 нм. Одиночные нитевидные нанокристаллы GaN на полученных плёнках, покрытых тонким слоем диэлектрика, продемонстрировали лазерную генерацию с полушириной линии менее 1 нм при оптической накачке, что подтверждает высокое качество эпитаксиального алюминия для задач УФ-плазмоники.

Ключевые слова: Молекулярно-пучковая эпитаксия, тонкие пленки алюминия, шероховатость поверхности, плазмонные нанолазеры.

Введение

В последнее десятилетие пленки алюминия привлекают все большее внимание в связи с их применением в ультрафиолетовой плазмонике. Ключевым требованием к ним является атомарная гладкость поверхности, так как высокая шероховатость ведет к диссипации энергии и деградации характеристик устройств на их основе. Особую роль занимает рост Al на кремнии, поскольку кремний является технологически совместимым и широко используемым материалом, определяющим применимость получаемых пленок в современной интегральной фотонике. При этом, основная технологическая сложность при выращивании Al на кремнии заключается в том, что 25 % рассогласование параметров решеток между ними и типичные температуры роста приводят к формированию островков и шероховатой поверхности. Возможным способом преодоления указанных трудностей может являться рост плёнок Al при низких температурах подложки [3]. В данной работе исследовано влияние потока материала при росте методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на микрорельеф эпитаксиальных пленок Al на подложках Si(111) при отрицательных температурах. Определены оптимальные параметры роста, обеспечивающие формирование атомарно-гладких пленок.

Материалы и методы

Ростовые эксперименты проводились на установке МПЭ Riber Compact 21 EB200 (Франция), оснащенной эффузионным источником Al. Для контроля состояния поверхности подложки во время роста использовались система дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). В качестве подложек были использованы сингулярные пластины Si(111) электронной проводимости. Перед загрузкой в ростовую камеру подложку подготавливали обычным методом RCA [4], а на заключительном этапе подложку для получения атомарно гладкой поверхности погружали в 40% раствор NH_4F на 2 минуты [5]. После предварительного отжига нагреватель подложки выключался, и подложка выдерживалась в ростовой камере до снижения температуры ниже 0 °C. Затем осуществлялся рост 30 нм алюминия при различных потоках материала. Измерения потоков Al проводились перед ростовыми экспериментами с помощью датчика Байарда-Альперта. Морфология поверхности выращенных образцов исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полу-контактном режиме на воздухе.

Результаты и обсуждение

В ходе эксперимента была выращена серия образцов при потоках Al в эквивалентных давлению единицах от $9.2 \cdot 10^{-8}$ до $2.8 \cdot 10^{-8}$ Торр. Картины ДБЭО в конце роста всех образцов серии имели полосчатую структуру, что свидетельствует о формировании сплошных пленок. Результаты АСМ-измерений показали, что шероховатость поверхности пленок Al уменьшается при понижении потока материала с $9.2 \cdot 10^{-8}$ до $5.5 \cdot 10^{-8}$ Торр. В данном случае среднеквадратичная шероховатость составила ~ 0.48 нм на сканируемой площади 3 × 3 мкм^2. Дальнейшее понижение потока до $2.8 \cdot 10^{-8}$ Торр не привело к выглаживанию поверхности.

На основе наиболее гладкой пленки Al/Si(111) была подготовлена «плазмонная подложка», которая представляет собой эпитаксиально выращенный на пластине кремния слой Al, покрытый слоем SiO_x толщиной 5 нм. После этого на подложку были перенесены нитевидные нанокристаллы (ННК) GaN высокого кристаллического качества, выращенные методом МПЭ с плазменной активацией азота. Мощностные зависимости спектров микро-фотолюминесценции одиночных ННК на плазмонной подложке продемонстрировали лазерную генерацию с относительно низкими порогами для существующих аналогов и полушириной лазерной линии менее 1 нм. Измерения проводились при оптической накачке.

Заключение

Таким образом, полученные результаты по росту эпитаксиальных тонких пленок алюминия представляют интерес для применения в ультрафиолетовой плазмонике, в частности при создании плазмонных нанолазеров, а также при разработке интегральных фотонных и плазмонных систем.

Благодарности

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект номер 23-79-00012).

Список литературы

[1] C. Li, Z. Liu, Y. Gao, M. Li, Q. Zhang. Nanophotonics, **8**(12), 2091-2110 (2019).
[2] S. Liu, B. Sheng, X. Wang, D. Dong, P. Wang, Z. Chen, T. Wang, X. Rong, D. Li, L. Yang, S. Liu, M. Li, J. Zhang, W. Ge, K. Shi, Y. Tong, B. Shen. Appl. Phys. Lett., **112**(23), 231904 (2018).
[3] Y.-H. Tsai, Y.-H. Wu, Y.-Y. Ting, C.-C. Wu, J.-S. Wu, S.-D. Lin. AIP Adv., **9**(10), 105001 (2019).
[4] W. Cady, M. Varadarajan. JES, **143**(6), 2064-2067 (1996).
[5] Y. Miura, S. Fujieda, K. Hirose. Appl. Phys. Lett., **62**(15), 1751-1753 (1993).

Пассивация поверхности кристаллического и наноструктурированного кремния слоем Al_2O_3, сформированным методом PE-ALD с использованием N_2O-плазмы

В. А. Поздеев [1,2] ✉, А. В. Уваров [1], А. И. Баранов [1], О. П. Михайлов [1], Е.А. Вячеславова [1], А. А. Максимова [1,2], Э. Я. Ярчук [1,2], А. С. Гудовских [1,2]

[1] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ pozdeev99va@gmail.com

Аннотация. Исследуется пассивация поверхности кристаллического и наноструктурированного кремния слоем Al_2O_3, полученным методом PE-ALD с использованием N_2O-плазмы. Эффективность оценивается по плотности поверхностных состояний и эффективному времени жизни носителей заряда τ_{eff}, определённому методом анализа спада фотолюминесценции. Показано, что постростовой отжиг снижает плотность поверхностных состояний более чем на два порядка для планарного кремния и увеличивает τ_{eff} до 664 мкс. Для наноструктурированного кремния при аналогичных режимах пассивации τ_{eff} также существенно возрастает и становится сопоставимым с планарными структурами.

Ключевые слова: A_2O_3, PE-ALD, кремний, черный кремний, пассивация поверхности, N_2O-плазма.

Введение

Поверхностная рекомбинация носителей заряда остаётся одним из ключевых факторов, ограничивающих эффективность кремниевых фотоэлектрических преобразователей. Особенно актуальна эта проблема для наноструктурированного кремния (черный кремний, b-Si), обладающего развитой поверхностью и повышенной плотностью поверхностных состояний [1]. Снижение поверхностной рекомбинации достигается за счёт формирования пассивирующих слоёв. Одним из наиболее эффективных материалов является Al_2O_3, обеспечивающий химическую пассивацию поверхности кремния. Формирование Al_2O_3 методом плазмохимического атомно-слоевого осаждения (PE-ALD) позволяет реализовать низкотемпературный процесс, совместимый с наноструктурированными поверхностями. Использование N_2O-плазмы в качестве окислителя требует оптимизации параметров разряда, поскольку условия плазмы существенно влияют на качество формируемого интерфейса. В частности, ранее показано, что при PE-ALD осаждении оксида Ga_2O_3 мощность ВЧ-разряда в диапазоне 10–20 Вт обеспечивает формирование более качественного интерфейса с кремнием, тогда как увеличение мощности приводит к ухудшению характеристик пассивации из-за деградации его свойств [2].

Материалы и методы

Слои Al_2O_3 формировались методом плазмохимического атомно-слоевого осаждения (PE-ALD) с использованием триметилалюминия (TMAl) и N_2O-плазмы при температуре 150 °C в режиме низкой мощности ВЧ-разряда. Наноструктурированный кремний (черный кремний) получался методом реактивного ионного травления. После осаждения проводился кумулятивный отжиг в атмосфере азота продолжительностью 5–60 мин при температурах 300–450 °C. Качество пассивации исследовалось методом спада фотолюминесценции и спектроскопии полной проводимости.

1. Результаты и обсуждение

Режим с мощностью 10 Вт и 100 циклами использовался для отработки параметров постростового отжига и анализа его влияния на эффективное время жизни носителей заряда τ_{eff} (рис. 1). Скорость роста 1.06 Å/цикл. При оптимизированном режиме отжига (20 мин,

350 °C) для слоёв Al_2O_3, сформированных при мощности N_2O-плазмы 20 Вт и 200 циклах осаждения, достигнуты значения эффективного времени жизни носителей заряда 664 мкс (полированный p-Si), 432 мкс (n-Si) и 95 мкс (n-Si с микроструктурированной химическим травлением поверхностью). Для емкостных исследований (C-*f*) сформированы МДП-структуры $Au/Cr/Al_2O_3/Si/Al_2O_3$, по которым рассчитана плотность поверхностных состояний D_{it}. После отжига на p-Si наблюдается существенное снижение плотности поверхностных состояний с $1.6 \cdot 10^{12}$ до $3.1 \cdot 10^{10}$ $см^{-2}эВ^{-1}$, что отражает формирование более качественного интерфейса Si/Al_2O_3. Полученные изменения D_{it} согласуются с увеличением τ_{eff}, что указывает на подавление поверхностной SRH-рекомбинации и рост эффективности пассивации. Для наноструктурированного кремния, несмотря на исходно развитую поверхность и повышенную плотность поверхностных состояний ($2.8 \cdot 10^{12} см^{-2}эВ^{-1}$), достигаемые значения τ_{eff} остаются на уровне планарных структур (~100 мкс), что свидетельствует о сохранении эффективности пассивирующего действия Al_2O_3 даже в условиях увеличенной удельной поверхности.

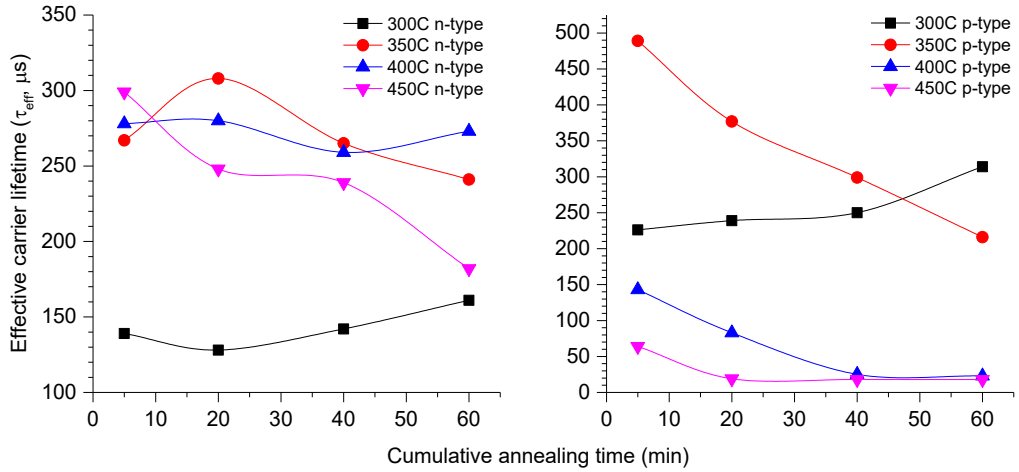


Рис. 1. Зависимость эффективного времени жизни в разных типах подложек со слоями Al_2O_3 (мощность ВЧ-разряда 10 Вт) от времени кумулятивного отжига при 300-450°C

Заключение

Показано, что формирование слоёв Al_2O_3 методом PE-ALD с использованием N_2O-плазмы и последующего постростового отжига обеспечивает эффективную пассивацию поверхности кремния, что выражается в снижении плотности поверхностных состояний более чем на два порядка и увеличении эффективного времени жизни носителей заряда до сотен микросекунд. Установлено, что для наноструктурированного (черного) кремния достигаются значения τ_{eff}, сопоставимые с планарными структурами, несмотря на развитую поверхность, что указывает на высокую эффективность пассивации при существенно большей удельной поверхности и плотности поверхностных состояний.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта Российского Научного Фонда «Высокоэффективные солнечные элементы на основе наноструктурированного «черного» кремния с оксидными пассивирующими слоями» № 24–79–10275 (https://rscf.ru/project/24-79-10275/)

Список литературы

[1] M. Otto, M. Algasinger, H. Branz, B. Gesemann, T. Gimpel, K. Füchsel, T. Käsebier, S. Kontermann, S. Koynov, X. Li, V. Naumann, J. Oh, A. N. Sprafke, J. Ziegler, M. Zilk, R. B. Wehrspohn. Adv. Opt. Mater., 3(2), 147–156 (2014).

[2] A. Uvarov, A. Baranov, V. Pozdeev, A. Maksimova, E. Vyacheslavova, O. Mikhaylov, E. Yarchuk, D. Kirilenko, A. Gudovskikh. Appl. Surf. Sci., 719, 165092 (2026).

Получение и исследование свойств тонких пленок $MoSe_2$

А. В. Станчик [1✉], **В. Ф. Гременок** [1], **О. В. Зинчук** [2], **А. В. Труханов** [1], **Сяосу Жао** [3]
[1]ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь;
[2]Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;
[3]Пекинский Университет, Пекин, Китай
✉stanchik@physics.by

Аннотация. Представлены результаты исследования морфологии, элементного и фазового состава пленок $MoSe_2$, полученных на подложках монокристаллического кремния. Установлено влияние параметров магнетронного напыления слоев молибдена на дальнейшее формирование пленок $MoSe_2$.

Ключевые слова: $MoSe_2$, дихалькогениды переходных металлов, микроструктура, магнетронное напыление, селенизация.

Введение

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), такие как MoS_2 и $MoSe_2$, представляют большой интерес для прикладных разработок благодаря слоистой структуре и уникальным свойствам в двумерном состоянии. Наличие слабосвязанной ван-дер-ваальсовой щели позволяет проводить интеркаляцию (включая самоинтеркаляцию) ДПМ – внедрение атомов металла без разрушения кристаллической решетки. Интеркаляция является эффективным инструментом модификации электронных, оптических и магнитных свойств ДПМ, что позволяет создавать новые материалы для электроники, катализа и сенсорики.

Соединение $MoSe_2$ рассматривается как перспективный электрокатализатор для реакции выделения водорода (РВВ) [1–3]. В [1] было продемонстрировано, что гетероструктуры $MoSe_2$/Si проявляют выраженную фотокаталитическую активность для выделения H_2. Пленки $MoSe_2$ с вертикальной ориентацией атомных слоев способствуют высокой плотности активных краевых центров, что вызывает эффективный перенос заряда к электроду в процессе РВВ [2]. Альтернативным подходом к повышению активности ДПМ является трансформация полупроводниковой фазы 2H в металлическую фазу 1T (например, посредством интеркаляции) [2]. Однако данный способ является трудоемким, а низкая стабильность метастабильной фазы 1T ограничивает его практическое применение. Кроме того, получение крупноразмерных ДПМ на подложках SiO_2 остается сложной задачей [3].

В работе представлены результаты исследования морфологии, элементного и фазового состава пленок $MoSe_2$, полученных на подложках монокристаллического Si.

Материалы и методы

Пленки $MoSe_2$ получены двухэтапным методом. На первом этапе осуществлялось магнетронное напыление Mo (толщина слоя 5 нм) при комнатной температуре на очищенные подложки. Мощность распыления составляла 120, 95 и 70 Вт при расходе рабочего газа (Ar) 60, 80 и 100 $см^3$/мин соответственно. Второй этап включал селенизацию нанесенных слоев Mo в атмосфере селена (в вакууме) при 750 °C в течение 40 мин.

Исследование элементного состава и морфологии образцов проводилось на растровом электронном микроскопе Hitachi S-4800. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) регистрировались на конфокальном комбинационном спектрометре Nanofinder HE (LOTIS TII, Беларусь-Япония). Возбуждение КРС осуществлялось твердотельным лазером в непрерывном режиме с длиной волны 532 нм и оптической мощностью 60 мкВт.

Результаты и их обсуждение

Данные РСМ-анализа показали, что пленки $MoSe_2$, полученные на основе слоев Mo, осажденных при высокой мощности распыления (95 и 120 Вт), имеют нестехиометрический состав (Mo – 35,87 ат.%, Se – 64,13 ат.% и Mo – 49,45 ат.%, Se – 50,55 ат.% соответственно). Тогда как пленки, синтезированные на основе Mo, осажденного при низкой мощности

(70 Вт), имеют стехиометрический состав (Mo – 32,43 ат.%, Se – 67,57 ат.%). Это указывает на зависимость процессов диффузии Se от исходной морфологии слоя Mo: мелкозернистая структура с высокой плотностью межзеренных границ ускоряет процесс диффузии Se. Полученные пленки состоят из плотного сплошного слоя толщиной 55–80 нм и вертикально ориентированных чешуйчатых кристаллов (рис. 1), что характерно для $MoSe_2$.

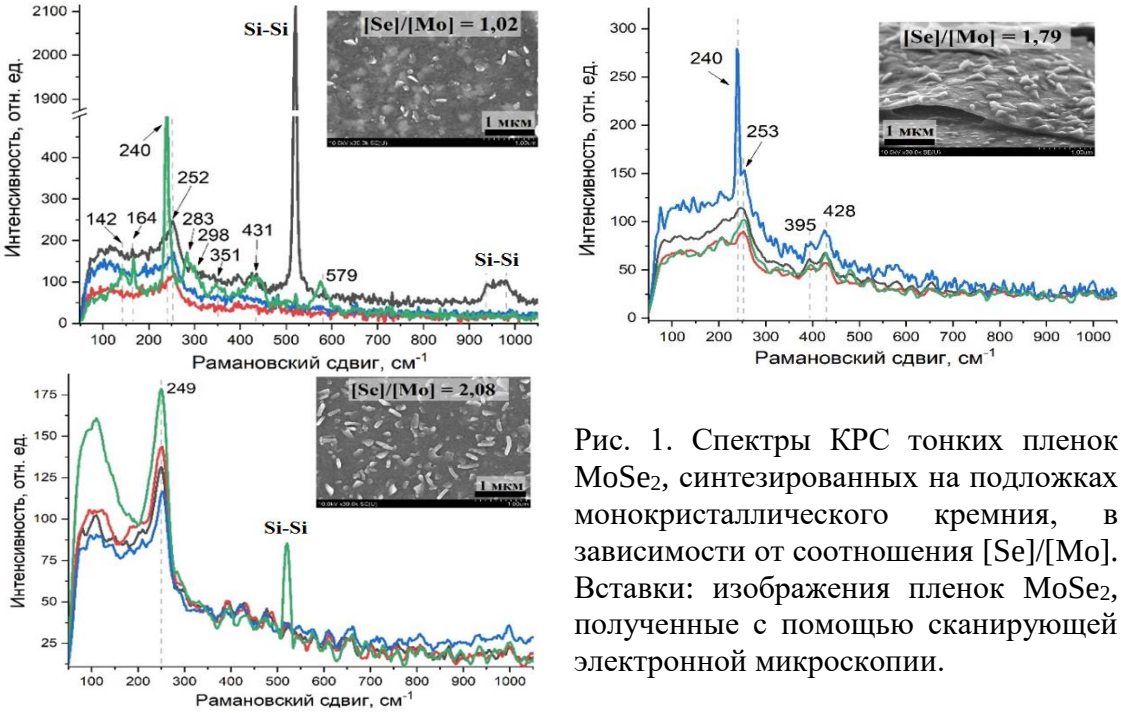


Рис. 1. Спектры КРС тонких пленок $MoSe_2$, синтезированных на подложках монокристаллического кремния, в зависимости от соотношения [Se]/[Mo]. Вставки: изображения пленок $MoSe_2$, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Анализ спектров КРС подтверждает формирование фазы 2H-$MoSe_2$ во всех образцах. Присутствуют характерные для $MoSe_2$ моды симметрии A_{1g} (240–249 см$^{-1}$) и E^1_{2g} (283 см$^{-1}$) [4]. Наличие мод второго порядка, вызванных резонансным эффектом, в спектрах пленок с [Se]/[Mo] = 1,02 и 1,79 связано с высокой дефектностью их структуры из-за отклонения состава от стехиометрии. При [Se]/[Mo] = 1,79 количество таких мод снижается, а в образце с [Se]/[Mo] = 2,08 они исчезают. Вариации сигналов от Si в спектрах КРС обусловлены толщиной и морфологией (включая зоны локального отслоения) пленки $MoSe_2$, а не деформацией кристаллической решетки Si. Разброс профилей кривых спектров в разных точках сканирования обусловлен неравномерным распределением вертикально ориентированных чешуек на поверхности образцов. Широкое плато в низкочастотной области спектров связано с разупорядоченностью структуры пленок, которую можно минимизировать, увеличив температуру или продолжительность селенизации.

Заключение

Полученные результаты подтверждают возможность использования предложенной методики получения пленок $MoSe_2$ для их интеграции в электронные устройства (для катализа и сенсорики), а также описывают физико-химические процессы синтеза ДПМ.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке ГКНТ и БРФФИ (№ Т24КИТГ-013).

Список литературы

[1] Sungmin Hong, Choong Kyun Rhee, Youngku Sohn. Catalysts, **9**, 494 (2019).
[2] D. Vikraman, S. Hussain, K. Akbar, et al. ACS Omega, **3**, 5799−5807 (2018).
[3] Xin Lu, M. Iqbal Bakti Utama, Junhao Lin, et al. Nano Lett, **14**(5), 2419–2425 (2014).
[4] Dahyun Nam, Jae-Ung Lee, Hyeonsik Cheong. Sci. Rep., **5**, 1711 (2015).

Морфологически-зависимая фотолюминесценция вертикально-ориентированного дисульфида молибдена

П. Г. Уймина [1✉], **М. А. Аникина**[1,2], **А.А. Воробьёв**[2], **А.Д. Большаков** [1,2]
[1] МФТИ, Долгопрудный, Россия;
[2] Алфёровский университет, Санкт-Петербург, Россия
[3] СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия
✉polinlin0508@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние условий синтеза методом химического осаждение из газовой фазы (температура 300 – 600 ˚C, положение подложки) на морфологию и фотолюминесцентные (ФЛ) свойства вертикально-ориентированных структур MoS_2. Установлено, что направленное изменение морфологии позволяет управлять положением (1,75 - 1,90 эВ) и абсолютной интенсивностью пика излучения. Максимальный ФЛ-отклик зафиксирован для структур, синтезированных при 400 ˚C. Показано, что эволюция оптических спектров обусловлена перераспределением вкладов излучательной рекомбинации нейтрального экситона (A) и отрицательно заряженного триона (A). Результаты открывают новые подходы к инженерии оптических свойств MoS_2 для оптоэлектроники.

Ключевые слова: фотолюминесценция, двумерные материалы, дисульфид молибдена

Введение

С момента открытия графена двумерные (2D) материалы привлекают пристальное внимание исследователей благодаря уникальным свойствам, принципиально отличающимся от их объемных аналогов. Особое место в этом классе занимают дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) - в частности, дисульфид молибдена (MoS_2), обладающий полупроводниковыми свойствами. Широкий спектр электронных и оптических характеристик ДПМ открывает перспективы для создания гибкой микро- и оптоэлектроники, а также высокочувствительных сенсоров. Среди различных модификаций 2D-материалов особый интерес представляет вертикально-ориентированная морфология, при которой слои располагаются перпендикулярно подложке. Такая архитектура не только кратно увеличивает удельную площадь активной поверхности (доля краевых состояний), но и обуславливает уникальные оптические эффекты.

Материалы и методы

Вертикально-ориентированные структуры MoS_2 синтезировали методом химического газофазного осаждения (CVD) в реакторе с горячими стенками. Источником молибдена служили пары гексакарбонила молибдена (T сублимации 35 ˚C), переносимые в реакционную зону потоком аргона. Синтез проводился при рабочем давлении 120 Па в диапазоне температур от 300 до 600 ˚C. Дополнительно в камеру по независимым линиям подавались сероводород и аргон в качестве газа-разбавителя. Для управления морфологией получаемых структур, помимо температуры, варьировалось положение подложки (A, мм) в реакционной зоне. Морфологию образцов исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ, Zeiss Supra) с последующей классификацией специфических морфологических параметров по методике [1]. Оптические свойства изучали методами Рамановской спектроскопии (LabRAM HR 800) и спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ). Возбуждение спектров осуществлялось лазером с длиной волны 532 нм.

1. Результаты и обсуждение

Анализ РЭМ-изображений образцов, синтезированных при температурах 300, 400, 500 и 600 ˚C, подтвердил формирование различных морфологических типов структур (от Type A до Type D'), зависящих от локальных условий роста. Установлено, что интенсивность и энергетическое положение пика ФЛ жестко коррелируют с типом структуры. В частности, плотные структуры Type D и Type D' не проявляли

люминесценции, тогда как остальные типы демонстрировали выраженный ФЛ-отклик с варьируемым положением пика от 1,75 до 1,90 эВ. Зависимость положения и максимума интенсивности пиков ФЛ от условий синтеза представлена на Рис. 1. Максимальной абсолютной интенсивностью ФЛ обладали структуры морфологического типа Type B (режим синтеза: 400 ˚C, положение подложки A=30 мм).

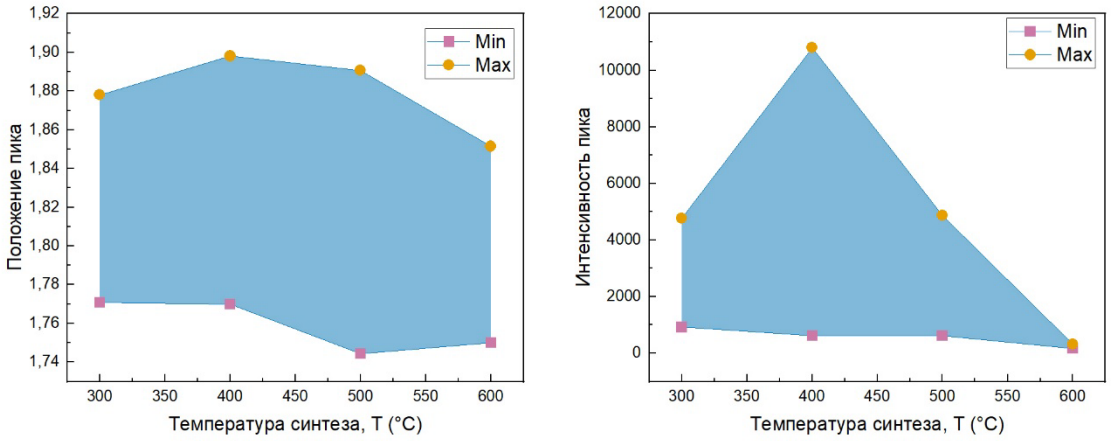


Рис. 1 Положение и интенсивность пика фотолюминесценции для различных типов структур, синтезированных при 300, 400, 500 и 600 ˚C.

Помимо сдвига пика, зафиксировано существенное изменение формы спектра ФЛ. Так, для структур Type A преобладающий вклад в спектр вносит излучательная рекомбинация нейтрального экситона (A_0) что характерно для монослойного MoS_2. При переходе к морфологиям Type B и C наблюдается перераспределение интенсивностей: возрастает вклад отрицательно заряженного триона (A^-), что свидетельствует о повышенном содержании структурных дефектов в данных конфигурациях.

Заключение

Показано, что контроль температуры синтеза и пространственного расположения подложки в реакционной зоне позволяет целенаправленно управлять морфологией вертикально-ориентированных структур MoS_2. Изменение морфологии, в свою очередь, дает возможность настраивать ширину, положение и интенсивность спектров фотолюминесценции за счет управления балансом между вкладами нейтрального экситона (A) и заряженного триона (A-), что открывает новые пути для инженерии дефектов в оптоэлектронике.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение 075-15-2024-560.

Список литературы

[1] P.G. Uymina, M.A. Anikina, A.B. Speshilova, V.M. Kondratev, E.P. Karaseva, S.V. Shmakov, A. Kuznetsov, A.V. Syuy, A.A. Osipov, M.V. Mishin, A.D. Bolshakov, Blossoming layers: Morphological engineering of vertically aligned MoS2 sheets, Mater. Sci. Semicond. Process. 200 (2025) 109906. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2025.109906.

Термодинамический анализ стабильности твердых растворов AlGaInAsP на основе квазихимической модели

Э. М. Данилина [1]✉

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-дону, Российская Федерация;

✉el.m.danilina@gmail.com

Аннотация. Разработана квазихимическая модель твердых растворов AlGaInAsP, учитывающая ближний порядок и упругие напряжения на основе модели Китинга. Рассчитаны области спинодального распада гетероструктур AlGaInAsP/InP. Показано, что рост содержания Al приводит к увеличению критической температуры распада до 850–900 °C вследствие высокой положительной энтальпии смешения в катионной подрешетке. Учет когерентных напряжений на подложке InP приводит к стабилизации раствора и снижению критической температуры на 150–200 °C.

Ключевые слова: квазихимическая модель, термодинамическая устойчивость, тонкие пленки, эпитаксиальные гетероструктуры.

Введение

Полупроводниковые соединения AIIIBV являются базой для современной электроники и оптоэлектроники [1–3]. Пятерные растворы AlGaInAsP [4] обладают дополнительной степенью свободы при согласовании решетки и ширины запрещённой зоны по сравнению с тройными и четверными растворами при широком выборе подложек. Это позволяет минимизировать плотность дислокаций и улучшать характеристики гетероструктур. Однако их получение осложнено наличием областей несмешиваемости и спинодального распада. Цель работы – разработка термодинамической модели спинодального распада AlGaInAsP с учетом ближнего порядка и упругих напряжений.

Методика и модель

Одной из структурных особенностей твердых растворов на основе A3B5 является склонность к образованию локальных кластеров ближнего порядка, который проявляется в неслучайном распределении катионов и анионов по своим подрешеткам структуры сфалерита [5]. Для адекватного описания таких систем удобно использовать квазихимическую модель парных связей [6], которая позволяет учитывать ближний порядок в распределении атомов.

Рассмотрим твердый раствор AlGaInAsP, который представляет собой соединение со смешанными подрешетками катионов (Al, Ga, In) и анионов (As, P) в структуре сфалерита, где каждый катион окружён смешанной оболочкой ближайших соседей-анионов, с которыми образует четыре связи. Для такого раствора самосогласованная квазихимическая модель функционала свободной энергии имеет вид:

$$F\left(x, y, z, T, p_{ij}\right) = F_0 + F_{mix} + F_{ex} + F_{st} \rightarrow \min$$

система линейно независимых балансовых уравнений

$$\begin{cases} p_{\mathrm{AlAs}} + p_{\mathrm{AlP}} = x, \\ p_{\mathrm{GaAs}} + p_{\mathrm{GaP}} = y, \\ p_{\mathrm{InAs}} + p_{\mathrm{InP}} = 1 - x - y, \\ p_{\mathrm{AlAs}} + p_{\mathrm{GaAs}} + p_{\mathrm{InAs}} = z, \end{cases}$$

система нелинейных уравнений квазихимического равновесия

$$\begin{cases} \dfrac{p_{\mathrm{AlP}} \cdot p_{\mathrm{GaAs}}}{p_{\mathrm{AlAs}} \cdot p_{\mathrm{GaP}}} = \exp\left(-\dfrac{\Delta\varepsilon_{\mathrm{AlGa}}}{RT}\right), \\ \dfrac{p_{\mathrm{AlP}} \cdot p_{\mathrm{InAs}}}{p_{\mathrm{AlAs}} \cdot p_{\mathrm{InP}}} = \exp\left(-\dfrac{\Delta\varepsilon_{\mathrm{AlIn}}}{RT}\right), \end{cases}$$

где F_0 – взвешенная сумма энергий бинарных соединений; F_{mix} – энергия смешения; F_{ex} – избыточная энергия, учитывающая локальные упругие напряжения кристаллической решетки на основе модели Китинга [7]; F_{st} – энергия упругих напряжений псевдоморфного сопряжения с подложкой; p_{ij} – вероятность образования связи между атомами i и j; x – мольная доля Al; y – мольная доля Ga, z – мольная доля As; $\Delta\varepsilon_{ij}$ – энергия обменной реакции между парами связей, T – температура, R – газовая постоянная.

Чтобы определить, какое распределение связей является термодинамически более предпочтительным для AlGaInAsP, нужно минимизировать функционал свободной энергии для заданных макроскопических параметров (x, y, z) или (x, y, T). В качестве начального приближения итерационного процесса минимизации функционала с ограничениями выберем распределение связей идеального раствора.

Заключение

На основе разработанной квазихимической модели, используя критерий термодинамической устойчивости Пригожина – Дефея [8], проведены расчеты областей спинодального распада для гетероструктур AlGaInAsP/InP. Показано, что с увеличением содержания Al в растворе расширяется область спинодальной неустойчивости, а критическая температура химического распада возрастает до ~ 850 - 900 °C. Это обусловлено высокой положительной энтальпией смешения вследствие существенного различия атомных радиусов в подрешетке катионов и энергетических характеристик связей Al-P, Al-As по сравнению с другими катионами. Однако наличие когерентных напряжений при псевдоморфном росте на подложке InP приводит к уменьшению области спинодальной неустойчивости и снижению критической температуры на ~ 150 - 200 °C в зависимости от состава, что имеет практическую значимость для технологов, открывая дополнительные возможности управления параметрами роста.

Благодарности

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН № гос. рег. 125011200142-7.

Список литературы

[1] J. F. Geisz, R. M. France, K. L. Schulte, M. A. Steiner, A. G. Norman, H. L. Guthrey, M. R. Young, T. Song, T. Moriarty. Nature Energy, 5, 326 (2020).

[2] M. Green, E. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, X. Hao. Prog. Photovolt., 29, 3 (2021).

[3] G. S. Gagis, V. I. Vasil'ev, A. G. Deryagin, V. V. Dudelev, A. S. Maslov, R. V. Levin, B. V. Pushnyi, V. M. Smirnov, G. Z. Sokolovskii, G. G. Zegrya, V. I. Kuchinskii. Semicond. Sci. Technol., 23, 125026 (2008).

[4] D. A. Veselov, K. R. Ayusheva, I. S. Shashkin, K. V. Bakhvalov, V. V. Vasil'eva, L. S. Vavilova, A. V. Lyutetskiy, N. A. Pikhtin, S. O. Slipchenko, Z. N. Sokolova, I. S. Tarasov. Quantum Electron., 45, 879 (2015).

[5] V. I. Iveronova, I. G. Sapkova. Kristallographiya, 24, 805 (1979).

[6] P. Chartrand, A. Pelton. Metall. Mater. Trans. B, 32, 1397 (2001).

[7] P. Keating. Phys. Rev., 145, 637 (1966).

[8] I. Prigogine, R. Defay, Chemical Thermodynamics (London, Longmans Green and Co, 1954).

Двухстадийное радикальное окисление кремния для формирования ультратонкого подзатворного диэлектрика

М. В. Черняев[1], **С. А. Горохов**[1,2], **С. И. Патюков**[1], **А. А. Резванов**[1,2], **Э. М. Филалова**[2]✉

[1] JSC «MERI», Zelenograd, Russia;

[2] Moscow Institute of Technology, Dolgorudny, Russia

✉filalova.em@phystech.edu

Аннотация. Исследован двухстадийный процесс радикального окисления кремния, включающий низкотемпературную и высокотемпературную стадии ISSG (англ. *in situ* steam-generation). Показано, что формирование самоограниченного оксидного слоя на начальном этапе обеспечивает снижение толщины, улучшение однородности и воспроизводимости ультратонкого подзатворного диэлектрика.

Ключевые слова: радикальное окисление кремния; ISSG; ультратонкий оксид; подзатворный диэлектрик; RTP; кинетика окисления.

Современное масштабирование МОП-транзисторов требует формирования ультратонкого подзатворного диэлектрика с высокой однородностью и воспроизводимостью параметров. При уменьшении толщины оксида кремния существенно возрастает влияние туннельных токов утечки, дефектов и вариаций технологических условий.

Одним из перспективных методов формирования тонких диэлектриков является радикальное ISSG-окисление, характеризующееся высокой скоростью роста и слабой зависимостью от параметров подложки. Однако использование стандартного высокотемпературного режима затрудняет получение ультратонких слоев с малым разбросом толщины.

В работе предложен двухстадийный процесс радикального окисления, включающий низкотемпературную (НРО) и последующую высокотемпературную (ВРО) стадии. На стадии НРО формируется тонкий самоограниченный слой оксида, рост которого определяется экспоненциальной кинетикой и прекращается при достижении критической толщины.

Показано, что данный слой выполняет пассивирующую функцию и переводит процесс на стадии ВРО в режим замедленного роста. Это обеспечивает уменьшение толщины оксида на 4–11 Å, снижение неоднородности по пластине в 3–5 раз и повышение воспроизводимости процесса примерно на 30% по сравнению со стандартным режимом.

Установлено, что управление толщиной диэлектрика может осуществляться за счет изменения параметров низкотемпературного этапа при фиксированных условиях высокотемпературного окисления. Предложенный подход позволяет стабилизировать технологический процесс, снизить чувствительность к вариациям условий и устранить эффект «первой пластины».

Таким образом, двухстадийное радикальное окисление обеспечивает управляемое формирование ультратонкого подзатворного диэлектрика и может быть эффективно использовано в технологиях СБИС.

[1] Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов. В 2 - х частях. Часть 1. – Москва: Техносфера, 2002. – С. 416.

[2] Pan T. M. Electrical characterization of 13 Å in situ steam-generated oxynitride gate dielectrics //Electrochemical and solid-state letters. – 2005. – Т. 9. – №. 2. – С. G66.

[3] Xu Y., Huang Y. Influence of ISSG tunnel oxide with decoupled plasma nitridation on erase characteristic of NOR-type floating-gate flash memories //Microelectronics Reliability. – 2015. – Т. 55. – №. 7. – С. 1126-1129.

[4] Seshan K., Schepis D. (ed.). Handbook of thin film deposition. – William Andrew, 2018.

[5] Storbeck O., Pethe W., Hayn R. A Growth Kinetics Model for the Radical Oxidation of Silicon //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2008. – Т. 573. – С. 147-152.

[6] Черняев М.В., Горохов С.А., Патюков С.И., Резванов А.А. Кинетика радикального окисления кремния // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2022. №3 (187). С. 31-44.
[7] Черняев М.В., Горохов С.А., Патюков С.И., Резванов А.А. Низкотемпературное радикальное ISSG окисление кремния // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2023. №2 (190). С. 62-68.

Оптические свойства объемных слоев GaPN(As) и сверхрешеток GaPNAs/GaPN, синтезированных на кремниевых подложках

К. Ю. Шубина [1✉], **Е. В. Пирогов** [1], **М. С. Соболев** [1], **А. К. Кавеев** [1,2], **Е. В. Никитина** [1,2]

[1] Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия;

[2] ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия;

✉kshubina@spbau.ru

Аннотация. Работа посвящена анализу оптических свойств эпитаксиальных гетероструктур на основе объемных слоев и сверхрешеток материалов разбавленных нитридов GaPN(As), синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на кремниевых подложках. Показано, что использование сверхрешеток, равно как и объемных слоев, позволяет добиться соответствия полос фотолюминесценции энергетическим диапазонам, необходимым для создания многопереходных солнечных элементов на кремнии.

Ключевые слова: разбавленные нитриды, кремний, молекулярно-пучковая эпитаксия, сверхрешетки, фотолюминесценция.

Введение

Разбавленные нитриды GaPN(As) – класс прямозонных полупроводниковых материалов, представляющих большой интерес для оптоэлектроники и фотовольтаики, в частности, для создания многопереходных солнечных элементов на кремнии. Уникальной особенностью данных материалов является то, что с вариацией состава твердого раствора по P, N (и As) можно добиться решеточного согласования с подложками Si, что является привлекательной перспективой для решения задачи интеграции кремния и A_3B_5 оптоэлектроники [1].

К сожалению, гетероэпитаксиальный рост качественных слоев разбавленных нитридов непосредственно на Si подложках невозможен, что обуславливает обязательное использование буфера GaP, и осложняется рядом проблем, сопряженных как с ростом полярных азотсодержащих материалов на неполярных Si подложках, так и с формированием структурных дефектов, в том числе, связанных с рассогласованием решеток GaP и Si. Одним из подходов, позволяющих улучшить характеристики эпитаксиальных гетероструктур на основе GaPN(As) на кремнии, является формирование сверхрешеток (СР) вместо объемных слоев. Ранее нами уже было проведено сравнительное исследование оптических свойств объемных слоев GaPN и СР GaPNAs/GaP(N), сиентезированных на подложках GaP [2]. Целью данной работы является исследование оптических свойств гетероструктур, содержащих объемные слои и сверхрешетки разбавленных нитридов, синтезированных на Si подложках.

Материалы и методы

Образцы эпитаксиальных гетероструктур были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота на установке Veeco GEN III. Синтез осуществлялся на подложках Si(100) с разориентацией 4°. Было изготовлено 2 типа гетероструктур: образцы с объемными слоями GaPN(As) и со сверхрешетками GaPNAs/GaPN, содержание азота в твердых растворах варьировалось в пределах 1,5-3%. Описание конструкций образцов представлено в Таблице 1.

Таблица 1

Конструкции исследуемых гетероструктур

№ Образца	Описание
1	GaP 25 нм/GaPN 200 нм/GaP/Si
2	GaP 30 нм/GaPN 30 нм/СР (GaPNAs/GaPN 7/7 нм 10 периодов)/GaPN 100 нм/GaP буфер 80 нм/Si
3	GaP 150 нм/GaPN 50 нм/СР (GaPNAs/GaPN 7/7 нм 10 периодов)/GaPN 50 нм/GaP

	буфер 100 нм/Si
4	GaPN 200 нм/GaP/Si
5	GaP 25 нм/GaPNAs 200 нм/GaP 50 нм/Si

Образцы исследовались с помощью методов рентгеновской дифрактометрии (XRD) и фотолюминесцентной (ФЛ) спектроскопии: были получены спектры ФЛ при комнатной температуре, а также изучена температурная зависимость ФЛ и зависимость интегральной интенсивности ФЛ от мощности накачки. Спектры ФЛ при комнатной температуре были получены с использованием в качестве источника накачки твердотельного лазера мощностью 1 мВт с длиной волны излучения $\lambda = 266$ нм.

1. Результаты и обсуждение

На Рис. 1 приведены спектры ФЛ исследуемых образцов, полученные при комнатной температуре. Как можно видеть, образцы отличаются как по интенсивности ФЛ, так и по положению максимума ФЛ. Так, если взять образцы 1, 4, содержащие объемные 200 нм слои GaPN, и 5 – с объемным слоем GaPNAs, то видно, что добавление мышьяка закономерно приводит как к сдвигу положения пика ФЛ в длинноволновую область, а также приводит к увеличению параметра решетки твердого раствора [1], что подтверждается данными XRD. При этом, по интенсивности и положению пика ФЛ образцов 2 и 5 видно, что использование СР GaPNAs/GaPN позволяет лучше компенсировать механические напряжения от нижних слоев GaP и GaPN (что так же подтверждается данными XRD) по сравнению с ростом объемного слоя GaPNAs непосредственно на буферном слое GaP, и при этом гарантировать попадание в тот же диапазон длин волн. Детальное обсуждение всех данных о ФЛ образцов и их сопоставление с данными XRD будет представлено в докладе.

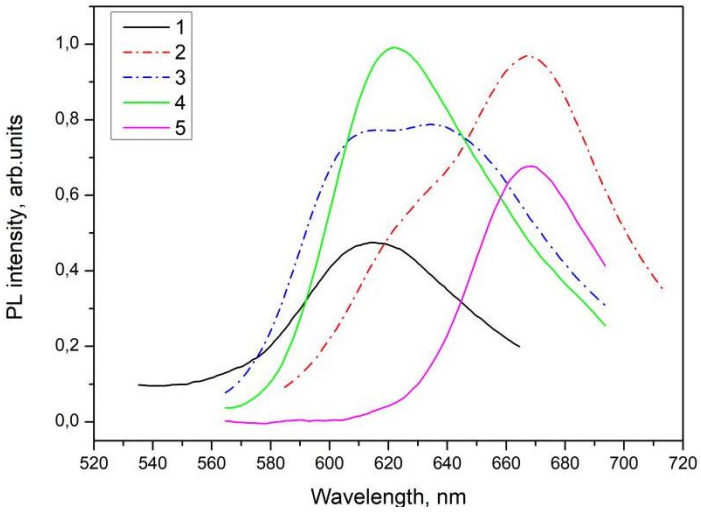


Рис. 1. Спектры ФЛ при комнатной температуре: сплошные линии – объемные слои GaPN(As), пунктир с точкой – образцы со сверхрешеткой GaPNAs/GaPN.

Заключение

Таким образом, продемонстрировано, что эпитаксиальные гетероструктуры на основе разбавленных нитридов, содержащие объемные слои и сверхрешетки из данных материалов, синтезированные на кремниевых подложках, демонстрируют фотолюминесценцию при комнатной температуре с максимумами в диапазоне длин волн 615-670 нм, и могут быть использованы в качестве верхних переходов многопереходных солнечных элементов на Si.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-79-00032.

Список литературы

[1] M. Henini, Mohamed. *Dilute nitride semiconductors*. (Elsevier, 2004).

[2] E. V. Nikitina, M. S. Sobolev, E. V. Pirogov, I. S. Makhov, A. M. Nadtochiy, E. I. Vasilkova, N. V. Kryzhanovskaya. Condensed Matter and Interphases. **26**(3), 490 (2024).

Поверхностное сопротивление и транзисторные эффекты в пленках WS_2 и WSe_2, полученных лазерным осаждением

В.Н. Загороднева [1]✉, С.М. Сутурин [1], Е.Ф. Канафиева[1], Е.Ю. Лобанова [1], Дж. М. Хуанг [3], С.К. Чжоу [3], Х.Х. Цай [3], Ю.Х. У [3], Н.С. Соколов [1], Ю.Ю. Илларионов [3]

[1] Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

[2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

[3] Южный университет науки и технологий, Шэньчжэнь, Китай

✉zagorodnevaleria@gmail.com

Аннотация. Исследовано влияние плотности энергии лазера на мишени во время роста WS_2 и WSe_2 на Al_2O_3 методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО) на поверхностное сопротивление (sheet resistance) этих пленок. Полученные структуры исследовали на наличие транзисторных свойств экспресс-методом, предложенным авторами данной работы.

Введение

Двумерные полупроводники, в частности дихалькогениды переходных металлов (WS_2, WSe_2, MoS_2), привлекают внимание благодаря своим уникальным электронным свойствам. Использование двумерных полупроводников в качестве проводящего канала в полевых транзисторах способствует развитию миниатюризации интегральной электроники [1].

Для создания таких приборов особый интерес представляют структуры, выращенные методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО). Данный метод имеет преимущество перед традиционными, так как решает проблему совместимости выращиваемого материала с кремниевой технологией. Важным параметром этого процесса является плотность энергии лазера на мишени. Этот параметр подлежит оптимизации, так как влияет на однородность и стехиометрию получаемых структур. Исследования компонентов полевых транзисторов в лабораторных условиях на начальных этапах осложнено созданием полноценных приборов с использованием литографии. Во-первых, полный цикл их создания в лаборатории зачастую недоступен. Во-вторых, создание целого прибора для исследования лишь одного компонента является избыточным. Поэтому существует необходимость в разработке экспресс методик оценки транзисторных свойств эпитаксиально выращенных слоев двумерных полупроводников.

Цель работы: Исследование влияния плотности энергии лазера на мишени во время роста на поверхностное сопротивление и транзисторные свойства тонких пленок WS_2 и WSe_2 на подложках Al_2O_3.

Задачи: Конструирование и сборка зондовой установки для проведения электрофизических исследований; Измерение продольной проводимости нанометровых полупроводниковых слоев WS_2 и WSe_2 четырехзондовым методом; Исследование полученных структур WS_2 и WSe_2 на подложках Al_2O_3 на наличие эффекта модуляции проводимости канала экспресс-методом с использованием ионной жидкости.

Материалы и методы

Слои WS_2 и WSe_2 выращены на подложках Al_2O_3 методом ИЛО при значениях плотности энергии лазера на мишени: F = 0.7-4 Дж/см^2.

Измерение сопротивления пленок проводилось на разработанной и собранной авторами прецизионной установке четырехзондовым методом. Острые графитовые зонды расставлялись в линию на одинаковом расстоянии друг от друга, два внешних зонда использовались для подачи постоянного тока *I*, два внутренних – для измерения напряжения *V*. Основное преимущество метода заключается в нечувствительности к сопротивлению измерительных контактов.

Структуры WS_2/Al_2O_3 и WSe_2/Al_2O_3 исследовали экспресс-методом с ионной жидкостью DEME TFSI. Она широко используется в конденсаторах с двойным электрическим слоем благодаря своей высокой стабильности. В ряде работ, где ионная

жидкость используется в качестве подзатворного диэлектрика, упоминаются гидрофильные свойства, поэтому электрофизические эксперименты проводились в вакуумной камере при давлении 10^{-3} мбар. На поверхность структуры наносилась капля жидкости, после чего в нее погружали три тонких гибких золотых зонда, два из них касаются пленки – исток и сток, третий висит в капле – затвор. Между истоком и стоком подавали постоянное напряжение 1 В и измеряли кривые зависимости силы тока в полупроводнике от изменения напряжения на затворе $I_D(V_G)$. Экспресс-метод позволяет оценивать величину транзисторного эффекта в слоях 2D полупроводников без использования литографии, травления и нанесения металлических контактов.

Результаты и обсуждение

Создана прецизионная четырехзондовая установка, позволяющая осуществлять большое количество методик электрофизических исследований.

Исследована зависимость поверхностного сопротивления пленок WS_2 и WSe_2, выращенных методом ИЛО на подложках Al_2O_3, от плотности энергии лазера на мишени. Из рис. 1 (a) видно, что сопротивление структур с селенидом в целом выше. Интересно, при увеличении плотности энергии лазера на мишени сопротивление уменьшается на несколько порядков. Вероятно, это связано с изменением стехиометрического соотношения, которое влияет на концентрацию носителей заряда.

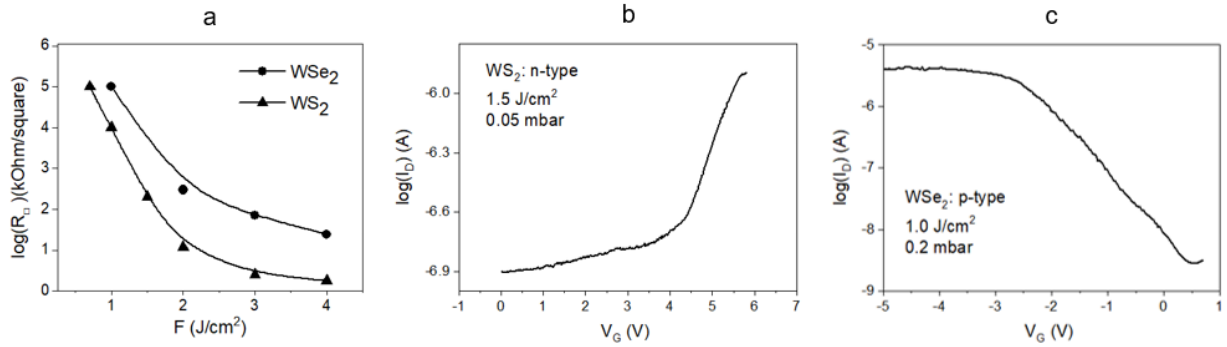


Рис. 1. (a) Зависимость поверхностных сопротивлений WS_2 и WSe_2 от плотности энергии лазера на мишени. Типичные кривые $I_D(V_G)$, полученные экспресс-методом на эпитаксиальных пленках WS_2 (b) и WSe_2 (c).

Получены типичные кривые зависимости силы тока в полупроводнике от изменения напряжения на затворе ($I_D(V_G)$) для WS_2 и WSe_2 (рис. 1 (b), (c)). Исходя из характеристик можно сделать несколько выводов. Во-первых, продемонстрирована модуляция проводимости в канале разработанным авторами экспресс-методом. Во-вторых, видно, что «канал» из WSe_2 открывается при приложении отрицательного напряжения на затвор, а WS_2 – при приложении положительного напряжения. Такое поведение соответствует p- и n-типам проводимости каналов, что характерно для данных структур.

Заключение

В настоящей работе изготовлена установка для проведения электрофизических исследований тонких пленок. Получена зависимость поверхностного сопротивления WSe_2 и WS_2 на подложках Al_2O_3 от плотности энергии лазера на мишени в процессе роста методом ИЛО. Разработан экспресс-метод исследования транзисторных характеристик выращенных структур. Продемонстрировано явление модуляции проводимости исследуемых структур. Получены типичные кривые $I_D(V_G)$ для WSe_2 и WS_2.

Список литературы

[1] T. Wei, Z. Han, X. Zhong, Q. Xiao, T. Liu, D. Xiang, Two dimensional semiconducting mate rials for ultimately scaled transistors в *iScience* **25**(10), 105160 (2022).

Исследование процессов роста квантовых точек InAs на структурированной поверхности GaAs(111)B при различных режимах молекулярно-лучевой эпитаксии

С. В. Балакирев [1]✉, Д. В. Кириченко [1], Н. Е. Солодовник [1], Н. А. Шандыба [1], Д. Д. Духан [1], М. М. Ерёменко [1], М. С. Солодовник [1]

[1] Лаборатория эпитаксиальных технологий, Южный федеральный университет, Таганрог 347922, Россия

✉sbalakirev@sfedu.ru

Аннотация. Проведено исследование закономерностей роста квантовых точек (КТ) InAs при различных режимах молекулярно-лучевой эпитаксии на структурированной поверхности GaAs(111)B. КТ формируются в тетраэдральных наноразмерных углублениях, образованных в результате модификации поверхности с помощью совмещенной методики фокусированных ионных пучков и локального капельного травления. Наиболее предпочтительными позициями для зарождения КТ являются вершины оснований углублений. В условиях подавления диффузионной длины адатомов в углублениях формируется множество неоднородных КТ, образующих цепочки КТ. При оптимальных режимах в углублениях формируется от 1 до 4 КТ, формирующих симметричный комплекс. Продемонстрированы способы получения упорядоченных массивов комплексов КТ с требуемой конфигурацией, а также спектры их фотолюминесценции.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, фокусированные ионные пучки, наноструктурирование, GaAs(111)B, InAs, квантовые точки.

Введение

В последнее время наблюдается повышенный интерес к эпитаксиальному росту на подложках GaAs(111), что связано главным образом с возможностью формирования на них квантовых точек (КТ) с симметрией C_{3v}, способных излучать запутанные пары фотонов с малым тонким расщеплением. Формирование КТ на поверхностях (111) может осуществляться без предварительного структурирования, однако в таком случае они имеют достаточно высокую плотность и непредсказуемое позиционирование, что затрудняет изоляцию одиночных КТ и их комплексов. Структурирование поверхности позволяет предопределять центры зарождения КТ и их геометрические характеристики. При этом рост КТ в таком случае осуществляется, как правило, методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) из тройного соединения (InGaAs). В данной работе проводится исследование закономерностей роста InAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на поверхности GaAs(111)B, структурированной наноуглублениями тетраэдральной формы с помощью совмещенной методики фокусированных ионных пучков (ФИП) и локального капельного травления (ЛКТ).

Материалы и методы

Исследования проводились с использованием подложек GaAs(111)B класса “epi-ready”. Структурирование поверхности реализовывалось методом ФИП Ga^+ с дальнейшим ЛКТ в камере МЛЭ. Доза ионного облучения задавалась числом проходов ионного пучка (N, от 1 до 60). Расстояние между точками воздействия ФИП (L) составляло 0.5 мкм. Осаждение InAs толщиной 2.5 монослоя (МС) осуществлялось методом МЛЭ при температурах (T) 450°C и 500°C, скоростях роста (V) 0.05 и 0.25 МС/с при давлениях мышьяка (P) $5\cdot10^{-6}$ и $3\cdot10^{-5}$ Па.

Результаты и обсуждение

Осаждение InAs при температуре 450°C сопровождается интенсивной нуклеацией на стыках граней углубления, приводящей к образованию сплошных линейных цепочек наноструктур InAs (рис. 1а). Увеличение температуры роста до 500°C позволяет

значительно снизить концентрацию центров зарождения островков, обеспечивая среднюю поверхностную плотность КТ в 8 мкм$^{-2}$ (рис. 2a). Повышение скорости осаждения InAs с 0.05 до 0.25 МС/с способствует дополнительному повышению плотности КТ до 17 мкм$^{-2}$ (рис. 1b). Увеличение давления мышьяка от $5\cdot10^{-6}$ до $3\cdot10^{-5}$ Па приводит к аналогичному эффекту, увеличивая плотность КТ с 8 до 23 мкм$^{-2}$ (рис. 1c).

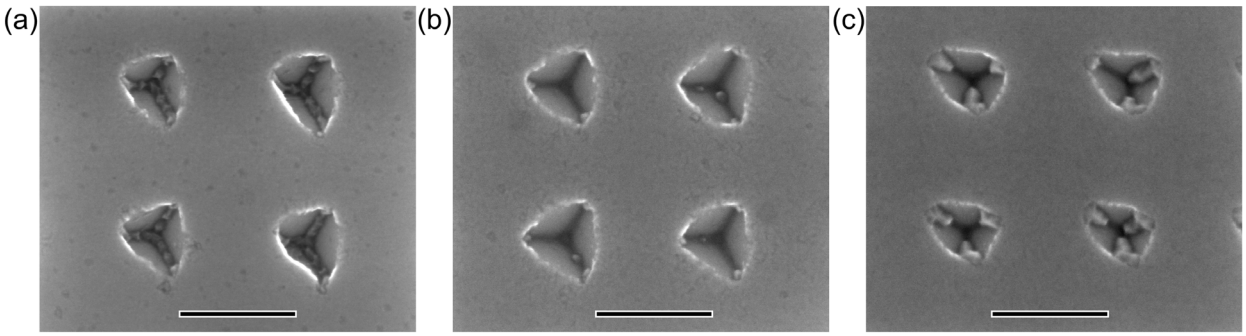


Рис. 1. СЭМ-изображения КТ InAs, сформированных на поверхности GaAs(111)B при различных режимах МЛЭ: a) $T = 550$ °C, $V = 0.05$ МС/с, $P = 5\cdot10^{-6}$ Па, b) $T = 600$ °C, $V = 0.25$ МС/с, $P = 5\cdot10^{-6}$ Па, c) $T = 600$ °C, $V = 0.05$ МС/с, $P = 3\cdot10^{-5}$ Па. Шкала: 400 нм.

Рост InAs при $T = 600$ °C, $V = 0.05$ МС/с и $P = 5\cdot10^{-6}$ Па обеспечивает формирование комплексов КТ, расположенных в предсказуемых позициях углубления (рис. 2a), что позволяет прогнозировать не только их положение, но и взаимное расстояние. В зависимости от числа проходов ФИП варьировалось количество КТ, составляющих комплекс в наибольшем количестве углублений в массиве. Так, при $N = 1$ наибольшее количество углублений в массиве содержит по 1 КТ (46%), при $N = 5$ – по 2 и 3 КТ с долями 41% и 43% соответственно, тогда как в остальных случаях преобладают углубления, содержащие по 3 КТ (рис. 2b).

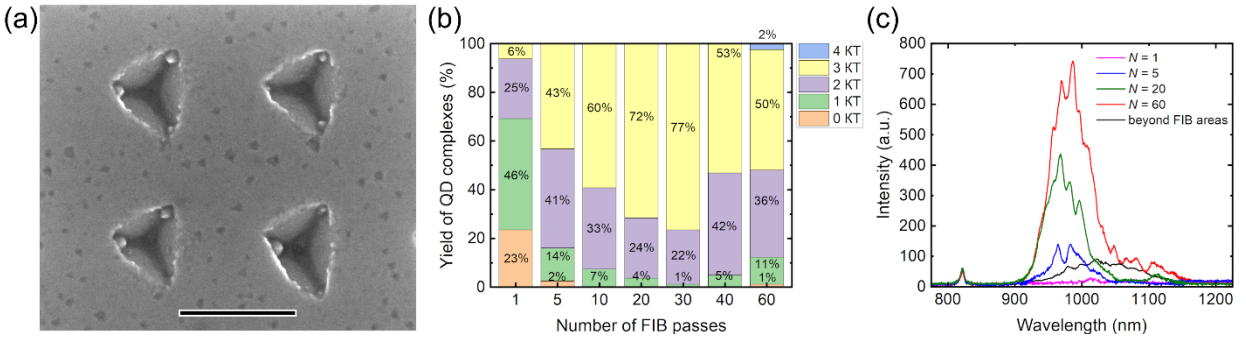


Рис. 2. СЭМ-изображение (a), диаграмма с накоплением (b) и спектры ФЛ (c) для КТ, полученных на поверхности GaAs(111)B при $T = 600$ °C, $V = 0.05$ МС/с и $P = 5\cdot10^{-6}$ Па.

Спектры ФЛ демонстрируют излучение КТ в диапазоне 900–1150 нм со значительным ростом интенсивности ФЛ при увеличении числа проходов ФИП. Начиная от $N = 5$, интегральная интенсивность ФЛ превышает интенсивность референсного участка за пределами области воздействия ФИП, при этом максимум излучения смещается в коротковолновый диапазон, что свидетельствует о снижении среднего размера КТ.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10313, https://rscf.ru/project/23-79-10313/, и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации; государственное задание в сфере научной деятельности № FENW-2025-0004 в Южном федеральном университете.

Модификация поверхности в процессе атомно-слоевого травления SiO_2

А. Н. Ковалев [1,2]✉, **Д. Р. Шибанов** [3], **А. Н. Строкачук** [1] **и А. А. Резванов** [1,2]
[1] АО НИИМЭ, г. Зеленоград, Российская Федерация;
[2] МФТИ (НИУ), г. Москва, Российская Федерация
[3] МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация
✉alkovalev@niime.ru

Аннотация. В работе исследовано плазменно-стимулированное атомно-слоевое травление (PEALE) пленок SiO_2 на ICP-реакторе. Показано, что циклический процесс позволяет сохранять низкую шероховатость поверхности при скоростях травления 1–6 Å/цикл, в отличие от других видов плазменного травления. Увеличение мощности нижнего ВЧ-генератора приводит к росту глубины проникновения реагентов и ухудшению качества слоя, а при скоростях менее 1–2 Å/цикл наблюдается неполное травление по площади. Определены режимы, обеспечивающие минимальную шероховатость.

Ключевые слова: атомно-слоевое травление, плазменное травление, КМОП-технология, микроэлектроника.

Введение

Плазменное травление диэлектриков для приложений микроэлектроники неизбежно влечет за собой модификацию топологии и состава поверхностного слоя материала, влияющую на свойства получаемых транзисторных структур. С уменьшением уровня технологий все актуальнее становится вопрос контроля таких параметров, как атомарное качество слоя и шероховатость его поверхности. Несмотря на то, что наибольшую скорость травления можно получить в режимах, в которых превалирует физическая составляющая процесса – распыление (sputtering), качество получаемой после травления поверхности неизбежно ухудшается, а шероховатость может достигать значений в 1-2 нм [1]. Метод плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления (PEALE), наоборот, предполагает прецизионную обработку в режимах с наименьшими энергиями ионов и скоростями травления от 2-3 Å за цикл [2]. Применение циклического ALE может не просто сохранить шероховатость поверхности, но и уменьшить ее значение из-за самонасыщения каждой стадии цикла [3].

Материалы и методы

Настоящая работа была проведена на ICP-реакторе атомно-слоевого травления Плазма ТМ-200-04 (НИИТМ). В качестве объектов исследования были использованы пленки SiO_2 (TEOS) на кремниевых подложках диаметром 200 мм. Цикл атомно-слоевого травления состоял из четырех последовательных стадий:

a) продувка Ar;
b) осаждение полимерной пленки C_x-F_y из C_4F_8/Ar;
c) продувка Ar;
d) очистка поверхности O_2/Ar.

Мощность ВЧ источника плазмы варьировались от 100 до 600 Вт, а мощность на нижнем генераторе – от 10 до 100 Вт соответственно. Соотношения потоков Ar/C_4F_8/O_2 было выбрано 10/0.55/1 и не изменялось в ходе всего эксперимента. Времена продувки составили 4с. Времена осаждения пленки C_x-F_y изменялись таким образом, чтобы проводить осаждение слоя полимера, толщиной в 1 нм. Время очистки для каждого режима подбиралось таким образом, чтобы доходить до насыщения в конце цикла.

Для контроля толщины пленки SiO_2 и полимерного слоя на разных стадиях цикла ALE использовались in-situ лазерный эллипсометр и ex-situ спектральный эллипсмотр. Качество слоя оксида кремния и состояние его поверхности определялось при помощи атомно-силового микроскопа (AFM) и рентгеновского рефлектометра (XRR).

Результаты и обсуждение

По результатам исследования был подтверждено отсутствие увеличения уровня шероховатости после травления слоя оксида кремния методом PEALE с малыми смещениями (bias). Скорость травления за цикл составила от 1 до 6 Å в зависимости от мощности высокочастотных генераторов смещения. В ходе экспериментов было показано, что с увеличением мощности на нижнем ВЧ генераторе увеличивается глубина проникновения реагентов в слой SiO_2, что изменяет плотность поверхностного слоя и отрицательно сказывается на значении шероховатости. Был определены мощности на верхнем и нижнем ВЧ генераторе, при которых наблюдалось минимальное значение шероховатости (рис. 1). Отдельно следует отметить, что в режимах с малыми скоростями травления – менее 1-2 Å за цикл, процесс атомно-слоевого травления поверхности проходил только частично – в некоторых областях толщина слоя не менялась после одного цикла травления, что отрицательно сказалось на качестве слоя после окончания процесса.

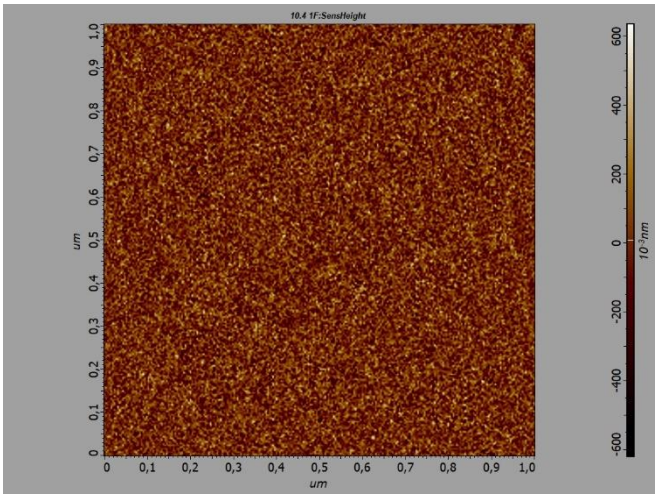


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности SiO_2 после 10 циклов атомно-слоевого травления в оптимальном режиме. Размер области сканирования – 1x1 мкм. Среднеквадратическая шероховатость составила 0.1 нм.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-91-06002, https://rscf.ru/project/23-91-06002/.

Список литературы

[1] D. S. Catherall, A. A. Hossain [et al] Atomic layer etching of SiO_2 using sequential exposures of $Al(CH_3)_3$ and H_2/SF_6 plasma // Journal of Vacuum Science & Technology A. –2024– Vol. 42, no. 5

[2] D.V. Lopaev, D.R. Shibanov Fluorocarbon (C4F8) assisted plasma-enhanced atomic layer etching (PEALE) of SiO2 with high repeatability of cycles in industrial ICP reactor. I. experiment. // Journal of Vacuum Science & Technology A.–2026–44.10.1116/6.0005123.

[3] M. Choi, H. Lee Plasma atomic layer etching of SiO_2 and Si_3N_4 using low global warming hexafluoropropene // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2025. – Vol. 43, No. 2. – P. 022601.

Генерация второй гармоники в квазидвумерном галогениде свинца на основе MePEA

Д.А. Семёнов[1]✉, Е.В. Сапожникова[1,2], Д.А. Татаринов[1,2], Г.А. Верхоглядов [2], А.П. Пушкарёв [1, 2]

[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;

[2] Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия;

✉ dmitrii.semenov@metalab.ifmo.ru

Аннотация. В данной работе исследуется генерация второй гармоники в квазидвумерных перовскитных кристаллах, а также впервые демонстрируется генерация второй гармоники в структурах с органическим катионом разделителем MePEA.

Ключевые слова: квази-двумерные галогенидные перовскиты, генерация второй гармоники, фотолюминесценция, нелинейная оптика.

Введение

Перовскитные материалы на основе галогенидов-свинца зарекомендовали себя как перспективный класс материалов для использования в оптоэлектронных и фотонных системах. Однако практическое применение таких структур ограничивается их низкой стабильностью к внешнему воздействию (температура, влага, атмосфера). Ряд работ продемонстрировал, что одним из методов повышения стабильности является понижение размерности кристалла за счёт введения органической молекулы – разделителя в кристаллическую решётку. Такие свинцово-галогенидные структуры являются квазидвумерными кристаллами различной фазы n, где n – количество перовскитных октаэдоров в слое.

Квази-2D перовскиты также привлекают все большее внимание для применения в нелинейной оптике (НЛО). Среди наиболее изученных явлений НЛО в этих материалах – генерация второй гармоники (ГВГ).

В настоящее время наиболее часто используемыми разделительными катионами в квазидвумерных перовскитах, в которых возможна ГВГ, являются галогениды бутиламмония (BA) и фенилэтиламмония (PEA) [1]. Однако эффективность преобразования SHG и стабильность генерации в системах на основе BA и PEA остаются относительно низкими, что ограничивает возможность их практического применения [1]. Выбор катионов-разделителей в сочетании с настройкой состава анионов может существенно улучшить как эффективность SHG, так и структурную стабильность [2]. В этом контексте в качестве возможного органического разделителя привлекает внимание 4-метил-2-фенилэтиламмоний (MePEA), который продемонстрировал отличные характеристики в качестве катиона-разделителя в нескольких работах по перовскитным солнечным элементам [3]. Однако в квазидвумерных перовскитах с нелинейно-оптическим откликом MePEA ещё не использовался.

В данной работе были исследованы бромные n = 2 квазидвумерные галогенидные перовскиты MePEA2MAPb2Br7. На основе анализа структурных и оптических свойств делается вывод о положительном влиянии MePEA катиона на нелинейно-оптический отклик квазидвумерного перовскита, относительно аналогичного состава с неметелированным органическим катионом.

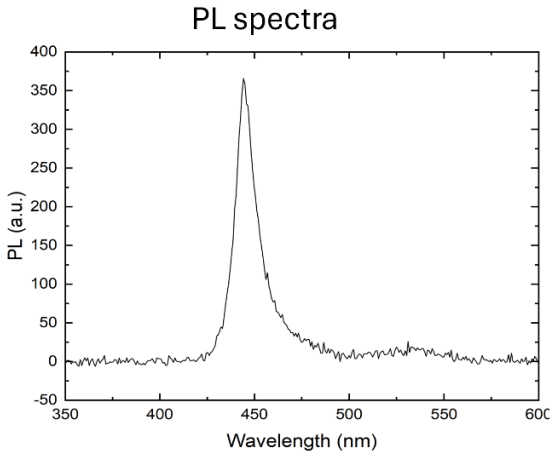
Материалы и методы

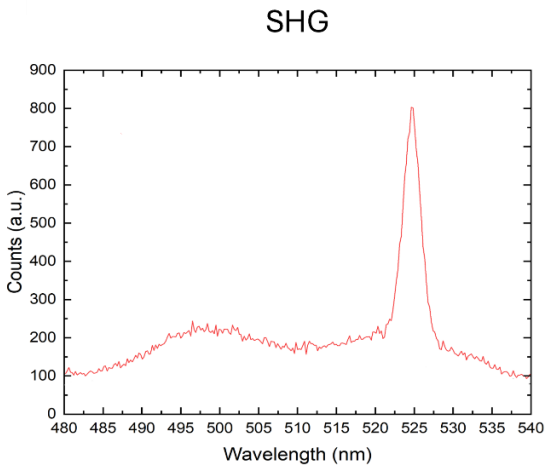
Изображения структур в светлом поле и люминесцентные изображения были получены на оптическом микроскопе Axio Imager A2m (Carl Zeiss SMT) при оптической накачке с использованием УФ-лампы с длиной волны 350 нм. Спектры генерации второй гармоники (SHG) измерялись на спектрометре Labram с оптической накачкой фемтосекундным импульсным лазером TEMA (λ = 1045 нм) и частотой 70 МГц через ИК-объектив 50x (NA = 0,42).

Результаты и обсуждение

Для получения квазидвумерных перовскитных кристаллов использовался новый метод кристаллизации под давлением. В этом методе две стеклянные подложки скреплялись между собой с помощью U-образного металлического кронштейна и винта с гайкой. После чего между двумя стеклянными подложками наносилось 3 мкл раствора квазидвумерного перовскита в ДМСО. Раствор равномерно распределялся по подложке за счёт капиллярного эффекта. Металлический кронштейн с подложками внутри находился в лабораторной печи при температуре 60°C в течение 48 часов. Такой метод синтеза позволил получить высококачественные квазидвумерные перовскитные кристаллы состава MePEA2MAPb2Br7 с латеральными размерами, достигающими нескольких сотен микрометров, и толщиной до нескольких микрометров.

Полученные структуры состава MePEA2MAPb2Br7 имеют пик фотолюминесценции на длине волны 441 нм. При облучении структуры лазерными импульсами с длинной волны 1045 нм в спектре излучения появляется пик на 523 нм. При увеличении мощности накачки интенсивность излучения квадратично увеличивается, что подтверждает генерацию второй гармоники.





Заключение

В данной работе были впервые продемонстрированы бромные n = 2 квазидвумерные галогенидные перовскиты состава MePEA2MAPb2Br7. В данном квазидвумерном перовските была получена генерация второй гармоники, что открывает перспективы для использования данных структур в оптоэлектронике и фотонных устройствах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда науки (проект No. 25-22-00278, https://rscf.ru/project/25-22-00278/)..

1. Darien J Morrow, Matthew P Hautzinger, David P Lafayette, Ja son M Scheeler, Lianna Dang, Meiying Leng, Daniel D Kohler, Amelia M Wheaton, Yongping Fu, Ilia A Guzei, et al. “Disen tangling second harmonic generation from multiphoton photo luminescenceinhalideperovskites using multidimensional har monic generation.” The Journal of Physical Chemistry Letters 11, no. 16 (2020): 6551–6559.
2. Jingjing Yao, Yahui Li, Ming Xia, Junyu Li, Yongchuan Wu, Yufeng Cheng, Xinyuan Zhang, Xiaoze Liu, et al. “Stable and enhanced second harmonic generation enabled by the organic cations of rigid 2D hybrid halide perovskites.” . Journal of Alloys and Compounds (2025): 182342.
3. YuMa,JiaqiWang,WuqianGuo,ShiguoHan,JinlongXu,YiLiu, Lei Lu, Zhenda Xie, Junhua Luo,, and Zhihua Sun. “The f irst improper ferroelectric of 2D multilayered hybrid perovskite enabling strong tunable polarization-directed second harmonic generation effect.” Advanced Functional Materials 31, no. 37 (2021): 2103012.

Пористый кремний как материал электродов для суперконденсаторов

А. А. Адамович[1]✉, **В. Н. Голованов**[1], **М. Ю. Махмуд-Ахунов**[1], **И. О. Явтушенко**[1], **А. А. Соловьев**[1], **В. В. Рыбин**[1], **Д. С. Боднарский**[1, 2], **Р. С. Сафин**[1]

[1]Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia;

[2]JSC Ulyanovsk Mechanical Plant, Ulyanovsk, Russia;

✉artem.adamovich@bk.ru

Аннотация. В работе проведено исследование по применению пористого кремния, модифицированного слоем полианилина, в качестве развитого электрода для емкостных системах типа суперконденсаторов. Емкостные свойства полученных электродов определялись по циклическим вольтамперограммам в растворе на основе H_2SO_4. В результате емкость электродов на основе пористого кремния составила 0.14–0.17 мФ/см².

Ключевые слова: пористый кремний, полианилин, суперконденсатор.

Введение

Методы формирования высокоразвитых поверхностей для использования в качестве электродов емкостных систем типа суперконденсаторов (СК) является активно исследуемой областью современного материаловедения в электронике. Исследования электрохимических двухслойных конденсаторов (ДСК) основано в основном на формировании развитых углеродных материалов типа углеродных нанотрубок, графена, углеродных аэрогелей и др. [1,2] Что касается псевдоконденсаторов, которые в отличие от ДСК хранят заряд фарадеевски, то они обладают большими емкостями и плотностью энергии. Такого рода конденсаторы используют в качестве электродов оксиды металлов и проводящие полимеры, типа полианилина и полипиррола [3,4]. Также в качестве электродов СК используются и композитные многослойные электроды, повышающие их эффективность и долговечность. В данной работы будут рассмотрены особенности использования пористого кремния в качестве электрода СК.

Материалы и методы

Формирование пористого кремния проводили под ультрафиолетовым излучением на подложках монокристаллического кремния марки КЭФ (ориентация (100), ρ = 2.0 – 2.4 Ом.см) в смеси $HF:C_2H_5OH$=1:1 при постоянном анодном токе 20 мА в течение 60 мин, в качестве катода использовался графит. Омический контакт к кремнию создавался путем нанесения на тыльную сторону образца InGa пасты. Для удаления излишек влаги и формирования внешнего тонкого диэлектрического слоя, образцы после анодной обработки проходили термическую обработку при 500 °С в течение 5 ч. Далее электроды покрывались слоем эмеральдиновой формы полианилина в смеси растворов анилина и персульфата аммония в соотношении 1:1. Емкостные характеристики полученных электродов определялись методом циклической вольтамперометрии в 1 М растворе H_2SO_4 в диапазоне от -0.5 до 0.5 В при скоростях сканирования потенциала 20 и 100 мВ/с, противоэлектродом служила Pt фольга.

1. Результаты и обсуждение

При электрохимическом окислении кремния в растворе на основе плавиковой кислоты и этилового спирта на поверхности формируется пористый слой. Типичные снимки поверхности после анодного воздействия приведены на рис. 1. Видно, что формируется типичная для кремния пористая структура с неупорядоченным расположением пор. Размер пор лежит в диапазоне от 0.3 до 0.6 мкм, что соответствует диапазону макропор. Поры имеют характерную форму квадратов, что соответствует используемой ориентации кремния (100).

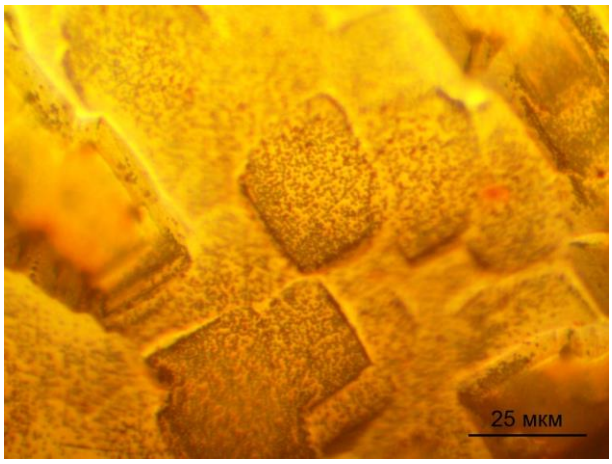


Рис. 1. Снимок поверхности n-Si после анодной обработки.

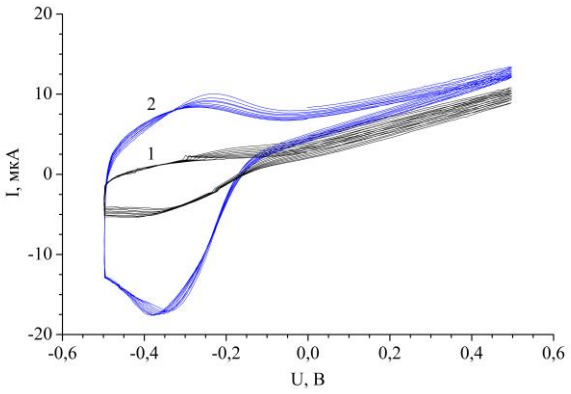


Рис. 2. Циклические вольтамперограммы электродов на основе пористого кремния в 1М растворе H_2SO_4 при различных скоростях сканирования, мВ/с: 1 – 20; 2 – 100.

Емкостные свойства полученных электродов оценивались по данным циклических вольтамперограмм, типичный вид которых представлен на рис. 2. Видно, что кривые носят характерный не симметричный вид. Более пологая анодная часть обусловлена формированием области пространственного заряда (ОПЗ) в n-Si. При смене полярности ОПЗ не образуется, что и приводит к возрастанию тока катодной части ВАГ практически в 2 раза. Емкость такого электрода составляет ~0.14-0.17 мФ/см^2.

Заключение

Таким образом, полученные данные подтверждают возможность формирования пористого кремния с благоприятной морфологией и электрофизическими характеристиками для использования в качестве электродного материала в суперконденсаторах. Проведенный анализ показывает, что пористый кремний обладает емкостью ~0.14-0.17 мФ/см^2, сопоставимой с аналогичными данными для систем на основе оксидов металлов [5].

Список литературы

[1] S.K. Kandasamy, K.J. Kandasamy. New Mater. Electrochem. Sys., **22**(3), 125 (2019).
[2] Q. Shao, J. Tang, Y. Lin, J. Li, F. Qin, J. Yuan, L. C. Qin. Journal of Power Sources., **278**, 751 (2015).
[3] A.R. Athira, T.C. Bhagya, A.H. Riyas, T.S. Xavier, M.A. Shibli. Journal of Materials Science: Materials in Electronics., **33(**5), 2829 (2022).
[4] M.H. Gharahcheshmeh, K. Chowdhury. Energy Advances., **3**(11), 2668 (2024).
[5] А.А. Адамович, М.Ю. Махмуд-Ахунов, И.О. Явтушенко, В.Н. Голованов. Российские нанотехнологии, **18**(6), 750 (2023).

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ЭВОЛЮЦИИ ДЕФЕКТОВ В БУФЕРНОМ СЛОЕ СОДЕРЖАЩЕМ СВЕРХРЕШЕТКИ ALGAN/ALN НА ПОДЛОЖКАХ SI

Дуплийчук И.С. [1,2]✉, **Заварин Е.Е.** [1,2], **Родин С.Н.** [1,2], **Клюев Б.Ю.** [1], **Лундин В.В.** [1], **Николаев А.Е.** [1,2], **Артеев Д. С.** [1,2], **Сахаров А. В.** [1,2], **Черкашин Н.А.**[3], **Цацульников А.Ф.** [1,2]

[1] НТЦ Микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

[2] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

[3] Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Etudes Structurales, Тулуза, Франция

✉duplijchuk@yandex.ru

Аннотация. Проведено исследование упругих напряжений и эволюции дефектов в буферном слое AlN/AlGaN/GaN на подложке Si, содержащем две сверхрешетки (СР) AlGaN/AlN. Методами просвечивающей электронной микроскопии и оптической in-situ рефлектометрии измерены плотность дислокаций и эволюция кривизны в процессе роста. Показано, что во время роста СР наблюдается полная релаксация упругих напряжений при одновременном снижении плотности дислокаций, в то время как при последующем росте GaN релаксация не наблюдается.

Ключевые слова: Плотность дислокаций, сверхрешетка, эпитаксия, упругие напряжения, буферный слой, III-N гетероструктура, AlN, AlGaN, Si.

Отсутствие подложек GaN вынуждает выращивать III-N структуры на инородных подложках, что создает значительные трудности, особенно при росте на кремнии [1]. Рассогласование параметров решетки III-N слоев и подложки приводит к образованию значительной плотности дислокаций, а различие в коэффициентах термического расширения создает высокие упругие напряжения при остывании структуры. Последняя проблема решается использованием особых буферных слоев, содержащих в себе напряжения противоположного знака, компенсирующие напряжения, возникающие при остывании [2]. Одним из способов создания таких буферных слоев является использование слоев AlN, AlGaN и сверхрешеток (СР) AlGaN/AlN в них, на гетерограницах которых и создаются упругие напряжения [3]. Однако, при выращивании этих слоев происходит как эволюция дислокаций, так и релаксация созданных напряжений [4].

В работе проведено исследование эволюции плотности дислокаций и релаксации напряжений в таком многослойном буферном слое. Структура была выращена методом металлорганической газофазной эпитаксии, на установке Dragon-125 на подложке Si (111) диаметром 76,2 мм толщиной 685 мкм и состояла из следующей последовательности слоев: AlN (200 нм), $Al_{0.8}Ga_{0.2}N$ (170 нм), $Al_{0.6}Ga_{0.4}N$ (170 нм), первой СР AlGaN/AlN (670 нм), второй СР (1700 нм), GaN 200 нм. Первая и вторая СР содержали, соответственно, 30 и 60 периодов и имели среднюю мольную долю AlN 0,41 и 0,33.

Измерение плотности дислокаций осуществлено с использованием просвечивающей электронной микроскопии. Измерение кривизны структуры в процессе роста производилось лазерным рефлектометром Burattino, встроенным в эпитаксиальную установку. Нарастание кривизны при увеличении толщины структуры прямо пропорционально толщине слоев и величине встроенных в них упругих напряжений. Тем самым наклон этой зависимости позволяет оценить изменение упругих напряжений во время роста, в частности - их релаксацию.

На рис. 1 представлена производная зависимости кривизны от толщины структуры и изменение плотности дислокаций различных типов по толщине структуры. Близкое к нулю значение производной кривизны свидетельствует о полной релаксации напряжений в наращиваемом в данный момент слое, в то время как значительные отрицательные значения говорят о высоком уровне упругих напряжений сжатия, создаваемых в

структуре. Во время роста слоев AlGaN наблюдается создание упругих напряжений сжатия вследствие различия составов твердых растворов с нижележащими слоями. При этом происходит увеличение плотности дислокаций, однако релаксации упругих напряжений не наблюдается. При начале роста первой СР, вследствие различия среднего состава этой решетки и нижележащего слоя AlGaN, происходит создание упругих напряжений сжатия в слоях – наклон зависимости кривизны меняется скачком. Однако, во время роста СР плотность дислокаций начинает падать, и это сопровождается начинающейся сразу релаксацией напряжений, в результате к концу роста СР напряжения практически полностью релаксируют. При переходе к росту второй СР, вследствие различия среднего состава, вновь возникает увеличение напряжений. По мере ее роста, плотность дислокаций продолжает снижаться и регистрируется быстрая релаксация, о чём свидетельствует приближение к нулю зависимости производной кривизны структуры от толщины. При последующем осаждении GaN напряжения генерируются вновь, однако на толщине 200 нм их релаксация не происходит, в отличие от СР, хотя плотность дислокаций уменьшается быстрее.

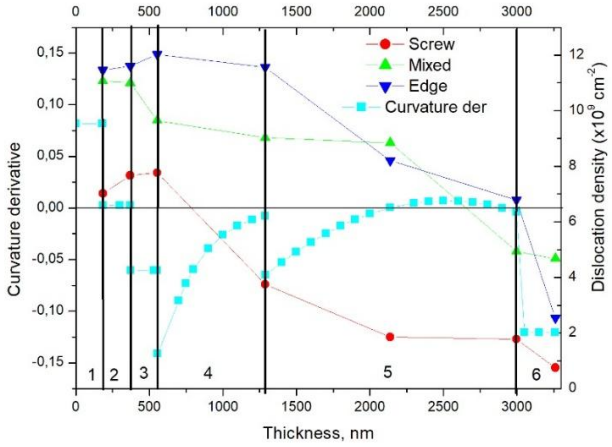


Рис. 1. Эволюция плотности винтовых, смешанных и краевых дислокаций и изменение производной зависимости кривизны гетероструктуры от толщины. 1 – AlN, 2 – AlGaN 80%, 3 – AlGaN 60%, 4 и 5 – СР AlGaN/AlN 30 и 60 периодов соответственно, 6 - GaN

Таким образом, в работе показано, что при росте СР наблюдается полная релаксация напряжений, при этом плотность дислокаций падает. Однако для слоя GaN релаксация не наблюдается, при большем, чем на СР, падении плотности дислокаций. Полученные результаты могут быть полезны для разработки модели, связывающей релаксацию со снижением плотности дислокаций.

Список литературы

[1] Hsu, L.H. Development of GaN HEMTs fabricated on silicon, silicon-on-insulator, and engineered substrates and the heterogeneous integration. Vol. 12 / L.H. Hsu, Y.Y. Lai, P.T. Tu, et al. – MDPI, 2021.

[2] Е. Е. Заварин, С. Н. Родин, Б. Ю. Клюев, В. В. Лундин, А. Е. Николаев, Д. С. Артеев, А. В. Сахаров, А. Ф. Цацульников, “Управление упругими напряжениями при росте гетероструктур (Al)GaN/SiC”, Физика и техника полупроводников, **59**:6 (2025), 315–318

[3] Rahman, M. N., Yusuf, Y., Zainal, N., & Shuhaimi, A. (2025). Enhanced stress relaxation of GaN epilayers on silicon (1 1 1) substrates with a unique AlN/GaN multilayer design. Journal of Materials Science, 60(29), 12519–12528

[4] Rudinsky, M., Yakovlev, E., Talalaev, R., Novak, T., Kostelnik, P., & Sik, J. (2019). Analysis of strain and dislocation evolution during MOCVD growth of an AlGaN/GaN power high-electron-mobility transistor structure. Japanese Journal of Applied Physics, 58, SCCD26.

Влияние температуры отжига на структурные и оптические свойства многослойных структур InP/GaN, сформированных методом плазмохимического атомно-слоевого осаждения

Э. Я. Ярчук [1,2]✉, **А. В. Уваров** [2], **А. А. Максимова** [2], **А. С. Гудовских** [2]
[1] СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия;
[2] СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия
✉ernst_yarchuk@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние температуры отжига на структурные и оптические свойства аморфных сверхрешёток InP/GaN на кремнии, полученные плазмохимическим атомно-слоевым осаждением. Отжиг при температурах 500-700°C приводит к кристаллизации слоев InP и изменению оптических свойств сверхрешёток. С ростом температуры отжига наблюдается уменьшение коэффициента отражения и смещение минимума отражения в коротковолновую область.

Ключевые слова: Солнечная энергетика, фосфид индия, нитрид галлия, отжиг, сверхрешётки.

Введение

Перспективным путём повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей является использование сверхрешёток на кремниевых подложках. Функциональные характеристики таких структур определяются не только исходными параметрами, но и последующей термической обработкой, изменяющей их свойства. Актуальной задачей является установление корреляций между температурами отжига и свойствами сверхрешёток.

Материалы и методы

В данной работе исследуются структурные и оптические свойства решёточно-согласованных с кремниевой подложкой многослойных композиций (сверхрешёток) на основе фосфида индия и нитрида галлия. Для их получения был применён метод плазмохимического атомно-слоевого осаждения при температурах не выше 400°C. Особенность метода заключается в режиме формирования слоёв без применения водородосодержащей плазмы [1,2]. Были получены два типа сверхрешёток: с толщинами слоёв InP и GaN 0.3/0.6 нм и 1.5/3 нм соответственно. Суммарная толщина каждой из структур составила порядка 50 нм. Исходные сверхрешётки InP/GaN, обладавшие аморфной структурой, отжигались при температурах 500, 600 и 700°C длительностью 60 секунд. Исследование структурных свойств проводилось методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Оптические характеристики определялись по спектрам отражения, измеренным в интервале длин волн 400–1200 нм.

Результаты и обсуждение

Спектры комбинационного рассеяния полученных сверхрешёток до и после отжига представлены на рисунке 1. На спектрах исходно аморфных структур наблюдаются два размытых пика при 300 $см^{-1}$ и 440 $см^{-1}$, соответствующих кремниевой подложке. После отжига наблюдается формирование пика при 350 $см^{-1}$, характерного для кристаллической фазы InP (LO мода). При этом для InP/GaN сверхрешёток с толщинами слоёв 1.5/3 нм кристаллизация InP происходит после отжига при 500°C и с ростом температуры отжига спектры не меняются. Для тонкослойных сверхрешёток (0.3/0.6 нм) изменения на спектрах наблюдаются только после отжига при 600°C.

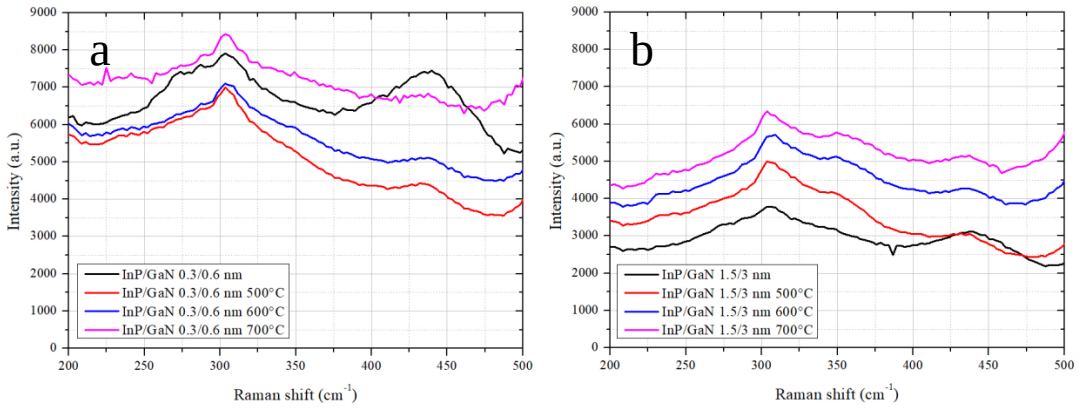


Рис. 1. Спектроскопия комбинационного рассеяния для сверхрешёток InP/GaN с толщинами слоёв 0.3/0.6 нм (a) и 1.5/3 нм (b) при различных температурах отжига

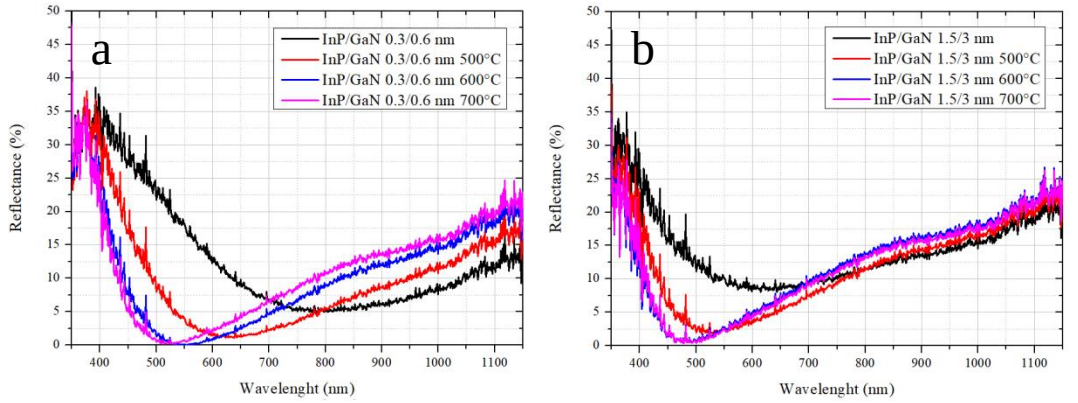


Рис. 2. Влияние отжига на отражение сверхрешёток InP/GaN с толщинами слоёв 0.3/0.6 нм (a) и 1.5/3 нм (b) при различных температурах

Спектры отражения InP/GaN сверхрешёток представлены на рисунке 2. Из зависимостей рисунка 2 видно, что с увеличением температуры отжига происходит сдвиг минимумов отражения в более коротковолновую область видимого спектра, а также, что в целом с увеличением температуры отжига отражение образцов падает в видимой области длин волн для обеих сверхрешёток. При этом в ИК-области спектра отражение незначительно возрастает.

Заключение

Отжиг сверхрешёток InP/GaN на кремнии на 500–700 °C в целом приводит к кристаллизации слоя InP и снижению отражения в видимой области. С ростом температуры отражение смещается в коротковолновую область, а в ИК-диапазоне незначительно возрастает. В работе планируется также представить исследования зависимости электрических и фотоэлектрических свойств структур от температуры отжига.

Благодарности

Работа проведена при поддержке за счёт гранта Российского научного фонда № 24-19-00150, https://rscf.ru/project/24-19-00150

Список литературы

[1] Plasma deposition of GaN/InP multilayer structures on Si / Alexander Gudovskikh, Alexander Uvarov, Artem Baranov et al. // J. Vac. Sci. Technol. A, 44, 023007, 2026, DOI: 10.1116/6.0005036

[2] Исследование квантовых ям InP/GaP, полученных методом газофазной эпитаксии / А. И. Баранов, А. В. Уваров, А. А. Максимова и др. // Письма в ЖТФ. 2023, том 49, №6. С. 16–20. DOI: 10.21883/PJTF.2023.06.54810.19404

Влияние морфологии наночастиц золота на SERS-усиление сформированных сухой аэрозольной печатью плазмонных структур

М.Ю. Алешина [1]✉, Д.В. Корнюшин[1], А.Г. Мусаев[1], А.Ф. Санатулина[1], А.А. Лизунова[1], Д.А. Лабутов[1]

[1] 1 Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

✉aleshina.miu@phystech.edu

Аннотация. В работе исследованы морфология, оптические и спектроскопические свойства наночастиц золота, синтезированных методом газофазного разряда и нанесенных на подложку методом сухой аэрозольной печати. Проведено сравнение исходных наночастиц и частиц, модифицированных термической обработкой и импульсным лазерным излучением. Показано влияние оптимизации на размер, морфологию и плазмонные характеристики частиц золота.

Ключевые слова: SERS, сухая аэрозольная печать, наночастицы, ПЭМ, золото.

Введение

Наночастицы (НЧ) золота Au представляют особый интерес благодаря уникальным оптическим свойствам, обусловленным локализованным поверхностным плазмонным резонансом, параметры которого зависят от размера, формы и степени агрегации частиц [1]. Эти свойства определяют возможность их применения в SERS при электромагнитном механизме усиления [2], причем контроль морфологии наночастиц является ключевым фактором. В данной работе исследуется влияние термической и лазерной обработки на свойства НЧ золота, синтезированных методом газофазного разряда при нанесении на подложку методом сухой аэрозольной печати [3].

Материалы и методы

НЧ золота синтезировались в импульсно-периодическом газовом разряде в потоке 50 мл/мин аргона с химической чистотой 4,8 при избыточном давлении 1,0 атмм методом электрической эрозии. Для синтеза использовались цилиндрические Au-электроды с чистотой 99,9999%. Полученные наночастицы транспортировались по газовому тракту и подвергались in-situ обработке: термической в трубчатой печи (750°C) и воздействию импульсного лазерного излучения (1064 нм, 26 мВт). Далее НЧ Au наносились на подложки методом сухой аэрозольной печати.

Морфология наночастиц исследовалась с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Jeol JEM 2100 (200 кВ). Для исследования спектров плазмонных наноструктур использовались спектрофотометр JASCO V–770 и рамановский спектрометр Thermo Scientific™ DXR (532 нм, 5 мВт). Для оценки усиления сигнала SERS был выбран метиленовый синий в концентрации 10^{-4} моль/л.

1. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показано, что на всех спектрах в интервале 520 – 540 нм наблюдается выраженная область оптического поглощения, при этом для первичных НЧ характерна широкая полоса с пиком на 525 нм, а для оптимизированных – ее сужение и смещение в длинноволновую область.

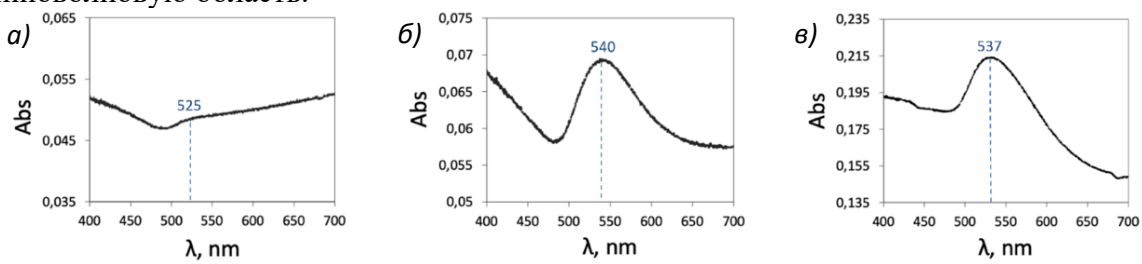


Рис. 1. Спектры поглощения образцов Au: а) первичные; б) 750°C в печи; в) после лазера.

Согласно ПЭМ-снимкам, первичные НЧ Au (рис. 2 (а)) образуют агрегаты из неправильных гранул размером 9–16 нм. Оптимизированные НЧ Au имеют квазисферическую форму: после печи их средний размер составляет 110 ± 27,7 нм (рис. 2 (б)), после лазера – 60 ± 11,3 нм (рис. 2 (в)). ПЭМ высокого разрешения (рис. 2 (г–е)) и дифракция электронов (вставки рис. 2 (а–в)) подтверждают кристаллическую структуру частиц с межплоскостными расстояниями 2,35 Å, 2,04 Å, 1,44 Å, 1,23 Å и 1,18 Å, соответствующими плоскостям (111), (200), (220), (311) и (222) золота.

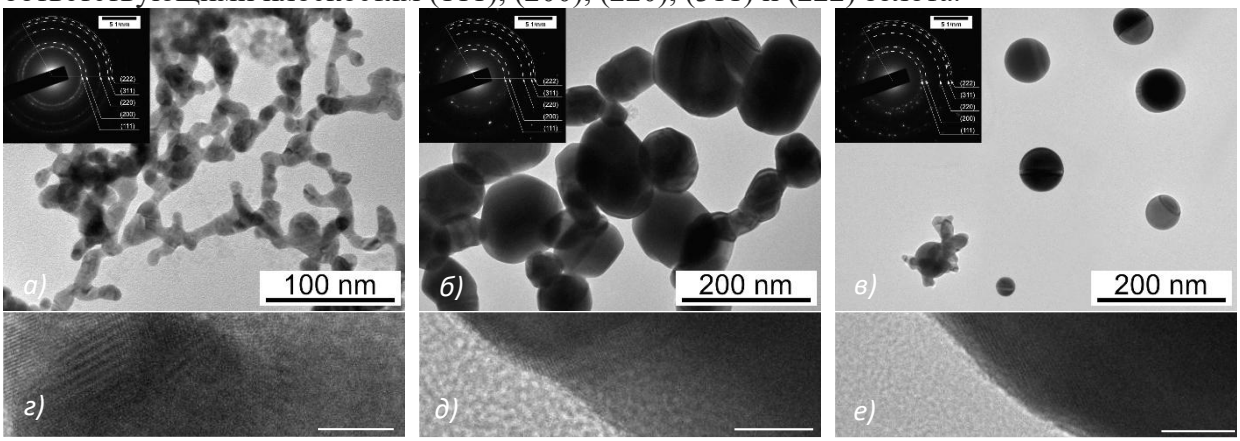


Рис. 2. ПЭМ изображения полученных НЧ Au: а) первичные; б) оптимизированные в печи; в) после лазера; г) – е) HRTEM соответствующих НЧ. Вставка а) – в) SAED.

Исследование комбинационного рассеяния (рис. 3) показало, что все типы НЧ обеспечивают усиление сигнала метиленового синего, однако наибольшее усиление наблюдается для НЧ золота, оптимизированных импульсным лазерным излучением.

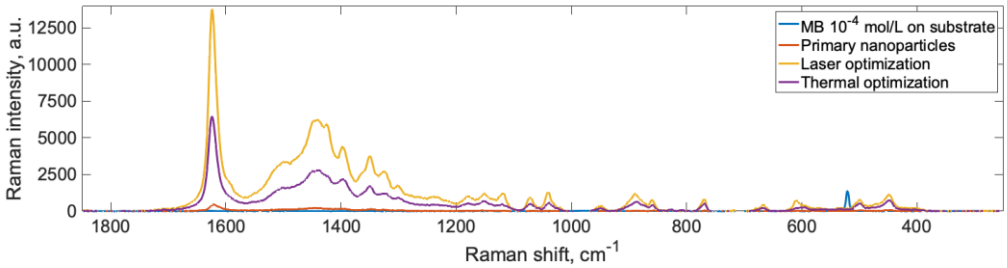


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния.

Заключение

В работе показано, что методы постобработки существенно влияют на морфологию и размер наночастиц золота. Установлено, что термическая и лазерная обработка приводят к модифицакии НЧ и изменению их оптических характеристик. Продемонстрировано, что эффективность SERS-усиления определяется морфологией наноструктур, при этом наибольшее усиление достигается для лазерно-оптимизированных частиц.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00311-П, https://rscf.ru/project/22-19-00311/

Список литературы

[1] Á.I. López-Lorente, Recent developments on gold nanostructures for surface enhanced Raman spectroscopy: Particle shape, substrates and analytical applications. A review. Analytica Chimica Acta 1168, 338474 (2021).

[2] J. Karlo, S.S. Razi, M.S. Phaneeswar, A. Vijay, S.P. Singh, Metallic nanoparticles for surface-enhanced Raman scattering based biosensing applications. Photochem 4(4), 417–433 (2024).

[3] V. Ivanov, V.I. Borisov, M.S. Ivanov, D.V. Kornyushin, V.A. Voroshilova, V.A. Dolgov, M.N. Urazov, P.Y. Peretyagin, S.N. Paranin, Dry aerosol printer and its application possibilities in advanced microelectronics. Printed and flexible electronics, 83–84 (2025)

Исследование влияния функционализации на оптические свойства борных квантовых точек

Е. А. Сидоров ✉, **Е. Д. Грибова**
Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия
✉siea.18@uni-dubna.ru

Аннотация. Борсодержащие квантовые точки представляют интерес для использования в областях фотовольтаики, сенсорики и медицины ввиду уникальных физико-химических свойств и возможности модификации поверхности. Однако полосы их флуоресценции лежат в синей и сине-зеленой области спектра, что ограничивает применение в области биовизуализации. В данной работе исследовано влияние функционализации поверхности борных квантовых точек различными органическими лигандами (мочевина, тиомочевина, орто- и пара-фенилендиамин) на положение полос возбуждения и испускания флуоресценции. Показано, что функционализация борных квантовых точек фенилендиамином приводит к длинноволновому сдвигу флуоресценции в область 588 нм.

Ключевые слова: Квантовые точки, борсодержащие наночастицы, флуоресценция

Введение

Борсодержащие квантовые точки являются относительно новым классом наноматериалов, вызывающим интерес ввиду многочисленных потенциальных областей применения, среди которых фотовольтаика, сенсорика и медицина [1]. Настраиваемые оптические свойства борсодержащих квантовых точек, а также возможность модификации поверхности обуславливает перспективность их использования для визуализации и терапии раковых заболеваний, в частности – методом бор-нейтронозахватной терапии, в которой они потенциально могут применятся в качестве тераностических агентов.

Полосы испускания и возбуждения флуоресценции борсодержащих квантовых точек находятся в синей и сине-зеленой области спектра [2], что ограничивает их применение в биоимиджинге. Одним из подходов к контролированию оптических свойств борсодержащих квантовых точек является функционализация их поверхности органическими лигандами. Несмотря на это, влияние поверхностных лигандов на оптические свойства борсодержащих квантовых точек остается не исследованным в полной мере.

Материалы и методы

Бор кристаллический, размер 0.5 – 2 мкм (99.9 %, Macklin, Китай); Мочевина (ч.д.а., ЛенРеактив, Россия); о-Фенилендиамин, *о*-ФДА (99.5 %, Sigma-Aldrich, США); п-Фенилендиамин, *п*-ФДА (98 %, CDH, Индия); Тиомочевина (≥ 99.0 %, Sigma-Aldrich, США); N,N-диметилформамид, ДМФА (х.ч., Aldosa, Россия); Спектрофотометр UNICO 2804, спектральный диапазоне от 190 до 1100 нм (UNICO, США); Спектрофлуориметр СМ2203, спектральный диапазон от 200 до 820 нм (Solar, Беларусь).

Результаты и обсуждение

Борные квантовые точки (БКТ) были синтезированы «сверху-вниз» путем последовательной ультразвуковой и сольвотермальной обработки дисперсии порошка кристаллического бора в диметилформамиде. Функционализация БКТ органическими лигандами проводилась *in situ* во время синтеза. В качестве лигандов были выбраны мочевина, тиомочевина, *п*-фенилендиамин (*п*-ФДА) и *о*-фенилендиамин (*о*-ФДА). Проекции спектров испускания флуоресценции, зарегистрированных при различной длине волны возбуждающего излучения, представлены на рисунке 1.

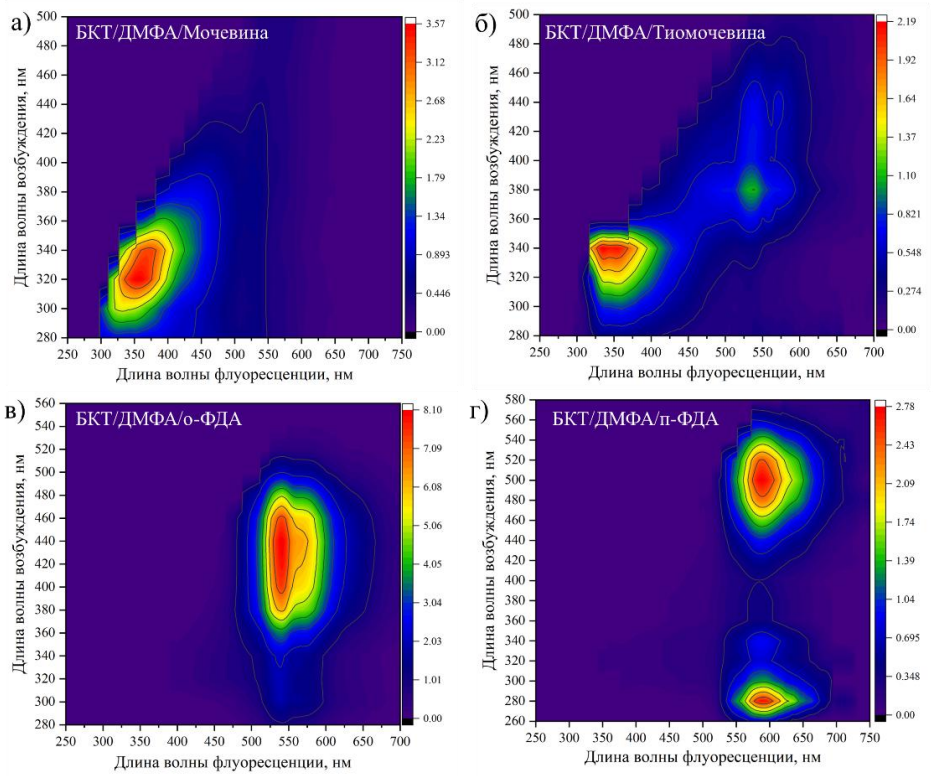


Рис. 1. Проекции спектров флуоресценции борных квантовых точек, синтезированных в диметилформамиде и функционализированных различными лигандами: а) мочевиной, б) тиомочевиной, в) *о*-фенилендиамином, г) *п*-фенилендиамином

При функционализации БКТ мочевиной и тиомочевиной наблюдается коротковолновый сдвиг флуоресценции, который может быть связан с совместным влиянием размера, различными дефектами и функциональными группами на поверхности БКТ. Функционализация *о*-ФДА и *п*-ФДА приводит к длинноволновому сдвигу полос возбуждения/испускания флуоресценции (440/540 и 500/588 нм соответственно). Можно предположить, что присоединение ФДА к поверхности БКТ приводит к расширению области делокализации π-электронов в результате образования сопряженной π-системы, поскольку ФДА в условиях проведения функционализации БКТ склонен к поликонденсации и может присоединятся к поверхности в виде олигомеров.

Заключение

БКТ были синтезированы «сверху-вниз» из порошка кристаллического бора. Показано, что путем функционализации органическими лигандами возможно контролировать положение полос возбуждения и испускания флуоресценции БКТ. Характер и величина спектрального сдвига определяется химической природой лиганда.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124110600041-0 Конъюгаты борсодержащих квантовых точек с биовекторами для диагностики и бор-нейтронозахватной терапии поверхностных злокачественных опухолей).

Список литературы

[1] E. A. Sidorov, I. O. Simonenko, N. M. Chtchelkatchev, E. D. Gribova, I. N. Fadeykina, P. P. Gladyshev, R. G. Nazmitdinov. Absorption properties of boron nitride quantum dots: effects of solvents. Physical Chemistry Chemical Physics. **27**(37) 20226-20236 (2025).

[2] C. Hazarika, P. Borah, R. Duarah, M. R. Das. Next-generation borophene nanostructures for dual-domain sensing: from structural optimisation to biomedical and environmental applications. Materials Horizons. 13, 1649-1677 (2026).

Стабилизация условий формирования капельных наноструктур In/GaAs путем предварительного осаждения металлического Ga

Д. Д. Духан[1]✉, Е. Н. Волошина[2], Д. А. Гуськов[1], С. В. Балакирев[1], М. С. Солодовник[1]
[1] Южный федеральный университет, 347922 Таганрог, Россия
[2]Институт Руджера Бошковича, 10000 Загреб, Хорватия
✉duhan@sfedu.ru

Аннотация. В работе предложен и экспериментально апробирован способ стабилизации формирования капельных наноструктур In/GaAs в условиях повышенного фонового давления As за счет предварительного осаждения металлического Ga. Показано, что избыток Ga связывает As, снижает поверхностную подвижность адатомов In, уменьшает размер и увеличивает плотность капельных структур, а также обеспечивает их устойчивое формирование при толщине осаждения In вплоть до 1,5 МС.

Ключевые слова: GaAs, In, капельная эпитаксия, теория функционала плотности

Введение

Гетероструктуры с квантовыми точками низкой плотности сегодня являются одной из основных технологических платформ для создания источников неклассического излучения. Среди существующих подходов, обеспечивающих получение эпитаксиальных квантовых точек с плотностью менее 1×10^{8} $см^{-2}$, что обусловлено требованием минимизации количества точечных излучателей в активной области источника излучения, особый интерес представляет технология капельной эпитаксии. Благодаря разделению подачи на поверхность ростовых компонент данный способ позволяет относительно просто и, в первом приближении, независимо управлять плотностью и размером структур [1], а также обеспечивает возможность получения квантовых точек в ненапряженных системах, что недостижимо при использовании традиционных подходов, основанных на механизме Странского-Крастанова. Однако широкое использование данного метода во многом ограничивается его высокой чувствительностью (особенно в системах с высокой подвижностью адатомов) к условиям на поверхности, в т.ч. фоновому давлению компоненты V группы [2]. В данной работе предложен оригинальный способ стабилизации условий формирования капельных наноструктур In/GaAs, основанный на предварительном осаждении металлического Ga, нивелирующего негативное воздействие избытка As путем его связывания.

Материалы и методы

Для экспериментальной апробации предлагаемого подхода проводилось осаждение 1.5 – 3.0 монослоя (МС) In на поверхность подложки GaAs(001) с предварительно выращенным буферным слоем GaAs при температуре 300°C без и с предварительным осаждением 3.0 МС Ga при температуре 300°C и 400°C. Фоновое давление As при этом составляло 5×10^{-7} Па, что существенно превышает допустимое для капельной эпитаксии значение $(1,5 – 2)\times10^{-7}$ Па.

Расчеты энергии связи между атомами были выполнены на основе теории функционала плотности с использованием вычислительного пакета VASP. Выбранные электронные потенциалы описывались методом проекционных плоских волн (PAW), а в качестве приближения для обменно-корреляционного функционала использовалась модель Пёрдью—Бёрка—Эрнцерхофа (PBE), основанная на методе обобщённого градиентного приближения (GGA). Все псевдопотенциалы, где это применимо, включали в себя p-орбитали.

Значения энергии связи между парами атомов были получены по формуле:

$$E_{связиАБ} = E_{АБ} - E_{А} - E_{Б} \quad (1)$$

где $E_{АБ}$ энергия атомов, образовавших пару, $E_{А}$ и $E_{Б}$ – собственные энергии атомов.

Результаты и обсуждение

По результатам эксперимента (Рис. 1) можно видеть, что наличие на поверхности избытка металлического Ga приводит к значительному уменьшению поверхностной подвижности адатомов In и, как следствие, к уменьшению размера и росту плотности капельных структур (Рис. 1А против 1Б и В). Важно отметить, что в присутствии избытка Ga на поверхности капельные наноструктуры In устойчиво формируются при снижении толщины осаждения до 1,5 МС, что в условиях избыточного фонового потока As невозможно на As-стабилизированных поверхностях. При этом размер и плотность капельных наноструктур In коррелирует с количеством несвязанного Ga на поверхности.

В дополнение к этим кинетическим соображениям мы рассмотрели разницу в химической активности при адсорбции In на смачивающий слой состоящий из Ga или In. Расчеты показывают, что наименее активно адатомы In связываются с In (энергия связи = -1,7 эВ), что означает, что их подвижность на смачивающем слое In будет больше чем на Ga, с которым In образует более сильную связь (Ec = -2,04 эВ). Данные результаты дают дополнительное обоснование эффекту, наблюдаемому в эксперименте.

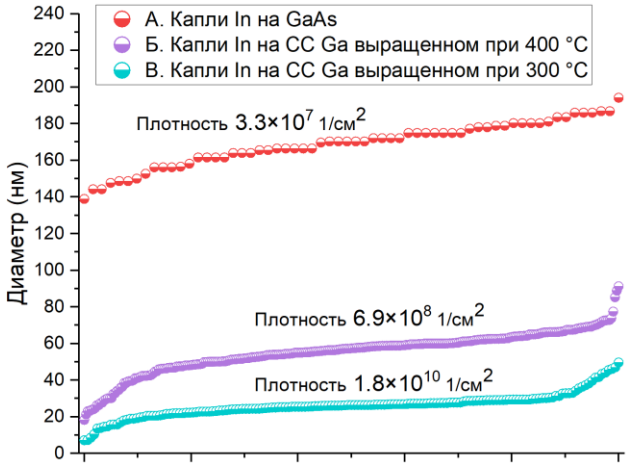


Рис. 1. Диаметры капель индия, отсортированные по размеру. А. На чистой подложке GaAs, Б. На смачивающем слое Ga выращенном при 400°C, В. На смачивающем слое Ga выращенном при 300°C

Заключение

В данной работе предложен оригинальный способ стабилизации условий формирования капельных наноструктур In/GaAs, основанный на предварительном осаждении металлического Ga и охарактеризовали его влияние на итоговую плотность наноструктур.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, грант № FENW-2025-0004 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Передовые технологии микро- и оптоэлектроники» Южного федерального университета

Список литературы

[1] S.V. Balakirev, N.E. Chernenko, M.M. Eremenko, O.A. Ageev, M.S. Solodovnik, Independent Control Over Size and Surface Density of Droplet Epitaxial Nanostructures Using Ultra-Low Arsenic Fluxes, Nanomaterials 11 (2021) 1184. https://doi.org/10.3390/nano11051184.

[2] I.A. Mikhaylin, S.V. Balakirev, M.M. Eremenko, N.E. Chernenko, M.S. Solodovnik, Arsenic background pressure effect on In droplet morphology, J. Phys.: Conf. Ser. 1410 (2019) 012051. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012051.

Исследование полупроводниковых и пьезоэлектрических свойств широкозонных полупроводников SiC и AlN, полученных методом магнетронного распыления

Д. В. Агафонов [1✉], С. А. Гурин [2], Е. А. Печерская [2], М. Д. Новичков [2], А. Э. Шепелева [2]

[1] Joint-stock company "Scientific Research Institute of Electronic-Mechanical Devices", Penza, Russia;

[2] Federal State Budgetary Educational Institution "Penza State University", Penza, Russia

✉e-mail@mail.com

Аннотация. Представлены результаты исследования полупроводниковых и пьезоэлектрических свойств широкозонных полупроводников — SiC и AlN, полученных методом магнетронного распыления. Предложена новая топология и комбинация слоев, позволяющая слою нитрида алюминия приобретать пьезоэлектрические свойства без проведения отдельной стадии высокотемпературной поляризации. Показано, что предложенный подход исключает необходимость использования специального печного оборудования и сложной оснастки, что существенно упрощает технологический маршрут и снижает себестоимость изготовления датчиков давления. Полученные результаты открывают перспективы для широкого внедрения нитрида алюминия в микроэлектромеханические системы (МЭМС) и датчиковую электронику.

Ключевые слова: тонкие пленки, широкозонный полупроводник, нитрид алюминия, карбид кремния, магнетронное распыление.

Введение

В настоящее время нитрид алюминия находит ограниченное применение в электронике, преимущественно в устройствах на поверхностных акустических волнах (ПАВ), тогда как его потенциал для создания пьезоэлектрических датчиков давления остается востребованным лишь в незначительной степени. Ключевая проблема создания тонкопленочных пьезоэлектрических датчиков давления конденсаторного типа заключается в необходимости принудительной ориентации диполей: для возникновения заряда векторы дипольных моментов должны быть направлены противоположно к обкладкам – к положительно и отрицательно заряженным электродам. Традиционно это достигается методом температурной полевой поляризации, требующим одновременного приложения высокого напряжения и нагрева, что влечет использование специального печного оборудования и сложной дорогостоящей оснастки. В качестве решения предлагается новая топология и комбинация слоев на основе широкозонных полупроводников – SiC и AlN [1]. Благодаря этому, слой AlN приобретает пьезоэлектрические свойства без необходимости применения отдельного высокотемпературного оборудования для поляризации [2].

Материалы и методы

Изготовление образцов включало 5 последовательных этапов: очистку диэлектрической подложки, формирование меандровых нагревателей, нанесение теплопередающего пассивирующего слоя поликристаллического SiC, формирование встречно-штырьевых электродов, а также осаждение и структурирование пленок AlN. В качестве материала подложки выступал ситалл марки Ст 50-1-1, который предварительно очищали в перекисно-аммиачном растворе (SC-1) с объемным соотношением H_2O_2 : NH_4OH : H_2O = 1 : 1 : 3 при температуре 75 °C в течение 10 мин. На фронтальную сторону методом термического вакуумного напыления наносили меандровые нагреватели из Pt толщиной 0,2–0,3 мкм с последующей фотолитографией. Затем методом низкотемпературного магнетронного распыления осаждали теплопередающий пассивирующий слой поликристаллического SiC толщиной 1,5–2 мкм. Далее формировали встречно-штырьевые электроды из металлов платиновой группы. Пленку легированного нитрида алюминия (AlScN) наносили методом реактивного ВЧ-магнетронного распыления составной мишени $Al_{0,7}Sc_{0,3}$ (30 ат.% Sc) в смеси Ar/N_2 с содержанием азота 20–50% при рабочем давлении 0,4–0,8 Па, мощности 250–350 Вт,

частоте 13,56 МГц и расстоянии мишень–подложка 50–70 мм. Базовое давление составляло $1 \cdot 10^{-5}$ Па, температура подложки – 400 °C. Схема этапов синтеза представлена на рисунке 1.

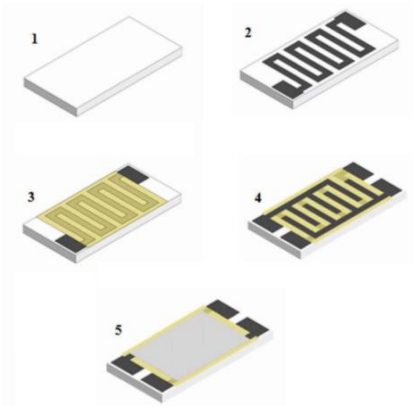


Рис.1. Схема синтеза экспериментальных образцов

К контактным площадкам нагревательного элемента подключали источник постоянного напряжения (10 В), обеспечивающий нагрев подложки до 500 °C. Одновременно к контактам встречно-штыревых электродов, образующих конденсаторную структуру, подавали постоянное напряжение для поляризации пленки легированного нитрида алюминия, где напряжение поляризации составляло не менее 60 В при толщине пленки порядка 200 нм. В результате ориентирования дипольных моментов в объеме пленки последняя приобретала пьезоэлектрические свойства.

Результаты и обсуждение

В результате поляризации пленок легированного нитрида алюминия (AlScN) подачей постоянного напряжения на встречно-штыревые электроды произошла ориентация дипольных моментов, и пленки приобрели пьезоэлектрические свойства. Установлено, что коэрцитивное поле составило 3–3,5 МВ/см, остаточная поляризация — 80–120 мкКл/см², а пьезокоэффициент $d_{33,f}$ – 11–12 пм/В. Полученные характеристики соответствуют типичным значениям для AlScN с концентрацией скандия около 30 ат.% и значительно превосходят показатели нелегированного AlN (d_{33} = 4–6 пКл/Н). Кроме того, пленки сохраняют пьезоэлектрические свойства при температурах до 600 °C и выше, что обеспечивает их высокую термическую стабильность.

Заключение

Предложена новая топология и комбинация слоев SiC и AlScN, позволяющая проводить поляризацию пленки непосредственно в структуре без отдельной высокотемпературной стадии. Подачей напряжения 60 В сформированы пьезоэлектрические свойства AlScN ($d_{33,f}$ = 11–12 пм/В, Pr = 80–120 мкКл/см²). Метод упрощает технологию и снижает себестоимость датчиков давления, открывая перспективы для применения AlN в МЭМС.

Список литературы

[1] Zywitzki O., Modes T., Barth S., Bartzsch H., Frach P. *Effect of scandium content on structure and piezoelectric properties of AlScN films deposited by reactive pulse magnetron sputtering* // Surface and Coatings Technology. — 2017. — Vol. 309. — P. 417–422.

[2] Popov M., et al. *Aluminum Scandium Nitride as a Functional Material at 1000 °C* // Advanced Electronic Materials. — 2025. — Vol. 11, Iss. 5. — Art. No. 2300785.

Исследование влияния температуры роста на селективность и оптические свойства ННК GaAs на ФИП модифицированных подложках Si(111)

А. Д. Кугаевский [1]✉, Н. А. Шандыба [1], М. М. Ерёменко [1], И. С. Махов [2], Д. Д. Духан [1], Н. Е. Солодовник [1], Д. В. Кириченко [1], Н. В. Крыжановская [2], С. В. Балакирев [1], М. С. Солодовник [1]

[1] ЮФУ, г. Таганрог, Россия

[2] НИУ ВШЭ, г. Санкт-Петербург, Россия

✉kugaevskii@sfedu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния температуры роста на селективность формирования локализованных массивов нитевидных нанокристаллов GaAs в областях, модифицированных ионным пучком на Si(111). Показано, что повышение температуры роста способствует увеличению селективности формирования массивов и возрастанию фотолюминесценции. Оптимизация параметров роста позволяет получать оптически активные массивы нитевидных нанокристаллов при крайне высоких температурах (800°C) и практически полном подавлении паразитного роста вне области модификации.

Ключевые слова: кремний, фокусированный ионный пучок, молекулярно-лучевая эпитаксия, нитевидные нанокристаллы, фотолюминесценция.

Введение

Нитевидные нанокристаллы (ННК) A^3B^5 представляют значительный интерес в качестве активных элементов интегральной кремниевой фотоники и оптоэлектроники. В наших предыдущих работах [1,2] мы экспериментально продемонстрировали, что предварительная обработка фокусированным ионным пучком (ФИП) Ga поверхности Si(111) с естественным оксидом позволяет воспроизводимо формировать локализованные массивы ННК GaAs с различными характеристиками. Однако, для создания функциональных устройств на их основе, помимо позиционирования массивов, необходимо также обеспечивать подавление паразитного роста наноструктур вне области обработки. С этой целью в рамках данной работы экспериментально исследовалось влияние температуры роста на процессы селективного формирования локализованных массивов ННК GaAs в ФИП модифицированных областях на подложке Si(111), а также на их оптические свойства.

Результаты и обсуждения

На основе анализа СЭМ-изображений массивов ННК, сформированных при различных температурах роста, установлено, что при повышении температуры с 680 до 800°C происходит постепенное уменьшение паразитного роста наноструктур вне области ФИП-обработки. При этом сохранение роста ННК в обработанной области и высокая селективность наблюдаются только при 750°C; при 800°C рост подавлен как в области ФИП, так и вне её, что, по-видимому, связано с высокой скоростью десорбции атомов. Важно также отметить, что массивы ННК на всех образцах характеризуются высокой плотностью и практически 100%-ным выходом вертикально ориентированных ННК.

Исследования фотолюминесценции (ФЛ) при температуре 5K показали, что повышение температуры роста вплоть до 750°C приводит к увеличению интенсивности ФЛ на порядок. Мы связываем данный эффект с улучшением кристаллического совершенства ННК – уменьшением политипизма – благодаря стабилизации параметров каталитической капли в Ga-обогащённых условиях. Для подавления поверхностной и повышения эффективности излучательной рекомбинации на ННК, выращенных при 750°C, было проведено дополнительное осаждение пассивирующего слоя широкозонного материала AlGaAs и формирование гетероструктуры «ядро-оболочка» (рис. 1(а)). В спектрах ФЛ при этом наблюдается подавление длинноволновых пиков, характерных для поверхностных состояний.

Несмотря на подавление роста при 800°C, данный температурный режим представляет интерес с точки зрения достижения более высокой селективности. Рост ННК в области ФИП-обработки при 800°C удалось реализовать лишь при одновременном увеличении потоков As и Ga при соотношении потоков V/III = 4 (рис. 1(б)) за счет компенсации интенсивных потерь адатомов на десорбцию. Сформированные массивы ННК характеризовались более высокой селективностью по сравнению с ННК, выращенными при 750°C, и оставались оптически активными, что подтверждается результатами ФЛ (рис. 1).

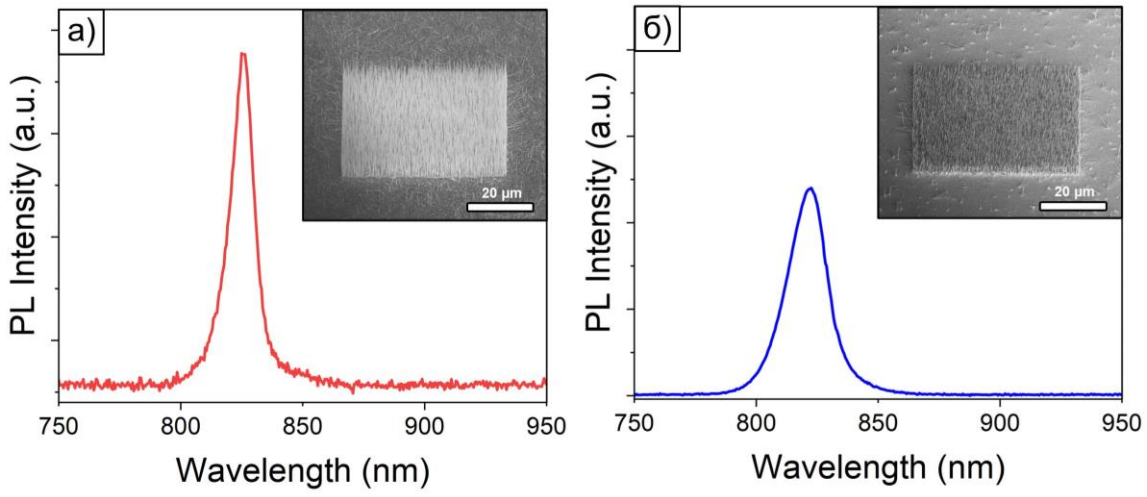


Рисунок 1 – Спектры ФЛ при 77K и СЭМ-изображения (на вставке) от массивов ННК, сформированных при температуре 750°C (а) и 800°C (б).

Заключение

Таким образом, установлено, что температура роста оказывает определяющее влияние на селективность формирования ННК GaAs на участках Si(111), модифицированных фокусированным ионным пучком. Показано, что оптимальная температура 750°C позволяет получать селективные массивы ННК, а их пассивация слоем AlGaAs существенно улучшает оптические свойства. При более высокотемпературном росте (800°C) необходима коррекция потоков для компенсации десорбции, что достигается одновременным увеличением потоков As и Ga; это позволяет формировать оптически активные ННК с более высокой селективностью.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации грант № FENW-2025-0004 и проекта "Зеркальные лаборатории" НИУ ВШЭ. Исследование проводилось на оборудовании Центра коллективного пользования «Передовые технологии микро- и оптоэлектроники» (Южный федеральный университет).

Список литературы

[1] N. Shandyba, S. Balakirev, V. Sharov, N. Chernenko, D. Kirichenko, M. Solodovnik. Int. J. Mol. Sci., **24**(1), 224 (2023).

[2] N. A. Shandyba, D. V. Kirichenko, V. A. Sharov, N. E. Chernenko, S. V. Balakirev, M. S. Solodovnik. Nanotechnology, **34**(46), 465603 (2023).

Исследование структуры монокристаллических алмазных методом поляризационной микроскопии

А. А. Харламова[1]✉, **И. О. Подойлов**

[1] Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia;

✉Kharlamova.anastasya2015@yandex.com

Аннотация. В работе рассмотрены результаты исследования кристаллической структуры монокристаллических алмазных пластин методом поляризационной спектроскопии. Исследование проводилось на партии алмазных пластин из 20 штук до и после отжига при температуре 1200 C°. Результаты работы показали высокую эффективность метода поляризационной микроскопии, были отмечены дефекты, которые наибольшим образом повлияли на качество алмазной пластины.

Ключевые слова: алмазные пластины, внутренние напряжения, анизотропия, поляризационная микроскопия.

Введение

В процессе синтеза монокристаллических алмазных пластин применяются различные способы постростовой обработки, такие как высокотемпературный отжиг и облучение для изменения кристаллической структуры и получения новых свойств. Так для производства пластины с азотно-вакансионными центрами (NV-центр) ее подвергают температурной обработке, чтобы перестроить матрицу алмаза и способствовать миграции вакансий к атомам азота [1]. Процесс такой обработки не всегда дает предсказуемый результат. Кроме того, во время роста также возникают различные дефекты, которые могут повлиять на качество алмазной пластины и стать причиной ее разрушения. Именно поэтому важно на каждом этапе синтеза и обработки алмазных пластин выявлять все возможные дефекты их кристаллической структуры. Одним из способов анализа структуры алмазной пластины является метод поляризационной микроскопии. С его помощью возможно определить степень анизотропии кристаллической структуры материала [2]. В данной работе методом поляризационной микроскопии будут изучены некоторые алмазные пластины в процессе их температурной обработки с целью изучения их структуры и оценке эффективности самого метода.

Материалы и методы

Метод поляризационной спектроскопии основан на явлении двойного лучепреломления в анизотропных средах. Алмазная пластина, обладающая нарушением целостности кристаллической структуры, наличием дефектов, внутренних напряжений обладает способностью двойного лучепреломления, при этом интенсивность пропускаемого через пластину излучения связана с величиной анизотропии. Качество алмазной пластины оценивалось наличием внутренних напряжений в ней, данный способ является распространенным и описан во многих работах [3, 4]. Внутренние напряжения в общем виде характеризуются коэффициентом анизотропии кристалла (1):

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta nL, \tag{1}$$

здесь λ - длина волны света, L - толщина образца и $\Delta n = n_1 - n_2$. Величина Δn известна как оптическая разность хода лучей. В данной работе для измерения внутренних напряжений использовался поляризационный микроскоп, работающий на основе системы Metripol [2] и собранный авторами. Микроскоп позволяет сохранить распределение внутренних напряжений на пластине в виде карты распределения коэффициента анизотропии в цветном коде, просмотреть характеристики анизотропии в каждой точке снятого изображения, получить среднее значение δ алмазной пластины.

1. Результаты и обсуждение

В данной работе оценка величины внутреннего напряжения проводится по коэффициенту анизотропии, шкала значений приведена на всех рисунках от 0 до 1. Была исследована партия 20 алмазных пластин. Измерения коэффициента проводились до и после отжига алмазных пластин при температуре 1200 C° в течение суток.

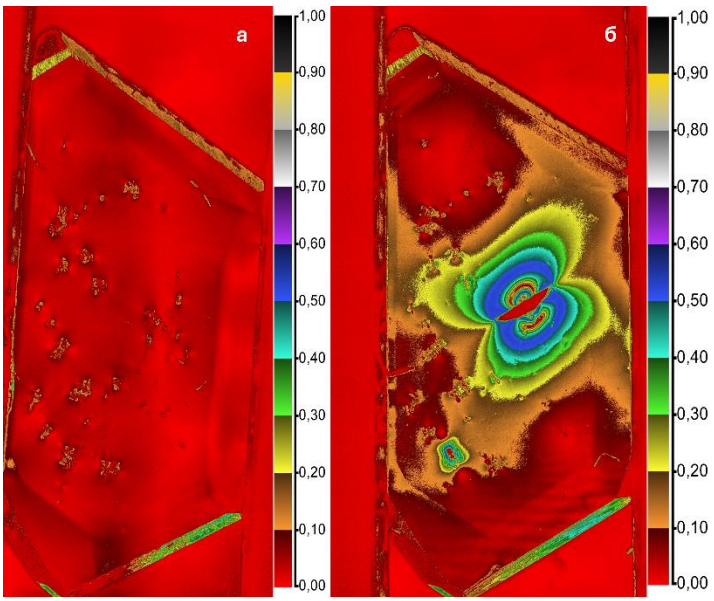


Рис. 1. Карты распределения внутренних напряжений алмазной пластины до (а) и после (б) отжига.

До отжига карта распределения внутренних напряжений показывает наличие графитовых вкраплений, полученных при росте пластины, а также небольшую субмикропустоту в центре, после отжига пластина треснула в месте субмикропустоты.

Заключение

На основании проведённого исследования можно отметить эффективность метода поляризационной микроскопии в анализе кристаллической структуры алмазных пластин. Работа показала, что внутренние напряжения могут говорить о наличии в пластине дефектов структуры, что необходимо отслеживать на каждом этапе обработки для повышения качества синтеза алмазных пластин.

Благодарности

Исследование поддержано грантом Российской Федерации FSRU-2024 -0005.

Список литературы

[1] E. Losero, et al. Creation of NV centers in diamond under 155 MeV electron irradiation, Advanced physics research, 3, (2023).

[2] A. M. Glazer, J. G. Lewis, W. Kaminsky, An Automatic Optical Imaging System for Birefringent Media, *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 452, (1955), pp. 2751-2765.

[3] D. Howell, I. G. Wood, D. Dobson, A. P. Jones, Quantifying strain birefringence halos around inclusions in diamond, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162(5), (2011) pp. 1113-1113.

[4] D. Howell, Strain-induced birefringence in natural diamond: a review, *European Journal of Mineralogy*, (24), (2012), pp. 575-585.

Исследование фазового состава ферромагнитных нанопроволок в процессе электрохимического осаждения в поры анодного окисла алюминия.

Е. А. Грушевский[1]✉, **Н. Г. Савинский**[1], **О. С. Трушин**[1], **В. В. Наумов**[1], **Р. В. Селюков**[1]

[1] Обособленное подразделение "Отдел микротехнологий" - Ярославль Федерального государственного бюджетного учреждения науки Отделения физико-технологических исследований имени К.А. Валиева Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Ярославль, Россия;

✉yaregor@mail.ru

Аннотация. Данная работа посвящена изучению влияния процесса электрохимического осаждения массивов ферромагнитных нанопроволок (НП), в поры матрицы из Al2O3 на фазовый состав НП. Образцы пористого оксида алюминия были получены методом двойного электрохимического анодирования подготовленной фольги в 0,5 М щавелевой кислоте при напряжении 60 В и температуре 25 °С и исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии. Диаметр пор составляет около 85 нм. Электроосаждение НП осуществляли в трехэлектродной ячейке на подготовленных матрицах из Al2O3 в импульсном режиме. Морфология поверхности пористых мембран и геометрия НП изучались с помощью сканирующей электронной микроскопии. Фазовый состав ферромагнитных НП изучался с методом рентгено - фазовой дифрактометрии.

Ключевые слова: анодирование, пористые матрицы из оксида алюминия, нанопроволоки, электрохимическое осаждение, рентгено-фазовый анализ.

Введение

Одним из лучших и наиболее распространенных методов обеспечения повторяемости и высокого качества получаемых наноструктур является использование шаблонов из пористого анодного оксида алюминия (ПААО) [1-3], в частности, массивов для выращивания контролируемых, самоорганизующихся, а также высокоупорядоченных структур, включая наностержни, нанопроволоки, нанотрубки, нанокомпозитные материалы со строгим соблюдением размеров изделия при плотности упаковки 10^9-10^{11} единиц/см² [4]. В последнее время большое внимание уделяется изучению магнитных наноматериалов и наноструктур с сильной анизотропией формы, перспективных для использования в наносенсорах, спинтронных устройствах и магнитной записи высокой плотности. Известно, что одним из наиболее распространенных методов получения таких нанопроволок является матричный синтез – заполнение требуемым материалом узких каналов в пористой матрице. Электрохимический метод, безусловно, является перспективным методом получения таких нанопроволок [5-6]. Состав таких наноструктур сильно зависит от условий синтеза и в значительной мере влияет на их свойства [7].

Материалы и методы

Для создания упорядоченных массивов ферромагнитных нанопроволок была разработана технология электроосаждения с использованием Пористого анодного алюминия оксида (ПААО) в качестве шаблона. Полированная алюминиевая фольга толщиной 500 мкм (99,95%) была анодирована в два этапа при постоянном потенциале 60В в термостатированной ячейке при 25°С в 0.5М растворе щавелевой кислоты. В результате анодирования формируется пористая пленка ПААО толщиной 35 мкм и с максимумом диаметров пор около 85 нм. Оставшийся слой алюминия после анодирования растворяли в растворе соляной кислоты с однохлористой медью. Барьерный слой оксида алюминия был удален в H_3PO_4 + CrO_3. На последнем этапе изготовления на шаблон ПААО был нанесен слой Ti/Ag/Cu суммарной толщиной 310 нм методом магнетронного распыления. Электрохимическое осаждение металлов в порах осуществлялось в трехэлектродной термостатируемой ячейке при постоянном перемешивании магнитной мешалкой в сульфатных электролитах. На рисунке 1а представлена морфология массивов нанопроволок полученная с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) на электронном микроскопе Supra 40.

Результаты и обсуждение

Фазовый состав ферромагнитных нанопроволок был исследован с помощью дифрактометра DRON 2. Измерения проводились в геометрии Брэгга-Брентано с использованием излучения CuKa (λ = 1,5418 Å) в диапазоне 2θ от 30 до 80 градусов. Для высвобождения нанопроволок, матрица анодного окисла растворялась в 10% NaOH. На рисунке 1б представлена дифрактограмма никелевых нанопроволок. Самый интенсивный пик никеля Ni (111) гранецентрированной кубической решетки (ГЦК) $44{,}5^0$ перекрывается с пиком серебра Ag (200) 44.3^0. Второй, менее интенсивный пик Ni (200) ГЦК так же перекрывается с пиком меди Cu (200). Кроме серебра, зафиксированы металлы напыленные на мембрану ПАОА титан Ti(100), (002), (101) и медь Cu (200). Пики этих металлов малоинтенсивные, поскольку удалены из образца во время растворения ПААО.

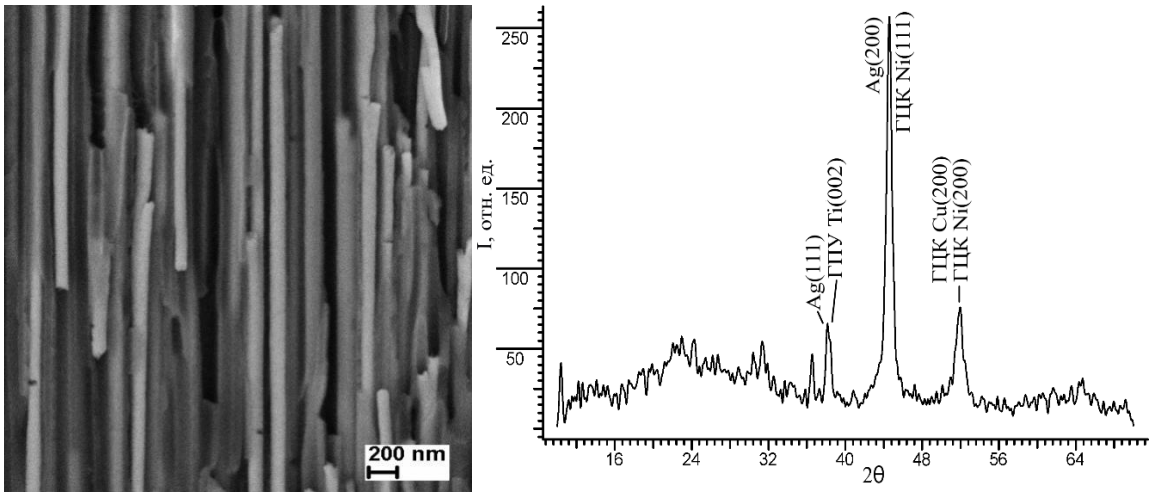


Рис. 1. (а) СЭМ изображение нанопроволок в пористой матрице, (б) дифрактограмма никелевых нанопроволок.

Заключение

В заключение, в данном исследовании синтезированы нанопроволоки никеля в матрице пористого оксида алюминия с аспектным соотношением более 50. Проведен рентгено-фазовый анализ массива нанопроволок, свидетельствующий о преимуществе ГЦК структуры в полученных наноструктурах никеля.

Благодарности

Работа проведена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт». Некоторые экспериментальные результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Диагностика микро и нано структур» при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

[1] H. Masuda, H. Yamada, M. Satoh, Appl. Phys. Lett., **71**, 2770 (1997).
[2] Е.Н. Муратова, канд. дисс., Санкт-Петербург, ЕТУ «ЛЕТИ», 2014.
[3] A.I. Vorobeva, E. A. Utkina, O. M. Komar, Russian Microelectronics, **42**, 79 (2013).
[4] Q. Hao, H. Huang, X. Fan, Nanotechnology, **28**, 105301 (2017).
[5] A. Safeer, N. Ahmad, S. Khan, L. Azam, D. Bashir, J. Appl. Phys., **125**, 034302 (2019).
[6] G. Varvaro, F. Casoli, Ultrahigh–density magnetic recording storage materials and media designs. Stanford: Pan Stanford Publishing, 2016.
[7] V. Vega, T. Böhnert, S. Martens, M. Waleczek, J. M. Montero-Moreno, D. Görlitz, V. M. Prida, K. Nielsch, Nanotechnology, **23**, 465709 (2012).

Моделирование динамики контактного угла капли и кристаллической фазы нитевидных нанокристаллов тройных соединений III-V

Е. Р. Панков[1]✉, В.Г. Дубровский[1]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, Россия
✉ e-mail: zhora.pankov.03@mail.ru

Аннотация. В работе построена теоретическая модель роста нитевидных нанокристаллов (ННК) тройных соединений III-V $A_xB_{1-x}C$. Основное внимание уделено анализу переходных процессов и изменению контактного угла капли на вершине ННК, определяющего кристаллическую фазу III-V ННК. Установлено, что динамика контактного угла капли β и скорость роста dL/dt определяется нелинейным вкладом диффузионного сбора атомов III группы, описываемые через зависимость от текущей длины ННК

Ключевые слова. Газофазная эпитаксия, угол смачивания**,** нитевидные нанокристаллы, тройные соединения III-V**.**

Метод автокаталитического роста ННК на основе соединений III-V позволяет прецизионно управлять кристаллической структурой (вюрцит - WZ или цинковая обманка - ZB) путем варьирования контактного угла капли катализатора β[1]. При этом известно, что GaAs ННК формируются в фазе WZ при промежуточных значениях β от 100º 125º [1]. В настоящей работе проведен анализ эволюции геометрии тройных ННК $A_xB_{1-x}C$ (где A, B - элементы III группы, C - элемент V группы). Динамика изменения контактного угла капли β описывается уравнением баланса массы металлов в капле с учетом их диффузионного сбора с боковой поверхности ННК:

$$\frac{R}{(1+\cos\beta)^2}\frac{d\beta}{dt} = \sum_{k=A,B} v_k\left(\sigma_k + \frac{2\lambda_k}{R}\tanh\left(\frac{L}{\lambda_k}\right)\right) - \frac{2\sigma_5 v_5}{1+\cos\beta}. \quad (1)$$

Здесь λ_k диффузионные длины на стенках ННК, а член с гиперболическим тангенсом описывает эффективность сбора адатомов. Скорость вертикального роста ННК лимитируется притоком элементов V группы

$$\frac{dL}{dt} = \Omega\frac{2\sigma_5 v_5}{1+\cos\beta}. \quad (2)$$

При достижении кристаллом длины, превышающей диффузионные длины ($L \gg \lambda_k$) уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{R}{(1+\cos\beta)^2}\frac{d\beta}{dt} = \sum_{k=A,B} v_k\left(\sigma_k + \frac{2\lambda_k}{R}\right) - \frac{2\sigma_5 v_5}{1+\cos\beta}. \quad (3)$$

Если рассматривать обратную ситуацию, при которой ($L \ll \lambda_k$), то уже используем приближение для $\tanh\left(\frac{L}{\lambda_k}\right) \approx \frac{L}{\lambda_k}$, тогда уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{R}{(1+\cos\beta)^2}\frac{d\beta}{dt} = \sum_{k=A,B} v_k\left(\sigma_k + \frac{2L}{R}\right) - \frac{2\sigma_5 v_5}{1+\cos\beta} \quad (4)$$

На Рисунке 1 и 2 представлены результаты моделирования зависимости угла β и длины L от времени для случая (4). Для всех исследованных радиусов ННК R от 20 до 50 нм наблюдается монотонное снижение угла смачивания от начального значения 127°.

Пунктирная линия на уровне 125° отмечает критическую границу: переход угла ниже этой отметки свидетельствует о возможной смене кристаллической фазы с цинковой обманки на вюрцит в процессе роста. При этом скорость роста длины L(t) остается близкой к линейной. Таким образом, варьирование радиуса R позволяет контролировать итоговую кристаллическую структуру ННК. На рисунке 3 и 4 представлена аналогичная зависимость в режиме, определяемом выражением (3).

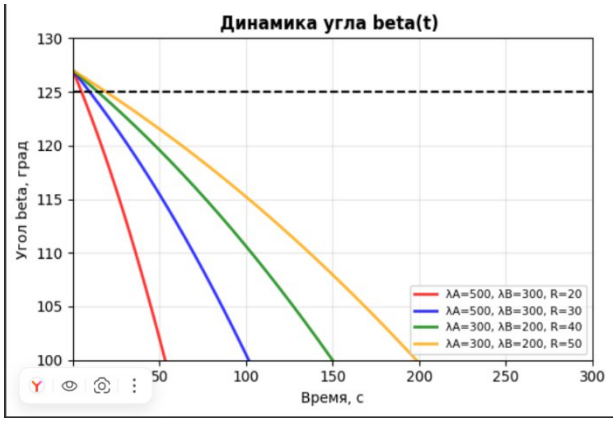


Рисунок 1. Зависимость угла смачивания от времени при различных значениях радиус R от 20 до 50 нм, а также при различных диффузионных длинах при (4).

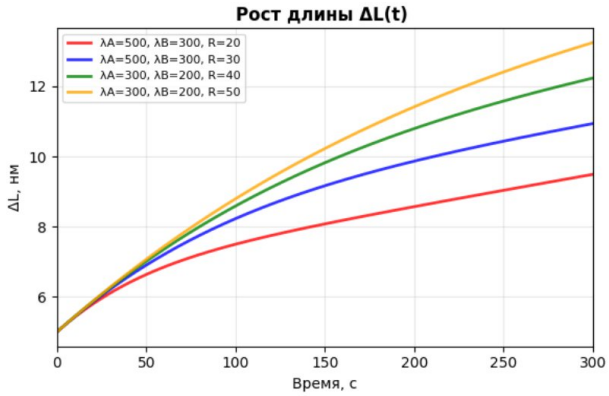


Рисунок 2. Зависимость длины от времени при различных значениях радиус R от 20 до 50 нм, а также при различных диффузионных длинах при (4).

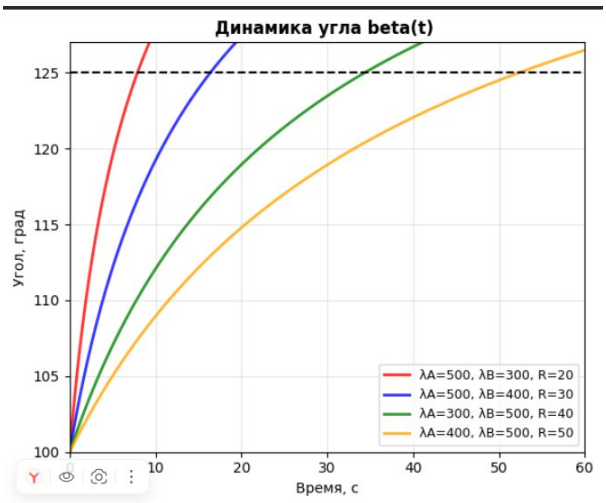


Рисунок 3. Зависимость угла смачивания от времени при различных значениях радиус R от 20 до 50 нм, а также при различных диффузионных длинах при (3).

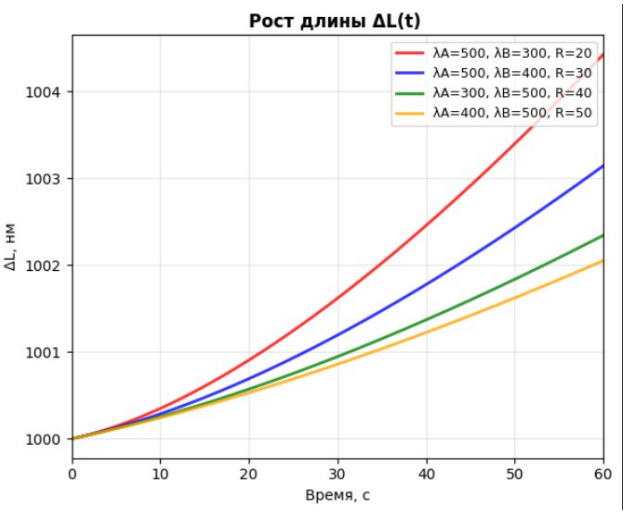


Рисунок 4. Зависимость длины от времени при различных значениях радиус R от 20 до 50 нм, а также при различных диффузионных длинах при (3).

Таким образом, построена аналитическая модель для описания временной эволюции геометрии капли и кристаллической фазы нитевидных нанокристаллов тройных соединений III-V при различных параметрах.

Список литературы:

F. Panciera, Z. Baraissov, G. Patriarche, V. G. Dubrovskii, F. Glas, L. Travers, U. Mirsaidov, J. C. Harmand. Nano Lett. 20, 1669 (2020).

Влияние пассивации массивов ННК GaAs, сформированных на ФИП-модифицированных подложках Si(111), на их оптические свойства

Н. А. Шандыба [1]✉, М. М. Ерёменко [1], И. С. Махов [2], Д. Д. Духан [1], Е. Ю. Гусев [1], Н. Е. Солодовник [1], А. Д. Кугаевский [1], Д. В. Кириченко [1], Н. В. Крыжановская [2], С. В. Балакирев [1], М. С. Солодовник [1]

[1] ЮФУ, г. Таганрог, Россия

[2] НИУ ВШЭ, г. Санкт-Петербург, Россия

✉shandyba@sfedu.ru

Аннотация. В работе показана возможность селективного формирования оптически активных массивов нитевидных нанокристаллов GaAs на Si(111), локализованных при помощи модификации подложки ионным пучком Ga. Выявлено, что оптимизация параметров гетероструктуры «ядро-оболочка» позволяет достичь интенсивной фотолюминесценции при комнатной температуре. Дополнительная пассивация поверхности наноструктур слоем SiO_2 увеличивает интенсивность фотолюминесценции, однако это приводит к изменению формы спектра вследствие напряжений.

Ключевые слова: Кремний, нитевидные нанокристаллы, A^3B^5, гетероструктуры.

Введение

Нитевидные нанокристаллы (ННК) A^3B^5 на кремнии рассматриваются как перспективный материал для интегральной фотоники благодаря возможности формирования бездислокационных гетероструктур (ГС). Одним из ключевых факторов, определяющих оптические характеристики устройств на их основе, являются параметры ГС типа «ядро-оболочка», позволяющей минимизировать влияние поверхностных состояний и подавлять безызлучательную рекомбинацию. В наших предыдущих работах [1,2] была продемонстрирована возможность управляемого эпитаксиального синтеза массивов ННК GaAs с различными характеристиками на Si(111), локализованных посредством предварительной обработки подложки фокусированным ионным пучком (ФИП). Однако исследования влияния ФИП обработки на оптические свойства массивов, а также оптимизация параметров гетероструктуры до настоящего времени не проводились. В данной работе представлены результаты комплексных экспериментальных исследований по оптимизации параметров ГС «ядро-оболочка» в ННК GaAs, сформированных в модифицированных областях на кремнии, с целью достижения устойчивой фотолюминесценции (ФЛ) при комнатной температуре (300K).

Результаты и обсуждение

На вставке рисунка 1а представлена схема исследуемой гетероструктуры в ННК. Влияние номинальной толщины барьерного слоя AlGaAs оценивалось путём сравнения спектров ФЛ, измеренных при температуре 5K, для образцов с толщиной оболочки 20 нм (ref sample) и 50 нм. На рисунке 1а видно, что увеличение толщины AlGaAs приводит к возрастанию интенсивности ФЛ от массива ННК на порядок. При этом форма спектра не изменяется: также наблюдается пик от ядра GaAs (819 нм) и длинноволновое плечо, соответствующее поликристаллам GaAs. Менее интенсивная ФЛ в структуре с тонкой оболочкой (20 нм) связана с тем, что носители заряда, генерируемые в ядре, могут преодолевать узкий барьер и попадать в покровный слой GaAs cap, который содержит большое количество оборванных связей, обусловливающих безызлучательную рекомбинацию. Увеличение толщины осаждённого слоя AlGaAs значительно снижает туннелирование носителей в приповерхностный слой и усиливает их пространственное ограничение, что проявляется в повышении интенсивности ФЛ.

Далее было исследовано влияние разращивания – эпитаксиального наращивания GaAs после кристаллизации капли катализатора, которое приводит к увеличению диаметра ядра. Сравнение с референсным образцом демонстрирует рост интенсивности ФЛ

практически на два порядка (рисунок 1a). Мы связываем это с увеличением объёма материала, участвующего в излучательной рекомбинации, что напрямую повышает ФЛ.

На основе полученных выше результатов были сформированы массивы ННК с оптимизированными параметрами ГС, обеспечивающими интенсивную ФЛ при комнатной температуре на длине волны, характерной для GaAs (870 нм) (рисунок 1b). Дальнейшее улучшение фотолюминесценции может быть достигнуто за счет дополнительной пассивации поверхностных состояний при помощи осаждения диэлектрического слоя, например SiO_2. Как видно из рисунка 1b, создание дополнительной оболочки в ННК приводит к увеличению интенсивности ФЛ, однако сопровождается существенным изменением формы спектра. Смещение спектра в длинноволновую область мы связываем с возникновением напряжений в ННК, вызванных разницей коэффициентов теплового расширения GaAs и SiO_2. Образование двух пиков (896 и 918 нм) вместо одного может указывать на расщепление валентной зоны в GaAs на состояния лёгких и тяжёлых дырок.

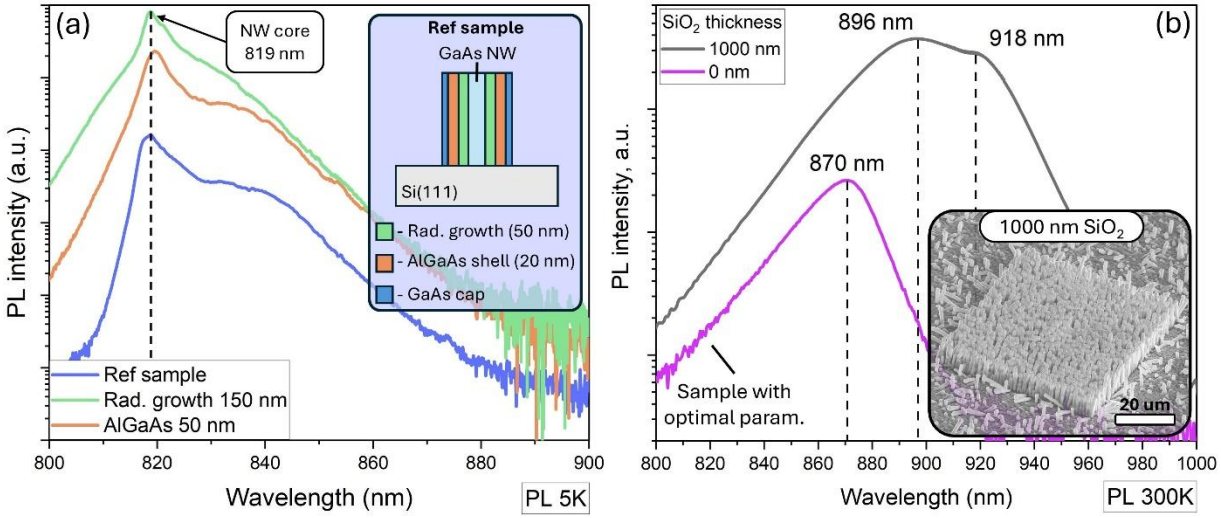


Рисунок 1 – (a) ФЛ при 5K от массива ННК, сформированного с различными параметрами ГС. (b) ФЛ при 300K от массива ННК до и после пассивации их поверхности SiO_2. На вставке (b) приведено СЭМ изображение после осаждения 1 мкм SiO_2 на ННК.

Заключение

В работе продемонстрирована возможность селективного создания оптически активных массивов ННК GaAs на Si(111), локализованных посредством обработки подложки ФИП. Показано, что оптимизация ГС позволяет достичь интенсивной ФЛ при 300K. Дополнительная пассивация поверхности ННК слоем SiO_2 приводит к усилению ФЛ, однако создаваемые при этом напряжения вызывают изменение формы спектра.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации грант № FENW-2025-0004 и проекта "Зеркальные лаборатории" НИУ ВШЭ. Исследование проводилось на оборудовании Центра коллективного пользования «Передовые технологии микро- и оптоэлектроники» (Южный федеральный университет).

Список литературы

[1] N. Shandyba, S. Balakirev, V. Sharov, N. Chernenko, D. Kirichenko, M. Solodovnik. Int. J. Mol. Sci., **24**(1), 224 (2023).

[2] N. A. Shandyba, D. V. Kirichenko, V. A. Sharov, N. E. Chernenko, S. V. Balakirev, M. S. Solodovnik. Nanotechnology, **34**(46), 465603 (2023).

Исследование механизмов локального травления GaAs в точках ФИП-модификации

Н. Е. Солодовник [1]✉, **Д. В. Кириченко** [1], **Н. А. Шандыба** [1], **М. М. Еременко** [1], **С. В. Балакирев** [1], **М. С. Солодовник** [1]

[1] Лаборатория эпитаксиальных технологий, Южный федеральный университет, Таганрог 347922, Россия

✉nchernenko@sfedu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований механизмов локального квазикапельного травления GaAs в точках модификации фокусированным ионным пучком в различных условиях. Показано значительное влияние температуры на морфологию формируемых структур. Предложены комплексные механизмы процессов, протекающие в области точечной ионной обработки и включающие капельное травление, кристаллизацию и рекристаллизацию. Определены оптимальные условия локального травления в точках модификации и минимальной деградации поверхности подложки.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, фокусированный ионный пучок, наноструктурирование, локальное капельное травление, GaAs.

Введение

Самоорганизующиеся квантовые точки (КТ) являются перспективными источниками одиночных и запутанных фотонов для квантовой обработки информации. Ключевыми требованиями к таким структурам являются контроль пространственного положения, однородность массива и геометрических параметров, определяющих их оптические свойства. Наиболее эффективный способ управления этими характеристиками — формирование КТ в предварительно созданных углублениях. Однако традиционные литографические методы вносят загрязнения, усложняя получение атомарно-чистой поверхности. Альтернативой является прямая модификация фокусированным ионным пучком (ФИП), выполняемая в вакууме без использования резистов. Основной проблемой данного подхода выступает генерация радиационных дефектов, приводящая к подавлению фотолюминесценции. Последующий отжиг позволяет частично восстановить кристаллическую структуру, однако полное устранение повреждений остаётся сложной задачей, решение которой напрямую зависит от понимания физико-химических процессов, происходящих в зонах ионного облучения при нагреве.

Результаты и обсуждение

На поверхности GaAs (001) методом ФИП с источником ионов Ga^+ были сформированы квадратные массивы точек с шагом 0.5 мкм. Затем образцы помещались в установку молекулярно-лучевой эпитаксии и отжигались при различных температурах в потоке As. Результаты экспериментальных исследований показывают, что температура отжига влияет как на геометрию предварительно сформированных углублений, так и на морфологию окружающей поверхности, на основе чего предложены механизмы локального травления GaAs в точках ионного воздействия.

При низкотемпературном отжиге (~500°C) углубления существенно не изменяются (рис. 1a), а поверхность вне области модификации остается гладкой. Напротив, при высокотемпературном отжиге (~650°C) углубления приобретают четкую огранку и увеличиваются в размерах (рис. 1c). Поверхность вокруг них остается гладкой, однако вне областей модификации наблюдается сильная деградация рельефа. Оптимальным является промежуточный режим (~600°C) (рис. 1b), где достигается баланс между формированием огранки и предотвращением значительной термической деградации. Наблюдаемые различия обусловлены физико-химическими процессами, активируемыми при разных температурах. Нами показано [1], что интенсивное термическое разложение GaAs активируется при температуре выше 530°C. При отжиге ниже этого порога (~500°C) галлий из переосажденного слоя обеспечивает локальное удаление оксида вокруг углублений, из-

за чего поверхность в дальнейшем остается гладкой. Однако этого недостаточно для того, чтобы избыток Ga в точках модификации запустил анизотропное травление по механизму, аналогичному локальному капельному травлению (ЛКТ). В результате углубления сохраняют исходную чашеобразную форму. При превышении пороговой температуры ситуация меняется. Избыточный галлий внутри углублений образует квазижидкую фазу, катализирующую разложение GaAs по механизму подобному ЛКТ. Анизотропия травления способствует формированию стабильных граней {111}, что и объясняет появление четкой огранки при высоких температурах. Вне областей модификации, где отсутствует переосажденный слой аморфного GaAs, удаление оксида происходит только за счет термического разложения подложки. При температурах значительно выше 530°C это приводит к интенсивному травлению поверхности, не успевающей восстанавливаться в потоке As_4, что объясняет наблюдаемую деградацию рельефа вне модифицированных участков. Таким образом, ключевым фактором является достижение порога выше 530°C, при котором запускается локальное квазикапельное травление GaAs без разрушительных последствий для подложки. Оптимальный режим (~600°C) обеспечивает баланс между полезным (формирование огранки и сглаживание) и паразитным (термическая деградация) травлением. Предложенный механизм подкрепляется результатами исследования образцов, с различной толщиной окисла и использованием жертвенных слоев аморфного GaAs.

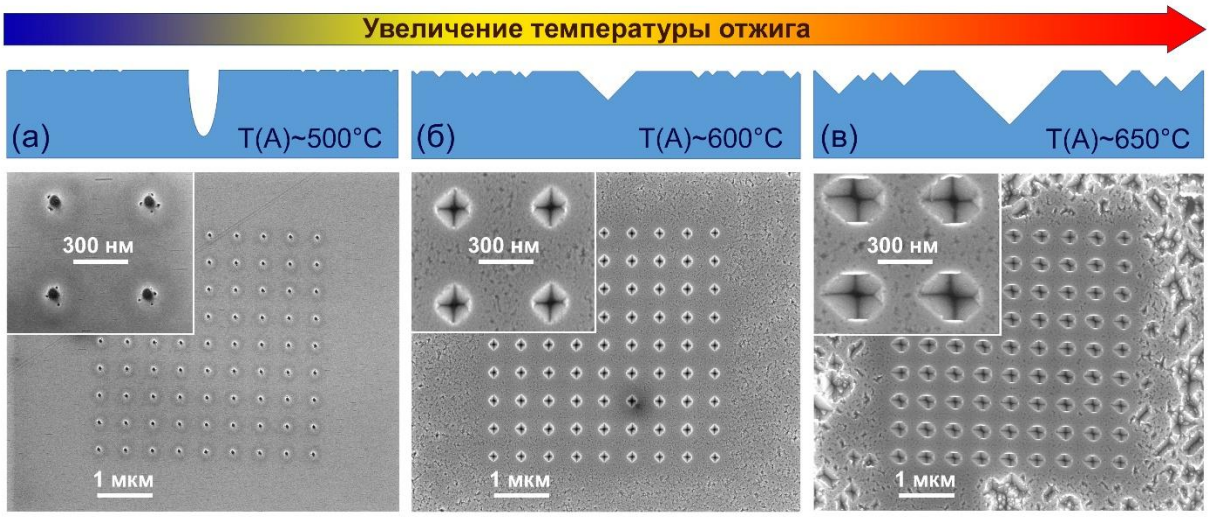


Рис. 1 – Схема влияния температуры отжига на формирование углублений в точках ФИП-модификации и эволюцию поверхности GaAs.

Заключение

Таким образом, проведены экспериментальные исследования процессов локального травления GaAs в точках ФИП-модификации с учетом различных параметров процесса. Предложены соответствующие механизмы и показано, что квазикапельное травление активируется при температурах выше 530°C. Определены оптимальные условия травления, обеспечивающие баланс между формированием кристаллографической огранки и предотвращением термической деградации немодифицированной поверхности.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, грант № FENW-2025-0004 на оборудовании Центра коллективного пользования «Передовые технологии микро- и оптоэлектроники» Южного федерального университета.

Список литературы

[1] M.S. Solodovnik, D.V. Kirichenko, D.D. Dukhan, N.E. Chernenko, I.S. Makhov, N.A. Shandyba, M.M. Eremenko, N.V. Kryzhanovskaya, S.V. Balakirev, Appl. Surf. Sci. 688 (2025) 162373.

Исследование капельной эпитаксии наноструктур Ga на структурированных подложках Si(001)

М. М. Ерёменко [1]✉, Н. А. Шандыба [1], Н. Е. Солодовник [1], Д. В. Кириченко [1], А. Д. Кугаевский [1], С. В. Балакирев [1], М. С. Солодовник [1]

[1] Лаборатория эпитаксиальных технологий, Южный федеральный университет, Таганрог 347922, Россия

✉eryomenko@sfedu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследований закономерностей роста при капельной эпитаксии (температуры и толщины осаждения) структур Ga на профилированной пирамидальными углублениями подложке Si(001). Показано, что уменьшение ростовой температуры до 650 °C приводит к снижению селективности ростового процесса и формированию высокоплотных наноразмерных капель Ga вне областей модификации. Увеличение эквивалентной толщины осаждения с 200 до 500 МС позволяет повысить процент локализации капель в центре пирамидальных углублений с 38 до 72 %.

Ключевые слова: капельная эпитаксия, кремний, фокусированные ионные пучки, жидкостное травление.

Введение

Монолитная интеграция полупроводников A3B5 на кремниевых подложках является одним из перспективных направлений развития современной интегральной фотоники. Однако прямое эпитаксиальное выращивание полупроводников A3B5 на кремнии сопряжено с рядом проблем, обусловленных значительным рассогласованием параметров кристаллических решеток и коэффициентов термического расширения. Стандартные подходы к решению данных проблем (выращивание толстых буферных слоев, рост на вицинальных подложках и др.) отличаются технологической сложностью и не позволяют полностью исключить дефектообразование [1]. Перспективной альтернативой является локальная интеграция, обеспечивающая релаксацию напряжений и снижение плотности дислокаций, однако ее реализация традиционными литографическими методами является трудоемким процессом и требует существенных экономических затрат.

В данной работе используется альтернативный подход, сочетающий локальную модификацию поверхности Si с использованием фокусированного ионного пучка и анизотропного жидкостного травления. В качестве ростовой методики была выбрана капельная эпитаксия, из-за высокого уровня контроля процессов роста за счет раздельного осаждения компонент.

Материалы и методы

В качестве подложек использовались кремниевые пластины с кристаллографической ориентацией (001), на которые был нанесен слой диоксида кремния (SiO_2) толщиной 200 нм. Локальная модификация поверхности проводилась методом фокусированных ионных пучков (ФИП) путем обработки квадратных участков с изначальными размерами 0,25 × 0,25 мкм. После модификации образцы подвергались анизотропному травлению в 25 % растворе тетраметиламмония гидроксида (ТМАН), в результате чего формировались пирамидальные углубления. Далее образцы помещались в ростовую камеру молекулярно-лучевой эпитаксии и отжигались при температуре 950°C в течение 2 часов. По завершении отжига производилось охлаждение до ростовой температуры (650, 750°C), после чего осуществлялось осаждение капель галлия (200, 500 МС). Во всех случаях скорость осаждения составляла 0,1 нм/с.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1а представлены СЭМ-изображения результатов осаждения капель Ga при температуре 750 °C с эквивалентной толщиной осаждения 200 МС на профилированной подложке кремния. Как было показано ранее, формирование капель Ga происходит не только в центре углубления, но и на углах граней пирамидальных углублений [2]. Установлено, что при данном наборе ростовых параметров доля капель, локализованных в центре углубления, составила 38 %. Паразитный рост вне областей модификации на поверхности образца практически отсутствует.

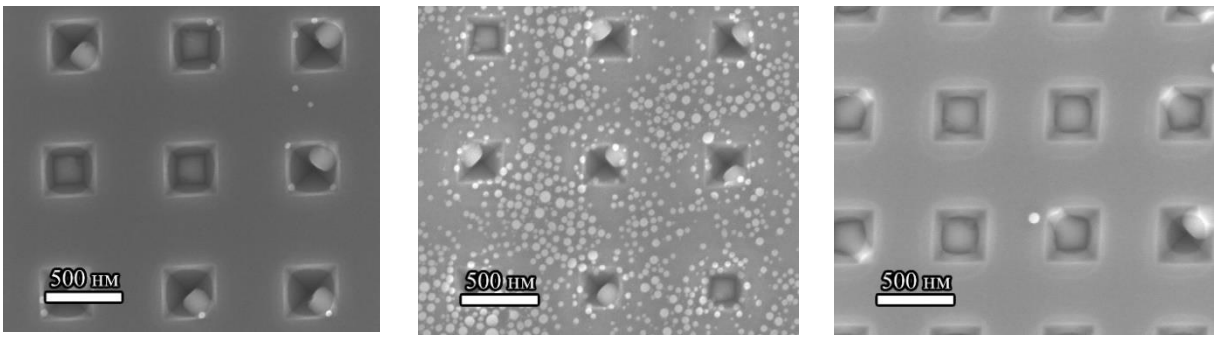


Рис. 1. СЭМ-изображения ФИП-модифицированных областей с осажденными каплями Ga при различных ростовых режимах: а) T = 750 °C и H = 200 МС, б) T = 650 °C и H = 200 МС, в) T = 750 °C и H = 500 МС.

Снижение температуры осаждения до 650 °C (рисунок 1б) привело не только к уменьшению селективности ростовых процессов и доли локализованных в центре капель (19 %), но и к образованию высокоплотных массивов капель Ga на поверхности оксида. Это объясняется тем, что при понижении температуры уменьшается диффузионная длина адатомов Ga и снижается скорость десорбции материала с поверхности. В результате капли Ga, осаждающиеся за пределами углублений, не успевают достичь углублений и зарождаются непосредственно на оксидном слое.

Увеличение эквивалентной толщины осаждения с 200 до 500 МС (рисунок 1в) привело к повышению доли капель, локализованных в центре пирамидальных углублений, с 38 до 72 %. По-видимому, при определенных геометрических параметрах углублений существует критическое значение толщины осаждаемого материала, при котором происходит переход от преимущественной нуклеации материала в углах к локализованному росту в центре углублений. Об этом свидетельствует вытянутая форма капли, ориентированная от центра к углу (рисунок 1в).

Заключение

Таким образом в работе проведено исследование закономерностей роста при капельной эпитаксии структур Ga на ФИП-модифицированных кремниевых подложках. Полученные результаты планируется использовать при подготовке образцов для второго этапа капельной эпитаксии – кристаллизации капель Ga в потоке мышьяка.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01239, https://rscf.ru/project/25-29-01239/, с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Передовые технологии микро- и оптоэлектроники» в Южном федеральном университете.

Список литературы

[1] J.-S. Park, M. Tang., S. Chen, H. Liu, Crystals, **10**, 1163 (2020).
[2] M. M. Eremenko, N. A. Shandyba, N. E. Chernenko, D. V. Kirichenko, S. V. Balakirev, M. S. Solodovnik. St. Petersbg. Polytech. Univ. J. Phys. Math., **18**(3.2), 57 (2025).

Формирование полупроводникового канала на основе IGZO с применением технологии аэрозольной печати для тонкопленочных транзисторов

В.Г. Торгунаков [1,2], Д.В. Масленников [1], И.В. Егельский [1], Д.А. Лабутов [1], А.А. Ефимов[1], А.А. Шарапов [1,2]

[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

[2]АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»

torgunakov.vg@phystech.edu

Аннотация: в работе исследован процесс формирования полупроводникового канала транзисторных структур на основе IGZO с применением технологии аэрозольной чернильной печати. Проведена характеризация структур типа «bottom-gate» с общим затвором. Металлические электроды стока-истока сформированы методом сухой аэрозольной печати из наночастиц серебра. Полученные структуры демонстрируют полевую подвижность электронов до 1 см²/(В·с) и отношение токов включения/выключения I_{ON}/I_{OFF} до 10^3.

Ключевые слова: аэрозольная печать, IGZO, полупроводник.

Введение

Среди перспективных полупроводниковых материалов выделяется оксид индия-галлия-цинка InGaZnO (IGZO) благодаря высокой подвижности носителей (более 10 см²/(В·с)) и широкой запрещённой зоне (~3,0 эВ) [1]. Тонкоплёночные транзисторы на основе IGZO успешно применяются в дисплеях и сенсорах, однако магнетронное распыление несовместимо с массовым производством на гибких подложках. В свою очередь, печатная электроника открывает путь к экономичному производству гибких устройств со сниженным расходом материала и энергозатратами по сравнению с традиционной литографией. В связи с этим возрастает интерес к формированию структур на основе IGZO аддитивными методами. Одним из таких методов является аэрозольная чернильная печать, в которой материал наносится в виде микрокапель аэродинамически сфокусированным потоком непосредственно на подложку, без использования масок [2].

Материалы и методы

В качестве основы транзисторных структур выступала подложка из кремния КДБ12(100)-675 с диэлектрическим слоем оксида кремния толщиной 100 нм. Общие электроды затвора (Au) формировались методом литографии. Затем с помощью технологий аэрозольной чернильной и сухой печати создавался общий полупроводниковый канал IGZO и массив электродов сток/исток из серебра, соответственно. Таким образом формировался массив транзисторных структур «bottom-gate» для проведения дальнейшей характеризации, схема которого представлена на рисунке 1а. На рисунке 1б представлено изображение печатных компонентов транзисторной структуры.

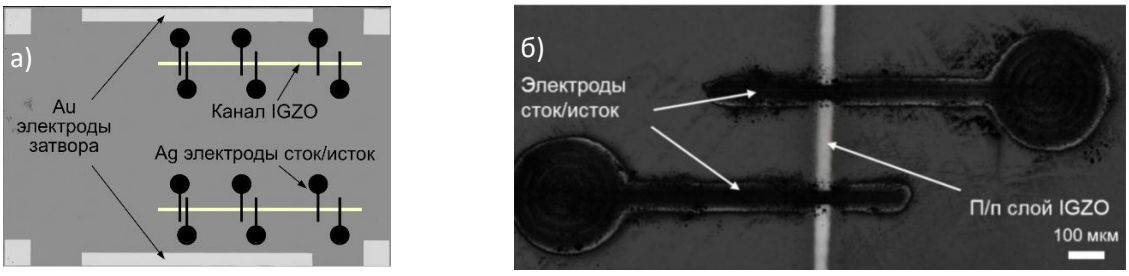


Рисунок 1 – а) Схема транзисторных структур типа «bottom-gate»; б) изображение печатных компонентов транзисторной структуры

Для формирования полупроводникового канала использовались чернила из истинного раствора нитратов индия, галлия и цинка в N,N-Диметилформамиде (DMF). Поверхностный синтез $In_{6,5}Ga_{1,5}Zn_2O_{14}$ осуществлялся путём термообработки канальной

структуры, которая приводила к разложению истинного раствора нитратов до оксида металлов.

Для обеспечения высокого качества покрытия и равномерного распределения нитратов в процессе аэрозольной печати подбирались оптимальные параметры: массовые расходы аэрозоля (Q_a), фокусирующего газа (Q_{sh}) и отводящего газа (Q_c).

Постобработка транзисторных структур проводилась путем отжига в печи в режиме медленного нагрева до 400 ºС и выдержки 1 ч при данной температуре.

Результаты и обсуждение

Переходные характеристики сформированных транзисторных структур представлены на рисунке 2.

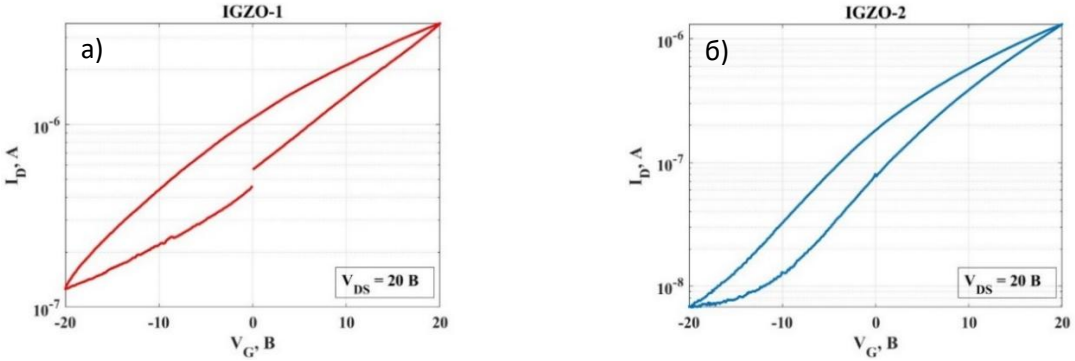


Рисунок 2 – Переходные характеристики сформированных транзисторных структур образцов: а) IGZO-1 и б) IGZO-2

Из рисунка 2 видно, что переходные характеристики структур соответствует транзистору n-типа. Средние и максимальные значения таких параметров, как отношение токов включения-выключения (I_{ON}/I_{OFF}), а также подвижности носителей заряда μ, рассчитанные по серии измерений не менее 10 транзисторных структур, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики гибридных транзисторов с полупроводниковым слоем IGZO

Образец	$Q_a/Q_c/Q_{sh}$, н. мл/мин	*d* сопла, мкм	I_{ON}/I_{OFF}		μ, см^2/(В·с)	
			макс.	средн.	макс.	средн.
IGZO-1	500/488/24	133	25	20	$4{,}4\times10^{-2}$	$3{,}9\times10^{-2}$
IGZO-2	570/483/13	115	$1{,}3\times10^{3}$	$8{,}0\times10^{2}$	1	$2{,}1\times10^{-1}$

Заключение

Таким образом, в работе подтверждается возможность формирования полупроводникового канала транзисторных структур на основе IGZO с применением технологии аэрозольной чернильной печати. Подобраны оптимальные параметры печати, позволившие достичь значений отношения токов I_{ON}/I_{OFF} – до $1{,}3\times10^{3}$, подвижности зарядов – до 1 см^2/(В·с).

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (идентификатор проекта FSMG-2025-0056).

Список литературы

[1] Kazarkin B.A. [et al.]. Thin film transistors with InGaZnO-semiconductor layer for active matrix addressing // Doklady BGUIR. 2019. V. 7(125). P. 101–106.

[2] Wilkinson N. J. et al. A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Т. 105. – №. 11. – С. 4599-4619.

Моделирование индукционного нагрева экспериментального CVD-реактора

Д. Лебедев[1], Д.А. Жигаев[1], И.А. Шишкин[2], П.Д. Тишин[2], Д.А. Шишкина[1]

[1] «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара;

[2] ООО «Бетавольтаика», г.Самара

✉dzhig00@gmail.com

Аннотация. Однородность температурного поля в рабочей зоне CVD-реактора [1] является критическим фактором, определяющим качество и структурное совершенство синтезируемых тонкопленочных покрытий. Индукционный нагрев обеспечивает высокую чистоту и скорость процесса, однако сложность сопряженных электромагнитных и тепловых явлений требует применения численных методов для оптимизации конструкции реактора. В данной работе было рассчитано и проанализировано влияние частоты и мощности индукционного нагрева на конструктивные элементы CVD-реактора, а также на разное положение подложек по высоте графитового контейнера при частоте от 10 до 20 кГц с шагом в 5 кГц и мощности 20, 22, 24 кВт.

Ключевые слова: HTCVD, COMSOL Multiphysics, моделирование.

Введение

Химическое осаждение из газовой фазы (CVD — Chemical Vapor Deposition) является одной из ключевых технологий в современном материаловедении, микроэлектронике и нанотехнологиях, позволяя получать высококачественные тонкопленочные покрытия и функциональные слои [2]. Качество синтезируемых материалов критически зависит от однородности температурного поля в рабочей зоне реактора, так как кинетика химических реакций и скорость роста пленки имеют сильную температурную зависимость.

Для достижения высоких температур в экспериментальных CVD-реакторах все чаще применяется метод индукционного нагрева. По сравнению с резистивным нагревом, индукционный способ обеспечивает бесконтактную передачу энергии, высокую скорость нагрева, чистоту процесса (отсутствие загрязнений от нагревательных элементов) и возможность локального управления тепловыделением [3]. Однако сложность электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в системе «индуктор — графитовый контейнер — газовая среда», затрудняет точное прогнозирование распределения температуры без проведения дорогостоящих натурных экспериментов. Прямые измерения температурного поля внутри работающего реактора часто невозможны из-за агрессивной среды и ограниченного оптического доступа.

В связи с этим, численное моделирование становится незаменимым инструментом для оптимизации конструкции реактора и режимов его работы. Использование методов конечных элементов (FEM) позволяет решать сопряженные задачи электродинамики и теплопередачи, учитывая нелинейность свойств материалов и влияние скин-эффекта [4].

В данной работе было рассчитано и проанализировано влияние частоты и мощности индукционного нагрева на конструктивные элементы CVD-реактора, а также на разное положение подложек по высоте графитового контейнера при частоте от 10 до 20 кГц с шагом в 5 кГц и мощности 20, 22, 24 кВт.

Материалы и методы

В соответствии с этой задачей уравнение, которые необходимо решить в программном обеспечение COMSOL Multiphysics [5], основываясь на уравнениях Максвелла в сплошной среде и теоремы о циркуляции магнитного поля

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} = \sigma E + \sigma v \times B + \frac{\partial D}{\partial t}. \quad (1)$$

Приближая модель к реальным условиям индукционного нагрева так спиральный проводник и межтрубное пространство кварцевых труб CVD-реактора охлаждается турбулентным потоком воды во внутреннем канале. Это достигается за счет сочетания высокой эффективной теплопроводности и однородных внеплоскостных конвективных потерь:

$$Q_0 = \frac{\frac{\partial M}{\partial t} \mathrm{C}_p (T_{\text{в}} - T)}{V}. \quad (2)$$

Результаты и обсуждение

По полученным данным наиболее подходящей комбинацией является 24 кВт и 20 кГц, поскольку разброс температурный относительно высоты графитового контейнера минимальный, при этом достигаются рабочие температуры проведения CVD-процесса для роста монокристаллического карбида кремния на кремнии. При уменьшении частоты до 10 кГц и той же мощности можно производить рост поликристаллической фазы карбида кремнии. Используя разные параметры, можно быстро и точно подобрать режим работы CVD-установки для роста необходимого покрытия.

В различных системах помимо газоносителя H_2 широко используют He и Ar в качестве газов-носителей в системах роста SiC. Использование Ar в качестве газа-носителя привело бы к наименьшему расходу энергии, но из-за его очень низкой теплоемкости может возникнуть неоднородность или тепловая нестабильность. Следовательно, более высокая теплопроводность и теплоемкость He делают его лучшей альтернативой Ar, а также H_2, что требует более высокой скорости потребления энергии, чем He. Ниже представлено результаты моделирования распределение температурного профиля CVD-установки в зависимости от применения разного газоносителя.

Список литературы

1. И.А. Шишкин, Д.А. Шишкина, С.А. Нефедов, Д.М. Лебедев, В.И. Чепурнов, Д.Н. Артемьев Анализ структурного состава пленки карбида кремния, полученной методом высокотемпературного химического осаждения из газовой фазы Физика твердого тела, 2023, том 65, вып. 12, с.2187-2190
2. Pierson, H. O. Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology, and Applications. — 2nd ed. — William Andrew Publishing, 1999. — 336 p. (Фундаментальное руководство по технологиям CVD).
3. Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R. L. Handbook of Induction Heating. — 2nd ed. — CRC Press, 2017. — 842 p. (Базовый источник по теории и практике индукционного нагрева).
4. Немков, В. С., Демидович, В. Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 256 с.
5. COMSOL Multiphysics®. Introduction to Module for AC/DC and Heat Transfer. — COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

Синтез субмикронных кристаллов InGaN на SiC/Si(111) подложках методом молекулярно-пучковой эпитаксии

Д. И. Пикин [1✉], **К. П. Котляр** [1-3], **В. О. Гридчин** [1-3], **В. В. Лендяшова** [1,3], **Д. А. Кириленко** [4], **А. А. Харченко** [1], **С. А. Кукушкин** [5], **Г. Э. Цырлин** [1-3]

[1] Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия;
[2] Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия;
[3] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;
[4] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия;
[5] Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
✉pikin2004@gmail.com

Аннотация. Показана возможность формирования субмикронных кристаллов InGaN при росте на гибридных подложках SiC/Si(111) методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Причиной их формирования является стохастическое срастание нитевидных нанокристаллов между собой вследствие формирования вставок кубической фазы в вюрцитном InGaN. Синтезированные структуры демонстрируют основной пик фотолюминесценции в диапазоне 500-660 нм.

Ключевые слова: InGaN, субмикронные кристаллы, молекулярно-пучковая эпитаксия, карбид кремния, видимый диапазон излучения

Введение

Нитрид индия-галия является перспективным материалом фотоники в силу возможности варьирования ширины запрещенной зоны от 0.7 эВ до 3.43 эВ при изменении его состава. Один из способов синтеза InGaN – рост в форме нитевидных нанокристаллов (ННК) на кремниевых подложках Si(111) [1,2]. Однако для ряда применений, например, для нанолазеров и микродисковых лазеров [3], необходимы кристаллы субмикронных размеров, формирование которых в неупорядоченных массивах ННК мало изучено. В настоящей работе исследована возможность роста таких кристаллов методом молекулярно-пучковой эпитаксии, для чего использовали гибридную подложку SiC/Si(111) с развитой морфологией.

Материалы и методы

В данной работе использовалась подложка SiC/Si(111) с толщиной буферного слоя SiC 100 нм. Рост проводился методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber Compact 12 при ростовой температуре 650°C. Морфология выращенных структур исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Zeiss Supra 25. Структурные свойства отдельных ННК исследовались с помощью методов просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на установке Jeol JEM-2100F. Спектры фотолюминесценции измерялись при комнатной температуре с помощью He-Cd лазера, длина волны накачки 325 нм.

Результаты и обсуждение

Детальное исследование морфологии показало формирование нескольких типов структур, соответствующих разным температурам роста от T_1 (с края) до $T_2 > T_1$ (в центре). Различие областей по температуре объясняется использованием специального держателя подложек, что позволяет формировать температурный градиент вдоль диаметра подложки.

На Рис. 1a приведено РЭМ-изображение типичной морфологии образца в области T_1. Средняя высота и диаметр ННК составили 2.7 мкм и 90 нм соответственно. ННК у основания имеют сегментированную структуру (обведено пунктиром), причем в области уширения сегментов возможна их частичная коалесценция между разными ННК. В области T_2 наблюдается срастание разных ННК к вершине (обведено пунктиром на Рис. 1b) – образование «стенок». Статистический анализ изображений в виде сверху (Рис. 1c) показывает стохастический характер формирования таких «стенок» в 6-ти эквивалентных

направлениях перпендикулярно ребрам ННК. В этой области наблюдается образование субмикронных кристаллов (СМК) диаметром от 200 до 500 нм (Рис. 1d).

Детальное исследование морфологии показало, что возможной причиной формирования таких СМК является формирование близко расположенных «стенок», что может привести к их замыканию и образованию субмикронных гексагональных структур.

Для выявления природы срастания кристаллов был проведен ПЭМ анализ одиночных СМК. Исследование показало сегментированную структуру СМК аналогичную тонким ННК, причем границы сегментов являются вставками кубической фазы в вюрцитном материале. Размер таких вставок может достигать до 20 нм. Содержание индия по отношению к галию в вюрцитной фазе составляет 10%. В свою очередь, кубическая фаза обеднена индием – 1%. Синтезированные структуры демонстрируют основную полосу фотолюминесценции в диапазоне 500-660 нм.

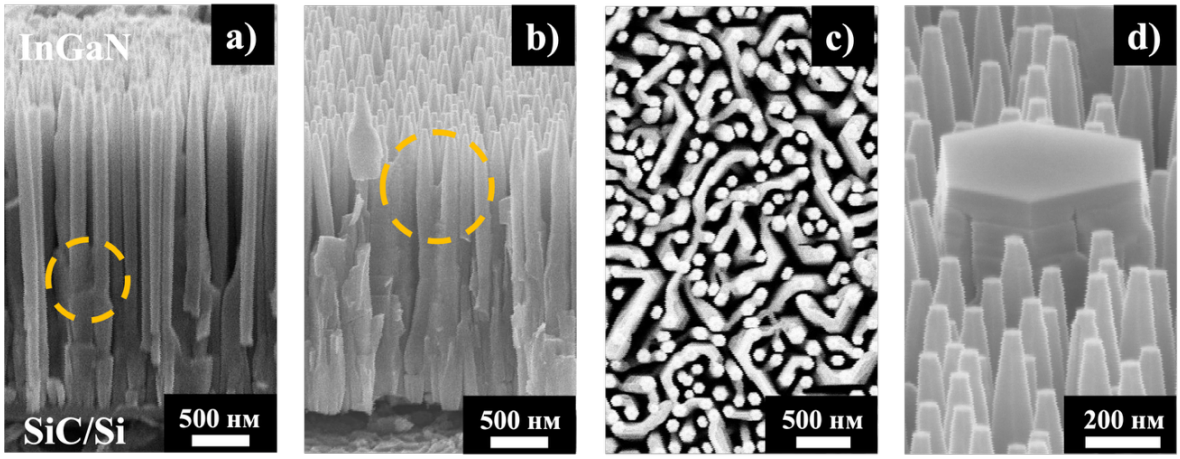


Рис. 1. SEM-изображения: (a) ННК в области T_1; (b) ННК в области T_2; (c) ННК в области T_2 вид сверху; (d) типичный субмикронный кристалл

Заключение

Таким образом, впервые показана возможность синтеза субмикронных кристаллов InGaN при росте на гибридных подложках SiC/Si(111) методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Причиной их формирования является стохастическое срастание нитевидных нанокристаллов между собой вследствие формирования вставок кубической фазы в вюрцитном InGaN. Последнее способствует латеральному разрастанию нанокристаллов и формированию объединенного кристалла. Синтезированные структуры демонстрируют основную полосу фотолюминесценции в диапазоне 500-660 нм.

Благодарности

Экспериментальные образцы синтезированы в рамках проекта РНФ № 23-79-00012. Исследования морфологических свойств образцов методом РЭМ выполнены при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ СПБАУ РАН им. Ж. И. Алфёрова № FSRM-2026-0004. Исследования методами провечивающей электронной микроскопии выполнялись с использованием оборудования Федерального объединенного исследовательского центра «Материаловедение и характеристика в передовых технологиях» (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия).

Список литературы

[1] V.O. Gridchin, K.P. Kotlyar, E.V. Ubyivovk et all. ACS Applied Nano Materials, **7**(15), 17460-17468 (2024).

[2] T. Tabata, J. Paek, Y. Honda, M. Yamaguchi, H. Amano. Phys. Status Solidi C, **9**, 646-649 (2012).

[3] R. Yi, X. Zhang, C. Li et al. Light Sci. Appl. **11**, 120 (2022).

Влияние буферных слоев InP/InGaAs в гетероструктурах квантово-каскадных лазеров на ширину гетерограниц сверхрешеток InGaAs/InAlAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии

Д.С. Папылев [1]✉, И.И. Новиков[1,2], В.В. Андрюшкин[1,2], А.Г. Гладышев[2], В.В. Дюделев[3], Л.Я. Карачинский[1,2], А.В. Бабичев[1], И.А. Няпшаев[3], П.А. Юнин[4], А.Ю. Егоров[2,3], Г.С. Соколовский[3]

[1] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

[2] ООО «Коннектор Оптикс», Санкт-Петербург, Россия

[3] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

[4] Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

✉dspapylev@itmo.ru

Аннотация. При исследовании гетероструктур квантово-каскадных лазеров показано, что использование толстого (около 5 мкм) буферного слоя InP, предварительно выращенного методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке из фосфида индия, не приводит к полной планаризации исходной шероховатости подложки. В результате использование подложек с повышенной (на 0,2 нм), шероховатостью поверхности ведет к увеличению ширины гетерограниц сверхрешеток InGaAs/InAlAs на 72%. Показанный эффект нивелируется при формировании методом молекулярно-пучковой эпитаксии буферного слоя $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ толщиной 100–500 нм, что позволяет обеспечить ширину гетерограниц на уровне не более одного монослоя (≤0.35 нм).

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, гетероструктура, ширина гетерограниц, молекулярно-пучковая эпитаксия, рентгеновская рефлектометрия.

Введение

В гетероструктурах квантово-каскадных лазеров (ККЛ) среднего ИК диапазона на подложках InP используются толстые, порядка несколько микрометров, волноводные слои и активная область, состоящая из повторяющихся каскадов наноразмерных слоев. Для выращивания толстых волноводных слоев предпочтительно применение газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) ввиду относительно высоких скоростей эпитаксиального роста. В свою очередь, молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) позволяет с точностью на уровне одного монослоя контролировать толщину наноразмерных слоев активной области. Поэтому при производстве гетероструктур ККЛ среднего ИК диапазона перспективно комбинировать эти подходы.

В гетероструктурах ККЛ для изготовления волноводных слоев, также выполняющих функцию буферных, методом МОГФЭ предпочтительно использовать материал InP с относительно высокой теплопроводностью. Поверх этого слоя, ближе к активной области, для управления фактором модового ограничения методом МПЭ формируют относительно тонкие слои $In_{0.53}Ga_{0.47}As$, обладающие более высоким показателем преломления и также выполняющие функции буферного слоя при эпитаксии. В активной области шероховатость и размытие химического состава, совокупно определяющие ширину гетерограниц, могут негативно влиять на характеристики ККЛ [1, 2], поэтому важно обеспечить планаризацию поверхности выращиваемых перед активной областью буферных слоев, а также подобрать подходящие условия эпитаксиального роста активной области.

Материалы и методы

В работе для исследования влияния шероховатости поверхностей подложки и выращенного методом МОГФЭ буферного слоя на качество гетерограниц сверхрешетки гетероструктур ККЛ были изготовлены образцы 1(a) и 1(b). Для этого на подложках InP (001), с различной шероховатостью поверхности (1(a) – 0.2 нм и 1(b) – 0.4 нм), методом МОГФЭ был выращен слой InP толщиной 5000 нм. Поверх этого слоя методом МПЭ были выращены тонкий буферный слой $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ толщиной 50 нм и сверхрешетка ККЛ, состоящая из 10 каскадов упруго-напряженных слоев

$In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.65}Ga_{0.35}As/In_{0.37}Al_{0.63}As$ общей толщиной ~500 нм. Для исследования влияния толщины выращенного методом МПЭ буферного слоя $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ были изготовлены образцы 2(a) и 2(b), содержащие 10 каскадов слоев $In_{0.36}Al_{0.64}As/In_{0.67}Ga_{0.33}As$ на подложках InP (001) с шероховатостью поверхности 0.4 нм, без заращивания методом МОГФЭ. Толщина буферных слоев $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ в образцах увеличена до 100 и 500 нм для образцов 2(a) и 2(b) соответственно.

Эпитаксия сверхрешеток InAlAs/InGaAs производилась при увеличенной до 40 об/мин скорости вращения держателей с подложками, 1 к 3 соотношении потоков материалов A3/B5, а также при поддержании температуры подложек 490±10°C. Шероховатость поверхности исследовалась методом оптической дефектометрии, ширина гетерограниц в сверхрешетках определялась при измерении и моделировании кривых малоугловой рентгеновской рефлектометрии (РР).

Результаты и обсуждение

При исследовании поверхности сформированного методом МОГФЭ слоя InP толщиной 5000 нм образцов 1a и 1b выявлена шероховатость, соответствующая исходной шероховатости подложек (0.2 и 0.4 нм). Исследование методом РР выявило различие в интенсивности пиков от сверхрешеток на кривых рентгеновской рефлектометрии (рис. 1), ширина гетерограниц в образцах составила 0.32 и 0.55 нм. По результатам исследования гетероструктур 2a и 2b с увеличенной толщиной буферного слоя $In_{0.53}Ga_{0.47}As$, интенсивность и форма пиков на кривой РР (рис. 2) незначительно различалась между образцами. Ширина гетерограниц в образцах 2a и 2b определена в диапазоне значений 0.29-0.30 нм для InGaAs/InAlAs и 0.33-0.35 нм для InAlAs/InGaAs, что соответствует величинам, полученным в образце 1a на подложке с меньшей шероховатостью.

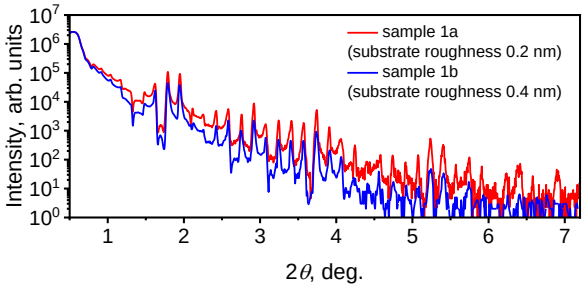


Рис. 1. Кривые РР образцов 1a и 1b, изготовленных на подложках с различной шероховатостью

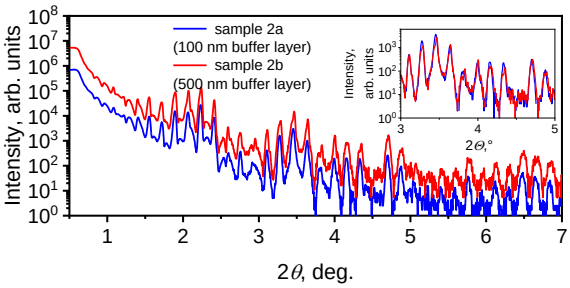


Рис. 2. Кривые РР образцов 2a и 2b, сдвинутые по вертикальной оси Вставка: кривые, совмещенные по интенсивности

Заключение

В результате проведённых исследований, показано что на поверхности толстых (около 5 мкм) буферных слоях InP, изготовленных методом МОГФЭ, происходит наследование исходной шероховатости поверхности подложки. Выращенный методом МПЭ буферный слой $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ толщиной 50 нм не обеспечил достаточной планаризации поверхности, что привело к увеличению ширины гетерограниц формируемых методом МПЭ сверхрешеток InGaAs/InAlAs на 72%. Увеличение толщины слоя $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ до 100 нм и 500 нм в образцах 2a и 2b, при подобранных параметрах эпитаксиального роста, обеспечило формирование атомарно-гладких гетерограниц сверхрешеток с шириной гетерограниц ≤0,35 нм.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-30020-П, https://rscf.ru/project/21-72-30020/.

Список литературы

[1] K.A. Krivas, D.O. Winge, M. Franckié, A. Wacker. J. Appl. Phys., 118(11), 114501 (2015)
[2] C.A. Wang, B. Schwarz, D.F. Siriani, et al. J. Cryst. Growth, 464, 215 (2017)

Влияние состава газоразрядной плазмы на морфологию структур на поверхности карбида кремния

В. С. Климин [1✉], **М. Н. Григорьев** [1,2], **П. А. Тарасов** [1,2], **Д. В. Клещин** [1,2], **В. Н. Жирнов** [1,2], **В. В. Пташник** [2]

[1] ФГАОУ ВО Южный федеральный университет, Таганрог, Россия;

[2] АО Таганрогский научно-исследовательский институт связи, Таганрог, Россия;

✉Kliminvs@sfedu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальные исследования по плазмохимическому профилированию карбида кремния. Определена зависимость геометрии структур (высота, шероховатость, угол наклона стенок) от состава смеси O_2:CCl_2F_2:Ar и мощности источника индуктивно-связанной плазмы. Увеличение этих параметров ускоряет процесс. Подобраны режимы для контролируемого формирования рельефа. При 450 Вт и соотношении газов 74:14:12 получены структуры высотой 200,78±7,45 нм, шероховатостью 5,11±2,15 нм и углом наклона 82,23±1, 93°.

Ключевые слова: микроэлектроника, карбид кремния, плазмохимическое травление.

Введение

Плазмохимическое травление является одним из основных методов современной микроэлектроники для получения различных полупроводниковых структур. Ключевое влияние на результат плазмохимического травления оказывает состав газовой фазы. Сочетание кислорода и дифтордихлорметана (CCl_2F_2) определяет химическую активность плазмы, что сказывается на высоте структур, шерохнутости и углах наклона стенок [1]. В связи с миниатюризацией элементов в микро- и наноэлектронике возрастают требования к точности и однородности обработки. Изучение взаимосвязи между газовой смесью и параметрами травления позволяет совершенствовать существующие технологии и создавать структуры с заданными свойствами для высокочастотной, силовой электроники и фотоники [2]. Работа имеет значение как для теории, так и для практического применения в данной области.

Материалы и методы

Образцами служили пластины гексагонального карбида кремния (6H-SiC). На них формировали алюминиевую маску толщиной 1 мкм методом оптической фотолитографии с использованием фоторезиста ФП 9120-1. Резистивный слой удаляли в плазме смеси кислорода и аргона при мощности индуктивно-связанной плазмы (ИСП) 620 Вт. Травление поводилось со стороны кремниевой грани карбида кремния (Si-face, ориентация (0001)).

Плазмохимическое травление SiC выполняли в газовой среде, содержащей кислород, дифтордихлорметан (CCl_2F_2) и аргон. Соотношение компонентов варьировали, чтобы оценить его влияние на процесс. Мощность ИСП изменяли в установленных пределах, параметры емкостно-связанной плазмы (мощность, напряжение смещения) и рабочее давление в реакторе поддерживали постоянными. После обработки остатки алюминиевой маски удаляли химическим травлением в водном растворе гидроксида натрия.

Метрологический контроль включал профилометрию двух участков: непосредственно сформированной микроструктуры для определения её геометрических параметров и области поверхности, подвергшейся комплексному воздействию плазмы и химического травления, для оценки изменений рельефа.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлено изображение части структуры, сформированной на поверхности карбида кремния и основные параметры измерения.

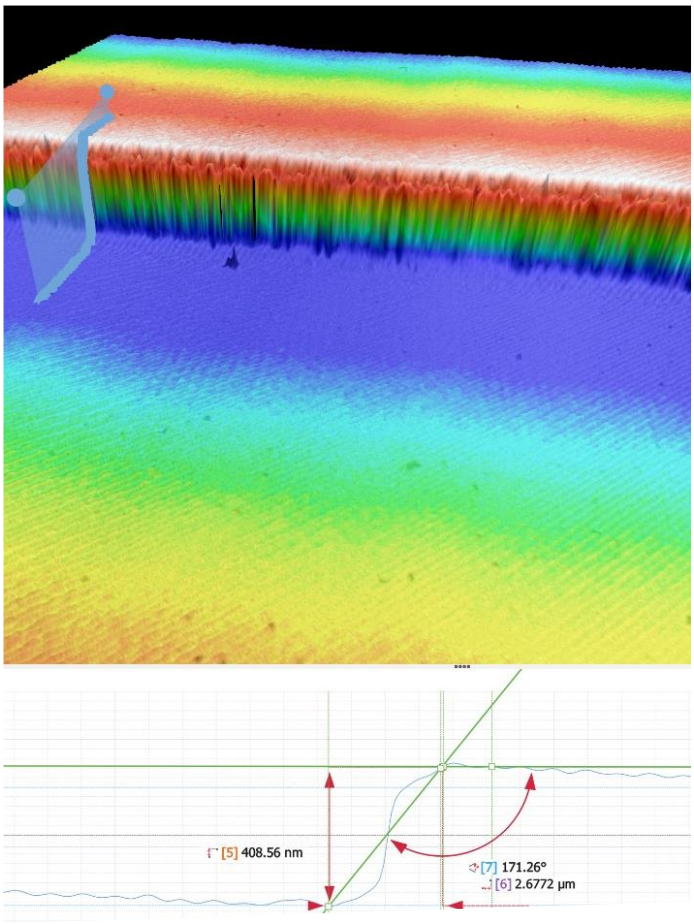


Рис. 1. Изображение и профиль микроструктуры, сформированной на поверхности карбида кремния методом плазменного травления

произвольный.

В результате исследований были построены зависимости высоты, шероховатости и угла наклона структур от состава газовой смеси.

Заключение

В ходе экспериментов установлено, что состав газовой смеси и мощность источника индуктивно-связанной плазмы определяют высоту структур, шероховатость и угол наклона боковых стенок при травлении карбида кремния. Выявлены режимы, обеспечивающие экстремальные значения шероховатости при заданной высоте, а также условия для воспроизводимого формирования требуемого угла наклона. Полученные закономерности позволяют целенаправленно управлять процессом создания микро- и наноструктур на основе SiC.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-00722, https://rscf.ru/project/25-29-00722/ в Южном федеральном университете.

Список литературы

[1] P. Chabert. // Deep etching of silicon carbide for micromachining applications: Etch rates and etch mechanisms. Journal of Vacuum Science & Technology B, **19**, 1339–1345 (2001).

[2] Klimin, V. S., Geldash, A., Ageev, O. A. // Russian Microelectronics. 2024. Vol. **53**(Suppl 2). P. 117–122.

Метаматериалы с нулевым показателем преломления на основе SiC с проводящим графеновым слоем

В. С. Климин [1]✉, **А. В. Демьяненко** [1], **В. О. Игнатович** [1], **И. Н. Бобков** [1]
[1] ФГАОУ ВО Южный федеральный университет, Таганрог, Россия;
✉Kliminvs@sfedu.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований по созданию метаматериалов на основе карбида кремния с токопроводящим слоем графена, сформированным методом плазменной обработки. Спроектирована элементарная ячейка метаматериала с нулевым показателем преломления, ориентированная на диапазон 75–85 ГГц. Коэффициент отражения ячейки не превышает –20 дБ, эффективная диэлектрическая проницаемость менее 0,35. Полученные результаты подтверждают перспективность разработанных структур для автомобильных радаров и систем промышленной сенсорики.

Ключевые слова: Метаматериалы, карбид кремния, плазменная обработка.

Введение

Для повышения эффективности излучения и управления электромагнитными волнами в антенных устройствах все чаще применяют метаматериалы, позволяющие получать новые свойства используя стандартные материалы. Карбид кремния (SiC) выступает перспективной подложкой благодаря термостойкости, низким потерям и совместимости с чиповыми технологиями, что открывает возможности для миниатюризации устройств [1]. Интеграция метаструктур на SiC позволяет создавать компоненты для миллиметрового и терагерцового диапазонов (5G/6G), а также обеспечивает работоспособность при экстремальных температурах. Актуальность исследования подтверждается высокой практической значимостью получения элементной базы для устройств передачи сигнала [2].

Материалы и методы

Моделирование метаматериала проводилось в программной среде Ansys HFSS с использованием метода полноволнового анализа. Для оценки возможности создания метаматериала на основе сформированного таким образом проводящего слоя была спроектирована элементарная ячейка метаматериала с нулевым показателем преломления (zero-index metamaterial).

В качестве подложки применялся монокристаллический карбид кремния политипа 6H-SiC. Формирование токопроводящего графенового покрытия осуществлялось методом плазменной обработки приповерхностного слоя SiC. Под действием плазмы происходила деструкция кремниевой составляющей, тогда как углеродный компонент оставался на поверхности, образуя функциональную плёнку толщиной в несколько слоёв. Использование ионов углерода в плазме позволяло достраивать графеновую поверхность. Для увеличения толщины проводящего графенового слоя метаматериал формировался на углеродной грани карбида кремния.

Результаты и обсуждение

Для метаматериалов с нулевым показателем преломления (ZIM) характерно равенство фаз поля на входе и выходе структуры. Такие материалы позволяют трансформировать сферический фронт волны, типичный для широкодиапазонных антенн, в плоский, что способствует повышению направленности излучения. Наиболее часто ZIM применяются при разработке антенн Вивальди [3,4]. На боковых гранях элементарной ячейки проектируемого метаматериала задавались условия идеального электрического (PEC) и идеального магнитного (PMC) проводников, на стенке, параллельной плоскости YZ, определялись два порта, декапсулированных до краёв ячейки.

Толщина графенового проводящего слоя, сформированного в подложке SiC, составляла 7 мкм. В качестве подложки использовался карбид кремния толщиной 250 мкм

с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 10$ и тангенсом угла потерь $tg(\delta) = 1\times10^{-6}$. Выбор толщины подложки обусловлен рабочим диапазоном частот (W-диапазон, 75 ГГц и выше).

Конфигурация проводящего слоя представляет собой модифицированную H-образную структуру, формирующую эквивалентный LC-контур. Извилистая линия (миандр) обеспечивает индуктивную составляющую, а параллельные плечи — ёмкостную связь между соседними ячейками (рисунок 1).

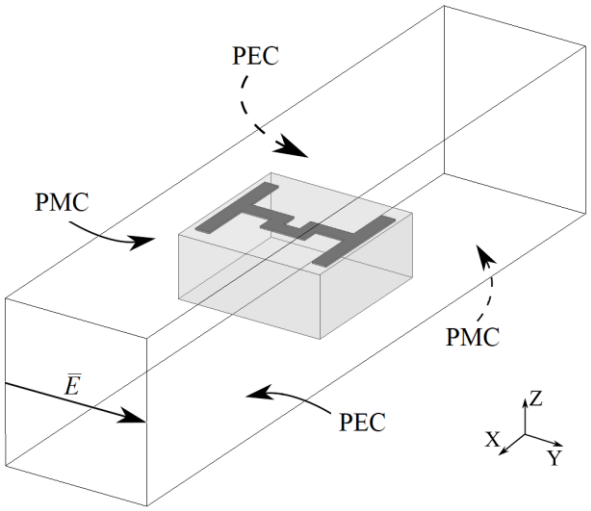


Рис. 1. Общий вид спроектированной элементарной ячейки из метаматериала

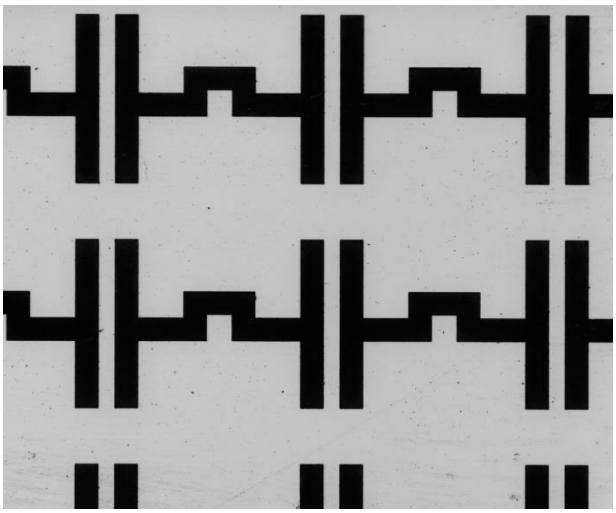


Рис. 2. Изображение сформированной структуры матаматериала на поверхности SiC

На рисунке 2 показано изображение сформированной структуры метаматериала на поверхности карбида кремния углеродной грани, полученной методом плазменной обработки.

Заключение

В ходе работы проведены экспериментальные и теоретические исследования формирования метаматериалов на поверхности карбида кремния с использованием проводящего слоя графена, полученного методом плазменной обработки. Спроектирована элементарная ячейка метаматериала, представляющая собой графеновый слой, сформированный в подложке SiC. Ячейка ориентирована на работу в диапазоне 75–85 ГГц, что соответствует задачам автомобильных радаров (SRR, LRR) и промышленного контроля уровня жидкостей. Коэффициент отражения в указанном диапазоне не превышает –20 дБ, а эффективная диэлектрическая проницаемость составляет менее 0,35.

Полученные результаты подтверждают возможность создания метаматериалов на основе графеновых слоёв на подложках SiC методом плазменной обработки, а также демонстрируют перспективность применения таких структур в диапазоне до 85 ГГц.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-00722, https://rscf.ru/project/25-29-00722/ в Южном федеральном университете.

Список литературы

[1] D. R. Smith, J. B. Pendry, M. C. K. Wiltshire. Science, **305**(5685), 788–792 (2004).
[2] Y. Mushake. IEEE Antennas and Propagation Magazine, **34**(6), 23–29 (1992).
[3] M. Sun, Z. N. Chen, X. Qing. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **61**(4), 1741–1746 (2013).
[4] A. Alu, M. G. Silveirinha, A. Salandrino, N. Engheta. Physical Review B, **75**(15) (2007).

Синтез графена на полярных гранях SiC(0001) и SiC(000–1) методом плазмохимической обработки

В. С. Климин [1✉], **М. Н. Григорьев** [1,2], **П. А. Тарасов** [1,2], **Д. В. Клещин** [1,2], **В. Н. Жирнов** [1,2], **В. В. Пташник** [2]

[1] ФГАОУ ВО Южный федеральный университет, Таганрог, Россия;

[2] АО Таганрогский научно-исследовательский институт связи, Таганрог, Россия;

✉Kliminvs@sfedu.ru

Аннотация. В работе исследовано формирование графеновых слоёв на Si- и C-гранях 6H-SiC методом плазмохимического травления в смеси $CCl_2F_2/O_2/Ar$. Установлено, что выбор полярности подложки определяет количество слоёв и электрофизические параметры графена. Для углеродной грани получен электронный тип проводимости с концентрацией носителей −2.731E + 22 $см^{-3}$. Результаты демонстрируют возможность управления свойствами графена за счёт выбора кристаллографической ориентации SiC.

Ключевые слова: Карбид кремния, плазменное травление, графен.

Введение

Карбид кремния (SiC) является одним из наиболее перспективных широкозонных полупроводников для силовой электроники, высокочастотных, высокотемпературных устройств. Получение графена на поверхности SiC, позволяет расширить области его применения и решить вопросы как с контактами к SiC, так и используя графеновый слой в качестве функционального. Одним из наиболее часто используемых методов получения графена на SiC является высокотемпературная термическая декомпозиция, при которой атомы кремния сублимируются с поверхности, а избыточные атомы углерода реорганизуются в графеновые слои [1, 2]. Однако этот подход требует нагрева подложки до температур выше 1500 °C в условиях сверхвысокого вакуума или инертной атмосферы, что ограничивает его совместимость с существующими технологическими маршрутами полупроводникового производства и повышает риск загрязнения и дефектообразования.

В качестве альтернативы рассматриваются низкотемпературные методы, в частности плазмохимическое травление, позволяющее селективно удалять кремний с поверхности SiC за счёт взаимодействия с активными частицами плазмы, такими как фтор-, хлор- или кислородсодержащие газы [3, 4]. При этом ключевым фактором, определяющим кинетику процесса и качество образующегося графенового слоя, является полярность исходной поверхности SiC. Кристаллы SiC обладают двумя полярными гранями: кремниевой (Si-face, ориентация (0001)) и углеродной (C-face, ориентация (000–1)), которые различаются атомной терминирующей поверхностью, химической стойкостью и механизмами взаимодействия с плазмой [4]. Однако сравнительные исследования технологии формирования графеноподобных слоёв на Si- и C-гранях SiC методом плазмохимического травления до настоящего времени остаются малочисленными.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование возможности получения графеновых слоёв на полярных гранях SiC(0001) и SiC(000–1) с использованием плазмохимического травления в комбинированной плазме на основе смеси газовой смеси $CCl_2F_2/O_2/Ar$.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились на полярных гранях: кремниевой (Si-face, ориентация (0001)) и углеродной (C-face, ориентация (000–1)) гексагонального политипа 6H-SiC (карбида кремния). В качестве резистивной маски использовалась алюминиевая пленка толщиной 1 мкм. Формирование рисунка на маскирующем слое осуществлялось методом оптической фотолитографии с применением фоторезиста FP 9120-1. Удаление фоторезистивной маски выполнялось методом плазмохимического травления в смеси кислорода и аргона в соотношении 95:5. Процесс длился 3 минуты с использованием источника индуктивно связанной плазмы мощностью 560 Вт.

Основной этап формирования графена проводился на обоих гранях с одинаковыми параметрами процесса. Состав газовой смеси представлял собой смесь газов дихлордифторметана, кислорода и аргона в следующих соотношениях $CCl_2F_2/O_2/Ar$ 81:7:12. Мощность источника ёмкостной плазмы составляла 460 Вт. Длительность плазменного воздействия составляла 5 минут.

1. Результаты и обсуждение

По результатам экспериментальных исследований были сформированы графеновые структуры на обоих поверхностях карбида кремния (рис. 1 и рис. 2). На рисунке 1 показаны структуры, сформированные на углеродной грани, на рисунке 2 показаны структуры, сформированные на кремниевой грани.

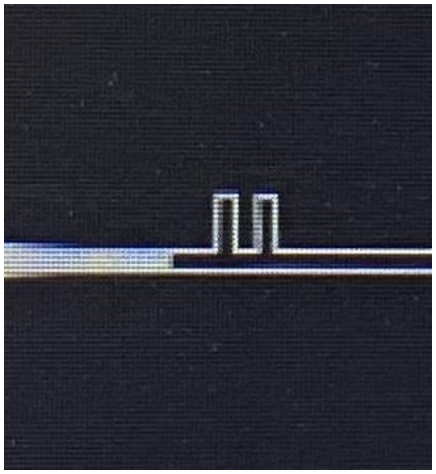


Рис. 1. Изображение графеновых структур, сформированных на углеродной грани поверхности SiC

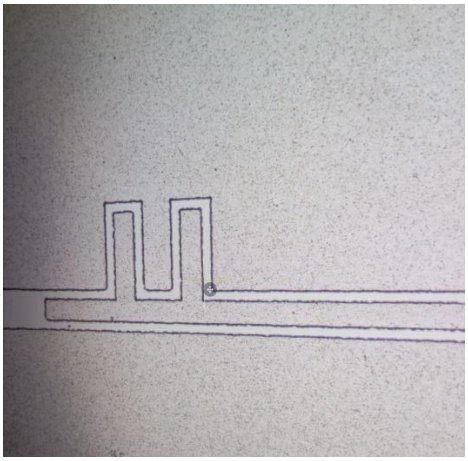


Рис. 2. Изображение графеновых структур, сформированных на кремниевой грани поверхности SiC

Помимо оптических свойств, полученные графеновые структуры обладали различным количеством слоев и электрофизическими параметрами.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены зависимости электрофизических параметров графеновых структур. Показано, что при использовании различных граней подложки можно получать различное количество графеновых слоев. Применение таких структур так же может лежать в различных областях. Так, например, поверхностная концентрация носителей заряда графеновой области, сформированной на углеродной грани, составила -2.731E+22 $см^3$, знак «-» указывает на электронный тип проводимости.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-00722, https://rscf.ru/project/25-29-00722/ в Южном федеральном университете.

Список литературы

[1] K. V. Emtsev, A. Bostwick, K. Horn, J. Jobst, G. L. Kellogg, L. Ley, J. L. McChesney, T. Ohta, S. A. Reshanov, J. Röhrl, E. Rotenberg, A. K. Schmid, D. Waldmann, H. B. Weber, T. Seyller. Nat. Mater., **8**, 203 (2009).

[2] J. Hass, W. A. de Heer, E. H. Conrad. J. Phys.: Condens. Matter, **20**(32), 323202 (2008).

[3] M. H. D. Guimarães, A. Zomer, J. van de Groep, R. W. A. Havenith, C. H. van der Wal, H. J. van Elferen, T. Li, B. J. van Wees. J. Appl. Phys., **108**(6), 064315 (2010).

[4] R. M. Feenstra, N. Srivastava, Q. Gao, M. Widom, B. Diaconescu, T. Ohta, G. L. Kellogg, J. T. Robinson, I. V. Vlassiouk. J. Appl. Phys., **111**(7), 073517 (2012).

Особенности состава и оптических свойств систем доставки лекарств на основе пористого кремния с осажденным циннаризином

А. С. Леньшин[1,2], **К. Б. Ким** [1✉], **С.С. Черненко** [1,2], **Э.П. Домашевская**[2]
[1] Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия;
[2] Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия;
✉kmkseniya@yandex.ru

Аннотация.
Целью работы явились формирование систем точечной доставки лекарственных средств пористый кремний – циннаризин, исследование особенностей их состава, оптических свойств и определение оптимальной методики осаждения циннаризина.

Нанопорошок пористого кремния был получен механическим и ультразвуковым измельчением пластин пористого кремния. Методами просвечивающей электронной спектроскопии, инфракрасной спектроскопии и ультрафилотовой спектроскопии исследованы морфология и состав образцов на основе пористого кремния. По результатам исследований просвечивающей электронной микроскопии определили присутствие в образцах как кристаллической, так и аморфной фазы. По данным ультрафиолетовой спектроскопии были определены энергии возможных прямых переходов в системах пористый кремний-циннаризин. Исследованы процессы адсорбции и десорбции на наноструктурах и установлено влияние параметров осаждения циннаризина на матрицу пористого кремния.

Ключевые слова: пористый кремний, наночастицы кремния, сорбция, циннаризин, системы доставки лекарств

Введение

Разработка контейнеров для адресной доставки лекарств в настоящее время одна из главных задач данной научной области. Ввиду своей биосовместимости и технологичности, перспективной основой для данной системы доставки являются наночастицы на основе оксида кремния и пористого кремния. В лечении последствий цереброваскулярных заболеваний, когнитивных и астенических расстройств, ассоциированных с COVID-19, наиболее перспективно использование нейрометаболических препаратов с нейропротективными и нейротрофическими свойствами. Представляет большой интерес опыт использования нейропротективного и нейротрофического препарата Циннаризин у пациентов с неврологическими расстройствами в постковидном периоде. Пористый кремний является перспективным функциональным материалом благодаря развитой внутренней поверхности и возможности управления морфологией порового пространства. Эти особенности определяют его применение в сенсорике, оптоэлектронике, микро- и наноэлектронике, а также в энергетических и каталитических системах. При формировании покрытий на пористом кремнии важную роль играют не только свойства осаждаемого материала, но и структура самой подложки, определяющая характер транспорта вещества и роста слоя.

Цель работы – формирование систем точечной доставки лекарственных средств пористый кремний – циннаризин, исследование особенностей их состава, оптических свойств и определение оптимальной методики осаждения циннаризина.

Материалы и методы

Образцы пористого кремния (por-Si) получены двусторонним анодным электрохимическим травлением полированных с обеих сторон пластин монокристаллического кремния c-Si(100) в растворах плавиковой кислоты в режиме постоянного тока с последующей промывкой в дистиллированной воде и изопропиловом спирте [1]. Нанопорошки кремния получали механическим отделением от пластин кремния пористых слоев с последующим измельчением в изопропиловом спирте

пористого кремния ультразвуком до порошкообразного состояния. Морфологию исследовали методом растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным микроанализом. Топографию поверхности и параметры шероховатости (включая энтропию распределения высот) определяли методом атомно-силовой микроскопии на приборе SOLVER P47 PRO с обработкой данных в программном обеспечении NOVA. Для анализа химических связей использовали инфракрасную Фурье-спектроскопию в диапазоне 4000–400 $см^{-1}$ (спектрометр Vertex 70, Bruker, с приставкой НПВО). Оптические свойства образцов изучались в диапазоне 190−900 нм методом УФ-спектроскопии с помощью прибора LAMBDA 650 фирмы Perkin Elmer.

Результаты и обсуждение

Методом инфракрасной спектроскопии определен химический состав и типы связей в пористом слое. Показано, что в пористом слое присутствуют связи Si-O, Si-Hx, Si-OH и Si-Si, а также связи характерные для циннаризина и выбрана оптимальная методика осаждения циннариризина (химическое осаждение с нагревом). При этом механизм адсорбции циннаризина по данным ИК - преимущественно физический. Методом УФ-спектроскопии определены возможные прямые переходы с энергией ~ 1.9 эВ и 2.3 эВ для исходного пористого кремния и дополнительный 1.5 эВ – для образца с осажденным циннаризином. По данным ФЛ показано, что осаждение циннаризина может приводить к смещению положения пика ФЛ пористого кремния в сторону больших энергий. Определено оптимальное время адсорбции циннаризина с поверхности макро- и мезопористого кремния – около 30 минут.

Выводы

Показано, что морфология пористого кремния определяет особенности роста и распределения золота при вакуумно-термическом напылении. Для мезопористых структур характерно проникновение металла в приповерхностные области пор, тогда как для более пористых подложек формируется выраженный приповерхностный слой. Нанесение золота приводит к сглаживанию поверхности и ослаблению полос ИК-спектров, что связано с экранированием функциональных групп и изменением состояния приповерхностного слоя.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда № 25-22-00292

Список литературы

[1] A.S. Lenshin, P.V. Seredin, V.M. Kashkarov, D.A. Minakov. Materials Science in Semiconductor Processing, 64, 71 (2017).

Влияние газового соотношения SF_6/O_2 на морфологию структур черного кремния

Е. А. Вячеславова [1✉], **А. В. Уваров** [1], **А. А. Максимова** [1,2], **А. И. Баранов** [1], **А. С. Гудовских** [1,2]

[1] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алферова РАН, Санкт-Петербург, Россия

[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

✉cate.viacheslavova@yandex.ru

Аннотация. Разработан режим криогенного травления на полированной поверхности подложки с вариацией соотношения газов SF_6/O_2 для получения структур черного кремния разной морфологии. Установлены корреляции между газовым составом, плотностью и высотой структур, что позволяет целенаправленно выбирать режим травления под требования конкретных задач.

Ключевые слова: криогенное травление, соотношение газов, черный кремний.

Введение

Криогенное травление в смеси SF_6/O_2 является одним из наиболее воспроизводимых методов формирования черного кремния (*b*-Si). Ключевым параметром, определяющим морфологию формируемых структур, выступает соотношение расходов рабочих газов, задающее баланс между травлением радикалами фтора и пассивацией SiO_xF_y слоем [1].

Плотность и высота структур являются ключевыми параметрами для различных приложений. Для фотоники необходимы низкие структуры высокой плотности, обеспечивающие эффективное подавление отражения и дальнейшую хорошую пассивацию [2]. Для сенсорики, напротив, требуется высокая игольчатая морфология структур с большим аспектным отношением [3].

В настоящей работе исследуется влияние соотношения SF_6/O_2 (от 5/1 до 2/1) на формирование черного кремния.

Эксперимент

Поверхность *b*-Si была получена криогенным травлением (-120 °C) в индуктивно-связанной плазме без использования маски или литографии. Для эксперимента использовались кремниевые подложки *p*-типа проводимости (100) с удельным сопротивлением 12 и 9.6-14.4 Ω·см. Проведена серия экспериментов с вариацией потоков рабочих газов SF_6/O_2 (5/1, 3/1 и 2/1) при давлении в камере 5 мТорр, ИСП мощности 1000 Вт, ВЧ мощности 10 Вт и времени травления 10 минут. Криогенное травление проводилось на установке «Oxford PlasmaLab System 100 ICP 380». Морфология структур черного кремния была изучена с помощью РЭМ на установке Zeiss Supra 25.

Результаты и обсуждение

Изменение соотношения потоков газов SF_6/O_2 кардинально меняет химию плазмы. На подложке формируются гибридные структуры разной плотности и высоты. Параметры процесса травления образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры процесса травления образцов с вариацией соотношения потоков газов

Параметр процесса/Образец	ICP853	IC857	IC932	IC934
Удельное сопротивление, Ω·см	12	12	9.6-14.4	9.6-14.4
Температура процесса, °C	-120	-120	-120	-120
Время травления, мин	10	10+10	10+10	10+10
ИСП мощность, Вт	1000	1000	1000	1000
ВЧ мощность, Вт	10	10	10	10
Соотношение SF_6/O_2	5/1	5/1+2/1	5/1+2/1	5/1+3/1
Высота структур, мкм	~ 8.5	~ 11 и 3	~ 11 и 2.5	~ 13.7 и 3.6

Показано, что при соотношении потоков газов SF_6/O_2=5/1 за время травления 10 минут формируются высокие (~8.5 мкм) и редкие структуры черного кремния (см. рис. 1, а). Наблюдаемая низкая плотность структур обусловлена недостаточным образованием стабильных оксидных кластеров (наномасок SiO_x) на начальной стадии процесса при относительно низком содержании O_2.

Увеличение доли O_2 в газовом соотношение (3/1), приводит к более интенсивному образования оксидных наномасок на начальной стадии и, как следствие, формируется более плотный конечный массив структур. При соотношении 3/1 снижается скорость вертикального травления и формируются структуры высотой около 3.6 мкм (см. рис. 1, б).

Процесса травления при газовом соотношение 2/1, с избытком O_2, приближается к границе перепассивации и снижает скорость травления, формируя структуры высотой примерно 3 мкм.

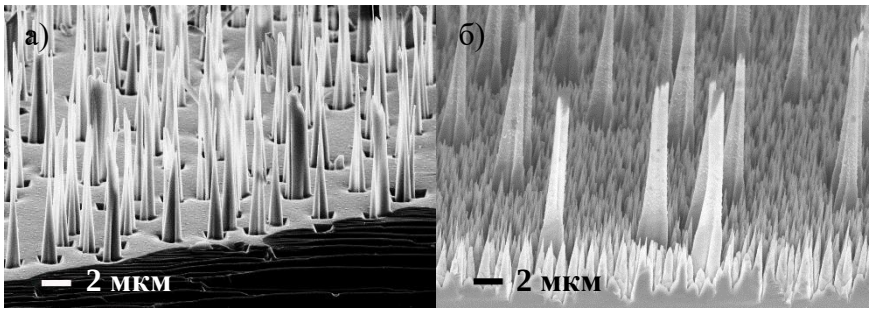


Рис. 1. РЭМ изображение образцов ICP853 (а) и ICP934 (б), изометрия 20°

Заключение

Реализована серия экспериментов с вариацией соотношения потоков газов SF_6/O_2. На подложке формируются гибридные структуры разной плотности и высоты. Соотношение потоков газов SF_6/O_2=5/1 приводит формированию редких и высоких (~8.5 мкм) структур черного кремния. Наблюдаемая низкая плотность структур обусловлена недостаточным образованием оксидных кластеров в начале процесса травления при относительно низком содержании O_2. Процесс травления с увеличенной долей O_2 при соотношение 3/1, приводит к формированию более плотного массива структур, но меньшей высоты (~3.6 мкм). Увеличение доли кислорода до 2/1 приводит к сильному общему пассивированию и формированию структур высотой около 3 мкм.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10275, https://rscf.ru/en/project/24-79-10275/.

Список литературы

[1] R. Dussart, T. Tillocher, P. Lefaucheux, M. Boufnichel. Plasma cryogenic etching of silicon: from the early days to today's advanced technologies // J. Phys. D. Appl. Phys., **47**(12), 123001 (2014).

[2] A. Gudovskikh, A. Baranov, A. Uvarov, E. Vyacheslavova, et al. Interface properties study of black silicon solar cells with front surface *a*-Si:H/*c*-Si heterojunction // J. Phys. D: Appl. Phys., **58**(4), 045101 (2025).

[3] V. Kondratev, E. Vyacheslavova, T. Shugabaev et.al. Si Nanowire-Based Schottky Sensors for Selective Sensing of NH_3 and HCl via Impedance Spectroscopy // J. ACS Appl. Nano Mater., **6**, 11513-11523 (2023).

Влияние морфологии макро- и мезопористого кремния на формирование золотых покрытий при вакуумно-термическом напылении

К. Б. Ким [1✉], **С.С. Черненко** [1], **С.И. Нифталиев** [1], **А.С. Леньшин** [1,2]

[1] Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия;

[2] Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия;

✉kmkseniya@yandex.ru

Аннотация. В работе проведено формирование золотых покрытий на пористом кремнии с различной морфологией пор при вакуумно-термическом напылении. Пористые подложки с разным размером пор получали электрохимическим травлением кремния n-типа (100) при плотностях тока 20 и 50 мА/см². Золото напыляли до толщины около 200 нм при давлении $5 \cdot 10^{-5}$–10^{-4} мм рт. ст. и скорости 3–5 нм/с. На поверхности образцов было подтверждено присутствие золота в концентрации ≈3 ат.%. Напыление снижает шероховатость и энтропию поверхности и ослабляет инфракрасные полосы Si–H и Si–O–Si.

Ключевые слова: пористый кремний; вакуумно-термическое напыление; золото; морфология поверхности; инфракрасная спектроскопия.

Введение

Пористый кремний является перспективным функциональным материалом благодаря развитой внутренней поверхности и возможности управления морфологией порового пространства. Эти особенности определяют его применение в сенсорике, оптоэлектронике, микро- и наноэлектронике, а также в энергетических и каталитических системах. При формировании покрытий на пористом кремнии важную роль играют не только свойства осаждаемого материала, но и структура самой подложки, определяющая характер транспорта вещества и роста слоя.

Вакуумно-термическое напыление представляет собой простой и воспроизводимый метод получения тонких плёнок. Однако при осаждении на пористые подложки процессы зародышеобразования, роста и распределения материала протекают иначе, чем на монокристаллическом кремнии, что связано с развитой поверхностью и возможностью проникновения вещества в поровое пространство. Это может приводить к формированию неоднородных покрытий и изменению морфологии поверхностного слоя.

Цель работы — выявить влияние морфологии пористого кремния на формирование золота при вакуумно-термическом напылении.

Материалы и методы

Пористые структуры получали электрохимическим травлением пластин монокристаллического кремния n-типа с ориентацией (100) в растворе ethanol:HF (1:1) [1]. Мезопористые структуры формировали при плотности тока 20 мА/см², образцы с большей общей пористостью — при 50 мА/см². Для наглядности сравнения второй тип подложек далее условно обозначали как «макропористый» (macro-por-Si), тогда как первый — как мезопористый (meso-por-Si).

Золотые покрытия формировали методом вакуумно-термического напыления (установка ВУП-4), толщина металлической плёнки достигала около 200 нм при скорости осаждения 3–5 нм/с.

Морфологию и распределение золота исследовали методом растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным микроанализом. Топографию поверхности и параметры шероховатости (включая энтропию распределения высот) определяли методом атомно-силовой микроскопии на приборе SOLVER P47 PRO с обработкой данных в программном обеспечении NOVA. Для анализа химических связей использовали инфракрасную Фурье-спектроскопию в диапазоне 4000–400 $см^{-1}$ (спектрометр Vertex 70, Bruker, с приставкой НПВО).

Результаты и обсуждение

По данным растровой электронной микроскопии установлены различия в морфологии гибридных структур. Для meso-por-Si/Au характерна локализация золота как на

поверхности, так и в приповерхностной области пор, что указывает на его частичное проникновение в пористую структуру. Для macro-por-Si/Au наблюдается формирование более выраженного приповерхностного слоя повышенного контраста, распространяющегося на глубину нескольких микрометров. Наличие золота во всех модифицированных образцах подтверждено энергодисперсионным микроанализом.

По данным атомно-силовой микроскопии нанесение золота сопровождается сглаживанием поверхности и снижением морфологической неоднородности. После напыления уменьшаются высота рельефа, шероховатость и энтропия поверхности. Наиболее выраженное сглаживание наблюдается для монокристаллического кремния, тогда как для мезопористого кремния изменения менее значительны, что свидетельствует о частичном сохранении исходной топографии.

Инфракрасная спектроскопия показала уменьшение интенсивности полос, соответствующих связям Si–H, Si–O–Si, Si–Si и гидроксильным группам после нанесения золота. Это указывает на экранирование поверхности металлическим слоем и изменение химического состояния приповерхностной области.

Выводы

Показано, что морфология пористого кремния определяет особенности роста и распределения золота при вакуумно-термическом напылении. Для мезопористых структур характерно проникновение металла в приповерхностные области пор, тогда как для более пористых подложек формируется выраженный приповерхностный слой. Нанесение золота приводит к сглаживанию поверхности и ослаблению полос ИК-спектров, что связано с экранированием функциональных групп и изменением состояния приповерхностного слоя.

Работа выполнена при поддержке РНФ № 25-73-00149

Список литературы

[1] A.S. Lenshin, P.V. Seredin, V.M. Kashkarov, D.A. Minakov. Materials Science in Semiconductor Processing, 64, 71 (2017).

Синтез и исследование композитных материалов на основе азотированного углерода с сульфидами переходных металлов.

Т. А. Моисеева [1]✉, А. Г. Сафонова[1], Т. Н. Мясоедова [1]

[1] Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

✉moisee@sfedu.ru

Аннотация. Получены композитные материалы на основе азотированного углерода, легированного сульфидами переходных металлов, методом гидротермального синтеза. Проведены исследования морфологии, удельной поверхности, суммарного объема пор и рамановской спектроскопии.

Ключевые слова: Сульфид кобальта, сульфид молибдена, азотированный углерод, гидротермальный синтез.

Введение

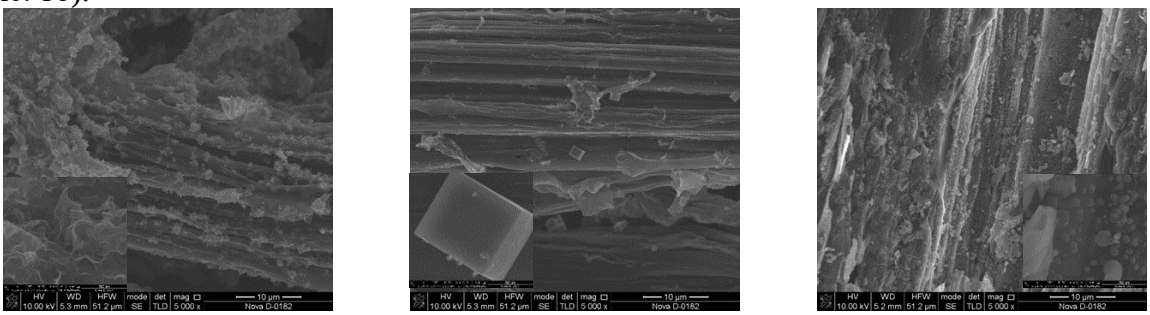
Современные научные исследования направлены на разработку новых материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками, отвечающими возрастающим требованиям к эффективности, долговечности и экологичности. В этом контексте особую актуальность приобретают композитные материалы, сочетающие преимущества различных составляющих. Особый интерес вызывают композиты, в основе которых лежат углеродные структуры, легированные азотом, и сульфиды переходных металлов.

Материалы и методы

Углерод, легированный азотом (NC), получали из жмыха сахарного сорго. Жмых смешивали с раствором мочевины и нагревали в автоклаве при 160 ± 3 °C (6 часов). Полученный материал отфильтровывали, промывали этанолом и бидистиллированной водой с последующей сушкой при 105 ± 3 °C в течение 6 часов. В завершении порошок прокаливали при 800 ± 1 °C в инертной среде (N_2) в течение 2 часов. Для получения композитов (NC_MoS и NC_FeS) применяли гидротермальный метод. Для этого смешивали раствор соли металла (аммоний молибденовокислый 4-водный или железо (II) сернокислое 7-водное), раствор тиомочевины и 0,1 г NC и нагревали в автоклаве при 210 ± 3 °C в течение 20 часов с последующей промывкой этанолом и бидистиллированной водой, затем центрифугировали и сушили при 105 ± 3 °C.

1. Результаты и обсуждение

При изучении морфологии поверхности методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) было установлено, что структура композитов (рис. 1), образована в основном длинными углеродными нитями NC (рис. 1в) с включением частиц металлов разной формы. Кристаллиты сульфида молибдена имеют лепестковую морфологию и равномерно распределены по поверхности нитей в значительном количестве (рис. 1а). Кристаллиты сульфида железа кубической формы присутствуют в небольшом количестве (рис. 1б).



(а) (б) (в)

Рис. 1. СЭМ-изображения образцов: (а) NC_MoS; (б) NC_FeS; (в) NC.

Удельная поверхность NC составляет 2668 м²/г. Для композита NC_FeS наблюдается снижение этого показателя в два раза (1297 м²/г), тогда как для NC_MoS снижение незначительно (~22%, 2087 м²/г), что указывает на формирование высокодисперсных частиц или тонких слоев сульфида молибдена на развитой поверхности NC.

Все полученные образцы являются мезопористыми с размерами пор, преимущественно, от 2 до 20 нм. Наибольшее снижение объема пор (1,6 см³/г) наблюдается для NC_FeS, что может быть связано с заполнением пор сульфидной фазой. Композит NC_MoS сохраняет высокий объем пор (2,6 см³/г), близкий к исходному NC (2,8 см³/г), что согласуется с его высокой удельной поверхностью.

Исследования методом рамановской спектроскопии показало, что все спектры демонстрируют характерные для неупорядоченных (аморфных) углеродных материалов пики (Таблица 1) [1].

Таблица 1

Положение пиков на рамановских спектрах

Образец	D, $см^{-1}$	G, $см^{-1}$	I_D/I_G	Дополнительные пики, $см^{-1}$
NC	1340	1590	0,99	2800 широкий пик; 824
NC_Fe	1340	1600	1,02	2710; 2910; широкий расщепленный пик
NC_Mo	1340	1600	0,98	398; 465

На спектрах образца NC_MoS наблюдаются пики при 398 и 465 $см^{-1}$, которые согласно, литературным данным соответствуют сульфиду молибдена MoS_2 [2,3]. Наличие пиков при 2710 и 2910 $см^{-1}$ в обертонной области у образца NC_FeS может указывать на специфическое взаимодействие железосодержащей фазы с углеродной матрицей, влияющее на ее колебательные свойства.

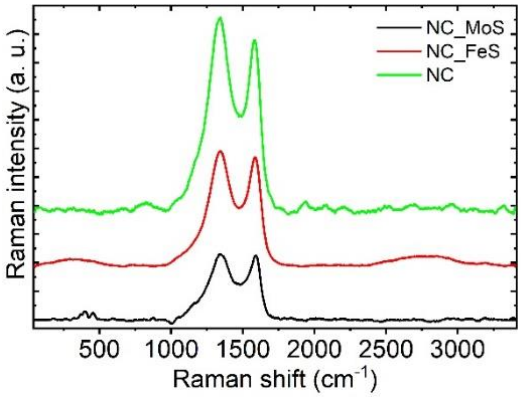


Рис. 2. Рамановские спектры

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что метод гидротермального синтеза является эффективным способом получения композитных материалов на основе NC с различными сульфидами переходных металлов. Композит NC_MoS демонстрирует оптимальное сочетание сохранения текстуры исходной матрицы и формирование целевой сульфидной фазы (MoS_2), что делает его наиболее перспективным для дальнейшего исследования в прикладных задачах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-23-00514 (https://rscf.ru/project/25-23-00514/) в Южном федеральном университете.

Список литературы

[1] A. C. Ferrari, D. M. Basko. Nature Nanotechnology, **8**(4), 235–246 (2013).

[2] H. Li, Q. Zhang, C. C. R. Yap, B. K. Tay, T. H. T. Edwin, A. Olivier, D. Baillargeat. Advanced Functional Materials, **22**(7), 1385-1390 (2012).

[3] A. Molina-Sánchez, L. Wirtz. Physical Review B, **84**(15), 155413 (2011).

ВИМС исследования пленок ниобата лития, полученных методом импульсного лазерного осаждения для нейроморфных применений

З. Е. Вакулов [1]✉, **И. Ю. Богуш** [2], **И. С. Угрюмов** [1], **В. А. Смирнов** [1]

[1] Научно-исследовательская лаборатория «Нейроэлектроника и мемристивные наноматериалы», Таганрог, Россия;

[2] Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Таганрог, Россия

✉zvakulov@sfedu.ru

Аннотация. В работе приведены результаты исследований методом вторично-ионной масс-спектрометрии пленок ниобата лития, полученных с помощью импульсного лазерного осаждения при различном расстоянии мишень-подложка. Показано, что пленки $LiNbO_3$, сформированные при расстоянии мишень-подложка 50 мм характеризуются дефектной структурой и дефицитом лития вызванными высокой кинетической энергией испаряемых частиц и локальным перегревом подложки. При этом увеличение расстояния мишень-подложка до 100 мм создает условия для формирования более однородных и стехиометричных пленок за счет более равномерного потока испаряемых частиц, низкой скорости роста и тепловой релаксации лазерной плазмы.

Ключевые слова: Ниобат лития, импульсное лазерное осаждение, наноматериалы, ВИМС исследования, состав пленок.

Введение

На сегодняшний день одними из наиболее перспективных направлений исследований являются разработки в области нейротехнологий и нейроэлектроники, направленные на использование и развитие природного потенциала мозга, а также эффективную интеграцию биологических нейронных сетей мозга с информационными системами на небиологической основе, как на уровне «аппаратного» обеспечения, так и на уровне взаимодействия с внешними устройствами [1]. Исследования нейроморфных систем остаются актуальными как в теоретическом, так и в прикладном аспектах, в частности с точки зрения разработки биоподобных вычислителей, предназначенных для решения сложных задач обработки многомерной информации в робототехнике. Уникальное сочетание физико-химических свойств ниобата лития ($LiNbO_3$), позволяет использовать его для создания энергоэффективных мемристивных структур для аппаратной реализации синаптической пластичности в нейроморфных системах [2]. Поскольку пленки $LiNbO_3$ представляют собой многокомпонентные оксиды, их физико-химические параметры зависят от точного соблюдения стехиометрического состава и структуры, которые, в свою очередь, определяются условиями их синтеза. Таким образом, целью данной работы является изучение расстояния мишень-подложка при импульсном лазерном осаждении (ИЛО) на состав пленок ниобата лития.

Материалы и методы

Пленки формировались путем лазерной абляции мишени $LiNbO_3$ (Kurt J. Lesker) с использованием лазера COMPex 102 (λ=248 нм) с частотой следования и энергией лазерных импульсов лазерных импульсов 10 Гц и 250 мДж соответственно. Расстояние от мишени до подложки изменялось от 50 мм до 100 мм, а осаждение проводилось на окисленные Si подложки при температуре 600 °C. Состав полученных образцов исследовался методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) с помощью масс спектрометра IMS 7f (Cameca).

1. Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены полученные профили распределения вторичных ионов образцов $LiNbO_3$, сформированных при различном расстоянии мишень-подложка. Идентификация ионов проводилась по характерным массовым числам ^{7}Li, $^{28}Si^{16}O$, ^{93}Nb. В случае образца, полученного при расстоянии мишень-подложка 50 мм толщина пленки $LiNbO_3$ составила ~ 230 нм. В области от 100 нм до 130 нм наблюдается снижение

интенсивности сигнала ^{93}Nb и ^{7}Li, что может быть связано с ростом дефектности пленки и формированием поликристаллической структуры. Следует также отметить, что у данного образца наблюдается нарушение стехиометрического состава $I(Li^+)/I(Nb^+)$, что свидетельствует о дефиците лития в сформированной пленки $LiNbO_3$. Недостаток Li может быть связан с локальным перегревом поверхности образца в процессе напыления за счет высокой кинетической энергии частиц мишени, достигающих поверхности образца в условиях малого расстояния от мишени до подложки.

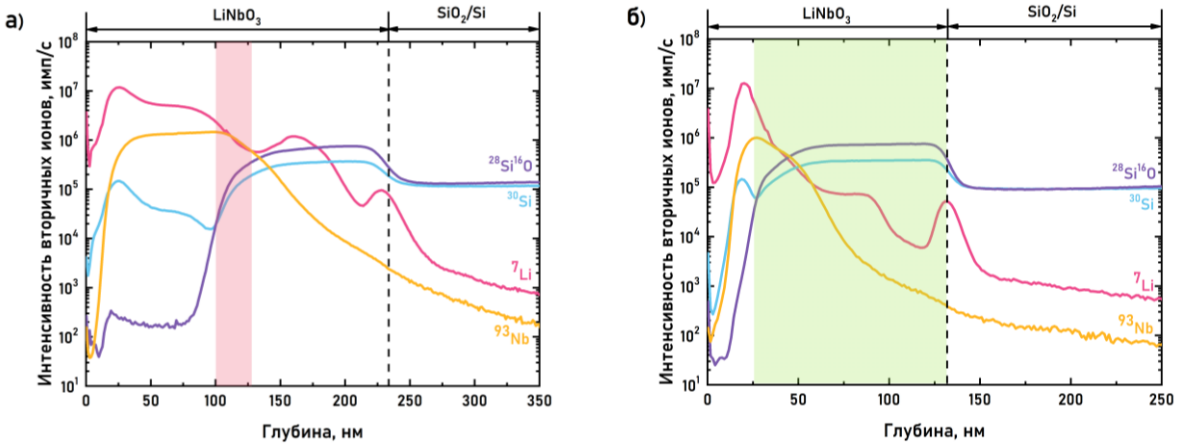


Рис. 1. Результаты ВИМС исследований пленок $LiNbO_3$, полученных методом ИЛО при различном расстоянии от мишени до подложки: 50 мм (а) и 100 мм (б)

При этом образец, сформированный при расстоянии мишень-подложка 100 мм обладают более упорядоченной структурой по сравнению с образцом полученном при расстоянии 50 мм. Установлено, что формирование равномерного по составу слоя $LiNbO_3$ наблюдается на глубине от 25 нм до 135 нм, при этом граница раздела $LiNbO_3$-SiO_2 находится на глубине ~ 140 нм, что характеризует снижение уровня сигнала Nb^+. Стабилизация $^{28}Si^{16}O$ и уменьшение интенсивности ^{7}Li и ^{93}Nb указывают на залегание слоя SiO_2 на глубине более 140 нм. Кроме того, данный образец обладает однородным распределением элементов с σ/μ не превышающим восемьми процентов и соотношением Li:Nb близким к стехиометрическому.

Заключение

Установлено, что расстояние от мишени до подложки при импульсном лазерном осаждении оказывает существенное влияние на структуру и состав формируемых пленок. Показано, что пленки $LiNbO_3$, полученные при расстоянии мишень-подложка 50 мм характеризуются дефектной структурой и дефицитом лития вызванными высокой кинетической энергией испаряемых частиц и локальным перегревом подложки. При этом увеличение расстояния мишень-подложка до 100 мм создает условия для формирования более однородных и стехиометричных пленок за счет более равномерного потока испаряемых частиц, более низкой скорости роста и тепловой релаксации лазерной плазмы. Полученные результаты могут быть использованы для формирования оксидных слоев нейроморфных структур для реализации *in sensing* вычислений.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-10295, https://rscf.ru/project/25-79-10295/ в Южном федеральном университете. ВИМС исследования выполнены с использованием приборной базы ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Список литературы

[1] V. I. Avilov, R. V. Tominov, Z. E. Vakulov, D. J. Rodriguez, N. V. Polupanov, V. A. Smirnov. Nanomaterials, **15**(1), 75 (2025).
[2] C. G. Kibebe, Y. Liu. Front. Electron. Mater., **4**, 1350447 (2024).

Связь магнитных свойств и магнитоупругих взаимодействий в многослойных магнитных структурах

М.А. Лях[1]✉, А.В. Проказников[1], В.А. Папорков[2], Р.В. Селюков[1], В.В. Наумов[1]

[1]ЦНИТ-Ярославль, ОФТИ им. К.А. Валиева, НИЦ "Курчатовский институт"Ярославль, Россия
[2]Ярославский Государственный Университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия
✉e-mail: misha_lyakh.2002@mail.ru

Аннотация. В интегральном магнитооптическом отклике трехслойной структуры Co(6 nm)/Ru(10 nm)/Co(10 nm)/Si (100) выделены вклады различных отдельных слоёв кобальта. Разработан и описан метод, позволяющий на основе анализа закономерностей магнитооптических зависимостей анализировать магнитные свойства отдельных магнитных слоёв трёхслойных систем, выделяя направления магнитной анизотропии.
Ключевые слова: магнитооптический эффект Керра, магнитная анизотропия, магнитоупругие взаимодействия.

Введение

Специальным образом приготовленные многослойные плёночные структуры обладают оптическими, магнитными, электрофизическими и сенсорными свойствами, необходимыми для использования в электронных устройствах нового поколения. Для таких систем характерно проявление на интерфейсах различного рода явлений и эффектов, оказывающих влияние на физические свойства тонких плёнок и всей многослойной системы.

Материалы и методы

Плёнки металлов осаждали на пластины Si (100), покрытые естественным оксидом, методом магнетронного распыления на установке SCR-651 “Tetra” (Alcatel). Для распыления мишеней кобальта и рутения чистотой 99.95% использовался Ar чистотой 99.995%, рабочее давление *Ar* составляло 0.2 Pa.

Развитая в работе методика основана на использовании характерных особенностей угловых зависимостей магнитооптического экваториального эффекта Керра, базирующихся на наличии угла инверсии магнитооптической петли гистерезиса (МОПГ) при определённом угле падения луча света от источника излучения и отсутствии при этом магнитооптического отклика. Соответствующим подбором углов падения и коэффициента k масштабирования петли по вертикали можно выделить сигнал от любой границы трёхслойной системы.

Результаты и обсуждение

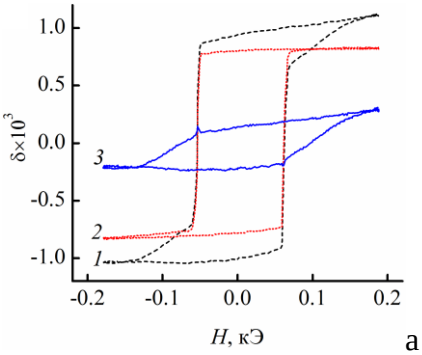
Процесс разделения МОПГ при угле падения 45° согласно развитой в работе методике показан на рисунке 1a. Результат определения осей лёгкого и трудного намагничивания для различных по глубине магнитных слоёв представлен на рисунке 1(b).

Рисунок 1(b) свидетельствует о наличии двух осей легкого намагничивания в нижнем слое кобальта, что позволяет совершить поворот вектора намагничивания вдоль этих осей. Этот результат представляет интерес для стрейнтроники [1] ввиду наличия двух осей легкого намагничивания.

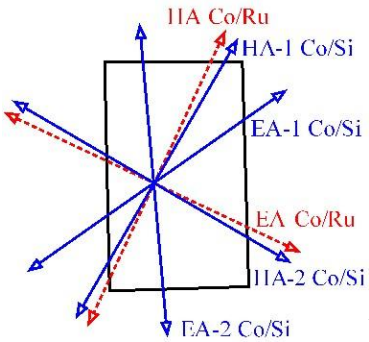
Рассмотрим влияние магнитоупругого взаимодействия для случая кристалла кубической симметрии. На рисунке 2 показана плотность энергии для кубической симметрии, построенная согласно формуле

$$f_{me}^{cubic} = B_1(\varepsilon_1\alpha_1^2 + \varepsilon_2\alpha_2^2 + \varepsilon_3\alpha_3^2) + B_2(\varepsilon_4\alpha_2\alpha_3 + \varepsilon_5\alpha_1\alpha_3 + \varepsilon_6\alpha_1\alpha_2), \quad (1)$$

где ε_i – элементы тензора деформаций, причём $\varepsilon_1/\varepsilon_2/\varepsilon_3=1/2/3$, α_i – направляющие косинусы, B_1 = –9.2 МДж/м^3 и B_2 = 7.7 МДж/м^3 – коэффициенты магнитоупругого взаимодействия. Форма полученной поверхности согласуется с направлениями осей, представленными на рисунке 1(b) для нижнего слоя кобальта.

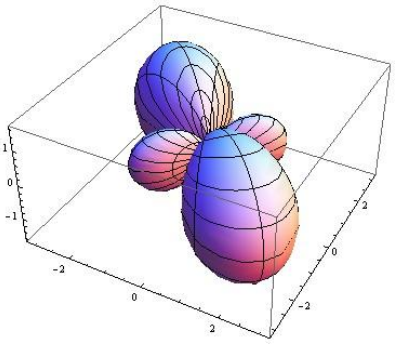


a

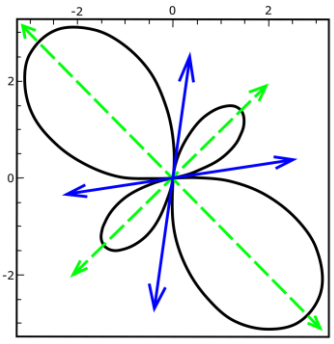


b

Рисунок 1. (*a*) – Петли гистерезиса образца Co(6 nm)/Ru(10 nm)/Co(10 nm)/Si (100) и отдельных его слоёв для угла падения света (*1*): φ = 45°, (*2*): φ = 76°, *k*=0.63, (*3*): разность петель гистерезиса, ориентация образца θ = 0°, (*b*) – Ориентация условных осей легкого (EA – easy axis) и трудного (HA – hard axis) намагничивания в трёхслойной структуре Co/Ru/Co/Si. Штриховыми линиями обозначены оси верхнего магнитного слоя Co(6 nm)/Ru(10 nm) и оси трудного намагничивания (НА) верхнего слоя Co(6 nm)/Ru(10 nm); сплошными линиями обозначены оси в нижнем слое Co(10 nm)/Si, оси трудного намагничивания (ОТН) обозначены НА - 1, 2 в нижнем слое кобальта на кремнии Co(10 nm)/Si, прямоугольником изображено положение образца со структурой.



a



b

Рисунок 2. (a) – Плотность энергии, построенная согласно формуле (1) для кубической симметрии, (b) – сечение структуры в плоскости x-y, изображенной на рисунке 2(a). Синим отмечены оси легкого намагничивания (ОЛН), зелеными штриховыми линиями отмечены оси трудного намагничивания (ОТН).

Заключение

Предлагаемый метод может быть полезен как для детального исследования магнитных свойств многослойных структур, так и для диагностики трехмерных функциональных электронных систем, в частности, памяти, с различными магнитными состояниями в каждом магнитном слое [2].

Благодарности

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» на оборудовании центра коллективного пользования научным оборудованием “Диагностика микро- и наноструктур” Ярославского Государственного Университета им. П.Г. Демидова.

Список литературы

[1] A.A. Bukharaev, A.K. Zvezdin, A.P. Pyatakov, Yu.K. Fetisov. **61**(12), 1175 (2018).
[2] A.V. Prokaznikov, V.A. Paporkov, M.A. Lyakh, R.V. Selyukov, V.V. Naumov. Russ. Microelectronics. **54(**6), 595 (2025).

Управление зонной структурой золь-гель пленок ZnO:Bi:Fe: синергетический эффект адсорбции красителей и воздействия УФ излучения

Н. Д. Якушова[1✉], **А. А. Карманов**[1], **И.А. Губич**[1,2], **И.А. Пронин**[1]
[1] Пензенский государственный университет, Пенза, Россия;
[2] АО «НИИФИ», Пенза, Россия
✉yand93@mail.ru

Аннотация. Разработаны методы и подходы зонной инженерии, обеспечивающие возможность управления оптической шириной запрещенной зоны пленок оксида цинка, содопированных висмутом и железом, за счет синергетического эффекта адсорбции красителей и воздействия жесткого ультрафиолетового излучения. На основании экспериментальных данных растровой электронной микроскопии показано, что все исследуемые образцы обладают развитой иерархической структурой. Установлена взаимосвязь между параметрами зонной структуры пленок, временем воздействия излучения, а также типом адсорбированного красителя: водный раствор метилового оранжевого, бриллиантового зеленого и их смеси.

Ключевые слова: зонная инженерия, золь-гель технология, оксид цинка, содопирование, адсорбция красителей.

Введение

Содопирование широкозонных полупроводниковых металлооксидов, таких как TiO_2, ZnO, SnO_2 и др., двумя и более атомами металлов представляет собой эффективный подход по созданию материалов с заданными параметрами зонной структуры, что соответствует целям и задачам зонной инженерии. В рамках данного научного направления решаются задачи по получению функциональных материалов с заданной шириной запрещенной зоны, положением энергетических уровней допантов и уровня Ферми, а также контролируется их изгиб и другие параметры для конкретных практических приложений [1], включая газовую сенсорику и фотокатализ. В последнем случае зонная инженерия направлена на эффективное использование в фотокаталитическом процессе солнечного излучения для очистки водной и воздушной среды от органических загрязнителей [2]. Содопирование позволяет как создавать энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводников, что уменьшает ее эффективную величину, так и создавать гетероструктуры, эффективно разделяющие фотогенерируемые носители заряда. При этом, в отличии от допирования атомами металлов одного сорта, содопирование существенно расширяет возможности по созданию фотокаталитических материалов. Отдельной малоизученной темой является как возможность многократного использования фотокаталитических материалов, так и вариация их параметров в процессе адсорбции красителя и воздействия УФ излучения, что соответствует цели настоящего исследования.

Материалы и методы

Синтез пленок ZnO, содопированных Fe и Bi, осуществляли в рамках золь-гель технологии, следуя разработанной ранее методике синтеза образцов ZnO:Al:Cu, заменив соответствующие соли металлов [3]. Получены 4 серии образцов: немодифицированный ZnO, а также ZnO:Bi, ZnO:Fe, ZnO:Bi:Fe, содержащие по 3 ат.% каждого из допантов.

Модификацию зонной структуры золь-гель пленок ZnO:Bi:Fe осуществляли, имитируя процесс фотокатализа. Образцы помещали в водные растворы органических красителей объемом 60 мл и воздействовали в течение 120 мин жестким УФ излучением, в качестве источника которого выступала ультрафиолетовая лампа, имеющая линейный спектр с максимумами 185 и 254 нм. При этом в качестве красителей использовали метиловый оранжевый (МО) с концентрацией 40 мкмоль/л, бриллиантовый зеленый (БЗ) с концентрацией 20 мкмоль/л и их смесь в объемном соотношении 1:1.

Все образцы комплексно исследованы современными методами нанодиагностики, включая растровую электронную микроскопию (РЭМ), оптическую спектрофотометрию, энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию и ИК спектроскопию.

1. Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены РЭМ-изображения морфологии поверхности золь-гель пленок ZnO:Bi:Fe, анализ которых показывает, что для образцов характерна иерархическая структура, представляющая собой переплетение ветвей из оксида цинка разного размера. Данный тип структуры пленок является результатом протекания процессов гидролитической поликонденсации в пленкообразующем золе и отвечает формированию высокой удельной площади поверхности образцов [4].

На рисунке 2 представлены результаты оценки оптической ширины запрещенной зоны (E_g) исследуемых образцов в процессе, имитирующем фотокатализ, согласно методу Тауца.

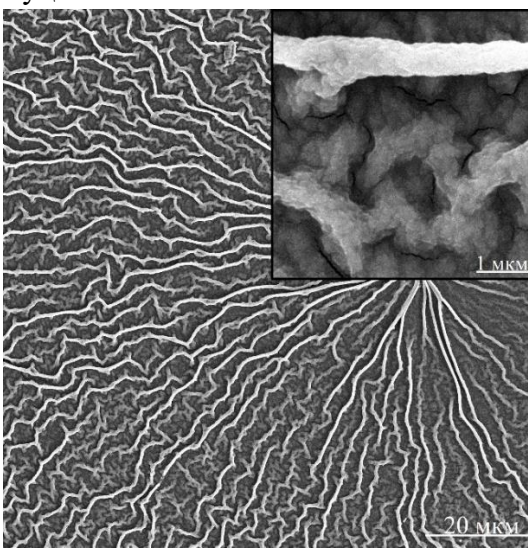


Рис. 1. РЭМ-изображения морфологии поверхности золь-гель пленки ZnO:Bi:Fe

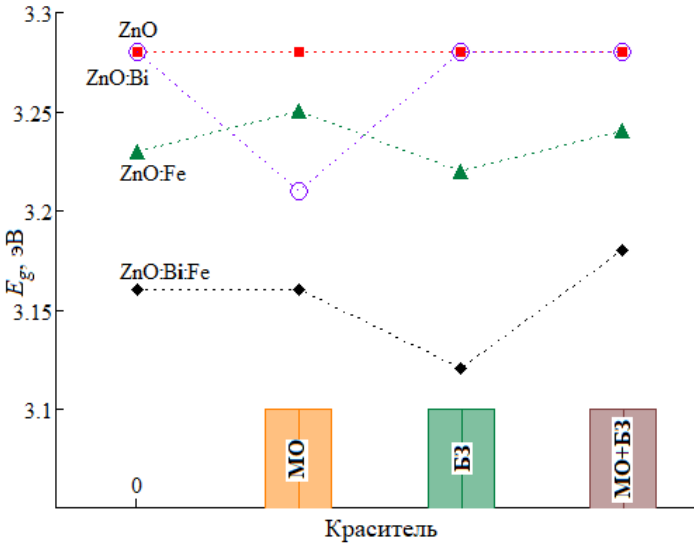


Рис. 2. Трансформация зонной структуры золь-гель пленок ZnO:Bi:Fe

Анализ представленных данных показывает, что для немодифицированного ZnO величина E_g≈3.28 эВ остается постоянной независимо от типа исследуемого красителя. Максимальная вариация параметров зонной структуры характерна для содопированных Fe и Bi образцов при использовании в качестве модельного загрязнителя БЗ, что является следствием их электронно-обменного взаимодействия.

Заключение

Таким образом, в рамках настоящей работы проанализированы новые методы и подходы зонной инженерии, ключевая идея которых заключается в синергетическом эффекте адсорбции красителей и воздействия жесткого ультрафиолетового излучения. Показано, что совместно с содопированием они позволяют гибко управлять зонной структурой пленок ZnO:Bi:Fe, что может использоваться для создания новых высокоэффективных фотокаталитических материалов.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-00338, https://rscf.ru/project/25-79-00338/

Список литературы

[1] A. Kumawat, K. P. Misra, S. Chattopadhyay Mater. Technol., **37**(11), 1595 (2022).
[2] A. Baig, M. Siddique, S. Panchal Catalysts, **15**(2), 100 (2025).
[3] N. D. Yakushova, I. A. Gubich, A. A. Karmanov, A. S. Komolov, A. V. Koroleva, G. Korotcenkov, I. A. Pronin Technologies, **13**(7), 277 (2025).
[4] E. Bouzaiene, F. I. H. Rhouma, A. Haouas, K. Khirouni, J. Dhahri J. Sol-Gel Sci. Technol., **14**(2), 365 (2025)

Визуализация этапов формирования наночастиц аспарагината хитозана методом просвечивающей электронной микроскопии

О. С. Ушакова ✉, **А. Б. Шиповская**
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Российская Федерация;
✉olgakol4ina777@yandex.ru

Аннотация. Методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) визуализированы этапы спонтанного формирования *in situ* наночастиц аспарагината хитозана без и с полисилоксановым оболочечным покрытием. На начальном этапе (1.5 час) зарождаются сферические наноструктуры размером 1.8–3.2 нм на локальных участках макроцепей, последующем (19–20 час) – наночастицы сферической формы со средним диаметром ~20–30 нм. В дальнейшем временном диапазоне (192 час) форма и размерные характеристики обоих типов наночастиц не изменяются, однако обнаруживается склонность безоболочечных наноструктур к агрегации, в то время как оболочечные наночастицы при тех же условиях остаются коллоидно-стабильными.

Ключевые слова: аспарагинат хитозана, самоорганизация, наночастицы, просвечивающая электронная микроскопия.

Введение

Способность протонированных макроцепей полисахарида хитозана (ХТЗ) к самоорганизации при увеличении ионной силы или понижении полярности водной среды способствует формированию наночастиц способом «снизу-вверх» [1]. Инициирующими структурами для таких наномакромолекулярных агрегатов выступают положительно заряженные уплотненные макроклубки солевого ХТЗ. Нами разработан новый подход к получению хитозановых наночастиц (на примере аспарагината ХТЗ), основанный на самоорганизации полимерных макроцепей за счёт внутренних структурно-динамических процессов [2]. Самосборка и компактизация макроклубков происходит *in situ* посредством ассоциации ионов кислотного остатка на протонированных полимерных цепях (противоинной конденсации). Для стабилизации наноструктур использовали тетраглицеролат кремния, формирующий эластичную полисилоксановую сетку вследствие протекания реакций гидролиза и конденсации на темплатных ОН–группах макроцепей. Поскольку надмолекулярная структура таких самосборных наноассоциатов стабилизирована развитой системой меж/внутримолекулярных водородных связей и специфических диполь-дипольных взаимодействий, а золь-гель сетка формируется в поверхностных сегментах макроклубков, мы назвали их оболочечными наночастицами. Однако, кинетика спонтанного образования *in situ* подобных наноструктур, определяющая их основные свойства, морфологию и размерные характеристики, остается не изученной. Цель настоящей работы – визуализация методом ПЭМ этапов формирования без- и оболочечных наночастиц аспарагината CS.

Материалы и методы

В работе использовали ХТЗ со средневязкостной молекулярной массой 200 кДа и степенью деацетилирования 82 мольн.%, D-аспарагиновую кислоту (АспК), тетраглицеролат кремния ($Si(OGly)_4$), бидистиллированную воду (Milli-Q). Водную дисперсию наночастиц аспарагината ХТЗ (ХТЗ·АспК) готовили диспергированием навесок полимера и кислоты в расчётном объеме воды при 50°C. Для получения водной дисперсии оболочечных наночастиц аспарагината CS (ХТЗ·АспК·Si) к исходной системе ХТЗ·АспК добавляли $Si(OGly)_4$. ПЭМ-изображения получали на просвечивающем электронном микроскопе Libra 120 Carl Zeiss (Германия) при ускоряющем напряжении 120 кВ и увеличении $(4–20)\cdot10^3$. ПЭМ-визуализацию проводили с нанодисперсиями ХТЗ·АспК и ХТЗ·АспК·Si, хранившимися в комнатной атмосфере в течение t = 1.5–192 ч.

Результаты и обсуждение

ПЭМ-анализ нестабилизированных безоболочечных наночастиц ХТЗ·АспК, полученных высушиванием капли дисперсии через 19 ч с момента её приготовления, показал наличие двух фракций сферических наноструктур со средним диаметром 25 (основная доля) и 80 нм (~10%). По прошествии 27 ч сферическая форма и средний размер основной фракции наночастиц ХТЗ·АспК сохраняется, а полидисперсность значимо понижается. Вторая размерная фракция не визуализируется, что обусловлено, вероятно, продолжающимся процессом противоионной конденсации и уплотнением наноассоциатов. Во временном диапазоне $t \geq 192$ ч форма и размер наночастиц дисперсии практически не изменяются, но проявляется их склонность к агрегации и при $t \geq 216$ ч начинается фазовое разделение системы с выпадением мелкодисперсного осадка.

Формирование эластичной полисилоксановой сетки на последовательности сегментов приповерхностного слоя макроклубков позволило визуализировать этап зародышеобразования частиц. Так, при $t = 1.5$ ч в системе формируются уплотненные сферические нанообразования размером 1.8–3.2 нм. Сопоставление полученных значений с длиной средней мономерной единицы полисахарида, равной 5.2 Å (0.52 нм), указывает на самоупорядочение локальных участков макромолекулы. Предположительно, зародышеобразование реализуется на масштабе блоба, подвижность звеньев которого существенно превышает подвижность макроцепи. Во времени процесс ионной конденсации и самоорганизации *in situ* затрагивает макромолекулу в целом и через 19–20 ч в системе визуализируются наночастицы ХТЗ·АспК·Si со средним диаметром 25 нм. Аналогичные форма и размер ассоциированных наноструктур наблюдаются и при $t = 20–192$ ч. При этом, водная дисперсия оболочечных частиц кинетически стабильна и не проявляет признаков фазового разделения вплоть до трёх лет хранения. По всей видимости, поверхностное золь-гель покрытие выполняет функцию защитной оболочки и препятствует агрегации оболочечных наночастиц.

Следует отметить, что через 19–27 ч после приготовления дисперсий средний размер образовавшихся безоболочечных и оболочечных наночастиц становится практически одинаковым, варьируясь в диапазоне 20–30 нм. Распределение наноструктур ХТЗ·АспК и ХТЗ·АспК·Si по размерам демонстрирует схожий фракционный состав. Это подтверждает, что наночастицы CS·AspA·Si представляют собой оболочечные наноклубки, а не классические наночастицы типа «ядро-оболочка».

Заключение

Визуализированные методом ПЭМ эффекты молекулярной самосборки протонированных макроцепей ХТЗ соответствуют способу формирования наночастиц «снизу-вверх». Поскольку спонтанное упорядочение представляет собой одну из форм кристаллизации полимерного вещества, наночастицы аспарагината ХТЗ на основе компактизированных *in situ* уплотненных макроклубков можно отнести к классу высокоупорядоченных супрамолекулярных архитектур. Эти структуры формируются на наномасштабе на начальной стадии фазового разделения полимерной системы.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №24-16-00172, https://rscf.ru/project/24-16-00172/.

Список литературы

[1] S. Popa-Nita, P. Alcouffe, C. Rochas, L. David, A. Domard. Continuum of structural organization from chitosan solutions to derived physical forms. Biomacromolecules, **11**(1), 6–12 (2010).

[2] T. N. Lugovitskaya, A. B. Shipovskaya, S. L. Shmakov, X. S. Shipenok. Formation, structure, properties of chitosan Aspartate and metastable state of its solutions for obtaining nanoparticles. Carbohydr. Polym., **277**, 118773 (2022).

Влияние термического отжига на структурные свойства и фазовый переход пленок Cu_xO для оптоэлектронных мемристивных структур

А. В. Саенко✉, Д. А. Дзюба, В. А. Смирнов
Научно-исследовательская лаборатория «Нейроэлектроника и мемристивные наноматериалы», Южный федеральный университет, Таганрог, Россия
✉avsaenko@sfedu.ru

Аннотация. Исследовано влияние температуры отжига на воздухе после осаждения на структурные и оптические свойства, а также фазовый переход пленок оксида меди для применения их в оптоэлектронных мемристивных структурах. Показано, что пленки оксида меди, полученные без отжига и после отжига при 250 ºС, состоят из зерен размером 27±3 и 25±2 нм соответственно, а после отжига при 500 ºС размер зерен возрастает до 52±4 нм. Получено, что после осаждения пленка состоит из кристаллической фазы Cu_2O, которая полностью переходят в фазу CuO после отжига при 500 ºС. Установлено, что ширина запрещенной зоны пленки после осаждения составляет 2,18 эВ, а после отжига при 500 ºС уменьшается до 1,63 эВ.

Ключевые слова: оксид меди, термический отжиг, кристаллическая структура, ширина запрещенной зоны, оптоэлектронный мемристор.

Введение

Мемристивные структуры являются устройствами энергонезависимой резистивной памяти, интерес к которым обусловлен простотой структуры, низким рабочим напряжением, высоким быстродействием и низким энергопотреблением. Оксид меди (Cu_xO) является нетоксичным полупроводником p-типа и имеет две основные фазы Cu_2O и CuO с шириной запрещенной зоны 2,0-2,5 и 1,2-1,7 эВ соответственно, что открывает возможности создания оптоэлектронных мемристивных структур для нейроморфных системах машинного зрения, сочетающих в себе свойства резистивной памяти с фоточувствительностью. Фазовый переход от Cu_2O к CuO возможен при термическом отжиге на воздухе за счет протекания реакции окисления, что может приводить к росту зерен, улучшению оптических и электрофизических свойств и, как следствие, улучшению характеристик резистивного переключения за счет более контролируемого формирования каналов проводимости вдоль границ зерен большего размера [1, 2].

В данной работе проведены исследования влияния температуры отжига после высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления в бескислородной среде при комнатной температуре на структурные и оптические свойства, а также фазовый переход пленок оксида меди для применения их в оптоэлектронных мемристивных структурах.

Материалы и методы

Пленки оксида меди толщиной порядка 90 нм были получены при ВЧ магнетронном распылении мишени Cu_2O на установке VSE-PVD-DESK-PRO. Мощность распыления составляла 75 Вт, а рабочее давление аргона было $5 \cdot 10^{-3}$ мбар. После осаждения пленки отжигались на воздухе в муфельной печи ЭКПС-10 при 250 и 500 ºС в течение 1 часа. Структурные свойства пленок исследовались растровой электронной микроскопией (РЭМ) на установке Nova Nanolab 600. Химический состав пленок определялся рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией (РФЭС) на спектрометре K-Alpha. Коэффициент пропускания пленок измерялся на спектрофотометре UV-VIS Evolution-300.

Результаты и обсуждение

Анализ РЭМ-изображений морфологии поверхности пленок оксида меди, полученных без термического отжига и с отжигом при 250 и 500 °С показал, что все пленки имеют равномерную нанокристаллическую зернистую структуру. Пленки без отжига и после отжига при 250 °С обладают высокой однородностью и состоят из

плотноупакованных зерен схожего размера 27±3 и 25±2 нм соответственно. После отжига при 500 °C размер зерен возрастает до 52±4 нм. Таким образом, термический отжиг способствует росту зерен, что может улучшать стабильность резистивного переключения за счет снижения плотности границ зерен.

Анализ РФЭС-спектров показал наличие на поверхности пленок меди, кислорода и углерода. Смещение пиков Cu2p в область более высоких энергий связи (от 932,4 до 933,7 эВ и от 952,3 до 954,4 эВ) при отжиге 500 °C указывает на переход от фазы Cu_2O к CuO (рис. 1). Асимметричный пик O1s включает компоненту при 530,0 (25 °C) и 529,7 эВ (250 и 500 °C), соответствующую кислороду (O^{2-}) кристаллической решетки, наличие которого необходимо для формирования проводящих каналов на основе кислородных вакансий, и компоненту при 531,2 (25 °C) и 531,5 эВ (250 и 500 °C), связанную с кислородом (O_i), адсорбированным на поверхности, наличие которого может способствовать пассивации поверхности, потенциально повышая стабильность работы мемристивной структуры [2].

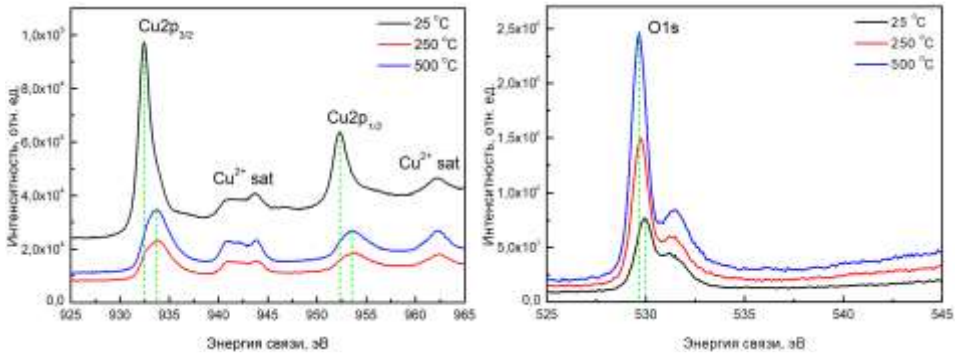


Рис. 1. РФЭС-спектры высокого разрешения уровней меди и кислорода пленок Cu_xO

Анализ спектров пропускания показал, что пленка оксида меди без отжига имеет оптическое поглощение до 550 нм, а после отжига при 500 °C поглощение смещается до 750 нм. Это связано с уменьшением ширины запрещенной зоны и улучшением кристалличности за счет окисления. Установлено, что без отжига ширина запрещенной зоны составляет 2,18 эВ (фаза Cu_2O), а после отжига при 500 °C – 1,63 эВ (фаза CuO). Возможность управления фазовым составом и шириной запрещенной зоны открывают перспективы создания мемристоров с регулируемой спектральной чувствительностью.

Заключение

Исследовано влияние температуры отжига на структурные и оптические свойства, а также фазовый переход пленок оксида меди. Показано, что пленки имеют однородную нанокристаллическую структуру. При этом без отжига и после отжига при 250 °C размер зерен составляет 27±3 и 25±2 нм соответственно, а после отжига при 500 °C возрастает до 52±4 нм. Получено, что без отжига пленки состоят из фазы Cu_2O, которая после отжига при 500 °C полностью переходит в CuO, а ширина запрещенной зоны уменьшается с 2,18 эВ (без отжига) до 1,63 эВ (при 500 °C). Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления мемристивных структур для нейроморфных систем машинного зрения.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00809, https://rscf.ru/project/25-19-00809/ в Южном федеральном университете.

Список литературы

[1] A.V. Saenko, G.E. Bilyk, S.A. Khubezhov, K.A. Kozyumenko, V.A. Smirnov. Applied Physics, **3**, 66 (2025).

[2] R.S. Harisankar, Prabana Jetty, Kannan Udaya Mohanan, Suryanarayana Jammalamadaka. ACS Applied Electronic Materials, **7**, 1622 (2025).

Исследование коррозионных свойств и фоточувствительности фотокатодов $Mo/MoO_x/Ag_{0.6}Cu_{0.4}GaSe_2$

Ракитин В.В.[1,✉], **Кулеметьев И.Д.**[1,2], **Конаков А.О.**[1], **Гапанович М.В.**[1,2,3], **Станчик А.В.**[4]

[1]Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия
[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Факультет фундаментальной физико-химической инженерии, Москва, Россия
[3]ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)», Долгопрудный, Россия
[4]ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь
[✉]domi-tyan@yandex.ru

Аннотация. В данной работе изучены коррозионная стойкость и вольтамперные характеристики фотоэлектрохимических ячеек на основе фотокатодов $Mo/MoO_x/Ag_{0.6}Cu_{0.4}GaSe_2$ в зависимости от условий синтеза тонких пленок $Ag_{0.6}Cu_{0.4}GaSe_2$. Установлено, что для пленок, отожжённых при 550 °C в течение 15 мин в парах селена, наблюдается максимальная величина плотности фототока j_{ph} = 0.306 мА/см^2. Электрохимические методы анализа показали, что плёнки устойчивы в течение 46 часов в ацетатном буферном растворе (pH = 5).

Ключевые слова: фотокатоды, тонкие плёнки, халькопириты, водород, фотоэлектрохимическая ячейка

Введение

В настоящее время активно развивается солнечная энергетика, одной из перспективных областей которой является производство чистого водорода путем разложения воды под действием солнечного света в фотоэлектрохимических ячейках. Для этого процесса необходимы полупроводниковые катоды с шириной запрещенной зоны выше 1.23 эВ, причем оптимальное значение $E_g \approx 1.6 – 1.7$ эВ. Кроме того, такие электроды должны быть коррозионностойкими. Для этой задачи могут быть использованы плёнки на основе тройных систем халькогенидов $CuGaSe_2$ (E_g = 1.68 эВ) и $AgGaSe_2$ (E_g = 1.6–1.8 эВ) [1], а также их твердых растворов $Ag_xCu_{1-x}GaSe_2$ [2]. К их преимуществам относят оптимальную величину ширины запрещенной зоны и относительно невысокую цену по сравнению, например, с соединениями группы $A^{III}B^{V}$. [3]

Материалы и методы

Синтез тонких плёнок проводился в три этапа. На первом этапе методом твердофазного ампульного синтеза были получены интерметаллиды-прекурсоры из простых элементов Cu, Ag и Ga (4N). На второй стадии проводился этап термического испарения серебра и полученных интерметаллидов в вакууме. Далее на третьей стадии, полученные прекурсорные материалы, отжигались при различных температурах T = 550 и 650 °C и различном времени t = 10, 15 и 30 мин при атмосферном давлении в среде аргона. Исследование структуры и фазового состава пленок $Ag_{0.6}Cu_{0.4}GaSe_2$ проводилось методами рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре PANalitical Aeris (излучение Cu-K_α) и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) на спектрометре Bruker Senterra micro-Raman system (излучение 532 нм). Исследование фоточувствительности полученных материалов фотокатодов проводился методом фотоэлектрохимических ячеек (photoelectrochemical cell, PEC) в ацетатном буферном растворе (pH = 5) в условиях прерывистого освещения, близкого к спектру AM1.5. Регистрация потенциала разомкнутой цепи (ПРЦ), а также запись спектров бестокового электрохимического импеданса относительно ПЦР в области частот 0.01 Гц – 100 кГц проводились на приборе

Autolab 302 N. Обработка полученных данных производилась в программном обеспечении Nova 1.11.

Результаты и обсуждение

По результатам рентгенофазового анализа было установлено, что наилучшими условиями отжига является T = 550 °C и t = 15 мин. При этих условиях образуется целевая фаза $Ag_{0.6}Cu_{0.4}GaSe_2$ и практически отсутствуют примесные фазы селенидов меди, серебра и галлия. Результаты дополнительного анализа рамановской спектроскопии подтверждают наличие халькопиритной структуры. По результатам исследования вольтамперных кривых в условиях прерывистого освещения фотокатодов было установлено, что все образцы являются фоточувствительными и имеют *p*-тип темновой проводимости. Было установлено, что максимальное значение фототока наблюдалось для плёнок, полученных при T = 550 °C и t = 15 мин, и составляло j_{ph} = 0.306 мА/см^2 (при E = -0.517 В отн. 3М ХСЭ).

Методом импедансометрии было показано, что на годографах импеданса (Рис. 1) на высоких частотах наблюдаются линейные участки, которые отвечают за активные процессы, происходящие в порах полупроводника. Сопротивление переноса заряда от начала эксперимента сильно увеличивается за 46 часов, затем наблюдается небольшое падение, а после чего рост. По-видимому, за 46 часов от начала эксперимента происходит активное растворение полупроводникового слоя фотокатода, а также растворение оксида молибдена. Далее идут процессы переосаждения и повторного растворения на поверхности фотокатода, которые и вызывают периодические изменения сопротивления переноса заряда.

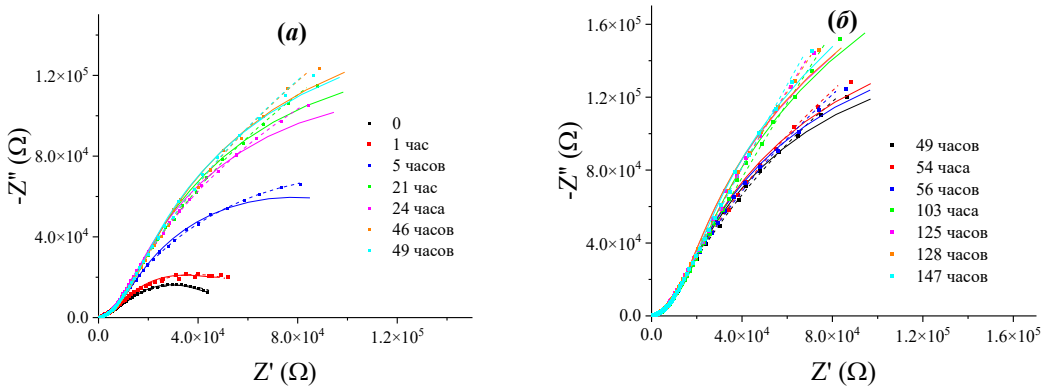


Рис. 1 Диаграммы Найквиста, полученные для электрода Mo/MoO_x/$Ag_{0.6}Cu_{0.4}GaSe_2$ в буферном растворе через разные промежутки времени.

Заключение

Установлено, что для халькопиритных пленок $Ag_{0.6}Cu_{0.4}GaSe_2$ отожжённых при 550 °C в течение 15 мин в парах селена наблюдается максимальная величина плотности фототока j_{ph} = 0.306 мА/см^2 (при E = -0.517 В отн. 3М ХСЭ). Кроме того установлена их коррозионная стойкость в буферном растворе в течение 46 часов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (Соглашение №24-43-10003) и БРФФИ (грант № Т23РНФМ-029).

Список литературы

[1] Turner J.A. Sustainable hydrogen production. Science. 2004;305(5686): 972-4.

[2] R.C. Valderrama, P.J. Sebastian, J.P. Enriquez, S.A. Gamboa. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 88, 145 (2005).

[3] Barreto L., Makihira A., Riahi K. / Int. J. Hydrogen Energy. 2003. V. 28. P. 267.

Доменная структура полимерных сегнетоэлектриков на основе сополимера ВДФ/ТФЭ

Е.Л. Бурьянская [1,2]✉, С.В. Кондрашов С.В.[1], А.С. Осипков А.С.[1], А.Д. Симонов А.Д.[1], Киселев Д.А.[2], М.О. Макеев[1]

[1]Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия;

[2]Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия;

✉ buryanskayael@bmstu.ru

Аннотация. Проведено исследование эволюции доменной структуры пленок сополимера виниленденфторида с тетрафторэтиленом, полученных методом экструзии из расплава, подвергнутых одноосной ориентационной вытяжки с целью увеличения доли полярной β-фазы. Методом силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика исследовано влияние условий контактной поляризации и изотермического отжига на локальные сегнетоэлектрические свойства, рассчитано значения размеров доменов до и после поляризации. Выдвинута гипотеза о том, что в формировании и стабилизации сегнетоэлектрических доменов в полимерах могут принимать участие цепочки аморфной фазы, а также, вероятно, заряды, инжектированные в глубокие ловушки во время поляризации. Такие заряды создают внутреннее поле стабилизирующие доменную структуру материала.

Ключевые слова: пьезоэлектричество, полимеры, новые материалы, силовая микроскопия пьезоотклика

Введение

Сегнетоэлектрические полимеры на основе виниленденфторида – это востребованный и перспективный класс электроактивных материалов нашедший широкое применение в различных областях техники. В том числе для создания датчиков и преобразователей энергии, изделий гибкой электроники, материалов для биоэлектроники и регенеративной медицины [1,2].

Считается, что сегнетоэлектрические материалы на основе ВДФ и его сополимеров относятся к дипольным сегнетоэлектрикам. Согласно [2] домены в полимерных сегнетоэлектриках формируются в процессе поляризации. Основой для формирования доменов являются фибриллярные структуры, возникающие при одноосной вытяжке ПВДФ, содержащие ламели, две грани которых несут электрические заряды противоположных знаков. Исследование доменной структуры полимерных сегнетоэлектриков представляется не тривиальной задачей. Доменные границы в таких материалах обладают менее выраженным контрастом по сравнению с неорганическими сегнето/пьезоэлектриками. Это связано с тем, что структура полукристаллических полимеров не является строго двухфазной с позиции термодинамики, так как аморфная и кристаллическая фаза не имеют четких границ раздела. С этой точки зрения изучение возникновения пьезоэлектрического отклика в полимерах представляется наиболее интересным.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования была выбрана экструдированная пленка сополимера винилиденфторида с тетрафторэтиленом (сополимер ВДФ/ТФЭ) состава 96/4 изготовитель АО РНЦ «Прикладная химия (ГИПХ)». Толщина пленки до ориентации 50 мкм.

Для увеличение пьезоэлектрического отклика пленка была подвергнута одноосной ориентационной вытяжке, с кратностью вытяжки 4. Контактную поляризацию проводили при фиксированном значении напряженности электрического поля E= 200 МВ/м на экспериментальном стенде по методике, описанной в работе [3]. После поляризации образцы были подвергнуты изотермическому отжигу при 80 ºС в течение 1 часа.

Значения макроскопических пьезокоэффициентов d_{33} были измерены квазистатическим методом Берлинкура с помощью d33-метра YE2730A (Sinocera Piezotronics, INC, Китай).

Локальные пьезоэлектрические свойства и изменение доменной структуры исследовались методами сканирующей зондовой микроскопии с помощью микроскопа NTEGRA Prima (NT-MDT SI, Зеленоград, Россия) с использованием кантилеверов с платиновым проводящим покрытием FMG01/Pt (Tipsnano, Таллин, Эстония). Экспериментальные данные обрабатывались в программном обеспечении Gwiddion 2.69 (Czech Metrology Institute, Чехия). Получены топографии поверхности пленок, рассчитаны значения среднеквадратичной шероховатости пленок (RMS). Получены карты сигналов вертикального и латерального пьезоотклика. Характерный размер доменов ξ был найден путем вычисления функции корреляции сигнала вертикального сигнала пьезоотклика в зависимости от координаты r:

$$\langle C(r)\rangle = A \cdot exp\left[-\left({}^{r}/_{\langle\xi\rangle}\right)^{2h}\right], \quad (1)$$

где A – константа, r – расстояние от центрального пика (nm), определенное из изображения автокорреляционной функции, ξ – среднее значение размера домена (nm), h (0<h<1) – параметр [4,5].

1. Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены данные силовой микроскопии пьезоотклика для ориентированных пленок до (рис.1a,d) и после (рис.1b,e) поляризации и после изотермического отжига (рис.1c,f). Для не поляризованного образца характерно наличие разноименно заряженных областей, хаотично распложенных по поверхности пленки. Ориентационная вытяжка и последующая поляризация меняют соотношение сегнетоактивных и несегнетоактивных областей на поверхности полимера.

Размеры сегнетоэлектрических доменов поляризованных пленок оказываются заметно выше размеров доменов исходных пленок (табл.1). Вероятно, зародыши доменов в пленке сополимера ВДФ/ТФЭ имеют размер порядка 50 нм. Полученные данные подтверждают вывод о том, что в ходе поляризации происходит переориентация и рост доменов.

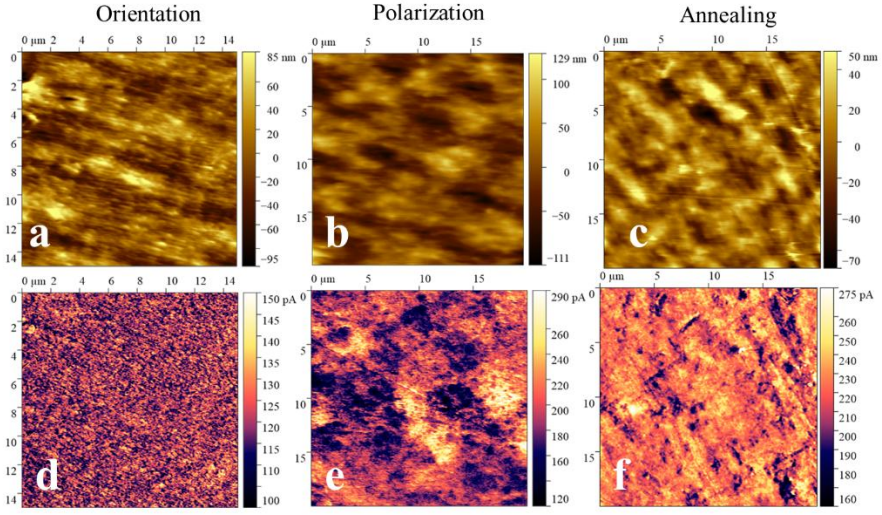


Рис. 1. Данные силовой микроскопии пьезоотклика, где a – топография поверхности ориентированной пленки до поляризации, b – после поляризации, c – после отжига; d, e и f – карты сигналов вертикального пьезоотклика для трех образцов соответственно

Ранее [6] из данных рентгеновской дифракции был рассчитан размер кристаллитов полярной β-фазы ~ 9 нм. Размер доменов, полученный из данных СМП (табл.1.), как для

неполяризованной (50 нм), так и для поляризованной (350 нм) пленок оказывается выше. Исходя из этого, можно сделать предположение о вкладе цепочек аморфной фазы в формирование доменов. Так же нужно отметить, что во время поляризации пленок контактным методом происходит инжекция носителей заряда в глубокие и мелкие ловушки, которые в свою очередь могут как стабилизировать поляризацию (в случае глубоких ловушек), так и приводить к ее релаксации (деполяризации) за счет термического высвобождения носителей из мелких ловушек.

Таблица 1

Пьезоэлектрические свойства пленок ВДФ/ТФЭ

Условия получения	Шероховатость, нм		Размер доменов ξ, нм		d_{33}, пКл/Н
	Поляризация				
	-	+	-	+	
Исходная пленка	30	32	54	76	5
Ориентация	30	42	67	350	24
Отжиг	33	27	58	189	13

После изотермического отжига величина пьезокоэффициентов и размер доменов снижаются. Так как отжиг производился ниже температуры Кюри, то замеченное падение не должно быть связано с переходом в параэлектрическую фазу. Вероятно, при термообработке происходит релаксация структуры полимера, приводящая к рекомбинации заряда, инжектированного в мелкие ловушки.

Заключение

Установлено, что в среднем размер зародышей сегнетоэлектрических доменов в пленках сополимеров винилиденфторида в неполяризованном состоянии составляет 50 нм. После поляризации размер доменов увеличивается до 150–350 нм. Принимая во внимание тот факт, что размер кристаллитов полярной β-фазы составляет порядка 10 нм, был сделан вывод о том, что в образовании сегнетоэлектрического домена могут принимать участие цепочки аморфной фазы, а также, вероятно, заряды, инжектированные в глубокие ловушки. Такие заряды создают внутреннее поле стабилизирующие доменную структуру материала.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (шифр темы FSFN-2025–0004).

Список литературы

[1] V. V. Kochervinskii, O. V. Gradov, and M. A. Gradova, Russ. Chem. Rev. 91(11), (2022).
[2] G. Liu, S. Zhang, W. Jiang, and W. Cao, Mater. Sci. Eng. R Rep. **89**, 1-48 (2015).
[3] S. V. Kondrashov, E. L. Buryanskaya, A. S. Osipkov, V. S. Kirkin, M. V. Butina, P. A. Mikhalev, D. S. Ryzhenko, and M. O. Makeev, *I.*, Int. J. Mol. Sci. **26**(13), 6309 (2025).
[4] D. A. Kiselev, I. K. Bdikin, E. K. Selezneva, K. Bormanis, A. Sternberg, and A. L. Kholkin, J. Phys. D: Appl. Phys. **40**, 7109–7112 (2007).
[5] R. C. Munoz, G. Vidal, M. Mulsow, J. G. Lisoni, C. Arenas, and A. Concha, Phys. Rev. B **62**, 4686–4697 (2000).
[6] V. V. Kochervinskii, E. L. Buryanskaya, A. S. Osipkov, D. S. Ryzhenko, D. A. Kiselev, B. V. Lokshin, and G. A. Kirakosyan, Polymers **16**(2), 233 (2024).

Атомно-слоевое осаждение пленок оксида тантала для применения в резистивной памяти ReRAM

Е. А. Ганыкина [1,2]✉, **С. С. Зюзин**[1,2], **А. А. Резванов**[1,2], **А. А. Резник**[1,2], **А. К. Козлов**[1,2], **А. М. Раводина**[1,2]

[1]МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия;
[2]АО «НИИМЭ», г. Зеленоград, Россия
✉eganykina@niime.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается оптимизация процесса атомно-слоевого осаждения пленок оксида тантала, а также дальнейшее применение данных пленок для создания элементов хранения энергонезависимой резистивной памяти ReRAM.

Ключевые слова: Атомно-слоевое осаждение, резистивная память, элемент хранения, оксид тантала.

Введение

Одним из наиболее актуальных направлений развития микро- и наноэлектроники является исследование альтернативных видов энергонезависимой памяти, основанных на новых физических принципах (ReRAM, PCRAM, FeRAM, MRAM). Однако, именно резистивная память ReRAM вызывает наибольший интерес благодаря простой структуре, низкому энергопотреблению, высокой скорости работы, а также низким напряжениям переключения [1]. В данной работе рассматриваются элементы хранения на основе оксида тантала ввиду возможности интеграции с КМОП-технологией [2].

Для создания матриц резистивной памяти актуальной является технология Vertical-ReRAM [3], требующая высокой конформности осаждаемых слоев, что можно достичь с помощью метода атомно-слоевоего осаждения (ALD), базирующегося на использовании последовательных поверхностных реакций, имеющих механизм самоограничения. АСО процесс состоит в общем случае из повторяющихся циклов химических реакций двух прекурсоров – металлоорганического (носителя целевого элемента вещества) и окислителя/восстановителя (пары воды, кислород, водород и др.) –, адсорбированных на подложку последовательно [4].

Результаты и обсуждение

В рамках данного исследования был разработан и оптимизирован процесс плазменного атомно-слоевого осаждения (PEALD) пленок оксида тантала. В качестве прекурсора выбран этоксид тантала $Ta(OC_2H_5)_5$, окислителем служила плазма кислорода с добавкой аргона (1 л/ч) для стимуляции образования вакансий кислорода и повышения стабильности плазмы. Экспериментально было установлено, что увеличение мощности плазмы выше 250 Вт приводит к резкому падению скорости роста (с 0.76 до ~0.4 Å/цикл) и росту неравномерности толщины до >10% из-за повышенной асимметрии плазмы и поверхностной пассивации. Повышение давления на шаге подачи прекурсора с 8 до 10.6 Па увеличило скорость роста с 0.51 до 1.03 Å/цикл и снизило неравномерность с 17.14% до 1.6% за счет улучшенной хемосорбции. С помощью атомно-силового микроскопа проанализирована шероховатость RMS 0.13–0.26 нм, что подтверждает сплошной рост без островковой фазы. ИК-Фурье спектроскопия выявила пик 640 $см^{-1}$ (Ta≡O), характерный для аморфного оксида с вакансиями кислорода, что перспективно для ReRAM. РФЭС подтвердила нестехиометричность слоев с отношением O/Ta ~2.31 (выше стехиометрического 2.5) и концентрацией вакансий кислорода около 4.5 ат.%.

Были исследованы макеты элементов хранения на основе Ta_2O_5 с верхним электродом Pt и дополнительным слоем Ta (5 нм) для вытягивания кислорода, что позволило отказаться от предварительной формовки. Структуры $Pt/Ta/Ta_2O_5/TiN$ и $Pt/Ta/Ta_2O_5/TaN$ продемонстрировали биполярное резистивное переключение. Наилучшие результаты получены для образцов с нижним электродом TaN: напряжение SET ~0.75 В, RESET ~0.8–1.2 В, отношение сопротивлений HRS/LRS (окно памяти) до 4.6, что в несколько раз выше,

чем без слоя Ta. Структуры выдерживают более 1.2×10^6 циклов переключения в импульсном режиме при амплитудах до 2 В. Наблюдалось сужение окна памяти в первых циклах с последующей стабилизацией. Образцы с TiN демонстрировали меньшее число циклов (до 3×10^4). Пробой структур происходил либо плавно (сужение гистерезиса за 5–10 циклов), либо резко. РФЭС и ПЭМ показали наличие аморфного интерфейсного слоя ~3 нм между Ta_2O_5 и TaN, сегрегацию кислорода на границе и присутствие состояний Ta^{4+}, Ta^{3+}, Ta^{2+} в объеме пленки, что подтверждает механизм филаментарного переключения через кислородные вакансии.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда №23-91-06003, https://rscf.ru/project/23-91-06003/.

Список литературы

[1] Красников, Г. Я. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти / Г. Я. Красников, Н. А. Зайцев, А. Г. Красников // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 4(177). – С. 60-64. – EDN RRMEYN.

[2] Resistive random access memory: introduction to device mechanism, materials and application to neuromorphic computing / Zahoor F. [et al.] // Discover Nano. – 2023. – Т. 18. – №. 1. – p.36. DOI: 10.1186/s11671-023-03775-y.

[3] Realization of vertical resistive memory (VRRAM) using cost effective 3D process / Baek I.G, Park C.J, Ju H. [et al.] // 2011 International Electron Devices Meeting (IEDM). Washington, DC, USA, 2011, pp. 31.8.1-31.8.4. DOI: 10.1109/IEDM.2011.6131654.

[4] Seidel T.E. Atomic layer deposition // Handbook of semiconductor manufacturing technology. – CRC Press, 2017. – С. 14-1–14-37. DOI: 10.1201/9781420017663-14. ISBN: 9781315213934

КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ CsPbBr3 И CsPbI3, СФОРМИРОВАННЫХ ВО ФТОРФОСФАТНОМ СТЕКЛЕ

Н. А. Петухов [1]✉, **М. Н. Батаев** [1], **И. В. Игнатьев** [1], **М. С. Кузнецова** [1]

[1] СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия;

✉st107189@student.spbu.ru

Аннотация. В работе экспериментально исследованы квантово-размерные (QD) состояния электрон-дырочных пар в нанокристаллах (НК) $CsPbBr_3$ и $CsPbI_3$, выращенных в матрице фторофосфатного стекла. В спектрах возбуждения фотолюминесценции (PLE) выше основного оптического перехода наблюдается несколько квантово-размерных состояний. Предложена простая модель квантово-размерных состояний для электронов и дырок в нанокристаллах, которая позволяет идентифицировать симметрию состояний, наблюдаемых в эксперименте. Модель также позволяет связать энергию оптического перехода с радиусом нанокристалла R. Установлено, что приближение раздельного квантования состояний электрона и дырки применимо для малых нанокристаллов $CsPbBr_3$ с $R < 5$ нм. При больших R кулоновское взаимодействие электронов и дырок (экситонный эффект) приводит к сходимости квантово-размерных уровней в этих нанокристаллах. В случае нанокристаллов $CsPbI_3$ такой эффект не наблюдается вплоть до исследованных экспериментально радиусов $R = 7.7$ нм. Эти результаты указывают на значительно больший экситонный радиус Бора в кристалле $CsPbI_3$ по сравнению с кристаллом $CsPbBr_3$.

Ключевые слова: перовскиты, нанокристаллы, фотолюминесценция.

Введение

Перовскитные нанокристаллы активно изучаются в последние годы благодаря их уникальным оптическим свойствам, высокому квантовому выходу и тонкой настройке длины волны излучения, что открывает возможности для их применения в современных оптических устройствах [1]. Оптические и оптоэлектронные свойства галогенидных нанокристаллов зависят как от химического состава, так и от размера нанокристаллов. Поэтому, определение размеров нанокристаллов путем исследования их оптических характеристик становится важной и актуальной задачей. Моделирование квантово-размерных уровней в спектрах фотолюминесценции возбуждения позволяет определить средний размер нанокристаллов в ансамбле, что значительно облегчает процесс характеризации образца.

Материалы и методы

Образцы перовскитных нанокристаллов $CsPbX_3$ (X = Cl, Br, I) были выращены с помощью метода закалки расплава, методика синтеза описана в работе [2]. Этот метод позволяет контролировать размер и состав НК, что делает возможной настройку длины волны излучения в выращенных образцах. Спектры возбуждения фотолюминесценции были измерены при температуре $T = 12\,K$ в гелиевом криостате замкнутого цикла. В качестве перестраиваемого источника света использовался свет белой лампы, пропущенный через монохроматор. Для НК $CsPbBr_3$ спектры ФЛ регистрировались в диапазоне энергий возбуждения от 2,36 эВ до 3,23 эВ, а для нанокристаллов $CsPbI_3$ — в диапазоне от 1,67 эВ до 3,15 эВ.

Результаты и обсуждение

Для теоретического моделирования наблюдаемого спектра возбуждения фотолюминесценции мы провели квантово-механический расчет энергий размерного квантования состояний электрона и дырки в сферически симметричном НК радиуса R с бесконечными потенциальными стенками. При этом мы используем приближение сильного размерного квантования, т.е., раздельного квантования движения электрона и дырки, поскольку расстояние между квантово-размерными уровнями в изучаемых НК значительно больше энергии связи экситона. Исходя из рассматриваемой модели мы получили

выражение для оптических переходов между квантово-размерными состояниями электрона и дырки:

$$E_{opt} = E_g^* + \frac{\hbar^2 k_{n,l}^2}{2m_e^* R^2} + \frac{\hbar^2 k_{n,l}^2}{2m_h^* R^2} \quad (1)$$

Где m_e^*, m_h^* - эффективные массы электрона и дырки соответственно, R – радиус НК, $k_{n,l}$ – корни сферической функции Бесселя. Энергия $E_g^* = E_g - E_C$, где E_g – ширина запрещенной зоны, E_C – энергия кулоновской связи электрона и дырки в НК (экситонный эффект).

Сферическая симметрия НК и близость эффективных масс электрона и дырки накладывают ограничения (правила отбора) на возможные оптические переходы. Мы считаем, что наиболее интенсивные переходы, наблюдаемые в спектрах возбуждения фотолюминесценции обусловлены переходами 1s ↔ 1s, 1p ↔ 1p, 1d ↔ 1d и так далее. Именно такая интерпретация переходов приведена на Рис.1.

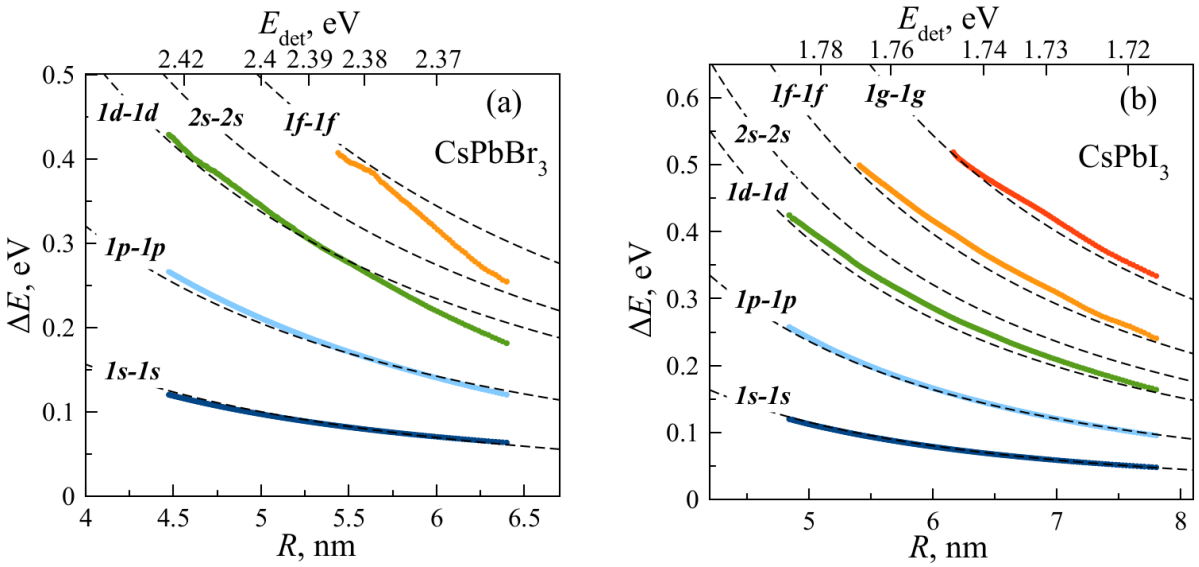


Рис.1 Энергия оптических переходов между квантово-размерными состояниями электронов и дырок для (a) НК $CsPbBr_3$ и (b) НК $CsPbI_3$. Экспериментальные данные показаны цветными кривыми, а результаты моделирования – пунктирными кривыми.

Заключение

На основе анализа спектров возбуждения фотолюминесценции было проведено моделирование квантово-размерных уровней в НК $CsPbBr_3$ и $CsPbI_3$, выращенных в матрице фторофосфатного стекла. Была построена модель, в которой НК рассматривается как сферически симметричная квантовая точка с бесконечными стенками и на ее основе получены правила отбора для оптических переходов и выражение (1) для энергии этих переходов.

Благодарности

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках гранта №125022803069-4.

Рост образцов производился в рамках проекта РНФ №26-13-00292.

Список литературы

[1] Duan, Y., *et. all*, Laser Photonics Rev., **19**(9), 2402245 (2025).

[2] Kolobkova, E. V., *et. all*, J. Non-Cryst. Solids, **563**, 120811 (2021).

Усиление фотолюминесценции однослойных углеродных нанотрубок на метаповерхности

Ф. М. Максимов [1,2✉], **А. Р. Вильданова** [3], **М. И. Петров** [4], **А. И. Чернов** [1,2]

[1] Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

[2] Russian Quantum Center, Moscow, Russia

[3] Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

[4] ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

✉maksimov.fm@phystech.edu

Аннотация. В работе представлена диэлектрическая метаповерхность, предназначенная для усиления оптических свойств однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ). Структура представляет собой массив протравленных цилиндров в кремниевой подложке с осаждёнными функционализированными углеродными нанотрубками (6,5). Для определения совпадения положений резонансов метаповерхности с энергиями переходов ОУНТ используются спектроскопия отражения и фотолюминесценции. Показано появление узких резонансных пиков при малой апертуре сбора, что указывает на реализацию связанных состояний в континууме в созданных поверхностях. Предложенный подход нанесения ОУНТ на метаповерхности перспективен для усиления накачки и излучения источников одиночных фотонов на основе функционализированных углеродных нанотрубок.

Ключевые слова: нанотрубки, фотолюминесценция, связанные состояния в континууме

Введение

Углеродные нанотрубки рассматриваются как перспективные нано излучатели в ближнем инфракрасном диапазоне, включая источники одиночных фотонов. Однако, существует необходимость в увеличении эффективности накачки и сбора излучения [1]. Диэлектрические метаповерхности позволяют усиливать локальное поле и управлять направленностью излучения при малых оптических потерях, а режимы, связанные с реализацией связанных состояний в континууме, обеспечивают высокодобротные резонансы и могут приводить к существенному увеличению интенсивности сигнала [2]. В этой работе исследуется диэлектрическая метаповерхность, предназначенная для усиления фотолюминесценции углеродных нанотрубок, выполнена экспериментальная характеризация резонансных состояний и продемонстрировано проявление связанных состояний в континууме.

Материалы и методы

Метаповерхность изготавливалась на кремниевой подложке методом литографии в виде периодического массива цилиндрических отверстий заданного диаметра и шага. Для получения эмиттеров использовались полупроводниковые ОУНТ хиральности (6,5), подвергнутые химической функционализации диазониевыми солями для создания sp^3-дефектов. Оптическая характеризация метаповерхности проводилась при комнатной температуре: в видимом диапазоне измерялись спектры отражения для сравнения с расчётами резонансных мод, в ближнем инфракрасном диапазоне регистрировалась фотолюминесценция нанотрубок при различных числовых апертурах сбора излучения.

Результаты и обсуждение

Спектры отражения, измеренные в видимом диапазоне для двух поляризаций (TE и TM), демонстрируют узкие резонансные особенности, хорошо согласующиеся с расчётными спектрами, а также ветви с усилением отражения вблизи нормали, соответствующие связанным состояниям в континууме (рис. 1). На фоне характерного широкого спектра

фотолюминесценции углеродных нанотрубок появляются узкие пики, причём при уменьшении числовой апертуры сбора отчётливо проявляется узкая линия, совпадающая по положению с резонансом метаповерхности, обусловленным связанным состоянием в континууме в данном спектральном диапазоне (рис. 2). Притом сигнал от нанотрубок усиливается на метаповерхности относительно кремниевой подложки. Данная зависимость спектров фотолюминесценции от апертуры, совместно с спектрами отражения, указывает на локальное усиление поля вблизи связанных состояний в континууме.

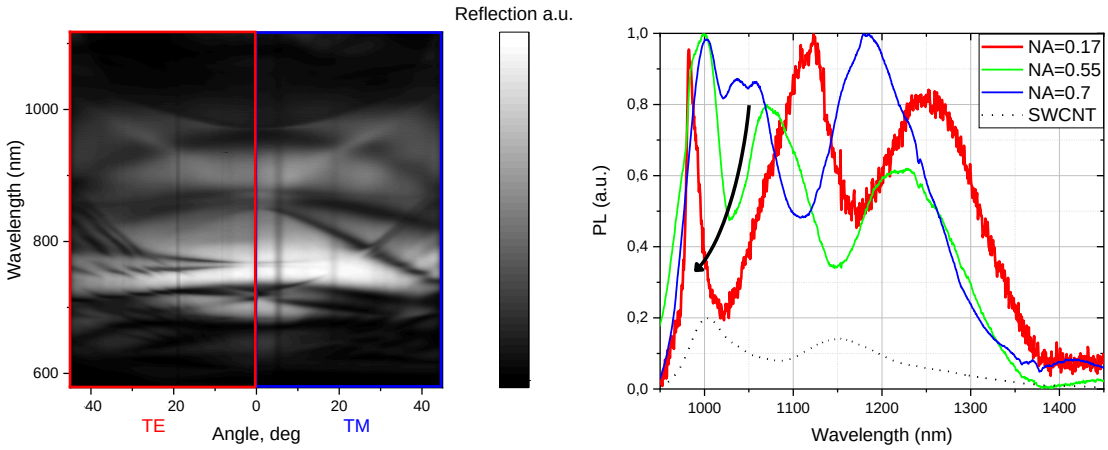


Рис. 1. Спектры отражения диэлектрической метаповерхности в поляризациях TE и TM в сравнении с расчётными данными.

Рис. 2. Спектры фотолюминесценции углеродных нанотрубок, осаждённых на метаповерхность, при различных числовых апертурах возбуждения и сбора излучения, стрелкой указано сужение пика ФЛ.

Заключение

В работе продемонстрирована диэлектрическая метаповерхность на кремниевой подложке, обеспечивающая усиление фотолюминесценции функционализированных углеродных нанотрубок хиральности (6,5). Анализ спектров отражения и фотолюминесценции продемонстрировал появление узких резонансных линий и их выраженную зависимость от апертуры сбора, что интерпретируется как проявление связанных состояний в континууме и связанного с ними локального усиления поля. Полученные результаты указывают на перспективность таких метаповерхностей для повышения эффективности накачки и сбора излучения в источниках одиночных фотонов на основе углеродных нанотрубок.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-43-02217).

Список литературы

[1] Chang Y. R. et al. Quantum defects in carbon nanotubes as single-photon sources // Communications Materials. – 2026. – Т. 7. – № 1. – С. 55.

[2] Koshelev K., Kivshar Y., Bogdanov A. Engineering with bound states in the continuum // Optics and Photonics News. – 2020. – Т. 31. – № 1. – С. 38–45..

Влияние материала нитевидного нанокристалла на локализацию мод и потери в гибридных структурах Ag/WS_2

М. В. Левичев [1,2]✉, **А. Кузнецов** [1,2], **А. В. Налитов** [1], **А. Д. Большаков** [1,2]
[1] МФТИ, Физтех, Москва, Россия;
[2] Алфёровский университет, Санкт-Петербург, Россия
✉mvlevichev@inbox.ru

Аннотация. Гибридные экситон-плазмон-поляритонные системы, состоящие из серебряной подложки, монослоя дисульфида вольфрама (WS_2) и полупроводникового нитевидного нанокристалла (ННК), представляют интерес в качестве платформы для создания когерентных наноразмерных источников излучения. Данная работа посвящена сравнительному анализу влияния ННК фосфида галлия (GaP), нитрида галлия (GaN), кремния (Si) и арсенида галлия (GaAs) на условия реализации одномодового режима в системе, потерь на распространение на длине волны экситона (615 нм) и перекрытия тангенциальной компоненты электрического поля с монослоем. Показано, что GaP оптимальную конфигурацию системы – малые потери при распространении и высокое перекрытие поля, тогда как Si и GaAs характеризуются большим перекрытием при чрезмерно высоких потерях.

Ключевые слова: сильная связь, экситон-поляритоны, полупроводниковые нитевидные нанокристаллы, дисульфид вольфрама, поверхностные плазмон-поляритоны.

Введение

Повышение степени интеграции фотонных компонентов требует использования электромагнитных мод, сохраняющих сильную локализацию на наноуровне при достаточно низких потерях. Гибридные структуры, сочетающие монослои дихалькогенидов переходных металлов (ДХПМ) с плазмонными и диэлектрическими элементами, представляют интерес, поскольку обеспечивают сильную связь между экситоном и волноводной модой поверхностного плазмон-поляритона [1]. В этом контексте материал ННК становится ключевым параметром для дизайна, поскольку он одновременно определяет локализацию поля, одномодовый режим и затухание.

Поскольку сила взаимодействия света с веществом в гибридных системах ННК/ДХПМ в первую очередь определяется перекрытием поля с монослоем, особый интерес представляют материалы, способные обеспечивать эффективное распространение волноводной моды и локализацию в ближнем поле. Ранее уже было показано, что платформы на основе GaP ННК обеспечивают эффективное распространение волноводных мод, оптическое взаимодействие между ННК и управление направленностью излучения в гибридных структурах [2]. В настоящей работе обобщенная задача оптимизации материала ННК решается путем сравнения GaP, GaN, Si и GaAs с целью выявления наиболее перспективной платформы для экспериментальной реализации.

Материалы и методы

Исследуемая структура состоит из серебряной подложки, монослоя WS_2 и полупроводникового ННК, поддерживающего гибридную волноводную моду. Численное моделирование для GaP, GaN, Si и GaAs на длине волны экситона λ_{exc} = 615 нм выполнено в ANSYS Lumerical. Для каждого материала радиус ННК варьировался в пределах реализации одномодового режима, а гибридная собственная мода анализировалась по ее комплексному эффективному показателю преломления и пространственному распределению поля. Потери при распространении определялись по мнимой части эффективного показателя преломления, тогда как перекрытие тангенциальной компоненты электрического поля с монослоем использовалось в качестве меры эффективности связи. Оптимальная конфигурация определялась балансом между малыми модовыми потерями и сильным перекрытием поля, поскольку оба фактора являются существенными для достижения сильной связи в экситон-плазмон-поляритонах.

1. Результаты и обсуждение

Для Si и GaAs ННК оптимальные радиусы, определенные из условия минимума потерь при распространении, составляют 26 нм и 31 нм соответственно – оба значения меньше, чем для GaP (≈37 нм). Для GaP оптимальный радиус составляет около 37 нм. Напротив, выраженный оптимум для GaN не обнаружен: в пределах одномодового режима потери при распространении остаются почти постоянными как функция радиуса.

Несмотря на меньшие оптимальные радиусы, Si и GaAs ННК демонстрируют более высокие потери при распространении на $\lambda_{exc} = 615$ нм по сравнению с GaP и GaN, что делает их менее привлекательными для рассматриваемой гибридной поляритонной системы. Наибольшее перекрытие поля достигается для Si ННК (≈2,8 %), далее следуют GaAs (≈2,2 %). Однако эти значения сопровождаются высоким модовым затуханием и потому не дают практического преимущества.

Среди кандидатов с относительно низкими потерями GaP превосходит GaN по перекрытию поля. Перекрытие тангенциальной компоненты электрического поля достигает ≈1,4 % для GaP и лишь ≈0,3 % для GaN – что примерно в четыре раза больше. Таким образом, GaP обеспечивает наилучший баланс между локализацией моды в области монослоя и приемлемыми потерями при распространении, тогда как GaN ограничен слабым перекрытием поля, несмотря на относительно низкие потери.

Заключение

Проведенный сравнительный численный анализ полупроводниковых ННК в составе гибридной платформы Ag/WS_2 показывает, что наиболее перспективным материалом для приложений в режиме сильной связи является GaP. Si и GaAs ННК обеспечивают более сильное перекрытие поля, однако характеризуются чрезмерно высокими потерями при распространении на длине волны экситона, тогда как GaN не демонстрирует выраженного оптимального радиуса и по величине перекрытия уступает GaP. Полученные результаты позволяют рассматривать ННК на основе GaP как наиболее сбалансированный выбор для проектирования гибридных экситон-плазмон-поляритонных устройств.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-12-00135).

Список литературы

[1] J. Fang, K. Yao, M. Wang, Z. Yu, T. Zhang, T. Jiang, S. Huang, B.A. Korgel, M. Terrones, A. Alù, Y. Zheng. Nano Lett., 23 (21), 9803 (2023).

[2] M.A. Anikina, P. Roy, S.A. Kadinskaya, A. Kuznetsov, V.M. Kondratev, A.D. Bolshakov. Nanomaterials, 13, 56 (2023).

Исследование особенностей спектральных характеристик фотодетекторов УФ-диапазона на основе эпитаксиальных слоёв GaN

О. А. Синицкая [1✉], **К. Ю. Шубина** [1], **А. М. Мизеров** [1], **А. В. Уваров** [1], **Е. В. Никитина** [1,2]

[1] Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия;

[2] Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

✉olesia-sova@mail.ru

Аннотация. В работе представлены ультрафиолетовые фотодетекторы типа металл-полупроводник-металл на основе эпитаксиальных слоёв GaN, выращенных на темплейтах GaN/c-Al_2O_3. Обнаружено, что детекторы на основе одного из образцов имеют узкополосную спектральную чувствительность. Исследования эпитаксиальных слоёв GaN показали, что такая форма спектральной характеристики, вероятно, связана с особенностями поверхности эпитаксиального слоя GaN или интерфейса GaN/темплейт.

Ключевые слова: GaN, ультрафиолетовый диапазон, узкополосный фотодетектор, металл-полупроводник-металл

Введение

На сегодняшний день растёт спрос на фотодетекторы (ФД) ультрафиолетового (УФ) диапазона, в частности с высокоселективной спектральной чувствительностью, которые применяются для детектирования пламени, в системах оптической связи и т.д. Эпитаксиальные слои GaN являются перспективными материалами для создания таких устройств благодаря своим уникальным свойствам, включая ширину запрещённой зоны (3.4 эВ), высокую подвижность электронов и превосходную термическую и химическую стабильность. В данной работе на основе эпитаксиальных слоёв GaN были изготовлены УФ ФД типа металл-полупроводник-металл (МПМ), исследованы их характеристики и проанализированы свойства эпитаксиальных слоев.

Материалы и методы

Слои GaN толщиной ~400 нм были синтезированы методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) с плазменной активацией азота на установке Veeco GEN 200 на темплейтах GaN/c-Al_2O_3, предварительно выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Характеризация образцов проводилась с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ), рентгеновской дифрактометрии (XRD) и спектроскопии комбинационного рассеяния света, измерений эффекта Холла, анализа спектров фотолюминесценции (ФЛ), а также спектров пропускания и отражения эпитаксиальных структур. Для создания УФ ФД типа МПМ на поверхности слоёв GaN были сформированы встречно-штыревые контактные площадки Ni/Au (5/10 нм). Затем были исследованы спектральные характеристики полученных устройств.

Результаты и обсуждение

Были синтезированы образцы двух типов, отличавшиеся подходом к МПЭ синтезу GaN, образец А имел суммарную толщину слоя GaN 2.1 мкм, а образец Б – 3.3 мкм. По полученным РЭМ изображениям видно, что образец А имеет относительно гладкую поверхность с высокой плотностью характерных V-дефектов (рис. 1,*а*) [1], в то же время образец Б имеет шероховатую морфологию поверхности (рис. 1,*б*), что может быть следствием слегка азот-обогащенных условий роста.

Холловские измерения показали, что синтезированные нелегированные слои GaN имеют проводимость *n*-типа, концентрация носителей заряда для образцов А и Б составила $1.8 \cdot 10^{17}$ и $1.1 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$, а подвижность – 270 и 95 $см^2/(В \cdot с)$ соответственно. Такое значение концентрации носителей заряда для образца Б может быть связано с трехмерным МПЭ-ростом слоёв GaN и с большим количеством дефектов в них.

На рис. 1,*в* представлено изображение сформированных УФ МПМ ФД. По спектральным характеристикам устройств (рис. 1,*г*) видно, что ФД на основе образца А имеют широкополосную чувствительность с максимумом на длине волны 350 нм, а

детекторы на основе образца Б отличаются узким рабочим диапазоном (с полушириной 11 нм) с максимумом на длине волны 364 нм. Для выявления природы узкополосности были исследованы оптические и структурные свойства образцов.

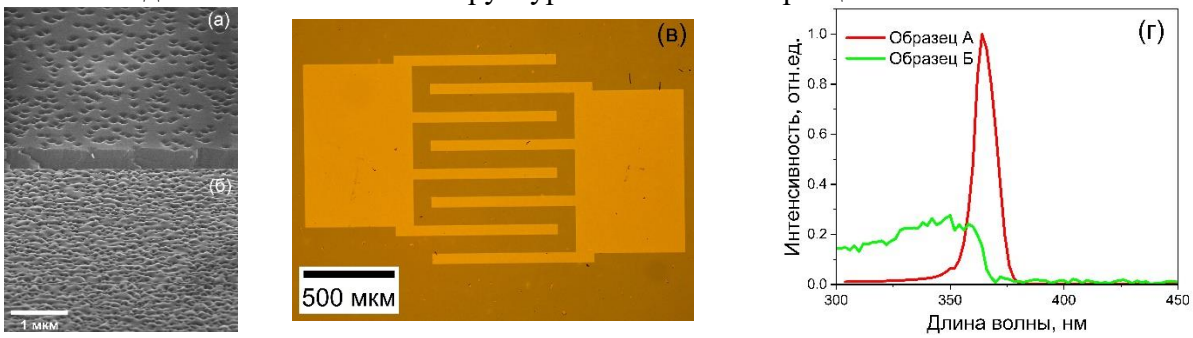


Рис. 1 РЭМ изображения образцов А (*а*) и Б (*б*). Изображения с оптического микроскопа сформированных ФД (*в*) и их спектральные характеристики (*г*).

По спектрам ФЛ было обнаружено, что пик краевой ФЛ обоих образцов находится на длине волны 362 нм (рис. 2,*а*), что соответствует ширине запрещённой зоны вюртцитного GaN [2]. Разница интенсивности ФЛ в 8 раз (вставка на рис. 2,*а*) обусловлена большей суммарной толщиной слоя GaN в образце Б. На спектрах ФЛ также присутствует желтая полоса в диапазоне 500–650 нм, связанная с дефектами в GaN.

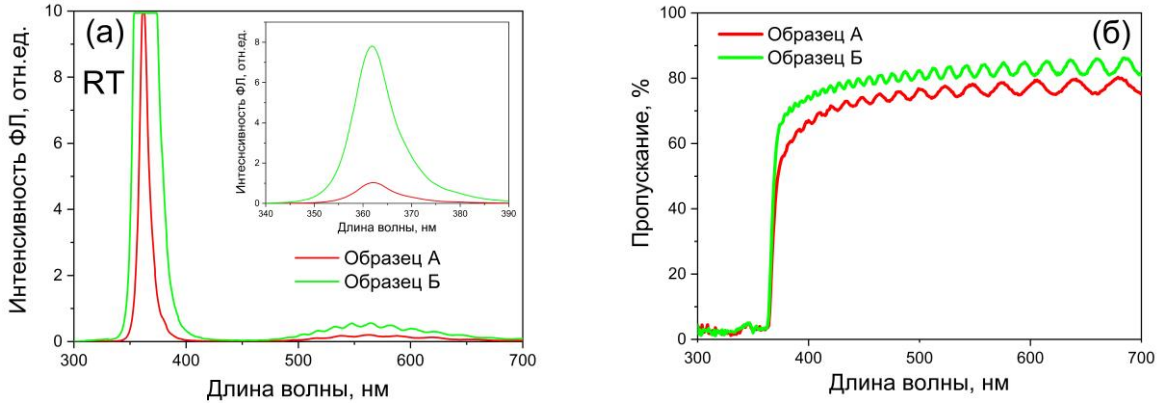


Рис. 2. Спектры ФЛ (*а*) и пропускания (*б*) синтезированных структур.

Также было обнаружено, что положение края поглощения для обоих образцов практически совпадает и находится на длине волны ~365 нм (рис. 2,*б*), что соответствует краю собственного поглощения вюртцитного GaN. По данным XRD и спектроскопии комбинационного рассеяния света было установлено, что выращенные слои GaN являются напряжёнными, однако, это не влияет на их селективность к излучению.

Заключение

Таким образом, было установлено, что узкополосность УФ ФД типа МПМ на основе образца Б не связана с характеристиками объёмных слоёв. Наиболее вероятно, что в качестве «фильтра» выступают дефекты на поверхности эпитаксиального слоя, либо на интерфейсе GaN/темплейт, которые могут производить захват фотогенерированных носителей заряда и препятствовать их сбору на контактных площадках.

Благодарности

Работа была поддержана Министерством образования и Науки (грант № FSRM-2026-0034).

Список литературы

[1] Daruka I., Barabasi A.-L.Physical Review Letters, **79** (19) 3708–3711 (1997).
[2] Reshchikov M. A. Journal of applied physics, **129** (12) 121101 (2021).

Фотоиндуцированный сдвиг частоты ФМР в эпитаксиальных пленках катион-замещенных гранатов железа

Д. В. Авдеенко [1✉], **Е. Ю. Семук** [1], **В. В. Попов** [1], **С. Н. Полулях** [1]

[1] Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь, Россия

✉danila.avdeenko@mail.ru

Аннотация. Исследованы низкополевые спектры ферромагнитного резонанса в тонких магнитных плёнках катион-замещенных гранатов железа. Экспериментально обнаружен фотоиндуцированный сдвиг частоты ферромагнитного резонанса. При планарном намагничивании величина сдвига возрастает пропорционально приложенному полю. Показано, что основной вклад в сдвиг частоты обусловлен эффектами фотоиндуцированной модификации магнитной анизотропии. Выделен вклад тепловых эффектов.

Ключевые слова: Эпитаксиальные магнитные пленки, катион-замещенные гранаты железа, фотоиндуцированная магнитная анизотропия, ферромагнитный резонанс.

Введение

Метод ферромагнитного резонанса (ФМР) широко используется для исследования магнитных свойств пленок катион-замещенных гранатов железа. Использовании широкополосных ФМР-спектрометров существенно расширяют возможности метода. В частности, оказывается возможной регистрация ФМР спектров с использованием частотной развертки [1]. Это представляется важным для экспериментов в слабых, сравнимых с полем насыщения, магнитных полях. Например, в работе [2] экспериментально обнаружена фотоиндуцированная модификация низкополевых спектров ФМР, обусловленная эффектами фотоиндуцированной магнитной анизотропии. В настоящей работе сообщается о фотоиндуцированной модификации полевой зависимости частоты ФМР в эпитаксиальных пленка гранатов железа.

Материалы и методы

Исследованные пленки гранатов железа получены путем эпитаксиального синтеза из раствора в расплаве. Пленки синтезированы на монокристаллических подложках немагнитных гранатов толщиной 500 мкм и ориентированных в кристаллографической плоскости (111). Параметры образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исследованные образцы

Образец	h, мкм	Подложка	$4\pi M_{eff}$. Э	
			Без накачки	Оптическая накачка
$(BiLuGd)_3(FeSc)_5O_{12}$	2.0	ГГГКМЦ	350 ± 15	290 ± 15
$(LuY)_3(FeInSc)_5O_{12}$	10.6	ГГГ	1250 ± 20	875 ± 20

Регистрация ФМР спектров осуществлялась путем измерения частотной зависимости коэффициента пропускания S_{21} полосковой линии передач с помощью векторного анализатора цепей. В область линии передач с максимумом величины переменного магнитного поля помещался исследуемый образец. Резонансная частота ФМР определялась по максимум поглощения. Использовались эпитаксиальные пленки гранатов железа, синтезированные с одной стороны подложки. Образец располагался в непосредственной близости к линии передач. Образец, вместе с линией передач, помещался в намагничивающую систему так, что взаимно перпендикулярные переменное и постоянное магнитные поля лежали в плоскости пленки.

Для исследования фотоиндуцированных эффектов использовался полупроводниковый лазер накачки, длина волны светового излучения 635 нм, мощность 200 мВт, область засветки - не менее 30% площади исследуемых образцов.

Результаты и обсуждение

Экспериментально зарегистрированные зависимости резонансной частоты ФМР f_{FMR} от величины внешнего магнитного поля при комнатной температуре приведены на рис. 1. При планарном однородном намагничивании пленки (111) резонансная частота f_{FMR} и величина внешнего магнитного поля H связаны соотношением:

$$f_{FMR} = \gamma\sqrt{H\left(H + 4\pi M_{eff}\right)}, \quad (1)$$

$$4\pi M_{eff} = 4\pi M_S - 2K_u/M_S - K_1/M_S. \quad (2)$$

Здесь $\gamma \approx 2.88\ MHz/Oe$ – гиромагнитное отношение, M_{eff} – эффективная намагниченность, зависящая от намагниченности насыщения M_S и констант одноосной K_u и кубической K_1 анизотропии. Результат аппроксимации экспериментальных зависимостей $f_{FMR} = f_{FMR}(H)$ приведен на рис. 1 сплошными линиями, соответствующие значения M_{eff} приведены в таблице 1.

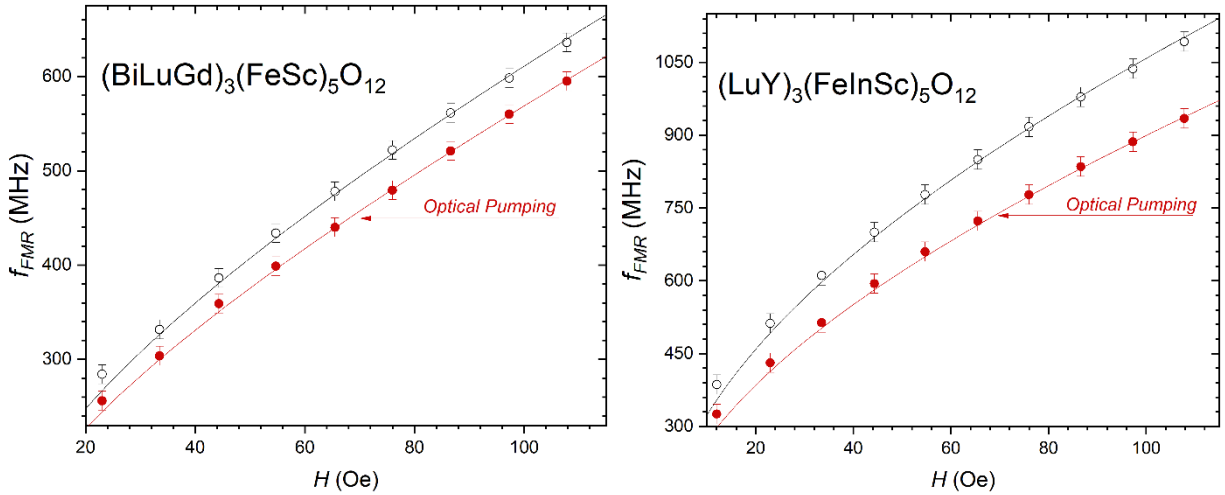


Рис. 1. Зависимость резонансной частоты f_{FMR} от магнитного поля H. Открытые символы – эксперимент в отсутствии засветки, закрытые символы – при действии оптической накачки. Сплошные линии – результат аппроксимации выражением (1).

Заключение

Оптическая накачка приводит к понижению частоты ФМР, а величина сдвига частоты растет с ростом магнитного поля. В результате специально проведенных экспериментов выделен вклад тепловых эффектов, приводящих к аналогичному сдвигу частоты ФМР. Показано, что основной вклад в наблюдаемый фотоиндуцированный сдвиг частоты ФМР обусловлен нетепловыми эффектами и связан с фотоиндуцированной модификацией магнитной анизотропии.

Благодарности

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FZEG-2026-0011.

Список литературы

[1] S. Lee, S. Grudichak, J. Sklenar , C. C. Tsai, M. Jang, Q. Yang, H. Zhang, and J. B. Ketterson. J. Appl. Phys. **120**, 033905 (2016).

[2] С. Н. Полулях, Е. Ю. Семук, А. К. Звездин, В. Н. Бержанский, В. И. Белотелов. Письма в ЖЭТФ, **115**(4), 224 (2022).

Неэкспоненциальная кинетика фотолюминесценции нанокристаллов $CsPbBr_3$ в стеклянной матрице

Е. В. Оськин [1]✉, **И. В. Игнатьев** [1]

[1] Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia;

✉stazen36@gmail.com

Аннотация. Теоретически проанализирована сильно неэкспоненциальная кинетика фотолюминесценции нанокристаллов $CsPbBr_3$ в стеклянной матрице. Предложена модель энергетической структуры нанокристаллов. Ключевая особенность модели – учет спектра поверхностных ловушек, захватывающих фотогенерированные носители заряда. Рекомбинация захваченных носителей заряда с носителями противоположного знака, находящимися в ядре нанокристалла, приводит к возникновению долгоживущей компоненты фотолюминесценции. Результаты использования модели для анализа экспериментальных данных позволяют предположить, что ловушки связаны с матрицей стекла и не сдвигаются по энергиям с изменением температуры.

Ключевые слова: Перовскиты, Кинетика, Фотолюминесценция, Моделирование.

Введение

Нанокристаллы свинцово-галоидных перовскитов (НК) были объектом интенсивных исследований в течение последнего десятилетия из-за их многообещающего применения в оптоэлектронике [1]. НК имеют яркую и узкополосную фотолюминесценцию (ФЛ). Высокий квантовый выход ФЛ даже при комнатной температуре объясняется присущей этому классу перовскитов устойчивостью к дефектам [2]. Тем не менее, дефекты (ловушки) на поверхности НК играют важную роль в их физических свойствах, в частности, в кинетике ФЛ.

В данной работе была изучена кинетика ФЛ образца CsPbBr3, синтезированного в матрице из фторфосфатного стекла. Кинетика экспериментально исследована в широком диапазоне температур (15-170 К) [3]. Обнаружена длительная компонента ФЛ, которая, предположительно, объясняется наличием поверхностных дефектов. Мы предлагаем модель, которая дает количественное описание кинетики ФЛ для таких НК.

Материалы и методы

Исследуемым образцом были НК $CsPbBr_3$, синтезированные во фторфосфатной стеклянной матрице. Подробности синтеза описаны в статье [4]. Кинетика ФЛ измерялась с помощью стрик-камеры Hamamatsu C5680, подключенной к спектрографу. Образец помещался в гелиевый криостат с варьируемой температурой от 6 до 300 К [4].

В работе предложена теоретическая модель, описывающая медленное затухание кинетики ФЛ. Предполагается, что медленная компонента ФЛ обусловлена рекомбинацией электронов, захваченных ловушками на поверхности НК, с дырками, локализованными внутри НК. С ростом температуры происходит переброс электронов через потенциальный барьер в НК и их быстрая рекомбинация с дырками. Этот процесс описывается формулой:

$$I_S(t) = a_2 \int_{E_s}^{\infty} \exp\left[-\frac{E}{a_U} - \frac{E}{kT} - \left(\frac{e^{-\frac{E}{kT}}}{\tau_2}\right)t\right] dE \qquad (1)$$

Здесь E_s – минимальная энергия локализации электронов ловушками, a_U характеризует энергетическое распределение ловушек («хвост» Урбаха [5]), τ_2 – характерное время переброса электронов через потенциальный барьер при высокой температуре.

Результаты и обсуждение

Пример использования модели к экспериментальным данным показан на рисунке 1. Шумной кривой представлена экспериментальная зависимость. Кинетика ФЛ имеет сильно неэкспоненциальный вид, так как, несмотря на логарифмическую шкалу по интенсивности,

зависимость далека от линейной. Видно, что предложенная модель хорошо описывает экспериментальные данные. Установлено, что два параметра модели могут быть усреднены и зафиксированы: a_U= 9.6 мэВ, τ_2= 0.17 нс. Зависимость E_s от температуры (см. вставку на рис. 1) хорошо подгоняется прямой с наклоном $a_1 = 0.16$ мэВ/K. Это в два раза меньше, чем скорость сдвига полосы ФЛ с ростом температуры (рисунок 2). Полученный результат позволяет предположить, что поверхностные ловушки привязаны к матрице стекла и не сдвигаются по энергии с ростом температуры.

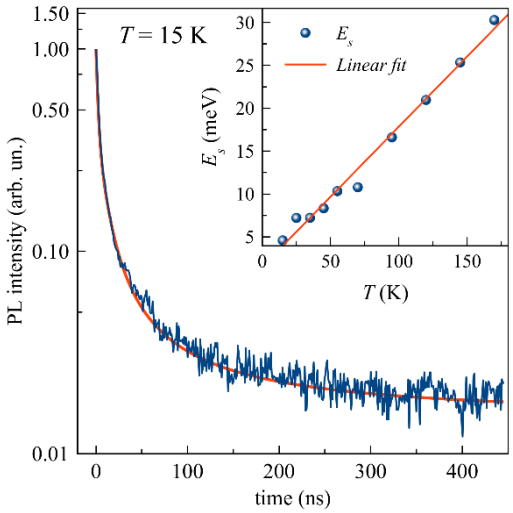


Рис. 1. Кинетика ФЛ при T = 15 К и ее подгонка формулой (1). На вставке показана температурная зависимость параметра E_s и линейная аппроксимация этой зависимости, $E_s = aT + E_s^0$, с параметрами α = 0,16 мэВ/К и E_s^0 = 1,5 мэВ.

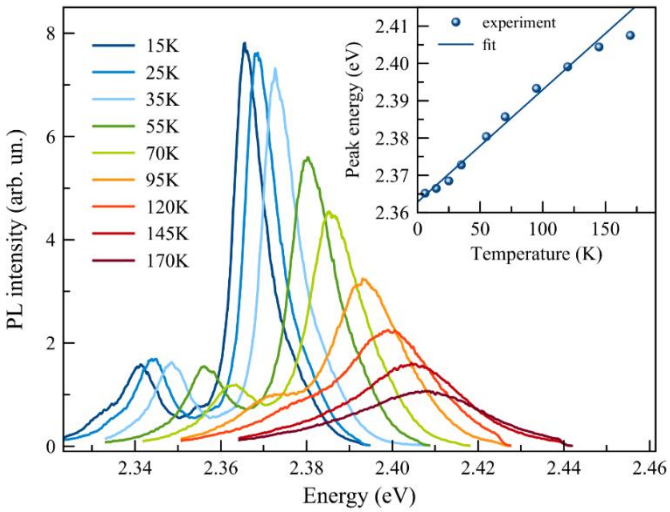


Рис. 2. Спектры ФЛ $CsPbBr_3$ при различных температурах образца. На вставке показана температурная зависимость энергии пика ФЛ. Сплошной линией показана аппроксимация зависимости линейной функцией, E(T) = $A \cdot T$ + $E(0)$, с наклоном A = 0,30 мэВ/К.

Заключение

Предложена модель процессов, ответственных за сильную неэкспоненциальность кинетики ФЛ в НК $CsPbBr_3$, синтезированных во фторфосфатном стекле. Установлено, что такая модель позволяет успешно описывать наблюдаемые температурные зависимости кинетики ФЛ. При этом, весь набор экспериментальных кривых описывается температурной зависимостью только параметра E_s. Эта зависимость оказывается линейной, $E_s = aT + E_s^0$, с параметрами α = 0,16 мэВ/К и E_s^0 = 1,5 мэВ. Более того, значение параметра α оказался вдвое ниже значения параметра, описывающего скорость сдвига энергетического положения полос ФЛ. Этот факт указывает на то, что энергия состояний ловушек зафиксирована стеклянной матрицей.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Санкт-Петербургскому государственному университету за исследовательский грант № 125022803069-4.

Список литературы

[1] L. Protesescu, S. Yakunin, M.I. Bodnarchuk, F. Krieg, R. Caputo, C.H. Hendon, R. X. Yang, A. Walsh, M.V. Kovalenko, Nano Lett 15 (2015) 3692–3696
[2] He Huang, Maryna I. Bodnarchuk, Stephen V. Kershaw, Maksym V. Kovalenko, and Andrey L. Rogach, ACS Energy Lett. 2017, 2, 2071−2083
[3] E.V. Kolobkova, M.S. Kuznetsova, N.V. Nikonorov, J. Non-Cryst. Solids, 563, 120811 (2021)
[4] E. V. Kulebyakina, M. L. Skorikov, E. V. Kolobkova, M. S. Kuznetsova, M. N. Bataev, D. R. Yakovlev, V. V. Belykh, Phys. Rev. B 109, 235301 (2024).
[5] F. Urbach, Phys. Rev., 92, 1324 (1953)

Адресная фотоиндуцированная модификация спектров ФМР в тонких плёнках катион-замещённого граната железа

Д. В. Авдеенко [1]✉, **С. В. Томилин** [1], **С. Е. Вижевская** [1]

[1] V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation;

✉danila.avdeenko@mail.ru

Аннотация. Экспериментально обнаружена модификация спектров ферромагнитного резонанса в связанной системе эпитаксиальных плёнок катион-замещенного граната железа при адресном воздействии линейно поляризованным излучением ближнего ИК диапазона. Установлено, что фотоиндуцированный сдвиг частоты резонанса интегрального спектра пропускания позволяет определить позицию оптической накачки, в том числе при одновременном воздействии на несколько образцов. Наблюдаемая модификация резонансных спектров обусловлена фотоиндуцированной магнитной анизотропией.

Ключевые слова: редкоземельные гранаты железа, эпитаксиальные пленки, ферромагнитный резонанс, фотоиндуцированная магнитная анизотропия.

Введение

Известен эффект фотоиндуцированной магнитной анизотропии (ФМА), позволяющий управлять намагниченностью тонких плёнок с помощью света. Описанные механизмы ФМА связаны с возникновением в результате зарядовой компенсации в катион-замещенном гранате железа фотоактивных ионов Fe^{2+} или Fe^{4+}, обладающих сильной спин-орбитальной связью и дающих вклад в магнитную анизотропию, превышающий вклад Fe^{3+} [1, 2]. Воздействие линейно поляризованного света приводит к неравномерному перераспределению этих ионов между неэквивалентными позициями кристаллической структуры граната, в результате чего наблюдается фотоиндуцированное изменение магнитной анизотропии. В частности, эффект ФМА может приводить к модификации магнитооптических петель гистерезиса [3] или спектров ферромагнитного резонанса [4].

Материалы и методы

Исследование особенностей адресного фотоиндуцированного управления магнитными свойствами тонких плёнок производилось методом низкополевого ферромагнитного резонанса (ФМР) на векторном анализаторе цепей (VNA) R&S ZNB-20 с дополнительной оптической накачкой линейно поляризованным светом. Регистрировались частотные зависимости коэффициента пропускания (S21) для системы связанных образцов, установленной на микрополосковой линии так, как показано на рисунке 1. В качестве образцов использовались тонкие эпитаксиальные плёнки железо-иттриевого граната, за счёт гетеровалентного замещения обладающие фотомагнитным откликом. Образцы были подобраны таким образом, чтобы фотоиндуцированный отклик проявлялся на различных частотах спектра при неизменном магнитном поле $H_0 = 35$ Э.

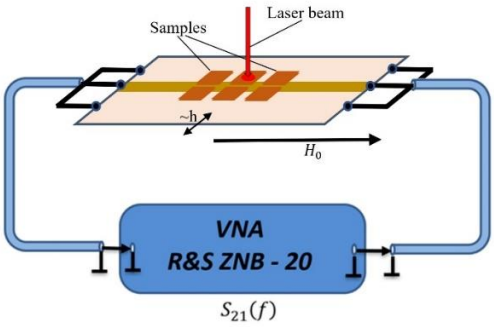


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки для регистрации адресной фотоиндуцированной модификации ФМР системы связанных магнитных плёнок.

Оптическая накачка осуществлялась нормально к плоскости образцов полупроводниковыми лазерами с длиной волны 808 нм и мощностью излучения 200 мВт.

Результаты и обсуждение

Установлено, что оптическая накачка конкретной плёнки из системы связанных образцов приводит к фотоиндуцированной модификации интегрального спектра пропускания всей системы, причём исключительно на собственных частотах оптического отклика этой плёнки (Рис. 2 a-f). Это позволяет точечно сдвигать максимумы спектральной линии ФМР, причём, при одновременной накачке нескольких образцов, их вклады в общий спектр ФМР остаются различимы, а величина фотоиндуцированного сдвига частоты оказывается большей, чем при математической сумме накачки этих же образцов по отдельности (Рис. 2 g-h).

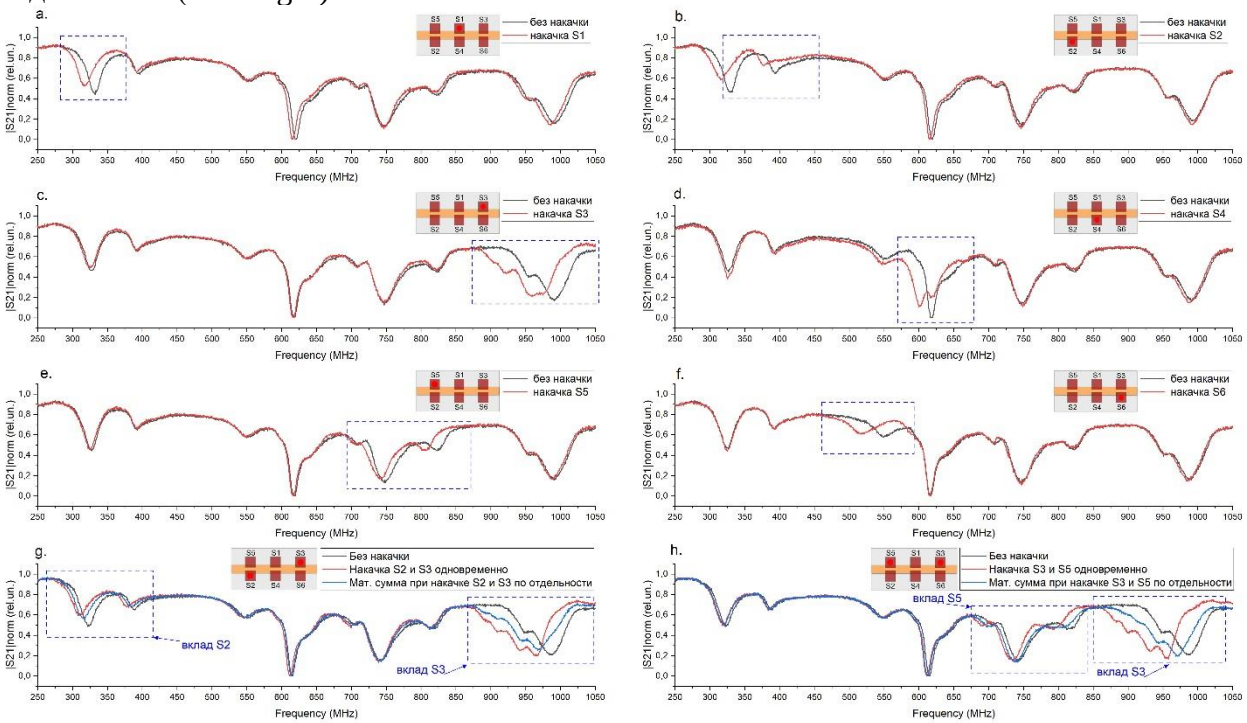


Рис. 2. Спектры модуля сигнала пропускания (|S21|) при оптической накачке каждого из образцов системы – обозначены красным, без оптической накачки – черным, математическая сумма спектров при поочерёдно накачке нескольких образцов – синим (на g-h). На вставках схематическое изображение адресного воздействия.

Заключение

Экспериментально обнаружена возможность модификации низкополевых спектров ФМР эпитаксиальных плёнок катион-замещенного граната железа в результате адресного воздействия оптического излучения на систему связанных образцов. Воздействие линейно поляризованного света приводит к фотоиндуцированному изменению магнитной анизотропии конкретного образца, в результате чего наблюдается сдвиг частоты ФМР интегрального спектра всей системы в области отклика этого образца. При накачке нескольких образцов, их вклады в интегральный спектр суммируются. Таким образом, по спектрам ФМР связанной системы тонких плёнок можно определить позицию оптической накачки, что может быть применимо, например, для реализации резервуарных вычислений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского» в рамках проекта МОЛ/2024/2.

Список литературы

[1] Alben R., Gyorgy E. M., Dillon J. F., Remeika J. P., Phys. Rev. B.,V. 5., P. 2560. (1972).
[2] Pardavi-Horváth M., Wigen P. E., Vértesy G., J. Appl. Phys., V. 63., P. 3110-3112 (1988).
[3] S. N. Polulyakh, D. V. Avdeenko et al., JETP Letters., V. 121., P. 149-153 (2025).
[4] S. N. Polulyakh, E. Yu. Semuk et al., JETP Letters, V. 115., P. 196-201 (2022).

Стеклянные микролинзы, сформированные методом ионного обмена через поляризованную маску

О. С. Плешаков[1]✉, **С. А. Щербак**[1,2], **А. А. Липовский**[1]
[1] СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия;
[2] СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
✉ olegushko1@gmail.com

Аннотация. Исследовано формирование стеклянных микролинз с выпуклым рельефом, формирующимся в результате калий-натриевого ионного обмена через маску, сформированную термоэлектрической поляризацией стекла. Исследовано влияние диаметра маски на геометрию линз. Обнаружены дефекты поверхности в виде кратеров, уменьшающиеся с увеличением размеров структур. Численное моделирование подтверждает способность сформированных структур к фокусировке света.

Ключевые слова: ионный обмен, микролинзы, стекло, термоэлектрическая поляризация, микроструктуры

Введение

Метод ионного обмена широко применяется для формирования оптических элементов в стекле. Замещение ионов натрия на более крупные ионы калия приводит к накоплению механических напряжений в стекле, релаксация которых при повышенной температуре локально увеличивает объём материала и формирует рельеф поверхности [1].

Для обеспечения локальности ионного обмена в стекле используются маски. Одним из эффективных подходов является термоэлектрическая поляризация стекла, при которой в уго приповерхностной области формируется слой с пониженной подвижностью щелочных ионов [2,3]. Такие области препятствуют протеканию последующего ионного обмена, выполняя функцию маски [2]. Сформированные таким образом структуры, при условии возможности преломления света, предполагается использовать в качестве микролинз.

Материалы и методы

В работе использовались пластины натрий-известкового стекла толщиной 1 мм состава (мас. %): SiO_2 – 72.2, Na_2O – 14.3, CaO – 6.4, MgO – 4.3, K_2O – 1.2, Al_2O_3 – 1.2. Маска формировалась методом термоэлектрической поляризации с использованием тонкоплёночного алюминиевого анода с отверстиями диаметром 20, 50, 80 и 120 мкм, полученными лазерной гравировкой. Поляризация проводилась в вакууме при напряжении 350 В в течение 25 мин. После поляризации алюминиевый слой удалялся в растворе NaOH. Обмен ионов натрия, содержащихся в стекле, на ионы калия осуществлялся в расплаве KNO_3 при температуре 560 °C (выбрана близкой к температуре стеклования для релаксации напряжений) в течение 35 минут. Профили поверхностей исследовались с использованием лазерного микроскопа Olympus OLS5100.

Результаты и обсуждение

В результате ионного обмена обогащение приповерхностного слоя стекла ионами калия происходит преимущественно в неполяризованных областях под отверстиями в электроде. В силу большего размера иона калия по сравнению с натрием, в этих областях при релаксации формируется выпуклый рельеф, параметры которого показаны в таблице 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики структур

Диаметр отверстия, мкм	Латеральный размер рельефа, мкм	Высота, мкм
20	75	0.4
50	130	0.6
80	170	0.73
120	200	0.78

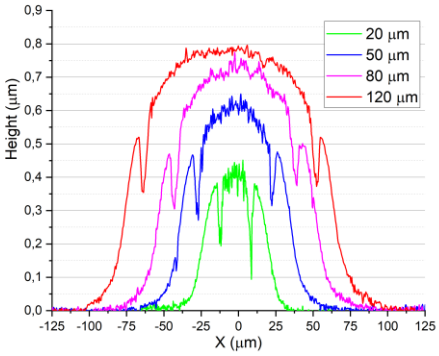


Рис. 1. Профили поверхностей структур.

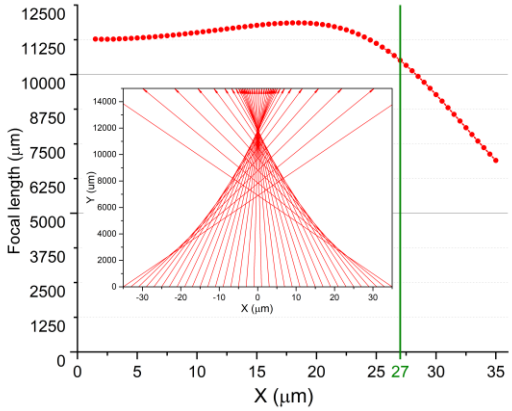


Рис. 2. График точек фокуса преломлённых лучей. Зелёной линией показана рабочая апертура. На вставке изображён ход лучей.

Профиль полученных структур показан на Рис. 1. Увеличение диаметра отверстий маски приводит к росту линейных размеров и высоты рельефа, что связано с латеральной диффузией ионов калия. Примечательно, что фактический латеральный размер выступающего рельефа на несколько десятков мкм превышает диаметр отверстий из-за латеральной диффузии ионов калия. При этом во всех образцах наблюдаются дефекты в виде кратеров вдоль периметра исходного отверстия маски, которые, наиболее вероятно, связаны с особенностями распределения электрического поля вблизи края электрода на этапе термоэлектрической поляризации. С увеличением размеров структур выраженность дефектов уменьшается, что может быть связано с более равномерным распределением диффузионных потоков и механических напряжений.

На основе полученных профилей было проведено численное моделирование хода лучей. Профиль аппроксимировался обратной полиномиальной функцией для обеспечения гладкости и исключения дефектов поверхности из расчёта. Пример результатов расчёта для структуры при отверстии в маске 80 мкм показан на Рис.2. Структура обладает выраженным фокусом ~11,5 мм и рабочей апертурой радиусом 54 мкм, не доходящей до дефектов у периметра маски, что позволяет использовать её в качестве микролинзы.

Заключение

Продемонстрирована возможность формирования стеклянных микролинз методом ионного обмена через маску, сформированную термоэлектрической поляризацией. Установлено влияние геометрии маски на параметры линз и выявлены характерные дефекты поверхности. Результаты моделирования подтверждают перспективность применения полученных структур в микрофотонных устройствах.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания FSRM-2026-0005.

Список литературы

[1] R. Gy. Mater. Sci. Eng. B, 149, 159 (2008).
[2] E. Babich, I. Reduto, A. Redkov, I. Reshetov, V. Zhurikhina, A. Lipovskii. J. Phys. Conf. Ser., 1695, 8 (2020).
[3] A. Redkov, V. Melehin, D. Raskhodchikov, I. Reshetov, D. Tagantsev, V. Zhurikhina, A. Lipovskii. J. Non-Cryst. Solids, 503–504, 279 (2019).

Влияние экситон-фононного взаимодействия на температурно-зависимую фотолюминесценцию перовскитных нанокристаллов $CsPbX_3$ в стеклянной матрице

Д. А. Кучинов [1✉], **М. Н. Батаев** [1], **И. В. Игнатьев** [1], **М. С. Кузнецова** [1], **Е. В. Колобкова** [2,3]

[1] СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия;
[2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;
[3] СПбГТИ(ТУ), Санкт-Петербург, Россия
✉daniil.kuchinov2004@gmail.com

Аннотация. В работе экспериментально изучена температурная зависимость спектров фотолюминесценции нанокристаллов $CsPbX_3$ (X = Cl, Br, I), выращенных во фторфосфатной стеклянной матрице, измеренная в широком температурном диапазоне 15–500 К. Анализ температурной динамики спектров фотолюминесценции позволил изучить влияние экситон-фононного взаимодействия на интегральную интенсивность, спектральное уширение и положение полосы фотолюминесценции при изменении температуры. Интегральная интенсивность спадает двухпороговым образом при увеличении температуры. Уширение полосы смоделировано с учётом взаимодействия с акустическими и продольными оптическими фононами. При высоких температурах наблюдается резкое изменение поведение положения пика фотолюминесценции, что вероятно связано с фазовым переходом в нанокристаллах. Кроме того, линейный сдвиг полосы фотолюминесценции при увеличении температуры выше комнатной, интерпретируется как результат гидростатического давления, создаваемого стеклянной матрицей из-за разницы в температурном расширении нанокристаллов и стекла.

Ключевые слова: перовскиты, нанокристаллы, фотолюминесценция.

Введение

В последние годы перовскитные нанокристаллы (НК) являются объектом активных исследований благодаря их уникальным оптическим и оптоэлектронным свойствам, высокому квантовому выходу и возможности тонкой настройки длины волны излучения, что открывает перспективы для их применения в современных оптических устройствах [1]. Инкапсуляция перовситных НК в стеклянную матрицу приводит к их долгосрочной стабильности, однако её влияние на температурно-зависимую фотолюминесценцию (ФЛ) остаётся неизученным. Известно, что экситон-фононное взаимодействие оказывает доминирующее влияние на изменения в температурной зависимости ФЛ. Основная цель данной работы состоит в экспериментальном изучении температурной динамики ФЛ и изучении влияния экситон-фононного взаимодействия на спектральный профиль ФЛ.

Материалы и методы

Образцы перовскитных НК $CsPbX_3$ (X = Cl, Br, I) были выращены с помощью метода закалки расплава, методика синтеза описана в работе [2]. Этот метод позволяет контролировать размер и состав НК, что делает возможной настройку длины волны излучения в выращенных образцах во всем видимом диапазоне. Возбуждение ФЛ НК $CsPbBr_3$ и $CsPb(Br,Cl)_3$ осуществлялось лазером с энергией E_{exc} = 3.06 эВ и с энергией E_{exc} = 2.33 эВ в случае а НК $CsPbI_3$. Для проведения измерений в диапазоне T = 10 – 500 К использовались гелиевый криостат замкнутого цикла (10 - 300 K) и азотный криостат (77 - 500 K), оснащенные PID-контроллерами. Сбор ФЛ осуществлялся в геометрии отражения и детектировался с помощью спектрометра, оснащённого CCD-камерой.

Результаты и обсуждение

Анализ температурной зависимости интегральной интенсивности показал, что затухание происходит двухпороговым образом, что может быть описано с помощью модели, включающей две энергии активации (Уравнение 1). Экспериментальные данные и их аппроксимация с помощью Ур. 1 представлены на Рисунке 1.

$$I(T) = \frac{P}{1 + a \cdot exp\left(\frac{-E_1}{k_B T}\right) + b \cdot exp\left(\frac{-E_2}{k_B T}\right)} \quad (1)$$

где P – масштабный множитель, E_1 и E_2 – активационные энергии процессов затухания ФЛ.

Температурная зависимость положения пика ФЛ демонстрирует немонотонное поведение: наблюдаются синий и красный сдвиг в разных температурных диапазонах, что определяется доминирующим механизмом экситон-фононного взаимодействия — либо с акустическими, либо с оптическими фононами. После некоторой критической температуры наблюдается резкое изменение в поведении сдвига полосы ФЛ, которое связано со структурным фазовым переходом из орторомбической в тетрагональную фазу в НК. Последующее линейное увеличение энергии происходит за счет возникновения гидростатического давления, создаваемого стеклянной матрицей на НК. Такое давление возникает из-за различия в коэффициентах теплового расширения стеклянной матрицы и НК. Температурные зависимости изменения положения пика ФЛ изображены на Рис. 2.

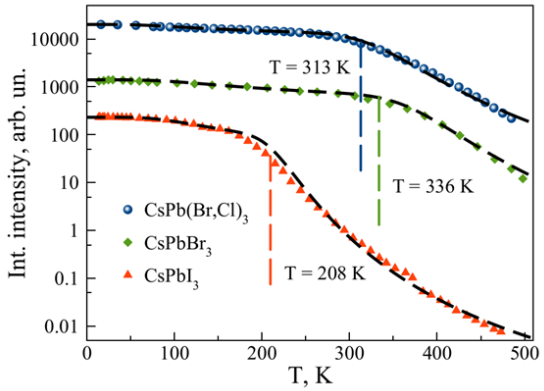


Рис. 1. Температурные зависимости интегральной интенсивности для НК $CsPb(Br, Cl)_3$, $CsPbBr_3$, $CsPbI_3$.. Подгонки Ур. 1 показаны чёрными штриховыми линиями. Вертикальные штриховые линии демонстрируют критические температуры.

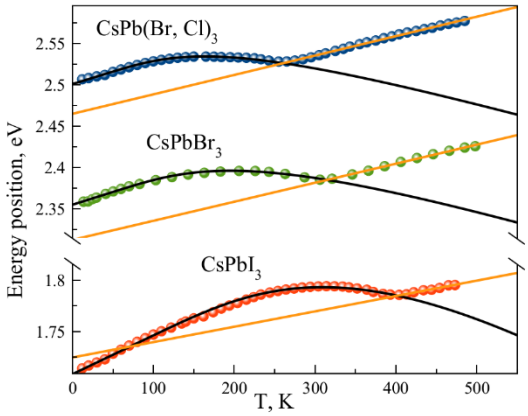


Рис 2. Температурные зависимости положения пика ФЛ для НК $CsPb(Br, Cl)_3$, $CsPbBr_3$, $CsPbI_3$.

Заключение

Проведены исследования температурной зависимости спеткров ФЛ для НК $CsPbX_3$ (X = Cl, Br, I), инкапсулирвоанных в стеклянной матрице в широком температурном диапазоне. Поведение ФЛ определяется экситон-фононным взаимодействием и влиянием гидростатического давления. Интегральная интенсивность ФЛ спадает двухпороговым образом, что описывается с помощью модели, включающей две активационные энергии. Температурная зависимость положения пика ФЛ меняется немонотонно, что обусловлено конкуренцией между взаимодействием носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Голубой сдвиг при T > 300 K мы связываем с гидростатическим давлением, оказываемым стеклянной матрицей на НК.

Благодарности

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках гранта №125022803069-4. Рост образцов производился в рамках проекта РНФ №26-13-00292.

Список литературы

[1] Duan, Y., *et. all*, Laser Photonics Rev., **19**(9), 2402245 (2025).
[2] Kolobkova, E. V., *et. all*, J. Non-Cryst. Solids, **563**, 120811 (2021).

Оптическая наноантенна на основе гетероструктурных нитевидных нанокристаллов $GaP/GaAs_{1-x}P_x$

Е.С. Завьялова [1,2✉], **М.И. Петров**[2], **А.Д. Большаков**[1,3]
[1] Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия;
[2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;
[3]Академический университет им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия
✉eseniia.zavialova@metalab.ifmo.ru

Аннотация. В работе численно исследована светоизлучающая наноантенна на основе гетероструктурированного нитевидного нанокристалла $GaP/GaAs_{1-x}P_x$, включающая брэгговский отражатель, активную область и верхний волноводный сегмент. Показано, что брэгговский отражатель эффективно подавляет излучение в нижнюю полусферу, а верхняя волноводная секция обеспечивает формирование направленного излучения. Достигнуто увеличение направленности, характеризуемое отношением мощностей, излученных в верхнюю и нижнюю полусферу. Результаты демонстрируют возможность управления направленностью излучения за счет интерференционных эффектов и модой структуры нитевидного нанокристалла, что перспективно для создания компактных источников света.

Ключевые слова: нитевидные нанокристаллы, наноантенна, брэгговский отражатель, направленность излучения, фактор Парселла.

Введение

Управление направленностью излучения на наноуровне является одной из ключевых задач современной нанофотоники, поскольку эффективность вывода света и пространственное распределение излучения напрямую определяют характеристики нанолазеров, однофотонных источников и элементов интегральных фотонных схем [1]. Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы (ННК) представляют собой перспективную платформу для реализации наноантенн благодаря сочетанию волноводных мод, резонансных эффектов [2] и возможности формирования гетероструктур на их основе методами эпитаксии [3]. В частности, ННК на основе фосфида галлия (GaP) обладают высоким показателем преломления и малыми оптическими потерями в видимом диапазоне [4], а его твердые растворы с мышьяком (GaAsP) позволяет реализовать активную область с настраиваемой шириной запрещённой зоны [5]. Совмещение этих материалов в единой структуре открывает возможность одновременного управления локализацией поля и диаграммой направленности излучения.

В данной работе исследуется наноантенна на основе гетероструктурированного ННК $GaP/GaAs_{1-x}P_x$, обеспечивающая подавление излучения в нижнюю полусферу и формирования направленного излучения вверх.

Материалы и методы

Рассматриваемая структура состоит из трех функциональных сегментов: нижнего брэгговского отражателя GaP/GaAsP, активной вставки GaAsP с повышенным содержанием мышьяка и верхнего волноводного сегмента GaP. Расчеты выполнены методом конечных элементов в пакете COMSOL Multiphysics на длине волны 650 нм, соответствующей максимуму фотолюминесценции активной области [6].

Анализ волноводных свойств проводился с использованием разложения поля по цилиндрическим гармоникам:

$$E(r, \varphi, z) = E_m(r, z)e^{im\varphi}, \quad (1)$$

где m – азимутальное число.

Для обеспечения эффективной работы брэгговского отражателя необходимо выполнение одномодового режима. Анализ дисперсионных зависимостей позволил определить критический радиус, при котором сохраняется распространения только фундаментальной моды HE_{11}. Оптимальным выбран радиус R = 70 нм, что обеспечивает

одномодовый режим при λ = 650 нм и эффективное формирование фотонной запрещенной зоны.

1. Результаты и обсуждение

Параметры брэгговского отражателя были оптимизированы для максимального подавления излучения в нижнюю полусферу. Важно отметить, что позиционирование 650 нм строго в центре запрещенной зоны не дает максимума направленности из-за интерференционных эффектов в структуре конечной высоты. Рабочая точка выбрана с небольшой отстройкой для обеспечения конструктивной интерференции волн, распространяющихся вверх, и деструктивной – для волн, направленных вниз. При толщине слоев d_{GaP} = 90 нм и d_{GaAsP} = 105 нм и числе периодов N = 30 отношение мощностей P_{up}/P_{down} увеличивается в 11 раз по сравнению со структурой без отражателя.

Дополнительно исследовано влияние длины верхнего волноводного сегмента на диаграмму направленности. Показано, что при увеличении высоты сегмента 1-1.5 мкм на рабочей длине волны возникают резонансы собственных мод, приводящие к усилению паразитной утечки излучения вниз. Оптимальным является значение h = 0.5 мкм, при котором структура работает вне резонанса, что минимизирует обратное излучение и способствует формированию направленного лепестка в верхнюю полусферу.

Для полной оптимизированной структуры в спектре фактора Парселла наблюдается провал, соответствующий запрещенной зоне брэгговского отражателя, а отношение мощностей P_{up}/P_{down}, достигает 10. Полученная диаграмма направленности демонстрирует эффективное подавление излучения в подложку и формирование выраженного направленного лепестка в верхнюю полусферу. Таким образом, показано, что предложенная геометрия обеспечивает локализацию электромагнитного поля в активной области и перераспределение излучения в заданном направлении.

Заключение

Полученные результаты подтверждают возможность реализации светоизлучающей наноантенны на основе гетероструктурированного ННК GaP/GaAsP. Оптимизация геометрических параметров позволяет обеспечивать одномодовый режим, сформировать фотонную запрещенную зону и достичь увеличения направленности излучения. Поскольку выбранные параметры совместимы с современными технологиями эпитаксиального роста, предложенная структура представляет собой перспективную платформу для создания компактных и эффективных наноисточников света для задач интегральной и квантовой фотоники.

Благодарности

Данное исследование было выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант №FSRM-2026-0004, проект FSMG-2025-0005). Также авторы выражают благодарность Российскому научному фонду (грант 24-12-00225).

Список литературы

[1] Grzela, Grzegorz, et al. "Nanowire antenna emission." *Nano letters* 12.11 (2012): 5481-5486.

[2] Sirbuly, Donald J., et al. "Semiconductor nanowires for subwavelength photonics integration." *The Journal of Physical Chemistry B* 109.32 (2005): 15190-15213.

[3] Gudiksen, Mark S., et al. "Growth of nanowire superlattice structures for nanoscale photonics and electronics." *nature* 415.6872 (2002): 617-620.

[4] Anikina, Maria A., et al. "Numerical study of GaP nanowires: individual and coupled optical waveguides and resonant phenomena." *Nanomaterials* 13.1 (2022): 56.

[5] Bolshakov, Alexey D., et al. "Growth and characterization of GaP/GaPAs nanowire heterostructures with controllable composition." *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters* 13.11 (2019): 1900350.

[6] Kuznetsov, Alexey, et al. "Anisotropic Radiation in Heterostructured “Emitter in a Cavity” Nanowire." *Nanomaterials* 12.2 (2022): 241.

Визуализация краевого распределения электрического поля при помощи второй гармоники в ионообменных стеклах

Г. Кан [1,2✉], **С. А. Щербак** [1,2], **В. П. Каасик** [1,2], **А. А. Липовский** [1]
[1] СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, РФ;
[2] СПбПУ, Санкт-Петербург, РФ
✉kan_g@spbstu.ru

Аннотация. Генерация второй оптической гармоники впервые использована для исследования распределения и динамики электрического заряда Максвелла-Вагнера, сформированного в ионообменном стекле в области неоднородного электрического поля. Показано, что скорость латеральной миграции ионного заряда в области ионообменного интерфейса существенно превышает ожидаемую для переноса заряда ионами натрия при комнатной температуре.

Ключевые слова: стекло, ионный обмен, генерация второй гармоники, эффект EFISH, эффект Максвелла-Вагнера

Введение

Стекло – оптически изотропный материал, центральная симметрия которого запрещает генерацию второй оптической гармоники. Однако в сильном электрическом поле стёкла могут проявлять квадратичную оптическую нелинейность (КОН) [1] и, соответственно, получить возможность генерации второй оптической гармоники (ВГ). Нами использован недавно предложенный подход [2] к инициации КОН, основанный на формировании заряда Максвелла-Вагнера, проявляющегося в ионообменных стеклах. В работе впервые продемонстрировано использование ГВГ для исследования распределения и динамики заряда в зоне неоднородного электрического поля.

Материалы и методы

В экспериментах натрий-силикатные стекла были подвергнуты электростимулированному ионному обмену в расплаве нитрата калия при температуре 365°C. Определяющим параметром процесса является прошедший через образец заряд (1 Кл), однозначно связанный с глубиной обогащённой калием области. Далее, образец ионообменного стекла был зажат между стальными электродами и к нему в течение 30 минут было приложено напряжение 1,3 кВ. В процессе такой «зарядки» на интерфейсе обогащённой калием области и немодифицированного объёма стекла формировался локально-неравновесный заряд, электрическое поле которого было достаточным для инициации КОН в стекле [2]. После «зарядки» образца были выполнены измерения сигнала ВГ, генерируемого образцом в области неоднородного электрического поля в окрестности края одного из электродов. Образец облучался импульсным лазером на длине волны 1030 нм. Оптическая схема включала фокусирующие объективы, фильтры, линзы, фотодетектор и моторизированную X-Z платформу. Образец фиксировался на платформе, ось Z была направлена по оптической оси, X – в направлении перпендикулярно краю «заряженной» области.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений сигнала ВГ в зависимости от смещения вдоль X-оси представлены на рис. 1(а). Полученные результаты показывают, что заряд Максвелла-Вагнера присутствует вне подэлектродной области на расстоянии до ~ 100 мкм. Из результатов измерений следует, что неравновесный заряд, как и ожидалось, релаксирует, однако при этом происходит латеральное «размывание» заряженной области (Рис. 1(а)). Количественная оценка скорости «размывания» зарядовой области показывает, что транспорт ионов - носителей заряда вдоль ионообменного интерфейса происходит существенно быстрее, чем можно ожидать для ионов натрия - наиболее подвижных из присутствующих в стекле.

Пример Z-сканирования сигнала ВГ от образца с уширенным профилем распределения заряда (Рис. 1(б)) показывает, что полуширина определяющей величину сигнала свертки каустики лазерного пучка и генерирующей ВГ области остается постоянной на всем протяжении области неоднородного электрического поля при «зарядке». Это свидетельствует о сохранении глубины локализации электрического заряда, т.е. о сохранении глубины локализации электрического поля и, соответственно, об отсутствии какой-либо, кроме латеральной (вдоль ионообменного интерфейса) миграции ионов.

а) б)

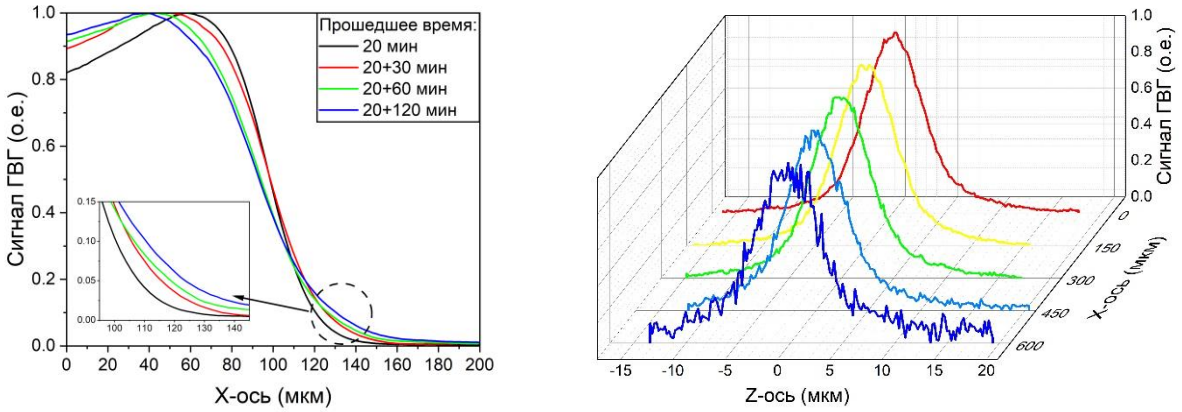


Рис. 1. (а) Нормированные результаты измерений сигнала второй гармоники в зависимости от расстояния X от края заряженной области в различные моменты времени после отключения напряжения. (б) Нормированные Z-профили сигнала второй гармоники при различных смещениях от края «заряженной» области

Заключение

Визуализация распределения электрического поля с использованием генерации второй оптической гармоники является удобным инструментом, и была использована для анализа динамики заряда Максвелла-Вагнера на краю заряженной области ионообменного стекла в зоне неоднородного электрического поля. В результате исследования зарегистрирована аномально высокая подвижность щелочных ионов вдоль интерфейса области, модифицированной ионным обменом, и немодифицированной области стекла.

Благодарности

Исследование выполнено авторами в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № FSRM-2026-0005.

Список литературы

[1] P. G. Kazansky, A. Kamal, and P. S. J. Russell, Opt. Lett., **18**(9), 693–695 (1993)
[2] S. Scherbak, I. Reshetov, V. Zhurikhina, and A. Lipovskii, J. Am. Ceram. Soc., 107(8), 5569–5577 (2024)

Локальная ГВГ на зарядовых структурах в стекле

А. Н. Терпицкий [1,2]✉, **С. А. Щербак** [1,2], **В. П. Каасик** [1,2], **А. А. Липовский** [1]

[1] Академический университет им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия;

[2] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

✉terpitskij_an@spbstu.ru

Аннотация. Локальные зарядовые структуры сформированы в стекле БФ-16 с помощью электронной литографии. В заряженных полосках шириной 1–16 мкм наблюдалась запрещенная изотропией стекла генерация второй оптической гармоники (ВГ). Методом сканирующей оптической микроскопии исследовано пространственное распределение амплитуды ВГ. Данные измерений интерпретированы исходя из представлений о формировании под поверхностью стекла тонкого положительно заряженного слоя, обусловленного эмиссией вторичных электронов из области облучения, и наличия продольной составляющей поля фундаментальной волны в области каустики используемого микрообъектива.

Ключевые слова: Генерация второй гармоники, Электронная литография, Стекло, Захват электронов, Электрическое поле, Поляризация излучения.

Введение

Наличие центра инверсии в стекле запрещает объёмные нелинейно-оптические эффекты чётных порядков, включая генерацию второй гармоники (ВГ). Центральная симметрия приповерхностной области стекла может быть нарушена при электронном облучении, позволяющим получать нелинейные области заданной геометрии. Появление ВГ в таких структурах обусловлено взаимодействием постоянного электрического поля заряда, сформированного в стекле в результате электронного облучения, с нелинейной восприимчивостью третьего порядка [1]. В работе исследована генерация второй оптической гармоники в электрическом поле протяженных зарядовых структур с поперечным размером, лежащим в диапазоне единиц микрон, сформированных в стекле в стекле электронным пучком.

Материалы и методы

Бесщелочное промышленное стекло БФ-16 облучалось электронами с энергией 100 кэВ в дозе 8 мкКл/см^2 в установке электронной литографии Raith EBPG5000 + ES. Были облучены полоски длиной 3 мм (вдоль направления Y) и шириной 1, 2, 4, 8 и 16 мкм; диаметр пучка составлял 2 нм. Исследования проводились с использованием фемтосекундного лазера с длиной волны 1030 нм. Сигнал ВГ регистрировался счётчиком фотонов Hamamatsu H11890-110. Фокусировка лазерного пучка, распространяющегося в направлении Z в пятно диаметром ~1.5 мкм осуществлялась с помощью 100-кратного объектива Mitutoyo. Образец помещался на двухкоординатный (XZ) пьезотранслятор.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 приведены нормированные результаты измерений зависимости интенсивности (профили) сигнала ВГ от смещения микрообъектива перпендикулярно (в направлении Z) поверхности облученного стекла и контрольного образца - серебряной плёнки толщиной 35 нм, нанесенной на необлученное электронами стекло. В последнем случае оптическая нелинейность второго порядка локализована в тонкой пленке, и измеренный профиль соответствует продольному (вдоль Z) распределению интенсивности лазерного пучка в каустике объектива. Уширение профиля сигнала ВГ от облучённого образца несет информацию о толщине генерирующей вторую гармонику области.

Измеренные профили интенсивности сигнала ВГ при поляризации фундаментальной волны поперек и вдоль полоски 8 мкм (оси X и Y, соответственно) представлены на рисунке 2. На обоих профилях проявляется пара пиков (1 и 2), расстояние между которыми

соответствует ширине полоски. Эти пики соответствуют полюсу электрического поля на краю тонкой положительно заряженной приповерхностной области, образовавшейся из-за испускания вторичных электронов. Сравнительно высокая интенсивность сигнала этих пиков при X-поляризации определяется вкладом наиболее сильной компоненты $\chi^{(3)}_{xxxx}$ тензора кубичной диэлектрической восприимчивости в нелинейное взаимодействие. Этим же объясняются и боковые максимумы (3 и 4) на рис. 2(а). Компоненты Y-поляризации ВГ слабее, так как вдали от торцов заряженной полоски Y-компонента статического электрического поля очень мала. Следы пиков 1 и 2 на рисунке 2(б) связаны с дефектами структуры и неточностью юстировки. В обоих профилях вследствие сильной фокусировки лазерного пучка (NA=0.55) присутствуют продольные компоненты электрического поля фундаментальной волны E_z^{ω} [2]. Поэтому в оба профиля вносит вклад сигнал ВГ, связанный с компонентой поля E_z^{DC}статического заряда. Аналогичный характер носят профили, измеренные для полосок других размеров.

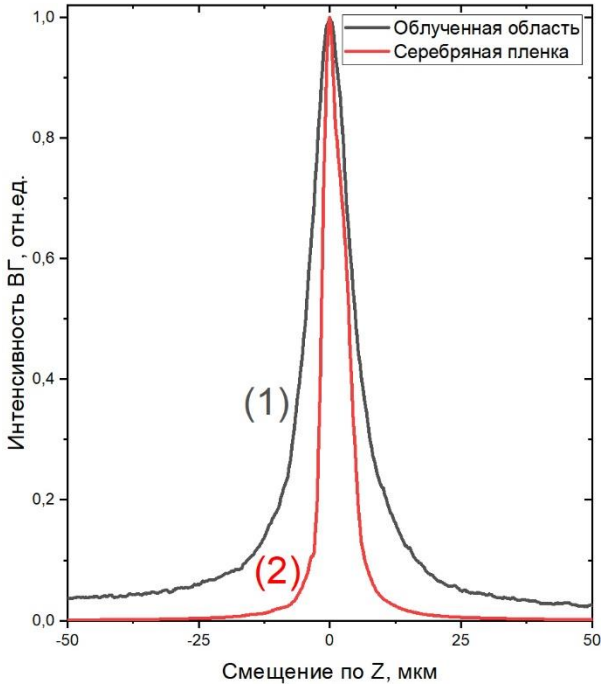


Рис. 1. Профиль сигнала ВГ по глубине Z в центре облученной области (1) и для серебряной пленки толщиной 35 нм (2) на поверхности исходного стекла.

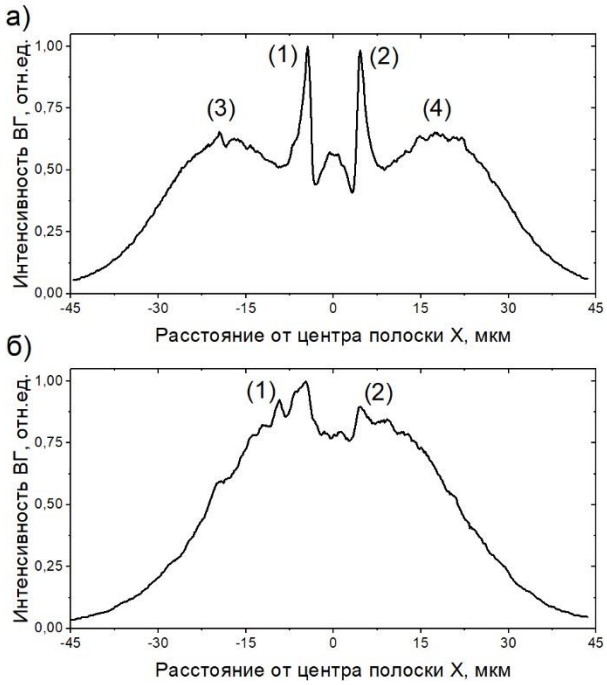


Рис. 2. Профиль сигнала ВГ, измеренного поперек облученной полоски 8 мкм (вдоль оси X) при поляризации основной волны а) поперек (X) и б) вдоль (Y) полоски.

Заключение

Показано, что электронная литография позволяет формировать под поверхностью стекла области, генерирующие вторую гармонику. Анализ пространственных профилей сигнала ВГ выявил влияние вторичной эмиссии электронов и появления продольной составляющей электрического поля фундаментальной волны на локальную генерацию ВГ.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания FSRM-2026-0005.

Список литературы

[1] D. Statman, J. A. Georges III. J. Appl. Phys., **80**(2), 654 (1996).
[2] Urbach H. P., Pereira S. F. Phys. Rev. Lett., **100** (12), 123904 (2008).

Новые подходы к созданию мембран с контролируемым оптическим пропусканием на основе полимеров и нитевидных нанокристаллов фосфида галлия

И.А. Козко [1]✉, Е.С. Завьялова [2], В.М. Кондратьев [1,3], С.А. Кадинская [1,3], И.А. Резник [2], В.В. Федоров [3,4], Ф.М. Кочетков [3], Д.Е. Колесина [3], М.В. Зюзин [1,2], А.Д. Большаков [1,3,4,5]

[1] МФТИ, Физтех, Долгопрудный, Россия;

[2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;

[3] СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия;

[4] СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия

[5] СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

✉ivkozko@gmail.com

Аннотация. В данной работе показана возможность создания гибкого композитного материала с управляемым оптическим пропусканием света в видимом диапазоне на основе полидиметилсилоксана и вертикальных массивов нитевидных нанокристаллов GaP. Продемонстрирован подход к отделению полученных мембран от ростовой кремниевой пластины с возможностью дальнейшего переноса. Установлено, что увеличение среднего диаметра нитевидных нанокристаллов GaP, а также увеличение среднего расстояния между нитевидными нанокристаллами GaP в вертикальных массивах, приводит к спектральному смещению минимального значения оптического пропускания мембран в видимом диапазоне длин волн с 452 до 679 нанометров. Полученные результаты перспективны для разработки оптических фильтров с возможностью прецизионного перестраивания оптического пропускания в видимой области спектра.

Ключевые слова: нитевидные нанокристаллы, фосфид галлия, полидиметилсилоксан, оптическое пропускание, нанофотоника, спектроскопия.

Введение

Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы (ННК), в частности ННК фосфида галлия (GaP), представляют собой перспективный материал для современной нанофотоники и оптоэлектроники благодаря возможности управления оптическими свойствами за счет варьирования морфологических параметров ННК GaP в процессе их эпитаксиального роста на кремнии [1, 2]. Прецизионный контроль над морфологией и развитие методов создания композитных материалов на основе ННК позволяют получать эффективные элементы газовой сенсорики, фоточувствительные элементы и источники излучения [3-5]. Для минимизации влияния границы раздела ННК - кремний на оптические свойства подобных материалов активно исследуются методы инкапсуляции вертикальных массивов ННК в полимерные соединения с последующим отделением полученных гибких мембран от исходной подложки, что ранее было исследовано для вертикальных массивов ННК кремния [6]. В данной работе исследовано влияние морфологических параметров инкапсулированных в полидиметилсилоксан (ПДМС) вертикальных массивов ННК GaP на спектры оптического пропускания полученных гибких мембран.

Материалы и методы

Синтез вертикальных массивов ННК GaP проводился методами молекулярно-пучковой эпитаксии по самокаталитическому механизму роста (установка Veeco Gen-III, Veeco, США) [2]. В результате получена серия образцов, состоящая из вертикальных массивов ННК GaP на ростовой кремниевой подложке с различными морфологическими параметрами - значениями среднего диаметра, средней длины и среднего расстояния между ННК GaP. Анализ морфологии синтезированных массивов проводился на основе изображений, полученных методами растровой электронной микроскопии (РЭМ, электронный микроскоп Zeiss Supra25, Carl Zeiss, Германия). Инкапсуляция вертикальных массивов ННК GaP проводилась по методу бакетного центрифугирования со следующим режимом нанесения: частота вращения 1500 об./мин., начальное ускорение 1000 об./мин. за

1 с, время нанесения 10 мин. (центрифуга Eppendorf 5804 с бакетным ротором A-4-44, Eppendorf, Германия). Данный режим нанесения ПДМС позволил перенести полимер в пространство между ННК, не нарушив кристаллическую целостность ННК GaP. При этом толщина получившейся мембраны составляла порядка средней длины ННК GaP [7]. Дальнейшее отделение и перенос полученных гибких мембран на стеклянные подложки позволил провести корректную характеризацию оптических свойств методами спектроскопии оптического пропускания (спектрофотометр CARY 5000, Agilent Technologies, США).

Результаты и обсуждение

По мере увеличения среднего диаметра ННК GaP с 0.108 до 0.142 мкм (при идентичных средней длине и расстоянии между ННК GaP) наблюдается рост минимального значения оптического пропускания с 50.81 до 65.09%, а также спектральное смещение минимального значения с 452 до 679 нм. Увеличение минимального значения оптического пропускания связано с ростом среднего расстояния между ННК GaP в вертикальных массивах с 1.336 до 3.181 мкм (при идентичных средней длине и диаметре), что непосредственно влияет на оптическую прозрачность исследуемых гибких мембран в видимом диапазоне длин волн. Спектральное смещение свидетельствует о ключевом вкладе среднего диаметра в оптические свойства исследуемых гибких мембран и позволяет говорить о возможности контроля над оптическими свойствами материалов на основе инкапсулированных в ПДМС вертикальных массивов ННК GaP с помощью варьирования морфологических параметров ННК GaP в процессе их эпитаксиального роста на кремнии.

Заключение

В данной работе продемонстрирована эффективная методика управления спектральными характеристиками оптического пропускания гибких мембран на основе вертикальных массивов ННК GaP, инкапсулированных в ПДМС. Установлено, что варьирование морфологических параметров ННК GaP на этапе синтеза методами молекулярно-пучковой эпитаксии позволяет осуществлять точный контроль спектрального положения и значения минимума оптического пропускания, достигающего 50% в видимой области. Полученные результаты перспективны для разработки оптических фильтров с возможностью прецизионного контроля над оптическим пропусканием в видимой области, а также полосовых фильтров и оптических покрытий с селективным пропусканием света.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Гранта Российского научного фонда № 25-72-00140, https://rscf.ru/project/25-72-00140/.

Список литературы

[1] M. A. Anikina, P. Roy, S. A. Kadinskaya, A. Kuznetsov, V. M. Kondratev, A. D. Bolshakov. Nanomaterials, 13, 56 (2023).
[2] V. V. Fedorov, Y. Berdnikov, N. V. Sibirev, A. D. Bolshakov, S. V. Fedina, G. A. Sapunov, L. N. Dvoretckaia, G. Cirlin, D. A. Kirilenko, M. Tchernycheva, I. S. Mukhin. Nanomaterials, 11(8), 1949 (2021).
[3] K. Aubekerov, K. N. Punegova, et al. J. Phys.: Conf. Ser., 2227, 012014 (2022).
[4] V. M. Kondratev, A. D. Bolshakov, S. S. Nalimova. Proc. IEEE ElConRus, 1163–1166 (2021).
[5] S. A. Kadinskaya, V. M. Kondratev, et al. Proc. IEEE ElConRus, 958–961 (2022).
[6] Y. J. Kim, Y. J. Yoo, M. H. Kang, J. H. Ko, M. R. Park, D. E. Yoo, D. W. Lee, K. Kim, I.-S. Kang, Y. M. Song. Nanophotonics, 9(10), 3287–3293 (2020).
[7] V. Neplokh, F. M. Kochetkov, K. V. Deriabin, V. V. Fedorov, A. D. Bolshakov, I. E. Eliseev, V. Y. Mikhailovskii, D. A. Ilatovskii, D. V. Krasnikov, M. Tchernycheva, G. E. Cirlin, A. G. Nasibulin, I. S. Mukhin, R. M. Islamova. J. Mater. Chem. C, 8, 3764–3772 (2020).

Низкопороговая усиленная спонтанная люминесценция в квазидвумерных перовскитах

А. В. Дыкова [1]✉, **Д. С. Гец** [2]
[1, 2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;
✉nastadykova544@gmail.com

Аннотация. В настоящей работе демонстрируется низкопороговое достижение усиленной спонтанной фотолюминесценции в тонких плёнках органо-неорганического перовскита. В квазидвумерных (квази-2D) перовскитах излучательная рекомбинация происходит преимущественно за счёт излучательной рекомбинации экситонов, а отличие от их трёхмерных аналогов, в которых эту функцию берут на себя свободные носители заряда. При этом фотолюминесценция у квази-2D выше, но и порог усиленной спонтанной люминесценции (УСЛ) тоже. Однако с помощью химического инжиниринга и контроля условий жидкостного синтеза можно добиться низких порогов УСЛ. При этом сохраняется простота и низкая стоимость метода, а также не требуются сложные или редкие лиганды.

Ключевые слова: Квазидвумерные перовскиты, фотолюминесценция, порог усиленной спонтанной люминесценции

Введение

Перовскиты – материалы, которые имеют хороший потенциал для использования в фотовольтаике, и, в частности, могут быть применены для изготовления светодиодов. Они имеют общую формулу $\boldsymbol{ABX_3}$ и кристаллическую структуру, схожую со структурой природного минерала перовскита. Здесь *A* – одновалентный катион металла, *B* – двухвалентный катион металла, а *X* – анион, как правило галоген.

К преимуществам перовскитов относится возможность перестройки по спектру в широком диапазоне, а также низкая себестоимость и высокая толерантность к дефектам. Главным недостатком данных материалов является их деградация под действием окружающей среды, а именно влаги и кислорода.

Методы химический инженерии позволяют бороться с недостатками, сохраняя преимущества. Так, частичное замещение металлического катиона *A* длинной органической молекулой *A'* позволяет получить слоистую структуру со свойствами мультиквантовых ям. Такой перовскит называется квазидвумерным и имеет общую химическую формулу $\boldsymbol{A_2'A_{n-1}B_nX_{3n+1}}$, где n – число, показывающее, какую часть катиона заместили.

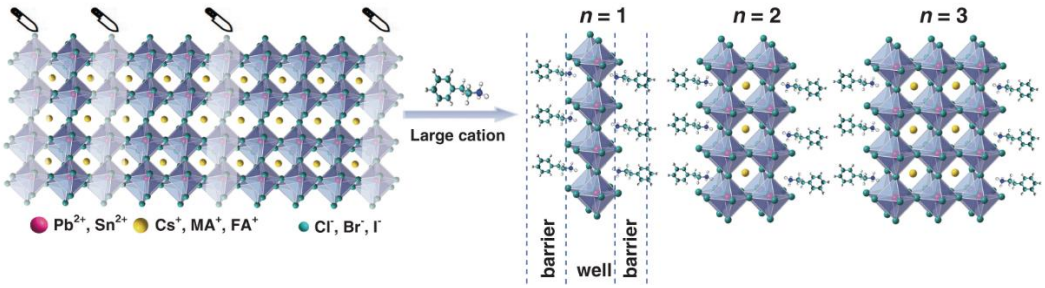


Рис. 1. Кристаллическая структура квазидвумерного перовскита [1]

Квази-2D перовскиты как правило демонстрируют более высокий квантовый выход фотолюминесценции, позволяют более тонкую перестройку по спектру и демонстрируют меньшую деградацию под действием окружающей среды по сравнению с трёхмерными аналогами, но их пороги усиленной спонтанной люминесценции, как правило, выше [2]. Однако путём варьирования параметров синтеза в данной работе удалось достичь низких порогов усиленной спонтанной люминесценции при высоких значениях квантового выхода.

Материалы и методы

В данной работе проводилось исследование квазидвумерного перовскита $BA_2'Cs_{n-1}PbBr_{3n+1}$, где BA – бутиламмоний. Для контроля кристаллизации, а также пассивации поверхности и инкапсуляции был добавлен полимер PEO (полиэтиленоксид).

Перовскит-полимерный композит наносился на стеклянную подложку методом центрифугирования, затем подвергался вакуумированию и отжигу (Рис. 2).

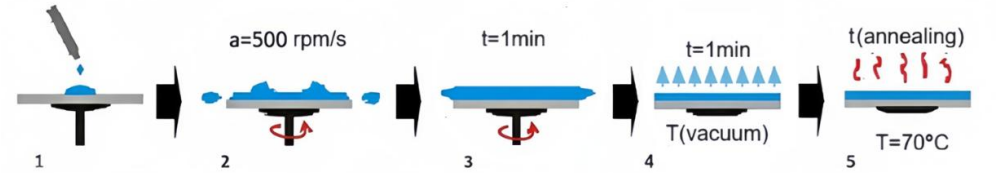


Рис. 2. Изготовление тонкой плёнки перовскита методом центрифугирования.

Нами было обнаружено, что температура вакуумирования (Рис.2.4) и время финального отжига (Рис.2.5) оказывают сильное влияние на процесс кристаллизации и результирующие оптические свойства перовскита.

1. Результаты и обсуждение

При комнатной температуре вакуумирования и 15-минутном отжиге удалось достичь низкопороговой фотолюминесценции (Рис. 3). Самый низкий порог - около $6{,}5\,\frac{\text{мкДж}}{\text{см}^2}$, - получен для перовскита с n=10.

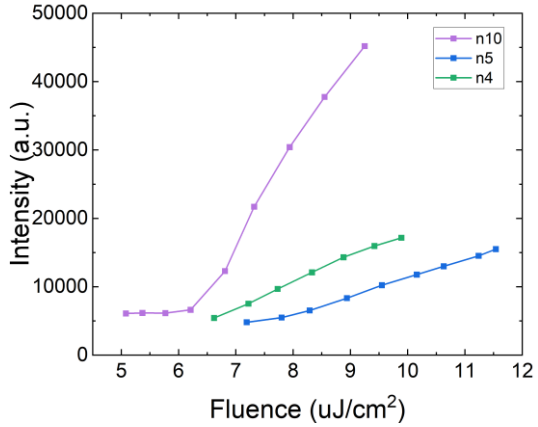


Рис. 3. Пороги усиленной спонтанной люминесценции

Этот результат говорит о возможности применения данного перовскита для изготовления высокоэффективных светодиодов сине-зелёного диапазона

Заключение

Условия синтеза перовскита значительно влияют на формирование его кристаллической структуры. Контролируя эти условия, можно добиться понижения количества дефектов и тем самым улучшить оптические свойства тонких перовскитных плёнок и повысить эффективность девайсов на их основе.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект Евгения Ивановича Терукова № 324051)

Список литературы

[1] Zhang L. et al. High-performance quasi-2D perovskite light-emitting diodes: from materials to devices //Light: Science & Applications. – 2021. – V. 10. – N. 1. – P. 61.

[2] Li Y. et al. Exciton versus free carrier emission: Implications for photoluminescence efficiency and amplified spontaneous emission thresholds in quasi-2D and 3D perovskites //Materials Today. – 2021. – Т. 49. – С. 35-47.

Расчет керровских солитонов в нитрид-кремниевом микрокольцевом резонаторе

Е. А. Фомина [1✉], **А. Б. Устинов** [1,]
[1] СПбГЭТУ «ЛЭТИ»;
✉e-mail@mail.com

Аннотация. В работе исследовано формирование керровских оптических частотных гребенок в микрокольцевом резонаторе из нитрида кремния (Si_3N_4). Динамика поля описывается уравнением Луджиато–Лефевера. Для резонатора с сечением волновода 1.58 × 0.75 мкм² и FSR = 88 ГГц, промоделирован диссипативный керровский солитон, что согласуется с экспериментальными данными. При этом в частотной области формируется оптическая частотная гребенка.

Ключевые слова: керровские гребенки, микрокольцевой резонатор, уравнение Луджиато–Лефевера.

Керровские оптические частотные гребенки представляют собой набор эквидистантных спектральных линий, генерируемых при непрерывной накачке лазером микрокольцевого резонатора за счет четырехволнового параметрического взаимодействия, возникающего в результате керровской нелинейности. Актуальность исследования таких структур обусловлена множеством их потенциальных применений в фундаментальной и прикладной физике, включая измерение физических констант, химическое зондирование, генерацию, измерение и распределение высокоточного времени, а также генерация микроволнового излучения с низким уровнем фазового шума [1]. Микрокольцевые резонаторы на основе нитрида кремния (Si_3N_4) являются перспективной платформой для генерации керровских оптических частотных гребенок благодаря совместимости с КМОП-технологией, низким оптическим потерям и высокому коэффициенту нелинейности [2]. В данной работе исследованы условия формирования керровских оптических частотных гребенок в микрокольцевом резонаторе на основе нитрида кремния.

Для описания динамики поля в микрокольцевом резонаторе в режиме аномальной дисперсии используется модифицированное уравнение Луджиато–Лефевера. Вывод данного уравнения детально представлен в работе [1]. В рамках модели приняты следующие допущения: одномодовый режим по поперечным координатам, пренебрежение рэлеевским рассеянием и высшими порядками дисперсии, а также постоянство добротности и нелинейного коэффициента во всем расчетном диапазоне. Обоснованность этих допущений подтверждена в работе [3].

Для решения уравнения Луджиато–Лефевера применяется split-step Фурье метод при периодических граничных условиях, что соответствует замкнутой геометрии резонатора. Данный метод является стандартным для задач подобного типа и позволяет разделять линейные и нелинейные вклады в эволюцию поля. Для моделирования керровских частотных гребенок в микрокольцевом резонаторе используется следующий алгоритм. На первом этапе формируется вычислительная сетка. Задается число точек по азимутальному углу, шаг по углу, полное нормированное время и шаг по времени. Затем рассчитываются волновые числа для частотной области. На втором этапе определяются нормированные параметры уравнения из физических параметров кольцевого резонатора: дисперсионный коэффициент, частота и амплитуда накачки. Затем вычисляются линейный и нелинейный операторы для split-step метода и запускается основной цикл по времени. В каждый момент времени выполняется последовательность: линейный полушаг в частотной области, нелинейный шаг в пространственной области, затем снова линейный полушаг. Через быстрые преобразования Фурье вычисляется интенсивность поля. Физические параметры моделируемого резонатора, соответствуют резонатору, который был исследован в работе [5]: сечение волновода 1.58 × 0.75 мкм², FSR = 88 ГГц. В результате моделирования был получен диссипативный керровоский солитон, рисунок 1. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными [4].

В рамках данной работы был также исследован микрокольцевой резонатор из нитрида кремния с меньшей толщиной волновода, его сечение равнялось 1.58 × 0.2 мкм², мощность накачки и частота отстройки не изменялись. Как показали расчеты, в таком случае формируются паттерны Тьюринга, а не светлый диссипативный солитон. Это связано с изменением знака дисперсионного коэффициента в результате уменьшения толщины волновода [5].

Представленная методика может быть использована для оценки параметров керровских гребенок в резонаторах с иной геометрией.

Работа поддержана грантом Минобрнауки № FSEE 2025-0014.

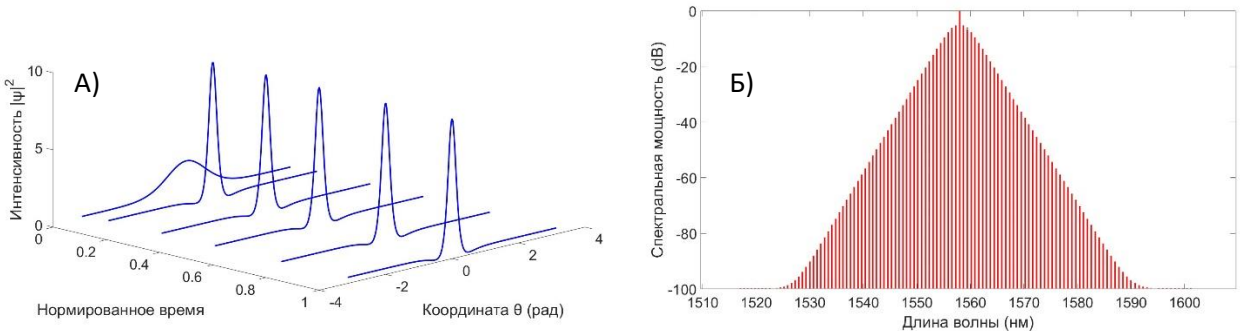


Рисунок 1 — Результат моделирования: а) пространственно-временная зависимость, б) спектр солитона

Список литературы

[1] Chembo Y. K., Menyuk C. R. Spatiotemporal Lugiato–Lefever formalism for Kerr-comb generation in whispering-gallery-mode resonators // Physical Review A. 2013. Vol. 87, No. 5. P. 053852.

[2] Kippenberg T. J., Holzwarth R., Diddams S. A. Microresonator-based optical frequency combs // Science. 2011. Vol. 332, No. 6029. P. 555–559.

[3] Godey C., Balakireva I. V., Coillet A., Chembo Y. K. Stability analysis of the spatiotemporal Lugiato–Lefever model for Kerr optical frequency combs in the anomalous and normal dispersion regimes // Physical Review A. 2014. Vol. 89, No. 6. P. 063814.

[4] Pfeiffer M. H. P., Liu J., Raja A. S., Morais T., Ghadiani B., Kippenberg T. J. Ultra-smooth silicon nitride waveguides based on the Damascene reflow process: fabrication and loss origins // Optica. 2018. Vol. 5, No. 7. P. 884–892.

[5] Balakireva I., Coillet A., Godey C., Chembo Y. K. Stability Analysis of the Lugiato-Lefever Model for Kerr Optical Frequency Combs. Part II: Case of Anomalous Dispersion // Preprint. 2013. (Dated: August 13, 2013).

Нейросетевой анализ устойчивости квази-связанных состояний в континууме к структурному беспорядку в метаструктурах

К.В. Семушев[1]✉, В.А. Порватов[2], Р.Х. Назаров[1], Н.А. Власов[1], З.Ф. Кондратенко[1], Е.Э. Маслова[1]

[1] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

[2] Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

✉kliment.semushev@metalab.ifmo.ru

Аннотация. При изготовлении метаструктур, поддерживающих связанные состояния в континууме (ССК), неизбежно возникает структурный беспорядок, приводящий к снижению добротности резонансов. В работе выполнено полноволновое моделирование позиционного беспорядка в цепочке керамических дисков и сформирован набор собственных мод вблизи целевых резонансных частот. На основе этих данных обучена нейросетевая модель, автоматически выделяющая квази-ССК по пространственной огибающей электрического поля. Показано, что квази-связанные состояния в континууме характеризуются существенно более гладким профилем огибающей по сравнению с другими модами при той же амплитуде беспорядка. Продемонстрировано, что модель, первоначально обученная на магнитных квадрупольных модах, после дообучения на малых выборках корректно обобщается также на магнитные дипольные и октупольные моды.

Ключевые слова: связанные состояния в континууме, метаструктуры, структурный беспорядок, машинное обучение.

Введение

Связанные состояния в континууме (ССК) – резонансные моды, добротность которых в идеальных периодических структурах бесконечна [1]. Высокая добротность перспективна для лазеров, сенсоров и устройств нелинейной оптики. При изготовлении реальных наноструктур периодичность неизбежно нарушается, превращая ССК в квази-ССК - высокодобротные резонансные состояния, образованные по механизму ССК [2]. Анализ зависимости добротности от степени беспорядка является затратным по времени и вычислительным мощностям. Использование нейросетей помогает ускорить процесс обработки [3].

Материалы и методы

В данной работе рассматривается периодический массив керамических дисков конечной длины. Структурный беспорядок задаётся случайными смещениями дисков относительно узлов решётки вдоль оси периодичности; амплитуда смещений σ варьируется в диапазоне от 0 до 0.15. Для каждого значения σ рассчитано по 100 реализаций, по результатам которых получены комплексные собственные частоты и пространственные профили распределения энергии собственных мод. Для автоматического выделения квази-ССК мы обучили нейросетевую модель, принимающую на вход огибающие модуля энергии поля вдоль сечений суперячейки. Обучение проводилось на магнитных квадрупольных модах (~16 000 реализаций) с последующей проверкой на магнитных дипольных и октупольных модах в структуре из диэлектрических цилиндров.

Результаты и обсуждение

При малых значениях амплитуды беспорядка σ добротность квази-ССК заметно превосходит добротности остальных мод, и нейросетевая модель уверенно выделяет целевое состояние. По мере увеличения σ контраст по добротности между модами постепенно снижается. При $\sigma \gtrsim 0.1$ пространственные профили мод существенно перемешиваются и становятся визуально трудно различимыми, что приводит к падению точности идентификации квази-ССК. Вместе с

тем показано, что дообучение модели на существенно меньших выборках (менее 1000 реализаций) обеспечивает корректную работу, в том числе для дипольных и октупольных мод.

Заключение

Применение нейросетевых методов позволяет отказаться от полного перебора и ручного анализа собственных мод суперячейки и оперативно оценивать влияние структурного беспорядка на добротность квази-ССК. Показано, что пространственная огибающая поля служит универсальным признаком, по которому обученная модель корректно обобщается на различные типы мультипольных резонансов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании метаповерхностей и других фотонных метаструктур с учётом неизбежного структурного беспорядка.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-12-00213.

Список литературы

[1] C. W. Hsu, B. Zhen, A. D. Stone, J. D. Joannopoulos, M. Soljačić, Nat. Rev. Mater. 1, 16048 (2016).

[2] Z. F. Sadrieva, I. S. Sinev, K. L. Koshelev, A. Samusev, I. V. Iorsh, O. Takayama, R. Malureanu, A. A. Bogdanov, A. V. Lavrinenko, ACS Photonics 4, 723 (2017).

[3] W. Ma, Z. Liu, Z. A. Kudyshev, A. Boltasseva, W. Cai, Y. Liu, Nat. Photonics 15, 77 (2021).

Асимметричные краевые топологические состояния в зигзагообразной цепочке из бианизотропных диэлектрических резонаторов

Г. Д. Курганов✉, **Ц. Син, Д. В. Жирихин**
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;
✉georgiy.kurganov@metalab.ifmo.ru

Аннотация. В работе исследуются свойства краевых топологических состояний в зигзагообразной цепочке, составленной из бианизотропных диэлектрических резонаторов. Благодаря нарушению зеркальной симметрии частиц они обладают бианизотропным откликом, кроме того, свойства цепочки также зависят от направления распространения возбуждающей плоской волны. Численно продемонстрировано возникновение краевых топологических состояний в цепочке при ее возбуждении плоской волной разных поляризаций при противоположных направлениях распространения. Результаты демонстрируют новый подход к управлению топологическими состояниями в цепочках типа «зигзаг».

Ключевые слова: топологические краевые состояния, бианизотропный отклик, диэлектрические резонаторы, микроволновый частотный диапазон

Введение

Зигзагообразная цепочка резонаторов является примером системы с топологически нетривиальными свойствами. Впервые она была описана в 2014 году [1]. Благодаря чередующемуся геометрическому расположению соседних элементов их взаимодействие при возбуждении плоской волной описывается моделью Су-Шриффера-Хигера [2], а изменение поляризации позволяет управлять краевыми топологическими состояниями в цепочке. Однако существующие реализации систем такого типа ограничиваются симметричными сферическими [3, 4] и цилиндрическими резонаторами [1, 5]. Одновременно с этим для построения топологических систем более высокой размерности распространение получили диэлектрические резонаторы с нарушенной зеркальной симметрией, обладающие бианизотропным откликом и поддерживающими полную запрещенную зону в микроволновом частотном диапазоне [6]. В данной работе исследуются свойства краевых топологических состояний в зигзагообразной цепочке, составленной из диэлектрических бианизотропных резонаторов.

Материалы и методы

Изображение и размеры бианизотропного резонатора представлены на рисунке 1, а. Резонатор представляет собой два соединенных соосно цилиндра диаметрами d_1 = 22 мм и d_2 = 29,1 мм и высотами h_1 = 3 мм и h_2 = 9 мм соответственно. Зигзагообразная цепочка была собрана из 16 таких резонаторов, расположенных вплотную друг к другу с постоянной $a_0 = d_2$ = 29,1 мм. Изображение цепочки представлено на рисунке 1, б. При помощи решателя *Frequency Domain Solver* в программном пакете *CST Microwave Studio* было выполнено численное моделирование возбуждения краевых топологических состояний в цепочке плоской волной при различных поляризациях и направлениях распространения.

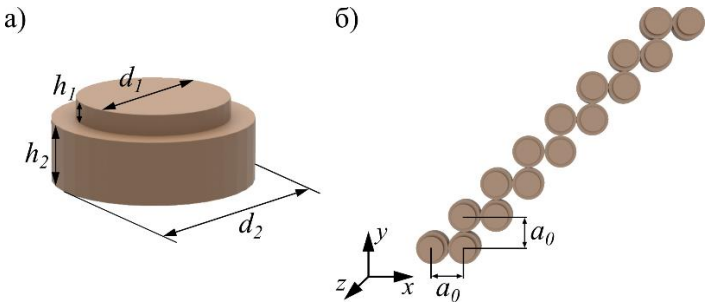


Рисунок 1 – Изображения и параметры исследуемых систем:
а – бианизотропный резонатор; б – зигзагообразная цепочка, составленная из бианизотропных резонаторов.

Результаты и обсуждение

Результаты численного моделирования возбуждения краевых топологических состояний в зигзагообразной цепочке представлены на рисунке 2. При облучении цепочки со стороны широкой части резонатора локализованные состояния в ней возбуждаются для волны x-поляризации (рисунок 2, а), и не возбуждаются для волны y-поляризации (рисунок 2, б). Однако при падении плоской волны со стороны узкой части резонатора поведение системы меняется кардинально: краевые состояния отсутствуют для x-поляризованной волны (рисунок 2, в), и возникают для y-поляризации (рисунок 2, г).

Зависимость возникновения краевых топологических состояний от поляризации падающей плоской волны объясняется изменением величины связи между резонаторами при вращении поляризации и согласуется с предыдущими результатами [1, 3–5]. Так, в цепочке из четного числа резонаторов для одной поляризации возбуждаются два краевых состояния на обоих концах системы, в то время как для ортогональной поляризации – ни одного. Асимметричность состояний относительно направления падающей плоской волны не была показана ранее и может быть объяснена разным характером взаимодействия волны с узкой и широкой частями резонатора. Следовательно, переключение цепочки от тривиальной к поддерживающей топологические состояния возможно путем изменения поляризации падающей плоской волны, либо направления ее распространения.

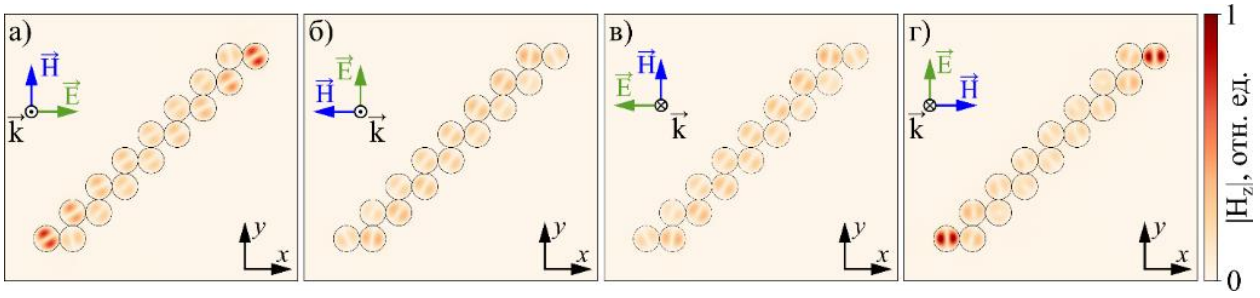


Рисунок 2 – Распределение модуля нормальной составляющей магнитного поля в цепочке при ее возбуждении плоской волной:
а, б – со стороны широкой части резонатора: а – x-поляризация, б – y-поляризация;
в, г – со стороны узкой части резонатора: в – x-поляризация, г – y-поляризация.

Заключение

В работе продемонстрирована зависимость возбуждения краевых топологических состояний в зигзагообразной цепочке, составленной из диэлектрических бианизотропных резонаторов, от поляризации падающей плоской волны и направления ее распространения. Таким образом, представлен новый механизм управления такими состояниями, который может быть масштабирован для использования в других частотных диапазонах.

Благодарности

Данная работа была выполнена при поддержке Программы «Приоритет 2030».

Список литературы

[1] A. Poddubny, A. Miroshnichenko, A. Slobozhanyuk, Y. Kivshar. ACS Photonics, **1**(2), 101 (2014).

[2] W. P. Su, J. R. Schrieffer, A. J. Heeger. Phys. Rev. B., **22**(4), 2099 (1980).

[3] A. P. Slobozhanyuk, A. N. Poddubny, A. E. Miroshnichenko, P. A. Belov, Y. S. Kivshar. Phys. Rev. Lett., **114**(12), 123901 (2015).

[4] A. P. Slobozhanyuk, A. N. Poddubny, I. S. Sinev, A. K. Samusev, Y. F. Yu, A. I. Kuznetsov, A. E. Miroshnichenko, Y. S. Kivshar. Laser Photonics Rev., **10**(4), 656 (2016).

[5] I. S. Sinev, I. S. Mukhin, A. P. Slobozhanyuk, A. N. Poddubny, A. E. Miroshnichenko, A. K. Samusev, Y. S. Kivshar. Nanoscale, **7**(28), 11904 (2015).

[6] A. Slobozhanyuk, S. H. Mousavi, X. Ni, D. Smirnova, Y. S. Kivshar, A. B. Khanikaev. Nat. Photonics, **11**(2), 130 (2017).

Формирование и сравнение оптических свойств локализованных излучателей на основе монослоёв дихалькогенидов переходных металлов, полученных методом локальной деформации зондом АСМ

Е. В. Неклюдов [1✉], **А. Н. Абрамов** [1], **Э. Моисеев** [2], **Э. Чиглинцев** [3], **В. А. Кравцов** [1],
[1] ITMO University, Saint-Petersburg, Russia;
[2] HSE University, Saint-Petersburg, Russia;
[2] MIPT University, Moscow, Russia;
✉egor.nekliudov@metalab.ifmo.ru

Аннотация На сегодняшний день разработка источников одиночных фотонов – это актуальная задача, так как они являются одним из основных компонентов устройств для квантовых вычислений и коммуникаций. Важным направлением является создание однофотонных излучателей, длина волны которых лежит вблизи окон прозрачности оптического волокна и которые могут быть применены для интеграции в оптоволоконные каналы связи. В данной работе были исследованы монослои дихалькогенидов переходных металлов WSe_2 и $MoTe_2$ как платформа для создания однофотонных излучателей. Методом локальной деформации были получены локализованные излучатели, исследованы их спектры фотолюминесценции и зависимости интенсивности излучения от мощности накачки. Было выявлено, что полученные локализованные излучатели на основе $MoTe_2$ [1] являются перспективными кандидатами для реализации однофотонных излучателей.

Ключевые слова: источники одиночных фотонов, монослои дихалькогенидов переходных металлов, атомно-силовая микроскопия.

Введение

Однофотонные квантовые излучатели (ОКИ) могут применяться в области квантовых технологий и квантовых коммуникаций, в частности, для развития технологии квантового распределения ключа. Важными параметрами однофотонных излучателей являются их спектральные характеристики. В частности, важной задачей является получение ОКИ с длиной волны, близкой к одному из окон прозрачности оптоволокна, так как с их помощью легче передавать сигналы на большие расстояния с минимальными потерями в оптоволоконных линиях связи. Излучатели на основе монослоёв дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) являются новой платформой для создания ОКИ. Одним из методов получения источников одиночных фотонов в монослоях ДПМ является метод локальной деформации зондом атомно-силового микроскопа (АСМ) [2]. В данной работе были изготовлены локализованные излучатели на основе монослоёв WSe_2 и $MoTe_2$ и произведено сравнение их оптических свойств.

Материалы и методы

Для получения монослоёв ДПМ использовался метод механической эксфолиации кристаллов: объемные кристаллы расщеплялись на лабораторном скотче и размещались на подложке из полидиметилсилоксана (ПДМС). Далее полученные монослои переносились на подложку ПММА (полиметилметакрилат)/SiO_2/Si.

Локализованные излучатели формировались в монослое методом локальной деформации образца зондом АСМ. Затупленный зонд АСМ (латеральный размер острия иглы около 400 нм), продавливая монослой, лежащий на ПММА, вызывает пластическую деформацию монослоя (рисунок 1а). Вблизи полученного углубления в монослое может образовываться пространственно локализованный источник света, являющийся ОКИ [2].

Измерение спектров фотолюминесценции (ФЛ) производилось при температуре 10 К с использованием постоянного лазера на длине волны 532 нм либо 633 нм. Мощность накачки лазера варьировалась в диапазоне от 0.5 до 30 мкВт.

1. Результаты и обсуждение

На рисунках 1б и 1в представлены характерные спектры локализованных излучателей на основе монослоёв WSe_2 и $MoTe_2$ (рисунки 1б и 1в). Для обоих видов монослоёв пики

локализованных излучателей наблюдались локально вблизи участков, деформированных зондом АСМ. Пики ФЛ излучателей на основе WSe_2 наблюдались в диапазоне 730–800 нм, а с монослоёв $MoTe_2$ – на длине волны 1130–1150 нм. Было выявлено, что: излучатели формируются в области локальной деформации; FWHM пиков ФЛ локализованных излучателей на основе монослоя $MoTe_2$ составляет около 0.8 мэВ, для пика основного экситона – 6.6 мэВ. Для излучателей на монослое WSe_2 FWHM для локализованного излучателя составляет 1–2 мэВ, а для пика основного экситона – 11 мэВ. Кроме того, для полученных локализованных излучателей характерно насыщение интенсивности ФЛ при увеличении мощности накачки.

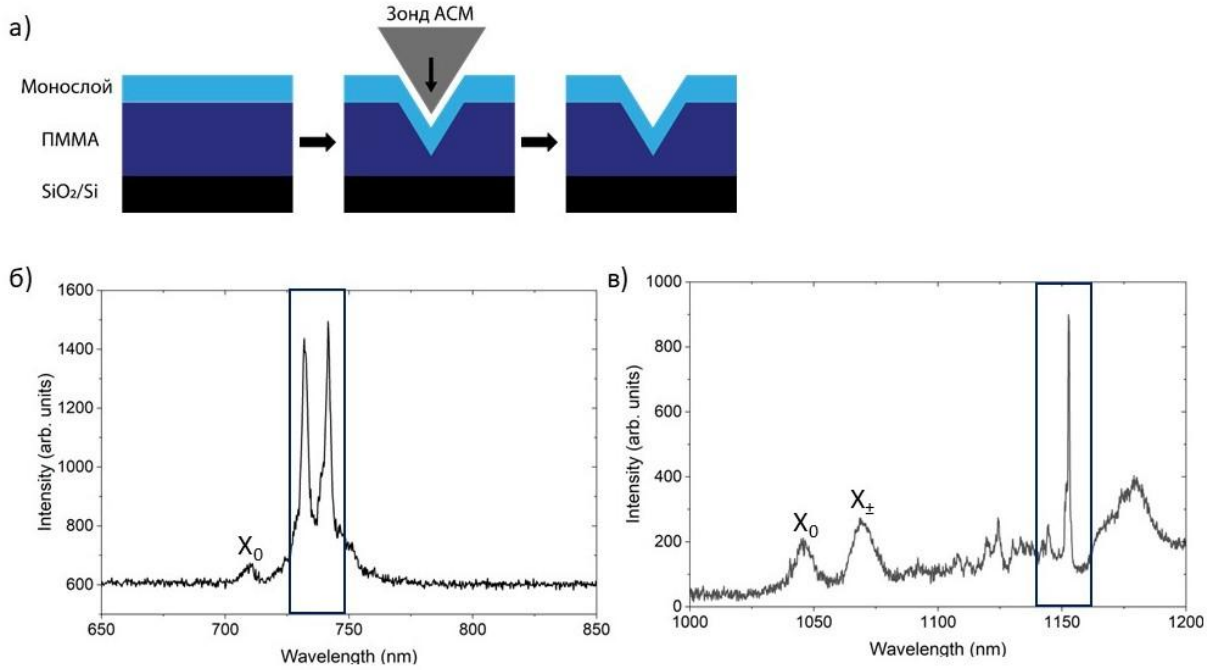


Рис. 1. а) Процесс формирования однофотонных излучателей в монослое ДПМ; б) Спектр фотолюминесценции одного из локализованных излучателей в монослое WSe_2; в) Спектр фотолюминесценции одного из локализованных излучателей в монослое $MoTe_2$, прямоугольниками обведены пики от локализованных излучателей. X_0 обозначен пик от экситона, а $X_{\pm}$ – пик от триона.

Заключение

В представленной работе были получены локализованные излучатели на основе двух материалов: WSe_2 и $MoTe_2$. Квантовые излучатели на основе монослоя $MoTe_2$ лежат на длине волны около 1140 нм, что близко ко второму окну прозрачности оптического волокна (1310 нм). Это значение ближе ко второму окну прозрачности, чем для WSe_2 (730–800 нм). Однако излучатели на монослоях WSe_2 характеризуются значительно меньшей мощностью насыщения (1 мкВт), чем излучатели на монослоях $MoTe_2$ (9.4 мкВт). Полученные результаты демонстрируют перспективность применения монослоёв $MoTe_2$ как платформы для создания квантовых излучателей.

Благодарности

Данное исследование было профинансировано грантом Российского Научного Фонда № 25-22-20038. Данное исследование было профинансировано грантом Санкт-Петербургского Научного Фонда № 20038-22-25.

Список литературы

[1] Zhao H. et al. Site-controlled telecom-wavelength single-photon emitters in atomically-thin MoTe2 //Nature communications. – 2021. – Т. 12. – №. 1. – С. 6753.

[2] Rosenberger M. R. et al. Quantum calligraphy: writing single-photon emitters in a two dimensional materials platform //ACS nano. – 2019. – Т. 13. – №. 1. – С. 904-912.

Управление оптическими свойствами смешаннокатионных и смешанногалогенидных коллоидных перовскитных нано и микрокристаллов

Е. В. Сапожникова [1,2]✉, **Д. А. Татаринов** [1,2], **Д. А. Семенов** [1] **А. П. Пушкарев** [1,2]

[1] Университет ИТМО, Санкт–Петербург, Россия;

[2] Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия;

✉e.sapozhnikova@metalab.ifmo.ru

Аннотация. Перовскитные коллоидные нанокристаллы обладают высокой реакционной способностью, что позволяет получать на их основе микрокразменые структуры за счет процессов самосборки, при этом изменение спектральных свойств кристаллов возможно путем замены катиона или аниона в кристаллической решётке. В данной работе представлены новые методы синтеза смешаннокатионных микроразмерных кристаллов состава $Cs(Pb,Cd)Br_3$ и $(Cs,Rb)PbBr_3$ в виде сверхрешеток и монокристаллов различной формы, а также изучены их оптические свойства в сравнении с кристаллами $CsPbBr_{3-x}Cl_x$ (x = 0–3). Было установлено, что частичная замена катиона приводит к улучшению оптических свойств кристаллов, в частности увеличению квантового выхода фотолюминесценции и повышению спектральной стабильности структур.

Ключевые слова: перовскит, сверхрешетки, микрокристаллы, коллоид.

Введение

Неорганические металлогалогенидные перовскиты (МГП) являются материалом, обладающим высокой подвижностью носителей заряда [1] и низкой концентрацией дефектов в решетке [2], обеспечивающей высокоинтенсивную люминесценцию при комнатной температуре. Благодаря вышеупомянутым преимуществам и простоте методов синтеза, перовскиты являются перспективным материалом для применения в различных устройствах фотоники и оптоэлектроники. Типичная кристаллическая структура МГП выглядит как ABX_3, где A и B – катионы металлов ($A=Cs^+$, $B=Pb^{2+}$), а X – галогенид-анион ($X=Br^-$, Cl^-, I^-). Наиболее широко используемым методом синтеза перовскитных нанокристаллов (НК) является метод коллоидной горячей инжекции, при котором кристаллы получают в растворе, заполненном лигандами, что позволяет точно контролировать процесс их нуклеации и роста [3]. Кроме того, метод горячей инжекции предоставляет возможность регулировать состав перовскитов и настраивать спектр излучения во всем видимом диапазоне путем частичного замещения катионов (например, введения ионов Cd^{2+}, или Rb^+), что также позволяет добиться улучшенной спектральной стабильности в сравнении со смешанногалогенидными кристаллами, которые подвержены фотоиндуцированной сегрегации галогенов [4]. Более того, их точные размеры, форма и структура могут контролироваться благодаря самосборке и повторному росту коллоидных НК, обусловленными силами Ван-дер-Ваальса [5]. Однако синтез микроразмерных коллоидных перовскитных кристаллов по-прежнему остается сложной задачей и крайне важным является найти новые методы для получения более стабильных перовскитов, излучающих во всем видимом диапазоне.

Материалы и методы

Перовскитные нанокристаллы $Cs(Pb,Cd)Br_3$ были синтезированы путем растворения бромида свинца ($PbBr_2$) в 1-октадецене с использованием олеиновой кислоты (OA) и олеиламина (OLAM) с помощью двухстадийного метода горячей инжекции, который заключался в медленном диффузионном замещении ионов свинца ионами кадмия из олеата $Cd(OA)_2$. При осушении НК от растворителя структуры образовывали сверхрешетки в форме пластинчатых микрокристаллов в результате процесса самосборки.

Для создания кристаллов $(Cs,Rb)PbBr_3$ была приготовлена смесь прекурсоров путем смешивания $PbBr_2$ с OA и OLAM в 7 мл дифенилового эфира и дальнейшего перемешивания при 120 °C. После нагрева коллоида до 140 °C был введен смешанный олеат цезия-рубидия, в результате чего образовались перовскитные нанокристаллы, которые

затем формировали микроразмерные монокристаллические структуры при дальнейшем перемешивании раствора в течение 2 часов. Введение ионов хлора в кристаллическую решетку осуществлялось путем диффузионного обмена полученного коллоида с солью хлорида иттрия YCl_3.

Оптические свойства кристаллов (спектры фотолюминесценции, лазерной генерации, кинетики затухания люминесценции) были изучены методами конфокальной спектроскопии при возбуждении структур фемтосекундными лазерными импульсами (λ=350) в различном диапазоне частот (10-100 кГц).

1. Результаты и обсуждение

Было установлено, что введение ионов кадмия в кристаллическую решетку в концентрации 12% приводит с сдвигу пика фотолюминесценции с 513 нм до 485, которое сопровождается увеличением квантового выхода люминесценции кристаллов в 1.3 раза, при этом среднее время жизни люминесценции уменьшилось с 15 до 5 нс. Это связано с тем, что в результате медленного замещения ионов свинца посредством диффузии происходила пассивация поверхностных вакансий, которая позволила заметно улучшить излучательную способность НК. Более того, образованные из НК сверхрешетки показали устойчивое положение пика люминесценции при воздействии на них до $3{,}6 \times 10^7$ лазерных импульсов.

В то же время кристаллы $(Cs,Rb)PbBr_3$ с содержанием рубидия более 3 % продемонстрировали сдвиг пика люминесценции микрокристаллов с 525 нм до 510-515 нм. В нитевидных и пластинчатых микрокристаллах также была получена стабильная лазерная генерация на протяжении $3{,}6 \times 10^8$ лазерных импульсов. Более того, введение ионов рубидия в состав смешанногалогенидных микрокристаллов $CsPb(Br,Cl)_3$ позволило замедлить процесс фотоиндуцированной сегрегации ввиду более устойчивого положения ионов Rb^+ в кристаллической решетке.

Заключение

В данной работе были представлены новые методы создания микроразмерных смешаннокатионных $(Cs,Rb)PbBr_3$ и $CsPb(Br,Cl)_3$ структур, демонстрирующих улучшение оптических свойств и спектральной стабильности в сравнении с нелегированными аналогами.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда науки (проект (проект 24-73-10072 https://rscf.ru/project/24-73-10072/).

Список литературы

[1] Herz, L. M. ACS Energy Letters, 2(7), 1539-1548, (2017).

[2] Brandt, R. E., Stevanović, V., Ginley, D. S., & Buonassisi, T. Mrs Communications, 5(2), 265-275, (2015).

[3] Li, H., Zhao, G., Song, B., Mao, Z., Qian, Y., Dong, W., & Han, G. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 113(1), 11-22, (2025).

[4] Soosaimanickam, A., Manidurai, P., Krishna Sundaram, S., & Sridharan, M. B. (pp. 143-179). Singapore: Springer Nature Singapore. (2023).

[5] Liu, J., Zheng, X., Mohammed, O. F., & Bakr, O. M. Accounts of Chemical Research, 55(3), 262-274. (2022).

Разработка метода формирования мембранных структур на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs с квантовой ямой InGaAs с использованием фокусированного ионного пучка и селективного жидкостного травления

Д. В. Кириченко [1]✉, **Н. Е. Солодовник** [1], **Д. Д. Духан** [1], **С. В. Балакирев** [1], **М. С. Солодовник** [1]

[1] Лаборатория эпитаксиальных технологий, Южный федеральный университет, Таганрог 347922, Россия

✉dankir@sfedu.ru

Аннотация. Показана возможность формирования мембранных микроразмерных структур на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs с квантовой ямой InGaAs с использованием фокусированного ионного пучка и селективного жидкостного травления жертвенного слоя $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$. Исследованы фотолюминесцентные характеристики кольцевых и квадратных структур размером 10 мкм на различных стадиях травления. Установлено, что после ФИП-модификации и последующего селективного травления интенсивность фотолюминесценции зависит от этапа травления, а на заключительном этапе для всех исследованных структур оказывается сопоставимой с референсной или превышает её. Для сформированных структур также зафиксировано длинноволновое смещение максимума фотолюминесценции до 10 нм.

Ключевые слова: фокусированный ионный пучок, селективное жидкостное травление, мембранные структуры, квантовая яма InGaAs, гетероструктура GaAs/AlGaAs.

Введение

Полупроводниковые гетероструктуры A3B5 широко используются при создании микроразмерных источников света и интегральных фотонных систем, включая мембранные резонаторы [1]. Формирование частично или полностью отделённых от подложки структур представляет интерес, поскольку позволяет уменьшить утечку оптических мод в подложку и изменить условия локализации и вывода излучения [2]. Одним из перспективных подходов формирования мембранных микроразмерных излучающих структур является сочетание методов ФИП и жидкостного травления, позволяющее отказаться от использования литографических методик. Для систем A3B5 данный подход активно исследуется [3], но материалы GaAs/AlGaAs с квантовой ямой InGaAs остаются малоизученными, особенно с точки зрения сохранения фотолюминесцентных свойств после ФИП-модификации.

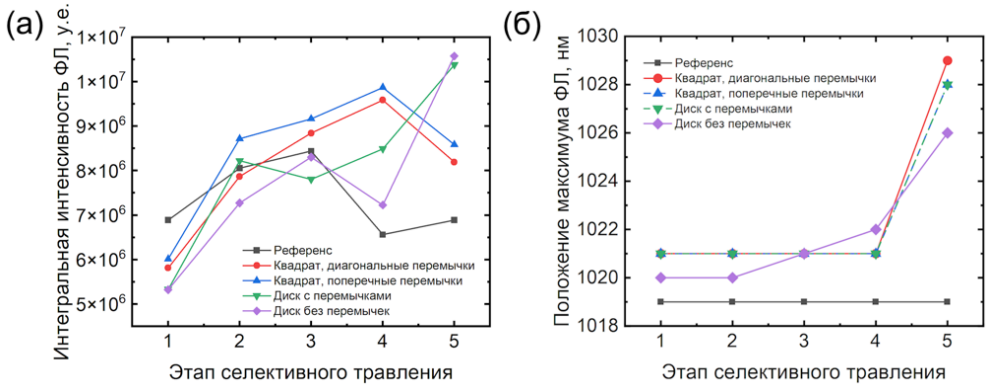
Материалы и методы

В работе исследовались фотолюминесцентные характеристики микроразмерных структур, сформированных на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs с квантовой ямой InGaAs. Для реализации подвешенной геометрии в структуре был предусмотрен жертвенный слой $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$. Для снижения воздействия ионов Ga^+ поверхность предварительно наносился слой SiO_2. Фокусированным ионным пучком были сформированы кольцевые и квадратные микроразмерные структуры с характерным размером 10 мкм, включая структуры с субмикронными перемычками и без них. После этого проводилось поэтапное селективное травление жертвенного слоя в 1%-м растворе HF. После каждой стадии травления структуры исследовались методом спектроскопии фотолюминесценции. В качестве референса использовался сигнал немодифицированной области, измеренный на соответствующем этапе.

Результаты и обсуждение

Установлено, что изменение фотолюминесцентных характеристик в процессе селективного травления носит немонотонный характер. На рисунке 1а показана интегральная интенсивность от этапа селективного травления. Для квадратных структур

интегральная интенсивность возрастает до четвёртого этапа травления, после чего на пятом этапе наблюдается её снижение. Для дисковых структур интегральная интенсивность фотолюминесценции увеличивается по мере вытравливания жертвенного слоя. На заключительном этапе все исследуемые структуры демонстрируют сигнал ФЛ, сопоставимый с референсом или превышающий его. Снижение интенсивности относительно референсного значения на первых стадиях травления, вероятно, связано с тем, что структура ещё не полностью отделена от подложки, вследствие чего сохраняется утечка части оптической моды в подложку, тогда как влияние боковых поверхностей уже начинает возрастать. Последующий рост фотолюминесценции может быть обусловлен уменьшением потерь, связанных с подложкой, и изменением пространственного распределения оптической моды. Снижение сигнала для квадратных структур на пятом этапе, может быть связано с их большей чувствительностью к краевым эффектам и состоянию поверхности после удаления защитного слоя оксида. Для всех типов структур также наблюдается длинноволновое смещение максимума фотолюминесценции. Максимальный сдвиг достигает 10 нм относительно исходного референсного значения 1019 нм и наблюдается после завершающего этапа травления, что, вероятно, связано с изменением локального напряжённого состояния вследствие частичной релаксации упругих напряжений, возникающих из-за рассогласования решеток ямы и матрицы.



Ри. 1. Зависимости интегральной интенсивности фотолюминесценции (а) и положения максимума фотолюминесценции (б) от этапа селективного травления для структур различной топологии

Заключение

Таким образом, разработан метод формирования подвешенных микроразмерных структур на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs с квантовой ямой InGaAs с использованием фокусированного ионного пучка и селективного жидкостного травления. Показано, что данный подход обеспечивает сохранение фотолюминесцентных свойств после ФИП-модификации и может использоваться для формирования излучающих микроразмерных структур на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, грант № FENW-2025-0004 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Передовые технологии микро- и оптоэлектроники» в Южном федеральном университете.

Список литературы

[1] Y. Nowicki-Bringuier, J. Claudon, C. Böckler, S. Reitzenstein, M. Kamp, A. Morand, A. Forchel, J. Gérard, Opt. Express, 15, 17291 (2007).
[2] P. Jiang, K. C. Balram, Opt. Express, 28(8), 12262 (2020).
[3] L. A. M. Barea, F. Vallini, A. R. Vaz, J. R. Mialichi, N. C. Frateschi, J. Vac. Sci. Technol. B, 27(6), 2979 (2009).

Параметрическое исследование и сравнительный анализ электромагнитного поля в системе из двух сферических наночастиц для различных металлов: алюминия, платины и магния

И. А. Цаплин [1]✉, **А. А. Лизунова** [1]

[1] Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия

✉tsaplin.ia@phystech.edu

Аннотация. В работе представлены результаты численного моделирования и сравнительного анализа электромагнитного поля в системе, состоящей из двух сферических наночастиц (НЧ) одинакового диаметра для различных материалов: алюминия (Al) и магния (Mg) со структурой ядро-оболочка и платины (Pt). Исследовано влияние диаметра наночастиц, расстояния между поверхностями наночастиц и толщины диэлектрической оксидной оболочки для наночастиц Al и Mg на величину электромагнитного поля, локализованного между частицами при возбуждении на различных длинах волн.

Ключевые слова: наночастицы, плазмонный резонанс, алюминий, платина, магний

Введение

Металлические НЧ, обладающие плазмонным резонансом, широко используются в биологических и химических сенсорах, спектроскопии, химическом зондировании и фотокатализе. В настоящее время наиболее широко используются наночастицы золота (Au) и серебра (Ag). Для плазмонно-управляемых применений в ультрафиолетовой области наночастицы алюминия и магния представляют собой альтернативу наночастицам Au благодаря своей низкой стоимости, стабильности за счет образования естественного оксида на поверхности металлического ядра и доступности [1]. Наночастицы Pt, характеризующиеся химической стабильностью и устойчивостью к окислению, рассматриваются как перспективный материал для создания плазмонных устройств, функционирующих в ульрафиолетовой и видимой областях. Таким образом, целью работы является исследование влияния размера, морфологии, материала и расстояния между частицами на усиление электромагнитного поля в зазоре между частицами для оптимаизации сенсорных свойств плазмонных наноструктур в ультрафиолетовой области.

Материалы и методы

Численное моделирование электромагнитного поля в системе двух наночастиц в воздушной среде выполнялось с помощью COMSOL Multiphysics с использованием модуля «Wave Optics». Окружающая среда - воздух. Оптические свойства Al, Pt и Mg задавались по данным из библиотеки материалов. Оксиды алюминия (Al_2O_3) и магния (MgO) – по интерполяции экспериментальных данных. Возбуждение осуществлялось плоской линейно поляризованной волной, распространяющейся перпендикулярно оси, соединяющей центры частиц. Исследуемый диапазон параметров: диаметр частиц d = 20-120 нм (шаг 5 нм); зазор между поверхностями L = 2-20 нм (шаг 2 нм), толщина оксидной оболочки Al частиц d_{ox} = 3-9 нм (шаг 2 нм), толщина оксидной оболочки Mg частиц d_{ox} = 3-11 нм (шаг 2 нм). Спектральный диапазон: для Al - λ = 150-500 нм, для Pt - λ = 200-700 нм, для Mg - λ = 150-600 нм (шаг 10 нм).

1. Результаты и обсуждение

Обнаружено, что максимальное усиление локального поля для Al наночастиц достигается при минимальном межчастичном зазоре L = 2 нм и составляет $|E|/|E_0|$ = 11,2. Данное значение зафиксировано для двух комбинаций параметров: λ = 210 нм при d = 60 нм и λ = 220 нм при d = 115 нм. На рис. 1 приведены спектральные зависимости усиления поля для Al, Pt и Mg частиц разного диаметра при L = 2 нм. Для Mg максимальное усиление составляет $|E|/|E_0|$ = 17.2. Данное значение зафиксировано при λ = 250 нм, d = 65 нм. Показано, что резонансная длина волны смещается в длинноволновую область с ростом размера частиц. Обнаружно существенное влияние оксидного слоя на усиление поля как

для алюминия, так и для магния: с увеличением толщины оболочки интенсивность поля умепньшается. При d > 80 нм для Al в спектрах усиления появляются дополнительные пики, что свидетельствует о возбуждении мод высшего порядка [2, 3]. Характер спектральных зависимостей Mg подобен наблюдаемому для Al, однако по величине усиления локального поля магний превосходит алюминий более чем в 1,5 раза. Для платиновых наночастиц максимальное усиление выше и достигает $|E|/|E_0| = 16{,}9$ (L = 2 нм, λ = 450 нм, d = 120 нм). В отличие от Al и Mg, резонансная длина волны для Pt слабо зависит от зазора, а спектральные кривые имеют один широкий пик.

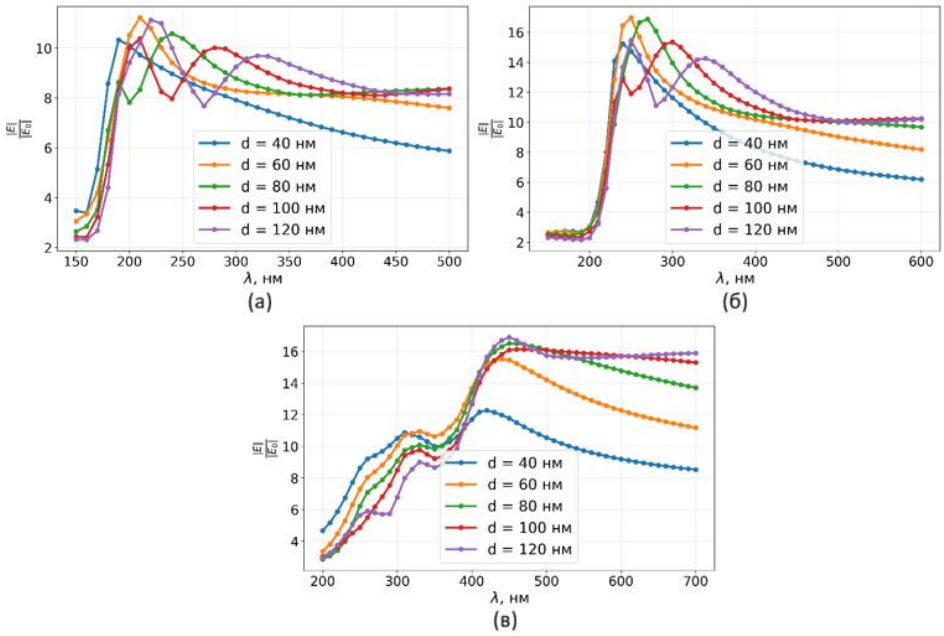


Рис. 1Зависимости усиления поля от длины волны для частиц Al (а), Mg (б) и Pt (в) размерами 40, 60, 80, 100 и 120 нм при расстоянии между частицами L = 2 нм. Толщина оксидных оболочек Al и Mg 3 нм.

Заключение

В результате численного моделирования определены оптимальные геометрические параметры системы, обеспечивающие максимальное усиление электромагнитного поля в межчастичном зазоре. Установлены следующие максимальные величины усиления электромагнитного поля в зазоре идентичных наночастиц: для НЧ магния диаметром 65 нм при длине волны 250 нм – 17 раз. Для платины - 17 при 450 нм для частиц диаметром 120 нм, алюминия – 11 при длине волны 210 нм, диаметре 60 нм и длине волны 220 нм, диаметре 115 нм. Полученные в работе параметрические зависимости могут быть использованы при проектировании плазмонных структур с заданными свойствами для ультрафиолетовой и видимой спектроскопии, и других применений.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00311-П, https://rscf.ru/project/22-19-00311/.

Список литературы

[1] C. A. West, V. Lomonosov, Z. S. Pehlivan, E. Ringe, Plasmonic Magnesium Nanoparticles Are Efficient Nanoheaters // Nano Lett., 23(23), 10734 (2023).
[2] M.W. Knight, N.S. King, L. Liu, H.O. Everitt, P. Nordlander, N.J. Halas, Aluminum for Plasmonics // ACS Nano, 8, 834–840 (2014).
[3] A.A. Ramanenka, A.A. Lizunova, A.K. Mazharenko, M.F. Kerechanina, V.V. Ivanov, S.V. Gaponenko, Preparation and Optical Properties of Isopropanol Suspensions of Aluminum Nanoparticles // J. Appl. Spectrosc. V. 87, P. 662–667 (2020).

Влияние диффузии носителей заряда на оптические свойства галогенидных перовскитных люминофоров с памятью

А.А. Экгардт [1]✉, А.А. Марунченко [2], Е.В. Сапожникова [1,3], Г.А. Верхоглядов[3], А.П. Пушкарев [1,3]

[1] Университет ИТМО, Санкт–Петербург, Россия;
[2] Университет Лунда, Лунд, Швеция;
[3] Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия;
✉ aleksei.ekgardt@metalab.ifmo.ru

Аннотация. Мемлюмор – оптический аналог мемристора, сочетающий функции памяти и модуляции сигнала. Выходной сигнал люминесценции зависит не только от возбуждающего светового сигнала, но и от текущего состояния материала. Для реализации мемлюморов хорошо подходят металлогалогенидные перовскитные люминофоры, которые за счет взаимодействия структурных дефектов с окружающей средой учитывают историю предыдущих взаимодействий, таким образом обеспечивая эффект памяти. Люминесценцию в перовскитах описывает модель Шокли–Рида–Холла, учитывающая динамику носителей заряда. Диффузия носителей заряда играет ключевую роль и сильно зависит от размеров мемлюмора. В работе исследуется функциональность перовскитных мемлюморов в зависимости от их характерных размеров для определения оптимальных параметров элементов для будущих оптических нейроморфных вычислительных архитектур.

Ключевые слова: Нейроморфные системы, мемлюморы, металлогалогенидные перовскиты, фотолюминесценция, диффузия носителей заряда, квантовый выход, время–разрешенная фотолюминесценция, модель Шокли–Рида–Холла, оптические вычислительные системы.

Введение

Архитектура фон Неймана, используемая в большинстве современных компьютеров, ограничена в производительности и энергоэффективности, что в последнее время стало важно для задач искусственного интеллекта и обработки больших данных [1]. Альтернатива – оптические нейроморфные архитектуры, вдохновленные биологическими нейронными сетями. Ключевым элементом в таких системах является мемлюмор [2], сочетающий память и фотолюминесценцию. Металлогалогенидные перовскиты подходят для реализации мемлюморов благодаря высокой подвижности носителей заряда, высокому квантовому выходу фотолюминесценции и простоте синтеза [3]. Эффекты памяти в перовскитах длятся от миллисекунд до минут из-за фотохимической активности. Размеры элементов имеют большое значение: длина диффузии носителей заряда превышает микрометры [4], что модулирует концентрацию носителей и сигнал люминесценции [5]. Работа оценивает влияние размера мемлюмора на функциональность. Проведены эксперименты: равномерная засветка микро- и нанокристаллов (100–1000 нм) $CsPbBr_3$ и время-разрешенная люминесценция $MAPbBr_3$ пленок (70–450 нм) при разных частотах импульсов.

Материалы и методы

$CsPbBr_3$ микрокристаллы были синтезированы из раствора (0,3 ммоль CsBr + 0,3 ммоль $PbBr_2$ в DMSO), нанесенного методом центрифугирования при 6000 об/мин на стеклянную подложку, которая затем помещалась в чашку Петри с 180 мл изопропанола. Затем 0,32 мл раствора выкапывалось на подложку и она оставалась на 10 минут в чашке Петри при 70 °C для роста кристаллов.

Пленки $MAPbBr_3$ (0,4–1,5 М) были нанесены спин-коатером при 3000 об/мин (толщины 70–450 нм).

Структурная характеризация была проведена методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Фотолюминесцентные изображения были получены на микроскопе Axio Imager.A2m (Carl Zeiss SMT). Обработка изображений производилась в программах ImageJ, Gwyddion. Моделирование динамики

носителей заряда производилась на Python по модели Шокли–Рида–Холла с учетом диффузии. Измерения кинетик затухания люминесценции осуществлялись при возбуждении структур фемтосекундным лазером – TEMA (Авеста) 350 нм, в диапазоне частот 10–200 кГц, при плотности энергии накачки 100 нДж/см².

1. Результаты и обсуждение

Исследование зависимости квантового выхода микрокристаллов $CsPbBr_3$ от их линейного размера проводилось при помощи обработки двух изображений – флуоресцентного и полученного на СЭМ. Из полученных результатов было установлено, что интегральное значение фотолюминесценции при изменении линейных размеров кристаллов от 100 до 1000 нм практически не меняется, а квантовый выход уменьшается, пропорционально обратному квадрату.

Для пленок $MAPbBr_3$ толщина измерялась при помощи АСМ и составила от 70 до 450 нм. Динамика носителей заряда изучалась методом время-разрешенной фотолюминесценции с временным разрешением до 100 пс. Полученные зависимости показали наличие двух компонент времени жизни носителей: быструю (порядка единиц нс), связанную с диффузией и медленную. Численное моделирование на основе модели Шокли-Рида-Холла с добавлением диффузии подтвердили полученную экспериментально связь диффузии с быстрой компонентой затухания фотолюминесценции, однако выявило количественные расхождения между теорией (моделью) и экспериментом.

Заключение

В результате работы было установлено, что предпочтительнее работать с элементами, не связанными друг с другом, в которых диффузия минимизирована. Данный результат важен для разработки мемлюморных массивов, с плотностью элементов, сопоставимой с современными транзисторными схемами (10^{10} $см^{-2}$).

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда науки (проект 25–29–00520, https://rscf.ru/project/25–29–00520/).

Список литературы

[1] Merolla P.A., Arthur J.V., Alvarez–Icaza R. et al., A million spiking–neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface. Science, 345 (2014) 668–673.

[2] Marunchenko A., Kumar J., Kiligaridis A. et al., Memlumor: A Luminescent Memory Device for Energy–Efficient Photonic Neuromorphic Computing. ACS Energy Letters, 9 (2024) 2075–2082.

[3] Pushkarev A.P., Korolev V.I., Markina D.I. et al., A Few–Minute Synthesis of CsPbBr3 Nanolasers with a High Quality Factor by Spraying at Ambient Conditions. ACS Applied Materials & Interfaces, 11 (2019) 1040–1048.

[4] Stranks S.D., Eperon G.E., Grancini G. et al., Electron–Hole Diffusion Lengths Exceeding 1 Micrometer in an Organometal Trihalide Perovskite Absorber. Science, 342 (2013) 341–344.

[5] Marunchenko A., Kumar J., Kiligaridis A. et al., Charge Trapping and Defect Dynamics as Origin of Memory Effects in Metal Halide Perovskite Memlumors. The Journal of Physical Chemistry Letters, 15 (2024) 6256–6265.

Оптическое детектирование муаровых экситонов в ван-дер-ваальсовых гетероструктурах при комнатной температуре

Т. О. Осколкова [1]✉, Y. Koo [2], А. А. Шубник [1], И. Ю. Честнов [1], K.-D. Park [2], P. Bhalla [3], И. В. Иорш [1], В. Кравцов [1]

[1] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;

[2] Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, Republic of Korea

[3] Department of Physics, SRM University AP, Amaravati, 522240, India

✉ tatiana.oskolkova@metalab.ifmo.ru

Аннотация. Последние достижения в области исследования ван-дер-вальсовых гетероструктур вывели их в разряд уникальных платформ для реализации квантовых симуляторов. Ключевая особенность данных систем – муаровая сверхрешётка, периодический потенциал которой способен локализовывать межслоевые экситоны. До сих пор экспериментальное наблюдение локализованных муаровых экситонов требовало сверхнизких температур, что существенно ограничивает практическое применение систем на их основе. В данной работе реализован метод оптического детектирования муаровых экситонов, основанный на локальной деформации гетероструктуры. Продемонстрировано, что деформация приводит к возникновению выраженных резонансов в спектре фотолюминесценции межслоевого экситона, соответствующих локализованным состояниям в муаровом потенциале.

Ключевые слова: Муаровые экситоны, ван-дер-ваальсовые гетероструктуры, локальная деформация.

Введение

Муаровые сверхрешётки, формируемые при укладке атомарно тонких слоев ван-дер-ваальсовых материалов с углом поворота или рассогласованием постоянных решёток, выступают в качестве перспективной платформы для создания квантовых симуляторов [1]. Ключевой особенностью таких сверхрешёток является формирование периодического муарового потенциала, способного локализовывать оптически возбуждённые межслоевые электрон-дырочные пары, что приводит к образованию так называемых муаровых экситонов [2]. Муаровые экситоны обладают настраиваемой энергией связи, большими временами жизни и оптическими правилами отбора, что позволяет реализовывать на их основе сильно коррелированные экситонные состояния, такие как моттовский изолятор [3, 4] и обобщённый вигнеровский кристалл [4]. Стоит отметить, что до сих пор оптическое детектирование муаровых экситонов в виде нескольких резонансов в спектре фотолюминесценции межслоевого экситона было возможно только в условиях сверхнизких температур [2, 5]. В данной работе представлен метод оптического наблюдения муаровых экситонов при комнатной температуре, основанный на локальной деформации гетероструктуры с помощью зонда атомно-силового микроскопа (АСМ).

Материалы и методы

Гетероструктуры MoS_2/WSe_2 были изготовлены на эластичной подложке из полидиметилсилоксана с помощью метода механической эксфолиации и сухого переноса. Угол поворота между слоями контролировался путем измерения сигнала второй оптической гармоники с угловым разрешением. В результате были получены образцы двух типов: R-стакинг ($0.3° \pm 0.1°$) и H-стакинг ($60° \pm 0.1°$). Для оптических измерений была собрана установка, объединяющая спектроскопию фотолюминесценции с электроникой АСМ (NT-MDT). Локальная деформация создавалась вертикальным перемещением зонда АСМ в сторону образца. Оптическое возбуждение осуществлялось непрерывным лазером с длиной волны 594 нм, излучение которого фокусировалось на образец через объектив 100x с числовой апертурой 0.8. В результате была получена серия спектров фотолюминесценции, зарегистрированных при разных степенях деформации гетероструктуры. Теоретический расчёт муарового потенциала структуры MoS_2/WSe_2 выполнялся с помощью теории функционала плотности.

1. Результаты и обсуждение

В гетероструктуре MoS_2/WSe_2 наблюдается формирование прямого межслоевого экситона с энергией излучения около 1 эВ. В отсутствие деформации спектр фотолюминесценции не имеет выраженных особенностей, тогда как для деформированной гетероструктуры наблюдается возникновение шести разрешённых резонансов (X1–X6) (рис. 1а). Мы полагаем, что появление данных резонансов обусловлено локализацией межслоевых экситонов в муаровом потенциале.

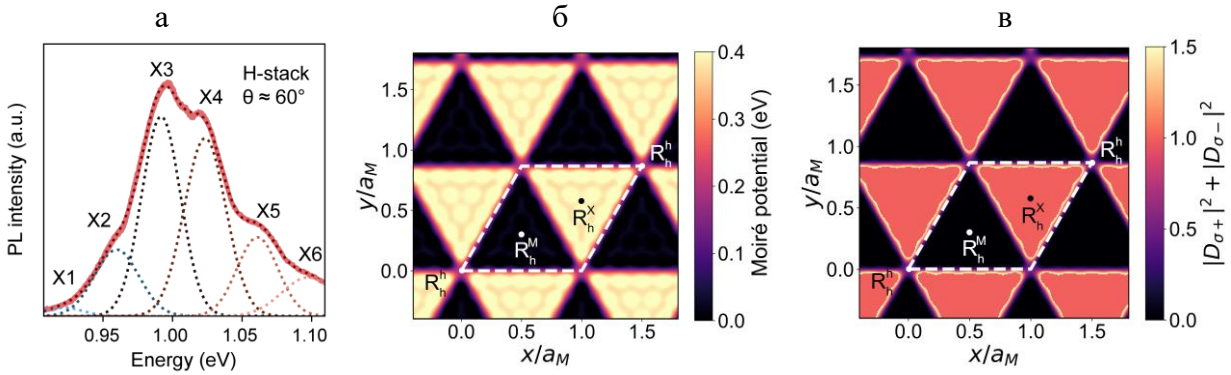


Рис. 1. (а) Спектр фотолюминесценции межслоевого экситона в деформированной гетероструктуре MoS_2/WSe_2 при комнатной температуре; (б) теоретически рассчитанный муаровый потенциал для гетероструктуры MoS_2/WSe_2 (белым пунктиром выделена элементарная ячейка муаровой решетки); (в) карта профиля суммы квадратов дипольных матричных элементов для лево- и правозакрученных циркулярных поляризаций.

В муаровой сверхрешётке тип укладки слоёв варьируется в пределах элементарной ячейки. Так, можно выделить три точки высокосимметричной укладки: R_h^h, R_h^M, R_h^X. Согласно расчётам (рис. 1б), минимум потенциала для исследуемой гетероструктуры находится в точке R_h^M. Как показано на рис. 1в, в данной точке излучение является оптически тёмным. Данное наблюдение объясняет форму экспериментально полученного спектра фотолюминесценции: пик X1, отвечающий основному экситонному состоянию, характеризуется малой силой осциллятора вследствие локализации экситона в оптически тёмной точке R_h^M. По мере увеличения энергии экситонные состояния начинают делокализоваться из точки R_h^M в более яркие домены муаровой сверхрешётки. Вследствие этого сила осциллятора для высокоэнергетичных экситонных состояний возрастает. На основе данных рассуждений был смоделирован спектр муаровых экситонов при комнатной температуре, который соотвествует экспериментальному.

Заключение

В работе предложен метод оптического детектирования муаровых экситонов при комнатной температуре. Показано, что деформация приводит к появлению выраженных резонансов в спектре фотолюминесценции межслоевого экситона, соответствующих локализованным состояниям в муаровом потенциале. Представлена теоретическая модель, количественно объясняющая форму экспериментально полученного спектра.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-42-01019.

Список литературы

[1] D. M. Kennes, M. Claassen, et al. Nature Physics, **17**(2),155-163 (2021).
[2] K. Tran, G. Moody, et al. Nature, **567**(7746), 71-75 (2019).
[3] Z. Lian, Y. Meng, et al. Nature Physics, **20**(1), 34-39 (2024).
[4] E. C. Regan, D. Wang, et al. Nature, **579**(7799), 359-363 (2020).
[5] X. Sun, Y. Zhu, et al. Nature, **610**(7932), 478-484 (2022).

Микродисковые лазеры с квантовыми ямами InGaAsN/GaAs с пассивацией плазмохимическим осаждением SiO_2

В. И. Войтович [1✉], **И. А. Мельниченко** [1], **И. С. Махов** [1], **М. С. Солодовник** [2], **Н. В. Крыжановская** [1], **А. Е. Жуков** [1]

[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург, Россия;

[2] Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

✉vvoytovich@hse.ru

Аннотация. Исследованы спектры электролюминесценции микродисковых лазеров диаметром от 12 до 32 мкм с активной областью на основе квантовых ям InGaAsN/GaAs с пассивацией поверхности диоксидом кремния и без пассивации при различных токах инжекции. Продемонстрирована лазерная генерация во всех образцах. Показано, что пассивация поверхности диоксидом кремния обеспечивает снижение пороговых токов в 3-5 раз по сравнению с непассивированными структурами.

Ключевые слова: микродисковые лазеры, пассивация, диоксид кремния.

Введение

Полупроводниковые соединения A3B5 являются одними из ключевых в современной оптоэлектронике, особенно применительно к созданию на их основе светоизлучающих устройств. Однако они характеризуются высокой плотностью поверхностных состояний и образованием на поверхности паразитных оксидов [1], например Ga_xO_y и As_xO_y для случая GaAs, что приводит к увеличению скорости безызлучательной поверхностной рекомбинации, которая становится ещё более критичной при миниатюризации устройств. Для микролазеров с активной областью на основе квантовых ям (КЯ) поверхностная безызлучательная рекомбинация приводит к большим величинам пороговых токов и усложнению работоспособности при комнатной температуре [2]. С целью подавления влияния поверхности на характеристики микролазеров применяют различные методы пассивации, которые позволяют снизить плотность поверхностных состояний. Одним из перспективных методов пассивации поверхности выступает методика плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD-метод), которая отличается низкой температурой осаждения, быстротой реализации и относительной дешевизной процесса. Настоящая работа посвящена изучению влияния пассивации поверхности с помощью диоксида кремния, нанесённого PECVD-методом, на спектрально-пороговые характеристики микродисковых лазеров с квантовыми ямами InGaAsN/GaAs.

Материалы и методы

Лазерная гетероструктура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке *n*-GaAs и представляла нелегированный GaAs волновод толщиной 400 нм, заключенный между сильнолегированными *p*-AlGaAs и *n*-AlGaAs эмиттерами толщиной 2 мкм. В центре волновода были расположены 3 КЯ InGaAsN/GaAs, отделенные друг от друга 10 нм спейсером GaAs. Состав и толщина КЯ были подобраны таким образом, чтобы обеспечить длину волны излучения свыше 1.2 мкм при комнатной температуре. Посредством фотолитографии и плазмохимического травления были сформированы микродисковые лазеры с диаметром резонаторов от 12 до 32 мкм. Для части чипов с микролазерами была осуществлена пассивация поверхности диоксидом кремния PECVD-методом при температуре 350 ºC. Толщина осажденного слоя SiO_2 составила около 200 нм. Чипы с микролазерами (исходные и пассивированные) были припаяны на медный теплоотвод с PID-регуляцией температуры. Электрическое соединение с *p*-контактом отдельного микролазера достигалось с помощью игольчатого BeCu микрозонда. Для уменьшения влияния саморазогрева использовался импульсный режим питания. Излучение лазеров собиралось с помощью микрообъектива Mitutoyo MPlan ApoNIR x20, заводилось в

многомодовое оптическое волокно и направлялось на входную щель решеточного монохроматора с охлаждаемым InGaAs детектором.

Результаты и обсуждение

При экспериментальных исследованиях лазерная генерация была обнаружена в микролазерах всех размеров как с пассивацией, так и без. Возникновение лазерной генерации характеризуется появлением узкой высокоинтенсивной линии излучения, а также наличием излома на ватт-амперной характеристике. На рис. 1(а) продемонстрированы спектры электролюминесценции, измеренные при различных токах инжекции для микродиска диаметром 20 мкм с пассивацией поверхности SiO_2. Возникновение линии лазерной генерации с длиной волны 1240 нм происходит при пороговом токе 40 мА. С дальнейшим ростом тока накачки возникают дополнительные линии, соответствующие модам шепчущей галереи различного радиального и азимутального порядков.

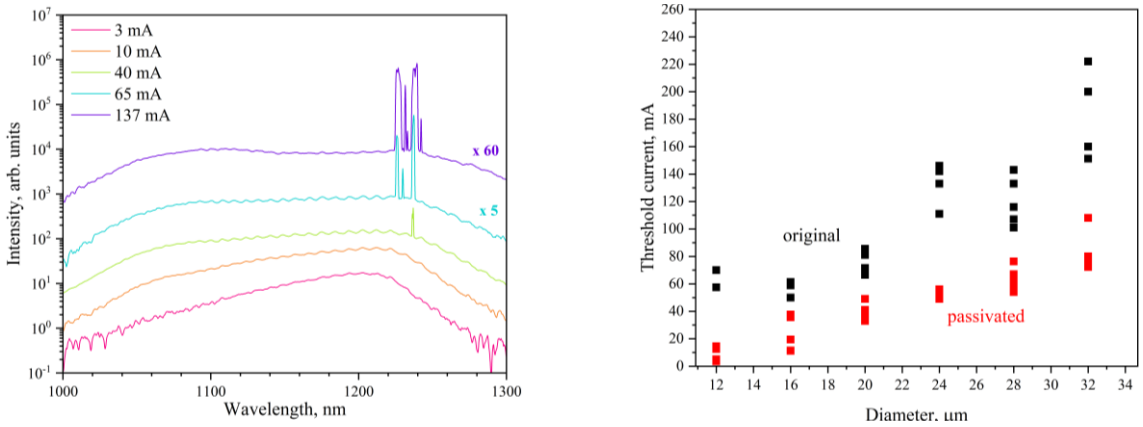


Рис. 1. Спектры электролюминесценции при различных токах инжекции для пассивированного микролазера диаметром 20 мкм (а) и зависимости порогового тока от диаметра микролазеров без пассивации и после нанесения SiO_2 слоя (б).

Пассивация поверхности микродисковых лазеров приводит к значительному уменьшению порогового тока (Рис. 1(б)): в 3-5 раз в зависимости от диаметра резонатора, при этом для микролазеров наименьшего диаметра 12 мкм эффект оказался наиболее сильным. Разброс значений пороговых токов, представленных на Рис. 1(б), вероятно вызван отклонением от идеальной формы диска и шероховатости поверхности самих микрорезонаторов. Также были выполнены исследования температурной эволюции пороговых токов микролазеров. Полученные значения характеристической температуры до и после пассивации совпадают и составляют около 180 К.

Заключение

Исследовано влияние SiO_2 PECVD-пассивации поверхности микродисковых лазеров с InGaAsN/GaAs КЯ на их спектральные и пороговые характеристики. Показано, что такая пассивация позволяет уменьшить величину порогового тока в 3-5 раз в зависимости от диаметра дискового резонатора.

Благодарности

Экспериментальные исследования характеристик микролазеров выполнены в рамках проекта «Зеркальные лаборатории» НИУ ВШЭ. Пассивация выполнена за счет средств проекта № FENW-2025-0004 в Южном федеральном университете.

Список литературы

[1] L. Zhou, B. Bo, X. Yan, C. Wang, Y. Chi, X. Yang. Crystals, 8(5), 226 (2018).

[2] A. E. Zhukov, N.V. Kryzhanovskaya, E. I. Moiseev, M.V. Maximov. Light Sci. Appl., 10, 80 (2021).

Лазерная очистка железистых чернил на бумаге

А. Д. Неелова [1,2✉], Т.К. Лепехина[1,3], Е. С. Быстрова [2], Е.М. Лоцманова[2], В. А. Парфенов[1,3]

[1]Санкт-Петербургский электротехничсекий университет «ЛЭТИ» им.В.И.Ульянова (Ленина), Санкт-Петербрг, Россия;

[2]Российская национальная библиотека, Санкт-Петербрг, Россия;

[3]Институт истории РАН, Санкт-Петербрг, Россия

[✉]angelina.neelova@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты экспериментов по лазерной очистке образцов железистых чернил на бумаге от загрязнений излучением импульсно-периодического волоконного лазера на длине волны 1064 нм. Проведен анализ результатов лазерной обработки методами спектрофотометрии, спектроскопии комбинационного рассеяния и инфракрасной спектроскопии.

Ключевые слова: железистые чернила, культурно-историческое наследие, лазерная очистка, применение лазеров, реставрация.

Введение

На сегодняшний день в области сохранения объектов культурно-исторического наследия широкое применение получила технология лазерной очистки, которая зарекомендовала себя в качестве безопасной и эффективной альтернативы традиционным методам удаления загрязнений с поверхности памятников из камня и металла [1-2]. Лазерная очистка памятников на основе органических материалов, к которым относятся в первую очередь памятники на основе бумаги, например, книги и документы, пока еще остается на этапе экспериментальных исследований в силу особенной хрупкости подобных материалов. Так как очистка является трудоемким, но неотъемлемым этапом любых реставрационных работ, разработка новых более совершенных методов очистки книг и документов является актуальной задачей.

Среди всего объема книг и документов особенно ценными являются рукописные. Известно, что для создания рукописных памятников со времен античности использовали чернила. Наиболее распространенная разновидность чернил представляет собой раствор, изготовленный на основе соединений железа, полифенолов и связующих веществ. Источниками железа могут быть ржавое железо или железный купорос, источниками полифенолов - экстракты галловых орешков или коры деревьев. Нередко к железистым чернилам примешивали сажу. В качестве связующих использовали камедь, квас, уксус.

Данная работа посвящена исследованию возможности применения лазерной очистки для удаления загрязнений с поверхности образцов реплицированных железистых чернил на бумаге.

Материалы и методы

Для проведения экспериментов были подготовлены образцы реплицированных согласно историческим рецептам железистых чернил, выкрашенных на тряпичной бумаге с двумя видами проклейки (осетровым клеем и мездровым клеем) и без проклейки. Чернила различаются по составу и концентрации красящих веществ и связующих. Основные компоненты чернил: железный купорос, ржавое железо, настой коры и галловых орешков, сажа, камедь и квасцы. Для имитации загрязнений на поверхность образцов наносилась графитная пыль.

Лазерная очистка образцов производилась при помощи волоконного иттербиевого лазера «МиниМаркер 2» (ООО «Лазерный центр», Россия) с длиной волны 1,06 мкм, оснащённого высокоскоростной двухкоординатной сканирующей системой. Выбор такого типа лазера для очистки книг и документов на бумажной основе был обоснован авторами в работе [3].

Оценка результатов лазерной очистки осуществлялась методами оптической микроскопии, спектрофотометрии, методом спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), а также инфракрасной (ИК) Фурье-спектроскопии. КР-спектры были получены спектроскопом Confotec MR350 («SOL instruments», Беларусь). ИК-Фурье спектры получены «Alpha II» («Bruker», Германия). Измерения спектрофотометрических параметров производились портативным спектрофотометром «Exact» («X-Rite», США).

Результаты и обсуждение

Эффективное удаление загрязнений без повреждения слоя чернил и бумажной основы удалось достичь при следующих параметрах лазерного излучения: длительность импульса 100 нс, частота повторения импульсов 20 кГц, средняя плотность мощности $2 \cdot 10^5$ Вт/см². Параметры сканирования: заполнение площади обработки 40 линий/мм, скорость лазерного пучка 1000 мм/с.

Помимо визуальной оценки результаты лазерной обработки контролировались с помощью спектрофотометра, для чего были измерены цветовые коэффициенты L*, a*, b* образцов до и после очистки. Также были проанализированы КР-спектры и ИК-спектры образцов чернил перед обработкой и после.

В целом, для большинства образцов чернил удалось добиться безопасной очистки, кроме образцов, содержащих сажу (рис.1). При визуальном осмотре заметно, что верхний слой сажесодержащих чернил был поврежден. Образцы с чернилами, в состав которых входила камедь, очищены без каких-либо повреждений или негативных изменений (рис.2). Однако некоторые чернила без камеди имели структурные повреждения.

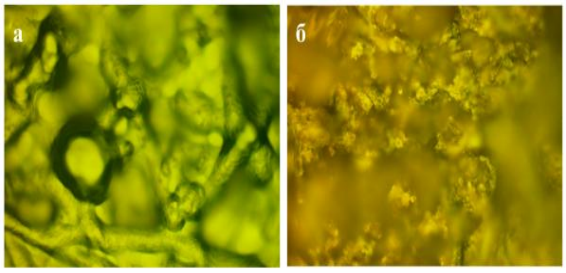


Рис. 1. Образец чернил С4 (орешки-железо-камедь-сажа) на бумаге с осетровой проклейкой до (а) и после лазерной очистки (б) (40-кратное увеличение)

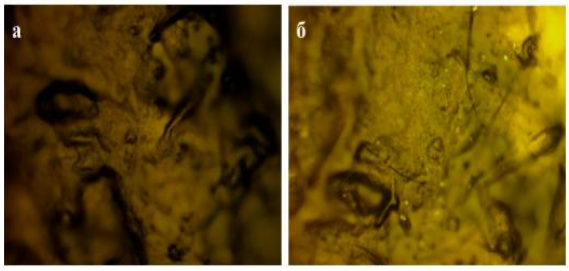


Рис. 2. Образец чернил КЖ 1 (кора-железо-камедь-квасцы) на бумаге с осетровой проклейкой до (а) и после лазерной очистки (б) (40-кратное увеличение)

Заключение

В результате проведенных исследований была продемонстрирована возможность использования лазерной очистки для удаления загрязнений поверхности железистых бессажевых чернил на бумаге в результате оптимизации параметров излучения и при условии, что в состав чернил входит связующее вещество. Данные результаты открывают перспективы для использования лазерной очистки в реставрации рукописных книг и документов.

Список литературы

[1] M. Cooper. Laser Cleaning in Conservation: An Introduction. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.

[2] C. Fotakis, D. Anglos, V. Zafiropulos, S. Georgiou, V. Tornari. Lasers in the preservation of cultural heritage. Principles and applications. CRC Press, 2007.

[3] V.A. Parfenov., A. A. Galushkin, T.S. Tkachenko, V. A. Aseev. Quantum Beam Science, **6** (3), 23 (2022).

Настройка оптических свойств квантовых точек карбида бора

Кулик В.С. ✉***, Сидоров Е.А., Грибова Е.Д.***

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Университет «Дубна», Дубна, Россия

✉*kvs.22@uni-dubna.ru*

Аннотация. В данной работе изучена возможность настройки оптических свойств квантовых точек карбида бора путем подбора растворителя и добавления аминолигандов. В результате проведения сольвотермального синтеза с ультразвуковой обработкой в N, N-диметилформамиде с добавлением п-фенилендиамина был получен образец квантовых точек, флуоресцирующих в оранжево-красной области спектра с максимумом при 632 нм. Исходя из свойств применяемых лигандов и положения максимумов испускания было высказано предположение о возможности формирования структур промежуточного состава между углеродными квантовым точками и квантовыми точками карбида бора, перспективных для применения в флуоресцентной визуализации.

Ключевые слова: Бор-нейтронозахватная терапия, квантовые точки, карбид бора, батохромный сдвиг.

Введение

В настоящее время онкологические заболевания остаются одним из главных факторов смертности в мире, что требует постоянного совершенствования методов их лечения и диагностики. Существующие подходы имеют серьёзный недостаток — высокий риск повреждения здоровых тканей. Перспективной альтернативой является бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ).

Метод основан на накоплении в раковых клетках изотопа ^{10}B с последующим облучением тепловыми нейтронами с энергией <0,5 эВ. При захвате нейтрона ядра бора мгновенно распадаются на ^{4}He и ^{7}Li. Испускаемое излучение действует на малом расстоянии, благодаря чему вероятность повреждения клеток, не содержащих бор, мала [1]. Применяемые ранее препараты не давали нужной избирательности, поэтому предложено использовать квантовые точки карбида бора (КТКБ). Они позволяют достичь необходимой концентрации бора в опухолевых клетках и адресной доставки благодаря возможности модификации поверхности, а их флуоресцентные свойства позволяют использовать их для визуализации тканей.

Для применения КТКБ в качестве флуоресцентных меток необходимо изучить возможность сдвига максимума их флуоресценции в длинноволновую область прозрачности тканей организма (650-1000 нм), что может быть достигнуто путем подбора растворителя и добавления различных лигандов [2,3].

Результаты и обсуждение

В рамках работы был проведен сольвотермальный синтез КТКБ с ультразвуковой обработкой в различных растворителях: вода, ДМФА, НМП и этанол. Затем была проведена функционализация поверхности КТКБ аминолигандами – мочевиной, тиомочевиной и п-фенилендиамином (п-ФДА).

Наибольшая длина волны флуоресценции зафиксирована у образца КТКБ, синтезированного в ДМФА с добавлением п-ФДА, испускающих в оранжево-красной области спектра в диапазоне 600-670 нм с максимумом при 632 нм. Батохромный сдвиг по отношению к КТКБ без дополнительных лигандов в ДМФА составил 242 нм.

Заключение

В результате исследования была выявлена возможность настройки оптических свойств КТКБ путем подбора растворителя и добавления аминолигандов, что позволило сдвинуть максимум флуоресценции КТКБ в оранжево-красную область спектра.

Наблюдаемое увеличение интенсивности, а также возникновение нескольких максимумов флуоресценции у образцов КТКБ с добавлением п-ФДА, широко применяемого для синтеза углеродных квантовых точек (УКТ) [4], позволяет предположить формирование структур промежуточного состава КТКБ-УКТ. Синтез и исследование свойств таких структур может значительно увеличить эффективность применения КТКБ в качестве флуоресцентных меток и агентов БНЗТ.

Список литературы

1. Wang S. Boron Neutron Capture Therapy: Current Status and Challenges / S. Wang, W. Zhang, J. Liu, Y. Peng, C. Fan // Frontiers in Oncology. – 2022. – Vol. 12. – P. 788770.
2. Wisotzky E.L. Determination of optical properties of human tissues obtained from parotidectomy in the spectral range of 250 to 800 nm / E.L. Wisotzky, F.C. Uecker, S. Dommerich et al. // J. Biomed. Opt. – 2019. – Vol. 24, № 12. – P. 125001
3. Zheng Z. Surface modification of hexagonal boron nitride nanomaterials: a review / Z. Zheng, M. Cox, B. Li // J. Mater. Sci. – 2018. – Vol. 53, № 1. – P. 66–99.
4. The preparation, optical properties and applications of carbon dots derived from phenylenediamine / T. Li, Y. Wang, Z. Zhang [et al.] // Microchemical Journal. – 2023. – Vol. 185. – P. 108299.

Распределение немонохроматических фотонов на свободных электронах

Ю. В. Верещагина ✉, К**. А. Макарова**
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
Архангельск, Россия
✉aisonoka@gmail.com

Аннотация. Известно, что взаимодействие фотонов со свободными электронами создает квантовую запутанность и приводит к появлению новых статистических распределений. Зачастую исследование статистических свойств фотонов при их взаимодействии с веществом рассматривается для монохроматических фотонов, что является сильным упрощением. В действительности же полностью монохроматических фотонов не существует, и это необходимо учитывать. В данной работе показано, что статистические свойства немонохроматических фотонов и их квантовая запутанность могут существенно отличаться от случая монохроматических фотонов. Продемонстрировано, что статистику фотонов можно достаточно легко изменять, варьируя параметр, отвечающий за ширину спектральной линии фотонов. Полученные результаты могут быть использованы в квантовых технологиях, где требуются состояния фотонов, которые не реализуются другими методами.

Ключевые слова: статистика, фотоны, светоделитель, свободные электроны.

Введение

Статистические свойства фотонов и их квантовая запутанность представляют собой важный ресурс для широкого круга приложений в квантовой оптике [1]. Для генерации различных типов статистики фотонов и их квантовой запутанности современные методы основываются на взаимодействии электромагнитного излучения с веществом, в результате которого изменяется статистика падающих фотонов и формируются запутанные фотонные состояния.

Квантовая запутанность и возможность управления статистикой фотонов, достигаемые с помощью светоделителей, представляют ценность в контексте линейно-оптические квантовые вычислений (LOQC) [2]. Недавно было показано, что квантовая запутанность фотонов возможна при их взаимодействии со свободными электронами [3]. Использование свободных электронов также открывает возможности для управления статистикой фотонов [4] и передачи квантовых статистических свойств от фотонов к электронам [5]. В целом, последние достижения в области взаимодействия электромагнитных полей со свободными электронами и их излучения активно исследуются. Схематично такое взаимодействие представлено на рисунке 1.

В реальных экспериментальных условиях падающие фотоны не являются строго монохроматическими. Следовательно, для полного понимания указанных взаимодействий необходимо более строгое теоретическое рассмотрение. Например, известный эффект Хонга-Оу-Манделя (HOM) демонстрирует необходимость учёта степени немонохроматичности для точного предсказания наблюдаемого провала Хонга-Оу-Манделя [6]. В частности, форма спектральной плотности однофотонного волнового пакета, а значит, и физические характеристики источника фотонов непосредственно определяют точную форму этого провала. Аналогичный анализ квантовой запутанности в волноводных светоделителях выявил существенное влияние немонохроматичности на характеристики запутанности по сравнению с идеализированным случаем монохроматических фотонов [7]. Недавно подобный результат был получен и для случая свободных электронов [8].

В данной работе рассмотрен светоделитель на свободных электронах и получена статистика фотонов на таком светоделителе при различных параметрах падающего света. Также изучена квантовая запутанность на такой системе. Выявлены новые закономерности при учете случая немонохроматических фотонов и зависимость от параметра σ/Ω. На рисунке 2 показан вариант представления статистики фотонов.

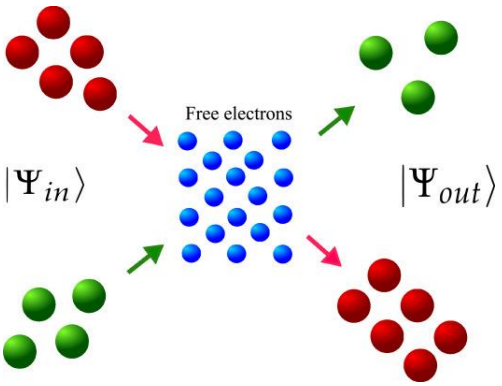


Рис. 1. Взаимодействие немонохроматических фотонов в двухмодовом электромагнитном поле со свободными электронами, в процессе которого создаются новые квантовые состояния фотонов.

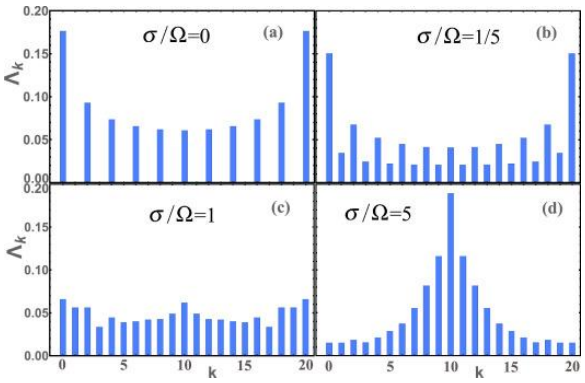


Рис. 2. Гистограмма зависимости вероятности обнаружения фотонов на выходе первой и второй мод соответственно в случае неидентичных фотонов.

Заключение

В настоящей работе показано, что статистические свойства немонохроматических фотонов и их квантовая запутанность после взаимодействия со свободными электронами существенно отличаются от случая монохроматических фотонов при изменении параметра σ/Ω. При σ/Ω статистические свойства близки к монохроматическим фотонам, а при σ/Ω наблюдается основное различие и появление новых интересных фотонных состояний. Также исследовались квантовая запутанность фотонов и её связь со статистикой. В результате такого взаимодействия формируются новые квантовые состояния фотонов, которые могут найти применение в квантовых технологиях.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-72-00093.

Список литературы

[1] K.A. Makarova, D.N. Makarov. Chinese Journal of Physics, **97**, 1348-1354 (2025).
[2] S.-H. Tan, P.P. Rohde. Rev. Phys., **4**, 100030 (2019).
[3] D.N. Makarov. Results Phys., **49**, 106515 (2023).
[4] C. You, M. Hong, N. Bhusal, J. Chen, M. A. Quiroz-Juárez, J. Fabre, F. Mostafavi, J. Guo, I. De Leon, R. de J. León-Montiel, O. S. Magaña-Loaiza. Nat. Commun., **12**, 5161 (2021).
[5] R. Dahan, A. Gorlach, U. Haeusler, A. Karnieli, O. Eyal, P. Yousefi, M. Segev, A. Arie, G. Eisenstein, P. Hommelhoff, I. Kaminer. Science, **373**, 6561 (2021).
[6] C.K. Hong, Z.Y. Ou, L. Mandel. Phys. Rev. Lett., **59**, 2044-2046 (1987).
[7] D. Makarov, Y. Tsykareva. Entropy, **24**, 49 (2022).
[8] D.N. Makarov, K.A. Makarova, S.N. Kapustin, A. A. Goshev, and Yu. V. Tsykareva. J. Opt. Soc. Am. B, **42**, 189-193 (2025).

Исследование эффективности лазерной очистки органических материалов методами инфракрасной Фурье-спектроскопии, спектрофотометрии и атомно-силовой микроскопии

Т. К. Лепехина [1,2✉], **А. Д. Неелова** [1,3], **В. А. Парфенов** [1,2]

[1] Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия;

[2] Санкт-Петербургский институт истории Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия;

[3] Российская национальная библиотека, Санкт-Петербург, Россия

✉tanialep@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование эффективности лазерной очистки органических материалов. Анализ методами инфракрасной Фурье-спектроскопии, спектрофотометрии и атомно-силовой микроскопии позволил оценить изменения химического состава, оптических свойств и структуры материалов объектов исследования. Продемонстрирована возможность селективного удаления загрязнений с сохранением молекулярной структуры целлюлозы, коллагена и устойчивых красителей.

Ключевые слова: лазерная очистка, инфракрасная Фурье-спектроскопия, спектрофотометрия, атомно-силовая микроскопия, органические материалы.

Введение

В современной реставрационной практике лазерная очистка зарекомендовала себя как безопасный и эффективный способ удаления различных видов загрязнений с поверхности объектов культурно-исторического наследия [1]. На сегодняшний день наиболее отработана технология лазерной очистки памятников из металла и камня, которая широко используется в музеях мира. Однако применение лазеров для очистки артефактов, выполненных из органических материалов, все еще находится на стадии экспериментальных исследований. Это связано с тем, что при лазерной обработке существует риск повреждения их структуры, обусловленный высокой чувствительностью данных материалов к термическим воздействиям. В связи с этим оценка безопасности и эффективности лазерной очистки органических материалов имеет научную новизну и практическую значимость.

Материалы и методы

Объектами исследования послужили модельные образцы выкрасок органических пигментов, нанесенных на бумагу, на поверхности которых были созданы искусственные загрязнения из графитной пыли. Это имитирует поверхностные загрязнения, возникающие в ходе бытования. Кроме того, эксперименты проводились с подлинными старинными артефактами: пергаменной рукописью со следами пыли и сажи и листом бумаги XIX в., загрязненной лампадным маслом и воском. Лазерная очистка образцов проводилась с использованием импульсного иттербиевого волоконного лазера «МиниМаркер» (ООО «Лазерный центр», Россия). Средняя плотность мощности лазерного излучения изменялась в ходе экспериментов. Анализ эффективности лазерной очистки проводился с помощью спектрофотометра «X-Rite exact» («X-Rite», США) в видимой области (система «CIELAB»), атомно-силового микроскопа (АСМ) «Ntegra» (ООО «НТ-МДТ», Россия) и инфракрасного Фурье-спектрометра «Alpha II» («BRUKER», Германия). Для обработки полученных данных были использованы методы векторного нормирования, сглаживания по 13 точкам, усреднение и вычитание инфракрасных (ИК) спектров, а также метод главных компонент (МГК).

Результаты и обсуждение

Спектральный анализ выявил на поверхности бумаги после лазерной очистки существенное ослабление валентных связей, характерных для липидных компонентов, что

свидетельствует об эффективном удалении жировых загрязнений (рис. 1). При этом характерные полосы целлюлозы не претерпели значительных изменений [2]. Математический анализ методом МГК показал, что первая главная компонента обеспечивает четкое разделение спектральных данных до и после лазерной очистки.

Анализ разности ИК-спектров пергамена до и после лазерной очистки подтвердил успешное удаление поверхностных загрязнений как с лицевой, так и с оборотной стороны артефакта (рис. 1). Стабильность положения и формы характерных полос амид I и амид II, а также отсутствие сдвига их максимумов свидетельствуют о сохранении структуры коллагена. Таким образом, подобранные в ходе экспериментов параметры лазерного излучения позволяют избежать денатурации коллагена в результате лазерного воздействия [3].

Исследование модельных образцов выкрасок органических пигментов показало успешное удаление загрязнений после лазерной очистки. Сравнительный анализ спектров пигментов без загрязнений и образцов после лазерной очистки показал устойчивость большинства красителей к воздействию лазерного излучения (рис. 2).

Эффективность лазерной очистки подтверждается результатами спектрофотометрии: на очищенных участках всех образцов выявлено повышение коэффициента отражения и светлоты, при этом цветовые различия для большинства пигментов оказались незначительными. Кроме того, результаты АСМ также подтверждают отсутствие структурных повреждений исследованных органических материалов.

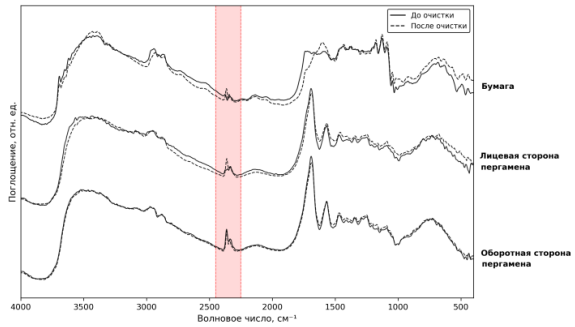


Рис. 1. Усредненные ИК-спектры бумаги и пергамена до и после лазерной очистки

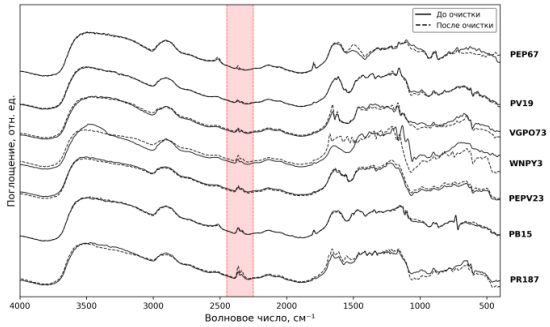


Рис. 2. ИК-спектры выкрасок органических пигментов до и после лазерной очистки

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что лазерная очистка является эффективным и безопасным способом очистки таких органических материалов, как бумага, пергамен и органические красители. При правильно подобранных выходных характеристиках лазерного излучения воздействие лазера не приводит к разрушению основного материала. При этом часто встречающиеся в реставрационной практике загрязнения поверхности органических материалов в частности, пылевые и жиросодержащие, могут быть эффективно удалены.

Список литературы

[1] Cooper M. Laser cleaning in conservation: An introduction. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. P. 98.

[2] Kumar R., Kumar V., Sharma V. Fourier transform infrared spectroscopy and chemometrics for the characterization and discrimination of writing/photocopier paper types: Application in forensic document examinations. Spectrochimica Acta: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2017. Vol. 170. P. 19–28.

[3] Gonzalez L., Wess T. Use of Attenuated Total Reflection–Fourier Transform Infrared Spectroscopy to Measure Collagen Degradation in Historical Parchments. Applied Spectroscopy. 2008. Vol. 62. № 10. P. 1108-1114.

Продукты пиролиза в диффузионном пламени уротропина

С. И. Ксенофонтов[1], А. Н. Лепаев[2]✉, О. В. Васильева[3]
[1]Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева, Чебоксары, Россия
[2]Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета, Чебоксары, Россия
[3]Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия
✉it@polytech21.ru

Аннотация. Изучены продукты пиролиза уротропина в условиях диффузионного пламени. Обнаружены дисперсные частицы различной морфологии крестообразной и шестилучевой формы. Продукты пиролиза претерпевают не только возгонку, но и физико-химические превращения под воздействием высокотемпературного пламени.

Ключевые слова: уротропин, пиролизный продукт, частица, кристалл, ИК- спектр.

Введение

Современные технологии требуют знаний о свойствах вновь синтезируемых продуктов. Уротропин используется в качестве горючего вещества в различных топливах. Однако процессы, протекающие при подготовке уротропина к воспламенению, остаются недостаточно исследованными. В данной работе проведено термическое воздействие на уротропин диффузионным пламенем с целью получения и анализа продуктов его пиролиза.

Материалы и методы

Молекулы уротропина в диффузионном пламени под действием тепловых потоков подвергаются пиролизу. В целях изучения продуктов пиролиза создавалось изделие в виде бумажной гильзы с внутренним диаметром 6 мм. Бумажный лист предварительно пропитывался насыщенным водным раствором уротропина. После высыхания при температуре 60 ^{0}C лист закручивался в гильзу. Гильза устанавливалась под углом 10^0 к горизонту. Воспламенение начиналось с верхнего торца гильзы, в то время как с противоположного ее конца происходило выделение продуктов пиролиза. Давление, создаваемое внутри конуса диффузионного пламени, равное 0,25 Па, выдавливало продукты пиролиза из гильзы. Продукты пиролиза внутри конуса пламени изолированы от воздействия кислорода воздуха. При вертикальном положении гильзы такой перепад давления не достаточен для организации потока продуктов пиролиза вниз. Конвективные продукты окружающего воздуха омывают горящую гильзу как снаружи, так и изнутри.

Продукты пиролиза, выходящие из гильзы, осаждались на стеклянную пластинку при ее проносе сквозь поток. При контакте с холодной поверхностью пробоотборника протекание химических реакций замедлялось или полностью прекращалось. В дальнейшем поверхности пробоотборников исследовались методом оптической микроскопии.

Продукты пиролиза также исследовались с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра ФСМ–1201. Для отбора пробы применялся метод вакуумной фильтрации. Поток продуктов пиролиза пропускали через слой бромида калия (KBr), помещённый в воронку, при этом под ситом создавалось давление, меньше атмосферного на 10^3 Па. Из насыщенного продуктами пиролиза бромида калия прессовалась таблетка для последующего ИК–анализа.

Результаты и обсуждение

На поверхности пробоотборника обнаружены одиночные кристаллы квадратной формы размерами 8 мкм, которые, по всей вероятности, являются кристаллами уротропина. Несмотря на сложный химический состав, кристаллы уротропина $(CH_2)_6N_4$ относятся к кубической сингонии. Кроме того, наблюдаются частицы крестообразной и

шестилучевой формы. Последние два типа представляют собой кристаллы, выращенные из паровой фазы непосредственно в процессе пробоотбора.

Крестообразные кристаллы формируются на гранях кубического зародыша, при этом сам кубический кристалл располагается на подложке одной из своих сторон. Преимущественные направления роста соответствуют граням куба. Если первичный кристалл расположен на подложке одной из своих вершин, то рост происходит со всех сторон куба. Возникает шестилучевая структура с углом между лучами в 60^0. Длина каждого составляет 72 мкм, а толщина – 8 мкм. Вероятность возникновения структур крестообразной или шестилучевой звезды зависит от концентрации пара и скорости охлаждения, причем вероятность возникновения крестообразных структур выше, чем шестилучевых.

Структура сложных частиц исследовалась с применением программных средств анализа изображений. Для количественной оценки отклонения формы частицы использовался форм-фактор, составляющий для идеальной окружности 12,56. Для крестообразных частиц форм-фактор находится в диапазоне от 25 до 40, для шестилучевых частиц – от 60 до 120. Высокие значения характерны для частиц с изрезанными краями. При высокой концентрации пара наблюдается формирование дендритоподобных поверхностных кристаллов, полностью покрывающих подложку.

ИК–спектр продуктов пиролиза уротропина приведен на рис. 1. В диапазоне частот 500 – 1000 $см^{-1}$ имеются глубокие пики поглощения, характерные, как для уротропина, так и продуктов его пиролиза. При температурах 230 – 280 ^{0}C уротропин начинает активно разлагаться и возгоняться, что обуславливает появление в продуктах пиролиза молекул CH_2 и CN. Характеристические полосы поглощения, соответствующие валентным колебаниям групп CH_2 и CH_3, проявляются в диапазоне 2870 – 2955 $см^{-1}$. Гидроксильная группа –OH регистрируется в виде широкой полосы поглощения с максимумом при 3420 $см^{-1}$. Наиболее существенные различия между спектрами наблюдаются в области 1050–1800 $см^{-1}$.

Рис. 1. ИК-спектр продуктов пиролиза уротропина

Продукты пиролиза, полученные при термическом воздействии пламенем, могут найти применение в химической технологии как материалы с высокоразвитой удельной поверхностью.

Заключение

1. Предложен новый метод получения продуктов пиролиза при температуре пламени.

2. В составе продуктов пиролиза уротропина обнаружены кристаллические частицы сложной структуры – крестообразной и шестилучевой формы.

3. Продукты пиролиза уротропина содержат молекулярные связи, характерные для самого уротропина, а также гидроксильные и CH_n – группы, что свидетельствует о протекании физико-химических процессов горения в продуктах пиролиза.

Двухуровневая лазерная генерация в микродисковых лазерах с активной областью на основе плотных массивов квантовых точек InGaAs/GaAs

Баделина Е. В.[✉], **Войтович В. И., Махов И. С., Крыжановская Н. В., Жуков А. Е.**
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург, Россия
[✉]evbadelina@edu.hse.ru

Аннотация: В работе представлены результаты исследования спектральных и пороговых характеристик микролазеров с двумя слоями квантовых точек InGaAs/GaAs с дисковыми резонаторами различного диаметра. В импульсном режиме накачки при слабых уровнях возбуждения обнаружено возникновение генерации на основном переходе квантовых точек, а при высоких уровнях инжекции – через состояния матрицы GaAs (волновода). Определены зависимости пороговых токов двухуровневой генерации от диаметра дискового резонатора и температуры.

Ключевые слова: Двухуровневая генерация, квантовые точки, основное состояние, волновод.

Введение

Микродисковые лазеры на основе квантовых точек обладают низкими порогам лазерной генерации, высокой добротностью и высокой температурной стабильность рабочих параметров [1], что делает их перспективными миниатюрными источниками излучения для применения в фотонных интегральных схемах. Для повышения пропускной способности оптоэлектронных схем могут применяться методы спектрального кодирования сигнала, которые могут быть реализованы, например, с применением двухуровневой лазерной генерации [2]. Явление двухуровневой лазерной генерации заключается в возможности одновременного излучения фотонов через различные оптические переходы, например основной и возбуждённый переходы в квантовых точках, существенно разнесённые друг от друга спектрально. К настоящему времени явление двухуровневой лазерной генерации подробно исследовалось для полосковых и микродисковых лазеров с квантовыми точками (КТ), формируемыми по механизму Странского-Крастанова (СК) [3], а также для полосковых лазеров с КТ высокой поверхностной плотности, формируемыми не по механизму СК [4]. Такие КТ позволяют заметно повысить мощность микролазера. В настоящей работе ~~в~~первые сообщается о двухуровневой лазерной генерации в микродисковых лазерах на основе массивов не-СК КТ InGaAs/GaAs высокой поверхностной плотности.

Материалы и методы

Лазерная гетероструктура была выращена методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений на подложке *n*-GaAs, разориентированной на 6° от направления (100). Активная область была представлена волноводом GaAs толщиной 780 нм, в центре которого располагались два слоя квантовых точек $In_{0.4}Ga_{0.6}As$. Волновод был заключен между эмиттерными слоями $Al_{0.39}Ga_{0.61}As$ *n*- и *p*- типов толщиной 1.5 мкм. Микродисковые резонаторы диаметрами от 12 до 32 мкм были сформированы посредством фотолитографии и плазмохимического травления через все активный слои структуры. Чипы с микролазерами были припаяны на теплоотвод с термоэлектрическим охлаждением/нагревом. Электрический контакт к микролазерам осуществлялся посредством микрозонда, питание микролазеров осуществлялось в импульсном режиме (500 нс, 2 кГц). Излучение электролюминесценции собиралось микрообъективом и с помощью оптоволокна направлялось в решёточный монохроматор с охлаждаемой InGaAs линейкой.

1. Результаты и обсуждение

На рис. 1а представлены спектры излучения микродискового лазера диаметром 32 мкм, измеренные при различных уровнях накачки. При достижении тока 6 мА в

спектре возникает узкая интенсивная линия с длиной волны около 1.05 мкм, свидетельствующая о начале лазерной генерации через основной оптический переход (GS) КТ. Наличие порога также подтверждается изломом на зависимости интегральной интенсивности излучения от тока накачки (рис. 1б). С дальнейшим увеличением накачки интенсивность линий генерации GS возрастает. Однако при достижении тока 315 мА в спектре возникает дополнительная полоса лазерной генерации около 0.9 мкм. Ее возникновение связано с началом генерации через волноводный слой (WG) GaAs. Сдвиг линии генерации относительно длины волны, соответствующей межзонному переходу в GaAs при комнатной температуре обусловлен саморазогревом микролазера, а также влиянием состояний смачивающего слоя. Выше порога двухуровневой генерации интенсивность линий WG растёт с дальнейшим ростом тока, а линий GS плавно спадает. Исследование микродисков других размеров показало, что с уменьшением диаметра пороговая плотность тока GS генерации возрастает, а для двухуровневой генерации изменяется слабо.

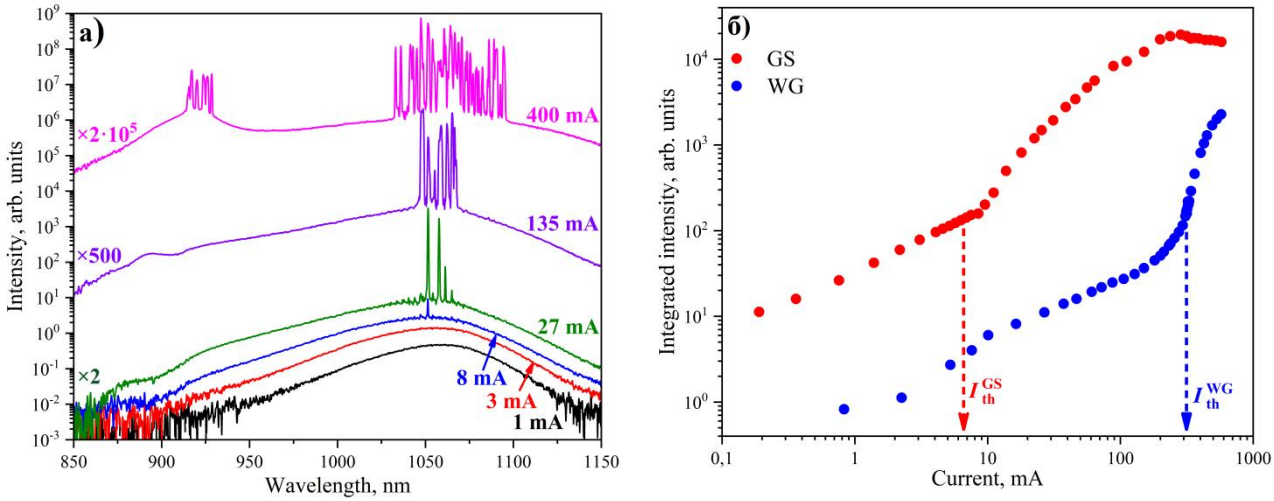


Рис. 1 Спектры электролюминесценции микродиска диаметром 32мкм (а) и интегральная интенсивность электролюминесценции в области основного перехода (GS) КТ и волновода (WG) GaAs (б), измеренные при разных токах накачки

Заключение

В работе исследованы спектральные и пороговые характеристики микродисковых лазеров различного диаметра с высокоплотными массивами квантовых точек для которых впервые обнаружено возникновение двухуровневой лазерной генерации.

Благодарности

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Список литературы

[1] A. E. Zhukov, N. V. Kryzhanovskaya, E. I. Moiseev, M. V. Maximov. Light: Sci. Appl., 10, 197 (2021).

[2] M. V. Maximov, Y. M. Shernyakov, N. Y. Gordeev, V. G. Dubrovskii, A. M. Nadtochiy, A. E. Zhukov. Physica Scripta, 98, 125119 (2023).

[3] I. Makhov, K. Ivanov, E. Moiseev, N. Fominykh, A. Dragunova, N. Kryzhanovskaya, A. Zhukov. Nanomat., 13, 877 (2023).

[4] G. Kornyshov, Y. Shernyakov, A. Beckman, A. Kharchenko, A. Payusov, S. Mintairov, N. Kalyuzhnyy, O. Simchuk, J. Tkach, V. Dubrovskii, N. Gordeev, M. Maximov. Appl. Phys. Lett., 126, 171101 (2025).

Формирование коллоидных систем на основе наночастиц металлов и оксидов, синтезированных методом искровой абляции в газе

А. Н. Патаравшили [1✉], А. Н. Патарашвили [1,2], В. О. Давыдов [1], А. А. Ефимов [1], В. В. Иванов [1]

[1] Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия;
[2]НИУ "МЭИ", Москва, Россия
✉patarashvili@phystech.edu

Аннотация. В работе представлен универсальный метод получения коллоидных растворов наночастиц металлов и оксидов на примере Au, Ag и ZnO, полученных методом искровой абляции в контролируемой газовой среде и переведённых в коллоидную форму барботажным методом. Продемонстрирована возможность управления агломерацией наночастиц в газе и термического спекания агломератов при температуре 650 °C на примере наночастиц Ag в сферические наночастицы с последующим осаждением в дистиллированную воду, содержащую поверхностно активные вещества для стабилизации. Получены результаты анализов методами просвечивающей электронной микроскопии и оптической спектроскопии, демонстрирующие размер, форму и химический состав полученных наночастиц.

Ключевые слова: Коллоидные системы, аэрозольные наночастицы, искровая абляция.

Введение

Искровая абляция в газе является универсальным и экологичным методом получения аэрозольных наночастиц металлов, оксидов и полупроводников в контролируемой газовой среде с возможностью управления размерами, элементным составом, формой и свойствами получаемых наночастиц [1,2,3]. Возможность термической обработки аэрозольных наночастиц и их агломератов до перевода в коллоидную форму выгодно отличает метод от методов мокрой химии или лазерной абляции в жидкости. Полученные данным методом наночастицы находят применения в катализе, сухой аэрозольной печати и приготовлении нанопорошков. Однако получение коллоидных растворов путём диспергирования нанопорошков не всегда возможно из-за сильной агрегации и агломерации наночастиц, что стимулировало развитие метода барботажного осаждения полученных аэрозолей в коллоидные системы с одновременной их стабилизацией поверхностно-активными веществами (ПАВ). Исследование способствует развитию нового метода получения наночернил и коллоидных систем для применений в печатной микроэлектронике, плазмонике, биомедицине и катализе.

Материалы и методы

Схема установки представлена на Рис.1а. В работе использовался генератор искрового разряда, состоящий из источника высокого напряжения (ИВНР- 30/1(+/-), ПЛАЗОН) и высоковольтного (12 кВ) конденсатора C_1=0,47 нФ. В качестве электродов использовались проволоки чистых (>99%) металлов Ag, Au, Zn. Источник питания подавал на конденсатор напряжение 5 кВ, в результате чего он заряжался до пробивного напряжения 3 кВ, после чего возникал искровой разряд с энергией 2,4 мДж. По величине тока $I_н$=0,1 мА (низкопроизводительный режим (НПР)) и $I_в$=1 мА (высокопроизводительный режим (ВПР)) определялась частота разряда $f_н$=71 Гц и $f_в$=710 Гц соответственно. Испаренный материал удалялся потоком газа N_2 (чистота 6,0) (для Ag) или очищенного воздуха (для Au, Zn) и конденсировал в первичные наночастицы со средним размером 4–8 нм, при этом Zn окислялся до ZnO. Полученные наночастицы подавались в поглотитель Полежаева (Киселева) с 7 мл водного раствора с содержанием 1% поливинпирролидона (ПВП), частично улавливались жидкостью и стабилизировались оболочкой ПВП, образуя стабильные коллоидные растворы, представленные на Рис. 1б,в.

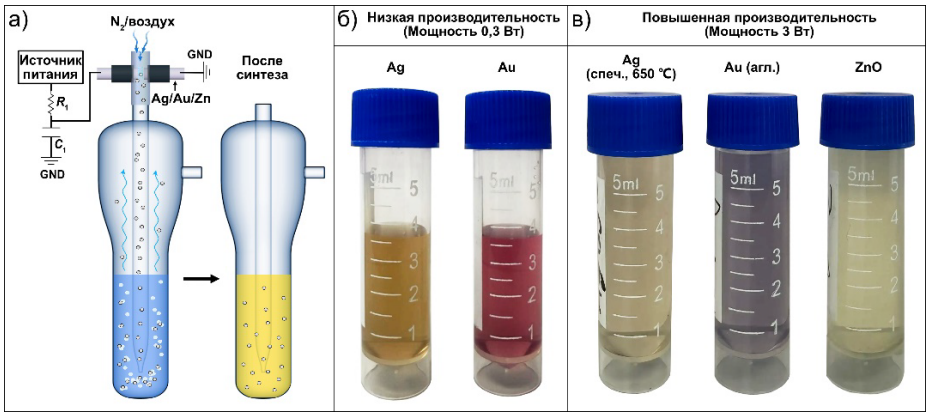


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а); Результаты низкопроизводительного (б) и высокопроизводительного (в) режимов синтеза наночастиц Au, Ag и ZnO

1. Результаты и обсуждение

Полученные коллоидные растворы анализировались методами спектрометрии и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), результаты которых представлены на Рис.2. ПЭМ-анализ показал, что НПР позволяет получать слабо агломерированные наночастицы, в то время как в ВПР первичные наночастицы успевали агломерировать до десятков и сотен нанометров до осаждения в жидкости (на примере Au (агл.)). Спекание агломератов (на примере Ag) в трубчатой печи при температуре 650 °C позволяет получать укрупненные сферические наночастицы со средним размером 30–40 нм. Агломераты, обладающие хорошей диспергируемостью, (на примере ZnO) в коллоидной форме распадаются на отдельные первичные наночастицы. Спектры относительного поглощения коллоидных растворов соответствуют локальному поверхностному плазмонному резонансу и согласуются с данными ПЭМ.

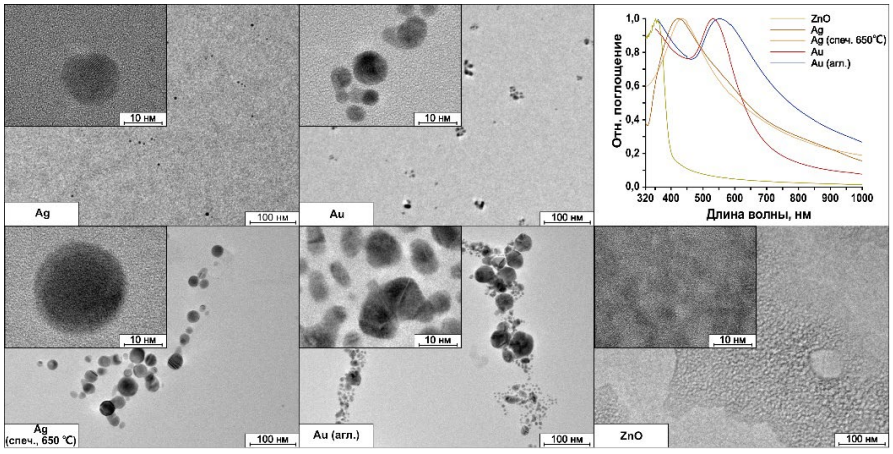


Рис. 2. Спектры относительного поглощения коллоидных растворов и ПЭМ-изображения полученных наночастиц, полученных при НПР (сверху) и ВПР (снизу).

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSMG-2025-0056).

Список литературы

[1] N. S. Tabrizi, M. Ullmann, V. A. Vons, U. Lafont, A. Schmidt-Ott, J. Nanoparticle Res., **11**, 315 (2009).

[2] A. Patarashvili, A. Efimov, D. Maslennikov, M. Ivanov, D. Labutov, E. Kameneva, O. Vershinina, V. Ivanov, J. Aerosol Sci., **191**, 106700 (2026).

[3] D. Kornyushin, A. Musaev, A. Patarashvili, A. Buchnev, P. Arsenov, M. Ivanov, O. Vershinina, E. Kameneva, I. Volkov, A. Efimov, et al., Metals, **13**, 301 (2023).

Исследование процессов генерации второй гармоники в наночастицах типа ядро-оболочка на основе мезопористого композита Si/SiO_2

А.С. Фунтикова [1,2]✉, **В.А. Шаров** [2,3], **А.М. Можаров** [1,2], **Д.А. Еуров** [3], **Е.Ю. Стовпяга** [3], **Д.А. Курдюков** [3]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия;

[2] Академический университет им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия;

[3] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

✉n.fn@mail.ru

Аннотация. Высокая стоимость и плохая совместимость классических нелинейных кристаллов, а также материалов AIIIBV порождает необходимость нахождения новых материалов для нелинейных элементов нанофотоники. Хорошей альтернативой может выступить мезопористый композит Si/SiO_2. В данной работе представлено исследование генерации второй гармоники в наночастицах типа ядро-оболочка, представляющих собой основу из SiO_2, покрытую слоем Si/SiO_2. Эффективность генерации второй гармоники проявляет резонансные особенности, связанные с рассеянием Ми. Наложение резонансов на разных длинах волн, а также резонансов наночастицы и ее ядра приводит к усилению или ослаблению нелинейно-оптического сигнала в результате интерференционных эффектов.

Ключевые слова: вторая гармоника, кремний, наночастицы ядро-оболочка, резонансы Ми

Введение

Нелинейные оптические явления второго порядка необходимы для создания различных элементов нанофотоники, когерентных источников света и преобразователей частот. Классические нелинейные кристаллы $LiNbO_3$ (ниобат лития), KDP (дигидрофосфат калия) и соединения A^3B^5 обладают высокой нелинейной восприимчивостью, однако их высокая стоимость и плохая совместимость с кремниевой технологией ограничивают интеграцию в современные оптические системы. Кремниевая платформа, напротив, отличается простотой изготовления и низкой стоимостью, но наличие центра инверсии в кристаллической решётке кремния подавляет нелинейные эффекты второго порядка. Обойти данный запрет позволяют нарушение симметрии на границах кристаллов и учёт взаимодействий следующего порядка малости, эффективность которых существенно зависит от морфологии структуры; в частности, использование мезопористых наночастиц Si/SiO_2 позволяет значительно увеличить эффективность нелинейных процессов [2].

Данная работа посвящена исследованию генерации второй гармоники (ГВГ) в структурах ядро-оболочка на основе SiO_2, покрытого композитом Si/SiO_2. Были рассмотрены различные механизмы ГВГ для структур с различными диаметрами ядра инкапсулированных в полидиметилсилоксан (PDMS).

Материалы и методы

Моделирование проводилось с помощью COMSOL Multiphysics. Исследовались наночастицы типа ядро-оболочка на основе SiO_2, покрытого мезопористым Si/SiO_2, инкапсулированные в PDMS, с вариацией диаметра ядра 0-450 нм, полный диаметр наночастицы составляет 450 нм. В качестве источника падающего света использовалась плоская линейно-поляризованная электромагнитная волна длиной 850-1000 нм. Показатели преломления и экстинкции для Si и SiO_2, использованные для расчета, были взяты из [3,4], соответственно. Оптические параметры композита Si/SiO_2 с соотношением компонент 1:1 были получены с помощью приближения Бруггемана. Нелинейно оптические параметры были взяты из [5,6].

1. Результаты и обсуждение

Были получены спектры эффективности рассеяния падающего света и ГВГ для различных диаметров ядра при фиксированном диаметре наночастицы, равном 450 нм. На

спектрах эффективности рассеяния отмечаются явные полосы усиления двух типов, связанные с резонансами Ми ядра и всей наночастицы. С уменьшением радиуса ядра (увеличением толщины оболочки) наблюдается спрямление резонансов наночастицы, связанное с изменением показателя преломления с изменением объема ядра. Эффективность ГВГ была рассчитана для 3х основных механизмов: генерация на внешней поверхности наночастицы, генерация на границах кристаллитов, составляющих композит Si/SiO_2, а также объемная генерация. Также, как и спектры рассеяния, данные зависимости проявляют резонансные особенности, как на длине волны падающего излучения, так и на длине волны второй гармоники. Полосы усиления вклада внешней поверхности, также, как и объемного, связаны в основном с резонансами Ми на длине волны второй гармоники, в то время как вклад поверхностей кристаллитов зависит преимущественно от резонансов на длине волы падающего света. На всех спектрах в точках пересечения резонансов различной природы наблюдается усиление (для вклада поверхностей кристаллитов) или ослабление (для вклада внешней поверхности) нелинейно-оптического сигнала, что связано с конструктивной или деструктивной интерференцией соответственно.

Заключение

В данной работе было проведено исследование ГВГ в наночастицах типа ядро-оболочка на основе SiO_2, покрытого композитом Si/SiO_2. Получены спектры эффективности рассеяния и ГВГ для наночастиц диаметром 450 нм с вариацией диаметра ядра. Зависимости показали наличие резонансных особенностей, связанных с резонансами Ми ядра и всей наночастицы на длине волны падающего света и длине волны второй гармоники. В точках пересечения резонансов наблюдаются интерференционные эффекты, вызывающие усиление или ослабление сигнала в зависимости от механизма ГВГ. Простота и низкая стоимость изготовления исследуемых структур позволяет использовать их в качестве эффективных и гибких преобразователей частоты для нанофотонных применений.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант гос. задания № FSEG-2024-0017).

Список литературы

[1] A.P. Anthur, H. Zhang, Y. Akimov, J. Rong Ong, D. Kalashnikov, A.I. Kuznetsov, L. Krivitsky. Optics Express, **29**(7), 10307 (2021).

[2] A. S. Funtikova, V. A. Sharov, L. N. Dvoretckaia, K. N. Novikova, D. A. Eurov, E. Y. Stovpiaga, D.A. Kurdyukov, A.V. Aybush, A.V. Koroleva, E.V. Zhizhin, V.V. Fedorov, D.V. Miniv, A.M. Mozharov, I. S. Mukhin. Materials Science in Semiconductor Processing, **204**, 110328 (2026).

[3] M. A. Green. Solar Energy Materials and Solar Cells, **92**(11), 1305 (2008).

[4] T. Radhakrishnan. In: Proceedings of the Indian Academy of Sciences-section A. New Delhi: Springer India. **33** (1), 22 (1951).

[5] B. Huo, X. Wang, S. Chang, M. Zeng. J. Opt. Soc. Am. B, **29**, 1631(2012).

[6] O. A. Aktsipetrov, I. M. Baranova, K. N. Evtyukhov, Nonlinear optics of silicon and silicon nanostructures, Fizmatlit, Moscow, 2012.

Нелинейно-оптическое преломление в растворах красителей для генерации бесселеподобных пучков

П.Н. Василевский [1,2]✉, Е.А. Кузнецова[1], М.С. Савельев[1,2], А.Ю. Толбин[2], А.Ю. Герасименко [1,3]

[1] Институт биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет электронной техники, Зеленоград, Москва, Российская Федерация;

[2] Институт физиологически активных веществ Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, Московская область, Российская Федерация;

[3] Институт бионических технологий и инженерии Первого МГМУ им. И. М. Сеченова, Москва, Российская Федерация

✉pavelvasilevs@yandex.ru

Аннотация. Бесселевы пучки являются перспективным инструментом современной фотоники и находят применение во многих областях применений благодаря своим уникальным свойствам. В работе исследована возможность генерации бесселеподобных пучков с использованием принципов нелинейно-оптического преломления. В качестве нелинейно-оптической среды использован раствор фталоцианинов цинка. Создана экспериментальная установка, включающая зондирующий лазер и лазер накачки. Получено, что при включении излучения накачки зондирующий луч изменяет свое пространственную форму с гауссовой на бесселеву форму. При этом, увеличение мощности накачки с 20 мВт до 35 мВт приводит к увеличению глубины фокуса зондирующего луча с 8 до 14 мм.

Ключевые слова: нелинейное преломление, лазерное излучение, бесселеподобные пучки, фталоцианины.

Введение

Оптические и лазерные методы в биомедицине активно используются на протяжении несколько десятков лет. Однако, традиционные гауссовы пучки обладают некоторыми ограничениями, которые тормозят развитие данных методов. Одним из путей решения данной проблемы является использование структурированных бесселевых пучков, которые обладают уникальными свойствами [1]. Поперечный профиль бесселева пучка сохраняется на существенно большей длине, чем у гауссового, а интенсивность центрального максимума слабо изменяется вдоль оси. Кроме этого, бесселвы пучки могут самовосстанавливаться, когда при частичном экранировании центрального пика энергия из кольцевых областей перетекает к оси и восстанавливает структуру пучка, что критично для работы в рассеивающих средах. Данный свойства делают такие лучи перспективными в флуоресцентной микроскопии, двухфотонной полимеризации, оптической манипуляции и глубокой оптической стимуляции.

Традиционным методом генерации бесселевых пучков является использование аксиконов. Однако, их недостатком является отсутствие гибкости при настройке бесселевых пучков. Для преодоления данного ограничения могут использоваться методы нелинейной оптики, например, метод пространственной фазовой кросс-модуляции вследствие нелинейного преломления. В этом случае в нелинейно-оптической среде вызывается лазерно-индуцированная фазовая неоднородность, которая приводит к изменению формы зондирующего луча. Одним из перспективных нелинейно-оптических материалов являются фталоцианины [2]. В данной работе показана возможность генерации и настройки бесселеподобных пучков в растворах фталоцианинов цинка.

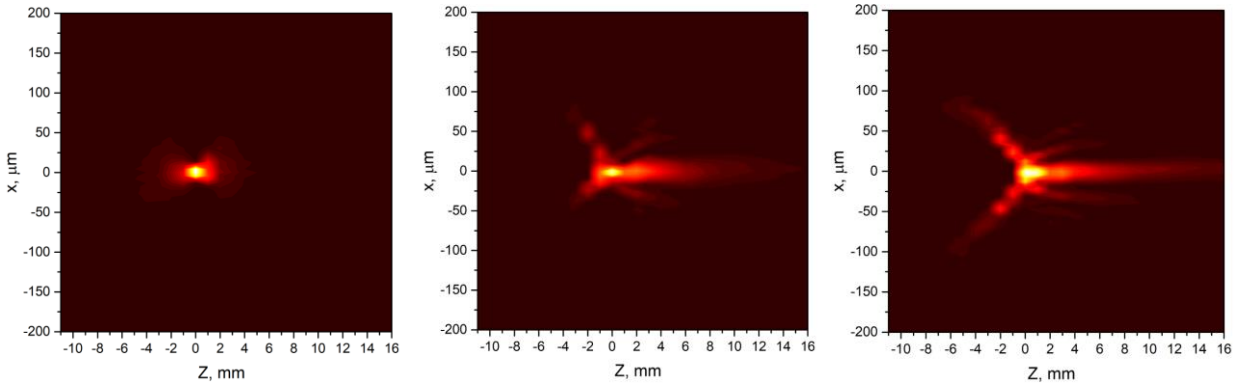
Материалы и методы

В качестве нелинейно-оптической среды использован раствор фталоцианинов цинка в диметилформамиде. Полученный спектр оптической плотности показывает увеличенное поглощение в области 640-670 нм и высокую прозрачность в зеленой и ближней ИК области спектра. Длина оптического пути составляла 2 мм.

Был разработан экспериментальный стенд для генерации бесселеподобных пучков с использование 2 лазеров: непрерывного диодного лазера с длиной волны 650 нм (лазер накачки) и импульсного наносекундного неодимового лазера (зондирующий лазер, использована вторая гармоника, 532 нм). С помощью светоделительной пластины излучение обоих лазеров направлялось в одну точку среды. Излучение накачки было предварительно сфокусировано для формирования большей интенсивности. После прохождения через раствор фталоцианинов зондирующий луч фокусировался на CCD-камеру, с помощью которой получены пространственные профили излучения.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены пространственные профили зондирующего луча в различных точках относительно фокуса линзы. При выключенном излучении накачки профиль соответствует гауссовой форме и наблюдается быстрое расхождение луча после прохождения через фокус, сопровождающееся резким снижением интенсивности. При включенной накачке (рисунки 1б и 1в) наблюдается формирование луча в виде кольца, который при фокусировке преобразуется в бесселеподобный луч. При этом наблюдается слабое расхождение центрального пика бесселеподобного луча и сохранение интенсивности излучения на значительно большем расстоянии в сравнении с гауссовой формой. При этом, увеличение мощности накачки с 20 мВт до 35 мВт приводит к увеличению глубины фокуса зондирующего луча с 8 до 14 мм.



а б в

Рис. 1. Распространение зондирующего луча вдоль оптической оси Z при мощности излучения накачки: 0 мВт (а), 20 мВт (б) и 40 мВт

Заключение

Показана возможность генерации бесселеподобных пучков в растворе фталоцианинов цинка при использовании лазера накачки. Мощность излучения накачки влияет на создаваемую в среде неоднородность показателя преломления вследствие проявления эффектов нелинейного преломления, что приводит к изменению свойств бесселеподобных пучков. Получено, что увеличение мощности накачки приводит к увеличению глубины фокуса. Такой метод позволяет обеспечить гибкость настройки геометрические свойства бесселевого пучка.

Благодарности

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения No 075-15-2024-555 от 25 апреля 2024 года.

Список литературы

[1] Khonina S. N., Kazanskiy N. L., Karpeev S. V., Butt M. A. Micromachines, **11**(11), 997 (2020).

[2] Tolbin A. Y., Savelyev M. S., Vasilevsky P. N., Gerasimenko A. Y. Physical Chemistry Chemical Physics, **26**(11), 8965 (2024).

Магнитоуправляемые экситон-поляритоны в антиферромагнетике CrSBr

Т. Д. Горелкина[1]✉, И. Е. Калантаевский[1], А. Н. Абрамов[1], К. А. Гасникова[1,2], П. А. Алексеев[2], С. Цзэн[3], Д. Хуан[3], Т. Цзян[3], И. В. Иорш[1], И. Ю. Честнов[1], В. А. Кравцов[1]

[1] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;

[2] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия;

[3] Институт прецизионной оптической инженерии, Университет Тунцзи, Шанхай, Китай;

✉t.gorelkina@itmo.ru

Аннотация. В работе исследуются самогибридизованные экситон-поляритоны в объемном кристалле и поляритоны, полученные в результате связи экситона и волноводной моды в фотонном кристалле (ФК), изготовленных из слоистого ван-дер-ваальсова антиферромагнетика CrSBr. Показано, что при фазовом переходе антиферромагнетик–ферромагнетик, индуцированном внешним магнитным полем, приложенным вдоль кристаллографической оси b, происходит непрерывное смещение энергии поляритонов, что позволяет отследить динамику переключения намагниченности в отдельных слоях. Впервые продемонстрировано полное изменение знака групповой скорости поляритонов в ФК CrSBr, а следовательно, и направления их распространения, при изменении внешнего магнитного поля всего на ~40 мТл.

Ключевые слова: экситон-поляритоны, фотонный кристалл, магнитное переключение, групповая скорость, ван-дер-ваальсовы материалы.

Введение

Слоистые ван-дер-ваальсовы полупроводники являются перспективной платформой для интегральной фотоники благодаря высокому показателю преломления, низким оптическим потерям и возможности гибридной интеграции. Магнитный полупроводник CrSBr выделяется среди них возможностью эффективного управления оптическим откликом с помощью умеренных внешних магнитных полей за счёт перехода из антиферромагнитного (АФМ) в ферромагнитное (ФМ) состояние.

Материалы и методы

Фотонный кристалл изготавливался из 105-нм объемного кристалла CrSBr методом сканирующей зондовой литографии, позволяющим формировать одномерные решётки. Период структуры составил 551 нм, глубина модуляции — 23 нм. Оптические измерения проводились при температуре 10 К в магнитных полях до 0.5 Тл, ориентированных вдоль кристаллографической оси b.

Результаты и обсуждение

Для исследования дисперсионных свойств наноструктурированного CrSBr были проведены углоразрешённые измерения отражения. На рис. 1а представлена экспериментальная дисперсия самогибридизованных экситон-поляритонов в объемном и фотонном кристалле. Видно, что объемный кристалл характеризуется бездисперсионными самогибридизованными поляритонами, а периодическое модулирование поверхности приводит к формированию высокодисперсионных поляритонных ветвей в области энергий 1.27–1.31 эВ. Эти ветви соответствуют нижним поляритонным состояниям, возникающим в результате сильной связи волноводной моды TE_0 с экситонным резонансом CrSBr.

Далее исследовано влияние внешнего магнитного поля на оптический отклик CrSBr в области спин-флип перехода. На рис. 1б вместо ожидаемого скачкообразного сдвига экситонного резонанса наблюдается Y-образное расщепление поляритонной моды с последующим плавным смещением одной из образовавшихся ветвей. Такое поведение связано с сосуществованием АФМ и ФМ фаз в многослойном образце, что приводит к формированию двух типов экситонов с различными резонансными энергиями, одновременно взаимодействующих с общей модой. Для количественного описания этого процесса использована модель трёх связанных осцилляторов, в которой параметр s определяет долю ФМ экситонов. На рис. 1в представлена схема послойного

переключения намагниченности в образце, а также зависимость доли ФМ экситонов от магнитного поля.

Ключевым результатом работы является демонстрация переключения направления распространения поляритонов при изменении внешнего магнитного поля. На рис. 1г представлены углоразрешённые спектры фотолюминесценции ФК CrSBr в АФМ ($B = 284$ мТл) и ФМ ($B = 324$ мТл) фазах соответственно. Групповая скорость поляритонов, определяемая наклоном дисперсионной ветви, меняет знак с отрицательного в АФМ фазе ($V_g^{\text{АФМ}} = -13.4$ мкм/пс) на положительный в ФМ фазе ($V_g^{\text{ФМ}} = +13.0$ мкм/пс). Таким образом, изменение внешнего магнитного поля всего на $\Delta B \approx 40$ мТл приводит к полному обращению направления распространения поляритонов.

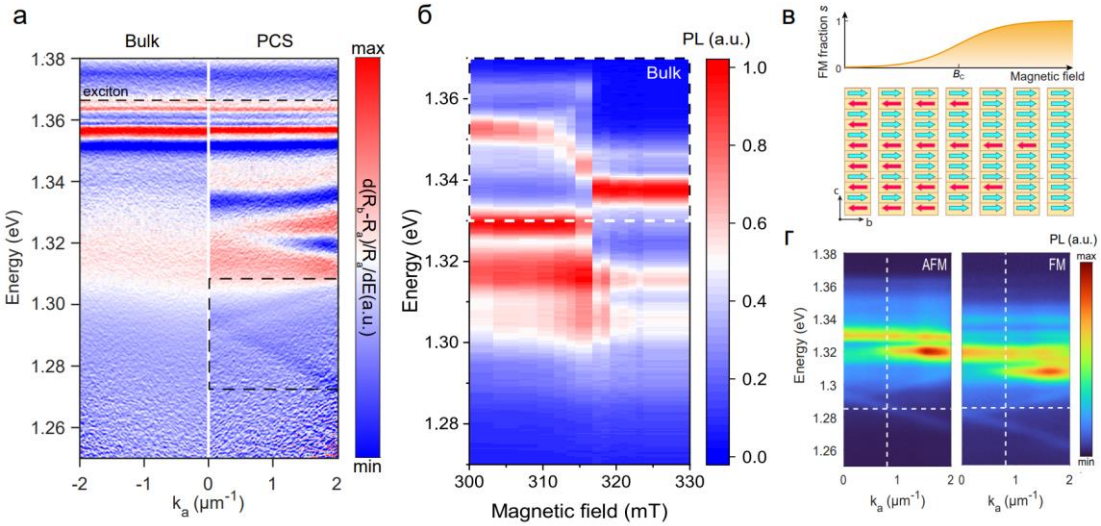


Рис. 1. (а) Первая производная измеренных спектров контраста отражения с угловым разрешением для неструктурированного (слева) и структурированного (справа) CrSBr, с экситонным резонансом при 1,3665 эВ, обозначенным горизонтальной пунктирной линией. (б) Зависимость нормированных спектров фотолюминесценции от магнитного поля, измеренных на неструктурированном образце CrSBr. (в) Зависимость доли ферромагнитных экситонов от магнитного поля (сверху), иллюстрация послойного переключения АФМ на ФМ свойства в образце CrSBr (снизу). (г) Спектры фотолюминесценции с угловым разрешением для ФК в АФМ и ФМ фазах. Белые пунктирные линии указывают энергию $E = 1.283$ эВ и волновой вектор вектора $k_a = 0.81$ мкм$^{-1}$, соответствующие изменению знака групповой скорости поляритона.

Заключение

В данной работе продемонстрирована возможность контроля дисперсионных свойств самогибридизованных экситон-поляритонов в объемном кристалле CrSBr с помощью внешнего магнитного поля. Ключевым результатом является реализация полного переключения направления распространения поляритонов при изменении магнитного поля всего на ~40 мТл, что открывает перспективы для создания активных магнитоуправляемых элементов интегральной фотоники.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-72-20029.

Список литературы

[1] F. Dirnberger, J.D. Ziegler, J. Förste, T. Taniguchi, K. Watanabe, A. Högele, R. Huber, M.A. Sentef, I.I. Mazin, D.N. Basov. Nature, **620**, 533 (2023).

[2] T. Wang, Y. Zhang, C. Li, S. Wang, J. Li, X. Xu. Nat. Commun., **14**, 5966 (2023).

Влияние толщины слоя ZnO на плазмон-усиленную фотолюминесценцию в ZnO/PLL/Al наноструктурах

Д. Е. Костина [1]✉, **А. А. Лизунова** [1]

[1] Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

✉frolova.de@mipt.ru

Аннотация. В работе исследовано влияние толщины слоя ZnO на фотолюминесценцию (ФЛ) в ZnO/PLL/Al наноструктурах. Показано, что в чистом ZnO интенсивность фотолюминесценции возрастает с увеличением количества слоев вследствие роста числа излучающих центров. В то же время в ZnO/PLL/Al структурах наблюдается противоположная зависимость: коэффициент усиления фотолюминесценции уменьшается с увеличением количества слоев ZnO. Такое поведение обусловлено тем, что влияние алюминиевых частиц (Al NPs) преимущественно распространяется на нижние слои ZnO в структуре ZnO/PLL/Al, тогда как вклад более удаленных слоев ZnO уменьшается.

Ключевые слова: оксид цинка, плазмон-усиленная фотолюминесценция, poly-L-lysine, алюминиевые наночастицы.

Введение

В последние десятилетия наблюдается повышенный интерес к плазмонным металлическим наноструктурам, в частности к алюминиевым наночастицам, благодаря их способности усиливать фотолюминесценцию полупроводниковых материалов [1, 2]. Одним из подходов к управлению оптическим откликом наноструктур является использование промежуточных полимерных слоев, позволяющих контролировать расстояние между металлом и излучателем [3]. В предыдущей работе было показано, что применение полимерного промежуточного слоя позволяет управлять расстоянием между ZnO и алюминием и изменять фотолюминесцентные свойства ZnO/Al систем [4]. При этом, помимо расстояния между металлом и излучателем, влияние толщины самого слоя ZnO на эффективность плазмонного усиления остается недостаточно изученным. В данной работе исследуется зависимость фотолюминесценции в наноструктуре ZnO/PLL/Al от числа слоев ZnO при фиксированной толщине полимерной пленки.

Материалы и методы

Poly-L-lysine (PLL, SIGMA-ALDRICH, USA) (0.1 wt.% в H_2O) использовался в качестве полимерного покрытия и разбавлялся 2-пропанолом (HiPerSolv CHROMANORM, VWR BDH Chemicals, Germany) в соотношении 1:3 (v:v). Коллоидные алюминиевые наночастицы (Al NPs) с концентрацией 0.18 г/л и средним размером 55 ± 25 нм, полученные методом электрического взрыва проволоки, были диспергированы в изопропиловом спирте с добавлением стабилизатора (лимонная кислота, 0.05 г/л) по ранее описанной методике [5]. Наночастицы ZnO со средним размером 27 ± 7 нм были приготовлены из ZnO (Sigma-Aldrich, Switzerland; 40 wt.%) с итоговой концентрацией 1.1 г/л [5]. Осаждение многослойных структур проводилось методом спин-коатинга на кварцевых подложках (1.2×4 см²) с параметрами: 15 мкл суспензии, 1000 об/мин, 30 с и ускорения 500 об/мин/с. Полимерный слой формировался нанесением 10 последовательных слоев PLL, что приводит к смещению максимума поглощения Al NPs с 225 нм до 298 нм [4]. Число слоев ZnO варьировалось от 3 до 24. UV-Vis-NIR спектры поглощения и спектры фотолюминесценции были измерены с использованием спектрофотометра JASCO V-770 и флуориметра JASCO FP-8300 соответственно. Фотолюминесцентные измерения проводились при длине волны возбуждения 325 нм и ширине щелей возбуждения и регистрации 10 нм; анализ коэффициента усиления ФЛ проводился при длине возбуждения 377 нм, соответствующей максимуму поглощения ZnO.

Результаты и обсуждение

Оптическая плотность Al NPs составляла 0.05, тогда как для ZnO она увеличивалась от 0.03 (3 слоя) до 0.22 (24 слоя). В чистых ZnO структурах наблюдается увеличение

интенсивности фотолюминесценции при увеличении числа слоев (рис.1*а*), что связано с ростом количества излучающих центров.

а) *б)*

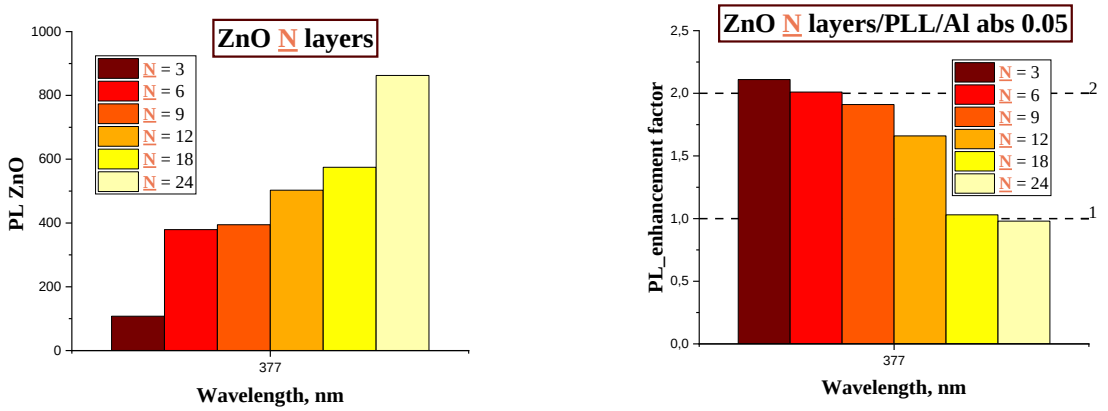


Рис. 1. *а)* Зависимость интенсивности фотолюминесценции ZnO от числа слоев ZnO (3-24 слоя). *б)* Зависимость коэффициента плазмон-усиленной фотолюминесценции в структуре ZnO/PLL/Al от числа слоев ZnO.

В ZnO/PLL/Al наноструктурах выявлена противоположная зависимость: коэффициент усиления фотолюминесценции уменьшается при увеличении количества слоев ZnO (рис. 1*б*). Полученные зависимости показывают, что плазмонное усиление определяется вкладом слоев ZnO, расположенных вблизи металлической поверхности. Наблюдаемое снижение коэффициента усиления фотолюминесценции при увеличении количества слоев ZnO согласуется с литературными данными, показывающими уменьшение усиления при увеличении расстояния между излучателем и плазмонной поверхностью, подтвержденное экспериментально и теоретически [5].

Заключение

Показано, что толщина слоя ZnO существенно влияет на фотолюминесценцию в ZnO/PLL/Al наноструктурах. Установлено, что увеличение количества слоев ZnO приводит к росту собственной фотолюминесценции, но одновременно снижает эффективность плазмонного усиления. Планируется проведение теоретических расчетов для количественного описания наблюдаемой зависимости и определения оптимальных параметров системы.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00311-П, https://rscf.ru/project/22-19-00311/

Список литературы

[1] Krishanu Ray et al, Aluminum Nanostructured Films as Substrates for Enhanced Fluorescence in the Ultraviolet-Blue Spectral Region, Analytical Chemistry 2007 79 (17), 6480-6487

[2] Forestiere, C et al, Enhancement of Molecular Fluorescence in the UV Spectral Range Using Aluminum Nanoantennas, Plasmonics 9, 715-725 (2014)

[3] Ai Ling Feng et al, Distance-Dependent Plasmon-Enhanced Fluorescence of Upconversion Nanoparticles using Polyelectrolyte Multilayers as Tunable Spacers, Sci Rep 5, 7779 (2015)

[4] D.E. Kostina et al, Optical properties of aluminum nanostructures modified by polymer coatings, St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. 2025. Vol. 18. No. 3.1

[5] Thomas E. M. at al, Combined effects of emitter–emitter and emitter–plasmonic surface separations dictate photoluminescence enhancement in a plasmonic field, Phys. Chem. Chem. Phys., 2022,24, 17250-17262

Управление оптической киральностью в кремниевых наноспиралях, полученных методом наклонного напыления, через изменение геометрических параметров

И. С. Фаттахов [1✉], **О. С. Трушин** [1], **А. А. Попов** [1], **Л. А. Мазалецкий** [1], **А. С. Федоров** [2, 3], **М. В. Логунов** [2, 3]

[1] Обособленное подразделение «Отдел микротехнологий» – Ярославль ОФТИ им. К.А. Валиева ЦПМ НИЦ «Курчатовский институт», Ярославль, Россия;

[2] Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия;

[3] Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия;

✉33ychenikan@mail.com

Аннотация. В данной работе были исследованы оптические свойства массивов киральных кремниевых наноспиралей, полученных методом наклонного напыления (GLAD – glancing angle deposition). Были изучены спектры кругового дихроизма и вращения плоскости поляризации в видимом диапазоне длин волн. Было показано, что оптические свойства зависят от геометрических параметров наноспиралей, что выражается в зависимости пиков кругового дихроизма от шага спирали. Такие наноструктурированные пленки обладают высокой оптической активностью и могут быть использованы в фотонике, в качестве поляризационных элементов и киральных биосенсоров.

Ключевые слова: круговой дихроизм, вращение плоскости поляризации, наклонное напыление, киральные наноспирали

Введение

Возможность создания искуственных киральных материалов с уникальными оптическими свойствами дает возможность изучать фундаментальные механизмы взаимодействия света с веществом, а также открывает перспективы для их практического применения [1]. Киральность проявляется в оптических явлениях в виде различных типов взаимодействия такого материала со светом с правой и левой круговой поляризацией [2, 3]. Эти явления могут быть использованы для создания оптических фильтров, поляризаторов и датчиков киральных биомолекул. Данная работа посвящена исследованию оптических свойств кремниевых наноспиралей, которые сочетают в себе настройку резонансных свойств и, в отличие от металлических, которые исследовались ранее [4], характеризуются высоким коэффициентом пропускания в видимом и ближнем ИК-диапазонах [5-7], что позволяет реализовывать большее количество витков и тем самым усиливать их оптическую активность. Также кремниевые наноструктуры полностью совместимы с технологией кремниевой фотоники и могут быть интегрированы в фотонные устройства.

Материалы и методы

Эксперименты по наклонному напылению тонких пленок проводились на установке электронно-лучевого испарения «Оратория-9». В процессе напыление угол наклона был 85°. Скорость вращения варьировалась от 0.1 до 0.4 об/мин. Морфология и структура получаемых пленок была исследована методом сканирующей электронной микроскопии (прибор SUPRA-40). Оптические характеристики измерялись на спектрометре кругового дихроизма фирмы Jasco Corporation J-1500.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлено СЭМ изображение кремниевых наноспиралей, полученных при напылении в течение 25 минут при скорости вращения вокруг своей оси 0.3 об/мин. Можно отметить отсутствие уширения волокна в течение процесса роста в отличие от металлических наноспиралей [4]. На рисунке 2 приведены спектры циркулярного дихроизма серии образцов кремниевых наноспиралей, в которой менялась скорость вращения образцов от 0.1 до 0.4 об/мин. Нужно отметить, что экстремумы кругового дихроизма образцов со скоростями 0.2, 0.3 и 0.4 об/мин отрицательны, так как спирали закручены в одну сторону. Экстремум у образца со скоростью вращения 0.1 об/мин

имеет другой знак, так как спирали закручены в противоположном направлении. Также заметно смещение экстремума кругового дихроизма при изменении скорости вращения.

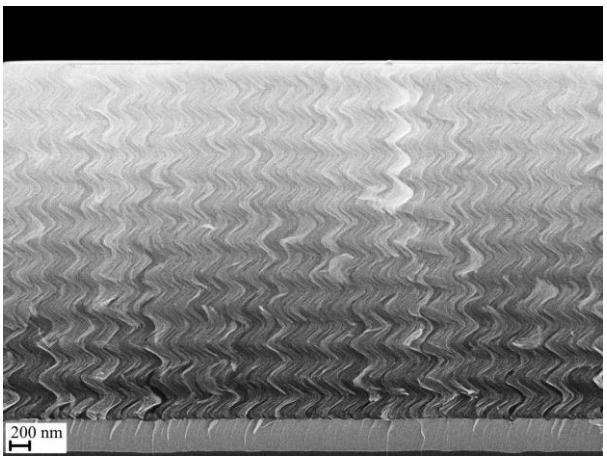


Рис. 1. Характерный вид массива наноспиралей сбоку на примере образца со скоростью вращения подложки 0.3 об/мин

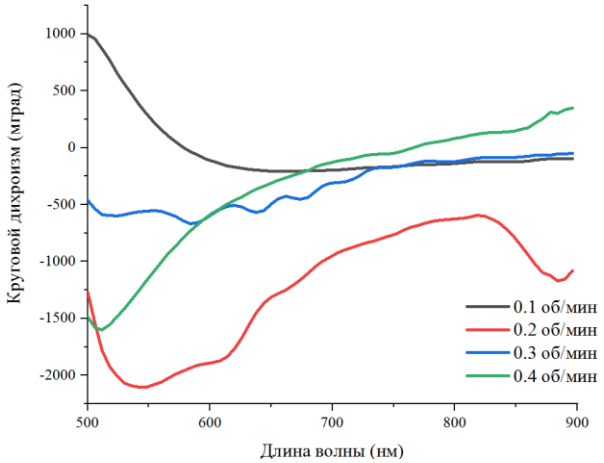


Рис. 2. Спектры кругового дихроизма кремниевых наноспиралей: черная линия – 0.1 об/мин, красная – 0.2 об/мин, синяя – 0.3 об/мин, зеленая – 0.4 об/мин

Заключение

Таким образом, наклонное напыление с вращением позволяет получать практически однородные кремниевые наноспирали. Благодаря изменению скорости вращения и напыления можно изменять геометрические параметры спирали. А высокое пропускание кремния на высоких длинах волн позволяет регулировать оптическую активность числом витков спиралей.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Диагностика микро- и наноструктур».

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] JH. Han, D. Kim, J. Kim, G. Kim, P. Fischer, HH. Jeong. Adv Mater., 35(34), 210797 (2022)
[2] U. Kilic, M. Hilfiker, S. Wimer, A. Ruder, E. Schibert, M. Schubert, C. Argyropoulos. Nat. Commun., 15, 3757 (2024)
[3] P. Liu, W. Chen, Y. Okazaki, Y. Battie, L. Brocard, M. Decossas, E. Pouget, P. Muller-Buschbaum, S. Pathan, T. Sagawa, R. Oda. Nano Lett., 20(12), 8453-8460 (2020)
[4] I.S. Fattakhov, O.S. Trushin, A.A. Popov, L.A. Mazaletsky, D.R. Titov, A.S. Fedorov, M.V. Logunov. St. Petersbg. State Polytech. Univ. J.: Phys. Math., 18 (3.2), 101-105 (2025)
[5] J. Toudert, R. Serna, J. Martín Sánchez, J. I. Larruquert, L. Calvo-Barrio. J. Phys. Photonics, 7(4), 045019 (2025)
[6] BJ Olohan, E. Petronijevic, U. Kilic, S. Wimer, M. Hilfiker, M. Schubert, C. Argyropoulos, E. Schibert, SR. Clowes, GD. Pantos, DL. Andrews, VK. Valev. ACS Nano, 18(26), 16766-16775 (2024)
[7] L.S. Basalaeva, Yu.V. Nastaushev, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, D.A. Radnatarov, S.A. Khripunov, D.E. Utkin, I.B. Chistokhin, A.V. Latyshev, F.N. Dultsev. Thin Solid Films, 672, 109-113 (2019)

Моделирование кирального оптического отклика никелевых наноспиралей

М.М. Чебохин[1]✉, **О.С. Трушин**[1], **И.С. Фаттахов**[1]

[1] Обособленное подразделение «Отдел микротехнологий» – Ярославль ОФТИ им. К.А. Валиева ЦПМ НИЦ «Курчатовский институт», Ярославль, Россия;

✉miskam546@gmail.com

Аннотация. В данной работе представлены результаты численного моделирования кирального оптического отклика никелевых наноспиралей, полученных методом наклонного напыления GLAD (glancing angle deposition). С использованием метода конечных разностей во временной области FDTD (finite difference time domain) получены спектры кругового дихроизма CD (circular dichroism) и проведено сравнение с экспериментальными спектрами. Показано качественное совпадение экстремумов кругового дихроизма, что подтверждает теоретические причины кирального отклика и позволяет использовать модель для теоретического изучения оптических свойств наноструктур с заданными киральными свойствами. Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными связано с разбросом параметров наноструктур при наклонном напылении.

Ключевые слова: круговой дихроизм, наклонное напыление, FDTD, киральные наноструктуры

Введение

Наклонное напыление позволяет создавать киральные наноструктуры с настраиваемыми оптическими свойствами [1]. Настройка оптической активности осуществляется за счёт изменения геометрических характеристик итоговых мета-атомов. Существует множество работ по изучению и моделированию оптической активности наноспиралей [2]. Большинство этих исследований посвящены благородными металлам (Au, Ag) из-за их сильных плазмонных эффектов в УФ и видимой областях спектра [3]. Однако для масштабирования технологии и снижения себестоимости конечных устройств перспективно использовать более доступные металлы с высокой оптической активностью, как, например, никель [4]. Наряду с этим перспективным также является применение магнитных металлов, поскольку в данном случае появляется возможность дополнительного контроля оптической активности за счет магнитного кругового дихроизма с помощью внешнего продольного магнитного поля. Таким образом, данная работа направлена на изучение зависимости оптической активности от формы наноспиралей с помощью численного моделирования, которые исследовались ранее [5] и характеризуются высоким круговым дихроизмом и вращением плоскости поляризации.

Материалы и методы

Эксперименты по наклонному напылению тонких пленок проводились на установке электронно-лучевого испарения «Оратория-9». В процессе напыления угол наклона равен 85°. Морфология и структура получаемых пленок была исследована методом сканирующей электронной микроскопии (прибор SUPRA-40). Оптические характеристики измерялись на спектрометре кругового дихроизма фирмы Jasco Corporation J-1500. Моделирование было проведено методом FDTD, в котором учитывался структурный фактор киральности, плазмонные и коллективные эффекты в моделируемых массивах наноструктур.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлено СЭМ изображение массива никелевых наноспиралей, полученных при напылении в течение 10 минут при скорости вращения вокруг своей оси 0.2 об/мин. Можно отметить формирование геликоидальных структур. На рисунке 2 приведен спектр кругового дихроизма данного образца и спектр, рассчитанный методом

численного моделирования. При сравнении спектров заметно совпадение экстремума максимума в районе 550 нм. Это говорит о том, что источником данной оптической активности является плазмонный резонанс, модулируемый структурной киральностью наноспиралей. Небольшое отличие при более коротких длинах волн связано с идеализацией формы самих спиралей, что не учитывает различные дефекты и шероховатости.

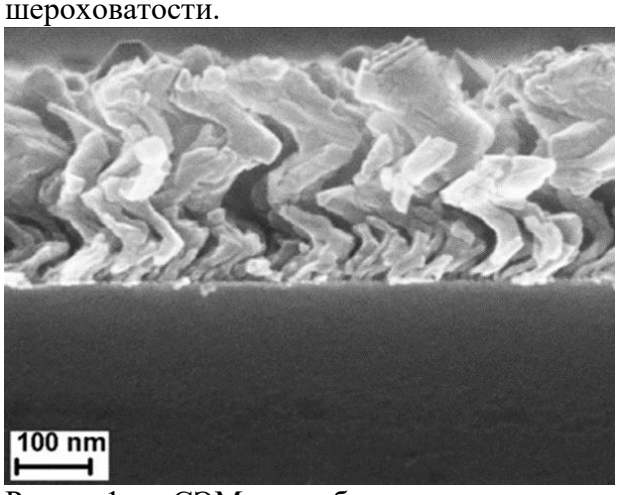


Рис. 1. СЭМ изображение массива никелевых наноспиралей сбоку

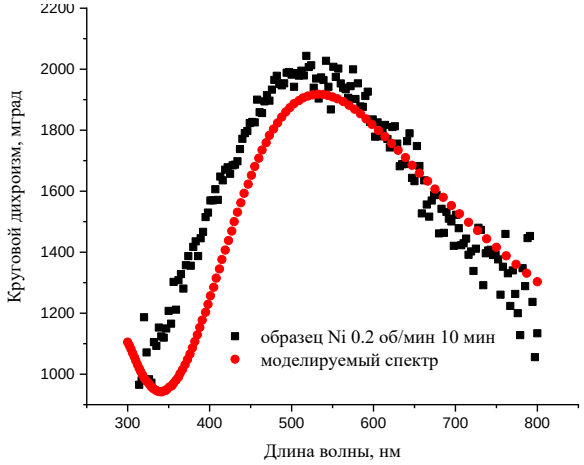


Рис. 2. Спектр кругового дихроизма никелевых наноспиралей: черный квадрат – экспериментальный спектр, красный круг – численное моделирование

Заключение

Таким образом, проведено численное моделирование кирального оптического отклика никелевых наноспиралей, полученных методом наклонного напыления. Проведенное моделирование демонстрирует качественное и количественное совпадение с экспериментальными данными.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Диагностика микро- и наноструктур».

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Barranco, A. Borras, A. Gonzalez-Elipe, A. Palmero. Prog. Mater. Sci., 76, 59-153 (2015)
[2] L. Fagiani, M. Gandolfi, L. Carletti, C. Angelis, J. Osmond, M. Bollani. Micro. Nano. Eng., 19(13), 100187 (2023)
[3] S. Yadav, S. Senapati, S. Kumar, S.K. Gahlaut, J.P. Singh. Biosensors, 12(12), 1115 (2022)
[4] S. Cong, G. Zou, Y. Lou, H. Yang, Y. Su, J. Zhao, C. Zhang, P. Ma, Z. Lu, H. Fan, Z. Huang. Nano Lett., 19(6), 3676-3683 (2019)
[5] I.S. Fattakhov, O.S. Trushin, A.A. Popov, L.A. Mazaletsky, D.R. Titov, A.S. Fedorov, M.V. Logunov. St. Petersbg. State Polytech. Univ. J.: Phys. Math., 18 (3.2), 101-105 (2025)

Экранирующие свойства прозрачных плёнок $In_2O_3/Ag/In_2O_3$ и сэндвич-структур на их основе

А.С. Воронин[1,2], **С.В. Неделин**[3,4], **Н.А. Золотовский**[3,4], **М.О. Макеев**[2], **Б.А. Паршин**[2], **И.А. Тамбасов**[4,5]
[1] ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия;
[2] МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
[3] СФУ, Красноярск, Россия;
[4]НПК Спецтехнаука, Красноярск, Россия
[5]Институт физики им.Л.В. Киренского, Красноярск, Россия
✉ a.voronin1988@mail.ru; m.makeev@bmstu.ru

Аннотация. Исследованы оптические и электромагнитные экранирующие свойства прозрачных плёнок $In_2O_3/Ag/In_2O_3$ и сэндвич-структур на их основе. Для одиночной плёнки с толщиной слоя Ag 13 ± 1 nm коэффициент передачи в диапазоне 0.01–7 GHz составляет –24.82 dB при максимальном пропускании в видимом диапазоне 89.4 %. Формирование сэндвич-структур с PMMA спейсерами толщиной 1 и 2 mm приводит к усилению экранирования: коэффициент передачи уменьшается до значений менее –50 dB при пиковом пропускании 73.9 %. Экспериментальные данные согласуются с расчётами в рамках интерференционной модели. Полученные структуры обеспечивают эффективное широкополосное экранирование при высокой оптической прозрачности.

Ключевые слова: Прозрачные проводящие покрытия, тонкие плёнки, сэндвич-структуры.

Введение

Оптически прозрачные экранирующие материалы востребованы в телекоммуникационных и метрологических задачах, где требуется сочетание высокого пропускания в видимом диапазоне и эффективного подавления излучения в СВЧ и ТГц областях. Ключевой задачей является достижение компромисса между оптической прозрачностью и экранирующей эффективностью.

Материалы и методы

Параметры магнетронного распыления плёнок $In_2O_3/Ag/In_2O_3$ детально описана в работе [1]. В работе мы рассматривали два типа плёнок, с толщиной слоя серебра 13 nm (IAI-1) и 17 nm (IAI-2). Сэндвич-структуры IAI-1/PMMA/IAI-1 и IAI-2/PMMA/IAI-2 формировались на PMMA спейсерах толщиной 1 и 2 mm. Диски диаметром 19 mm с центральным отверстием 4.6 mm вырезались при помощи CO_2 лазера затем с обеих сторон напылялись плёнки $In_2O_3/Ag/In_2O_3$, образуя сэндвич-структуру для измерений в коаксиальной ячейке. Детальное описание методик измерения оптоэлектронных и экранирующих свойств также приведены в работе [1].

1. Результаты и обсуждение

Плёнка IAI-1 (13±1 nm) демонстрирует максимум пропускания 89.4 % при поверхностном сопротивлении 9.04 Ω/sq. Увеличение толщины Ag до 17±1 nm (IAI-2) приводит к снижению прозрачности до 79.9 %, но уменьшает поверхностное сопротивление до 4.36 Ω/sq.

На Рис.1а приведены коэффициенты передачи и отражения для IAI-1 и IAI-2 в диапазоне 0.01-7 GHz. Спектры равномерны по всему исследуемому диапазону, поэтому могут быть описаны усреднёнными параметрами коэффициентов передачи и отражения составляют –24.82 dB и –0.35 dB для IAI-1. В случае плёнки IAI-2 коэффициенты передачи и отражения составляют –31.82 dB и –0.27 dB соответственно.

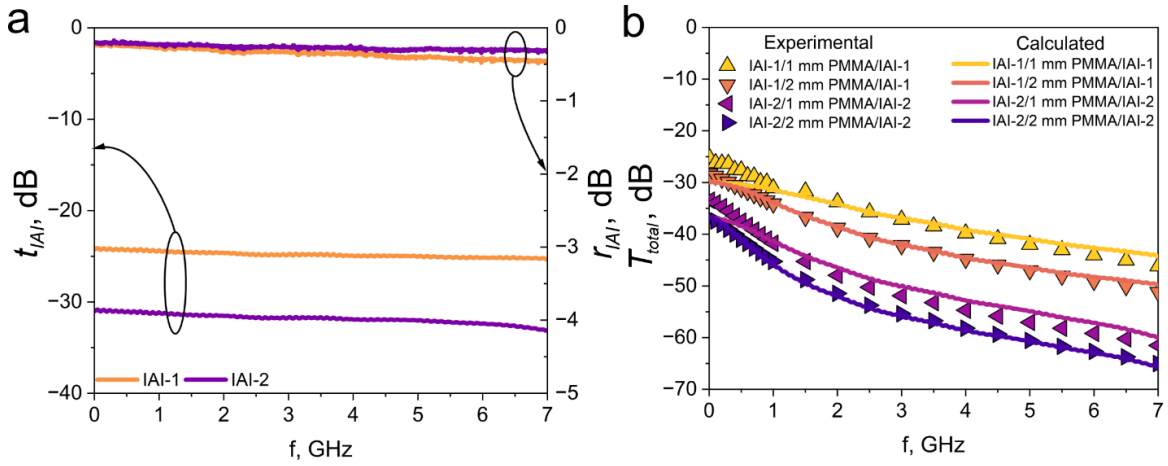


Рис. 1 Спектры коэффициентов передачи и отражения плёнок $In_2O_3/Ag/In_2O_3$ (a) Экспериментальные и расчётные данные коэффициента передачи в диапазоне 0.01-7 GHz для сэндвич-структур IAI-1/PMMA/IAI-1 (a) и IAI-2/PMMA/IAI-2 (b)

Аналитический расчёт коэффициента передачи может быть получен в рамках интерференционной модели при суммировании бесконечной геометрической прогрессии различных сценариев многократных отражений

$$T_{total} = \frac{t_{IAI}^2 e^{-i\frac{2\pi n}{c}fd}}{1-r_{IAI}^2 e^{-2i\frac{2\pi n}{c}fd}} \quad (1)$$

где t_{IAI} и r_{IAI} коэффициенты передачи и отражения для плёнок $In_2O_3/Ag/In_2O_3$, полученные из эксперимента (Рис.1a); n и d - показатель преломления и толщина PMMA спейсера; c - скорость света в вакууме. На Рис. 1б представлены экспериментальные и расчётные спектры коэффициента передачи сэндвич-структур IAI-1/PMMA/IAI-1 и IAI-2/PMMA/IAI-2 при толщине спейсеров 1 и 2 mm. Во всём диапазоне 0.01–7 GHz наблюдается хорошее согласие расчёта и эксперимента. Для структур на основе IAI-1 коэффициент передачи уменьшается от –25.31 dB до –46.06 dB (1 mm) и от –28.29 до –51.19 dB (2 mm). Сэндвич-структуры на основе IAI-2 характеризуются меньшим коэффициентом передачи –33.44 dB до –61.53 dB (1 mm PMMA) и от –36.95 до –65.05 dB (2 mm). Увеличение толщины спейсера приводит к дополнительному снижению коэффициента передачи и усилению экранирующих свойств.

Заключение

Показано, что формирование сэндвич-структур на основе плёнок $In_2O_3/Ag/In_2O_3$ позволяет снизить коэффициент передачи в диапазоне 0.01–7 GHz до значений менее –50 dB при сохранении высокой прозрачности в видимом диапазоне (до 73.9 %). Экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчётами в рамках интерференционной модели. Полученные значения коэффициента передачи превосходят параметры одиночных плёнок IAI и демонстрируют эффективность интерференционного подхода к увеличению экранирующих свойств.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFN-2024-0066).

Список литературы

[1] A. S. Voronin, S. V. Nedelin, N. A. Zolotovsky, I. A. Tambasov, M. O. Makeev, P. A. Mikhalev, B. A. Parshin, E. L. Buryanskaya, M. M. Simunin, I. V. Govorun, I. V. Podshivalov, I. I. Bril`, M. K. Khodzitskiy, S. V. Khartov. Materials, 18(23), 5393, (2025).

Морфология поверхности эпитаксиальных структур арсенида индия после их обработки различными очищающими составами

Л.И. Чернов[1]✉, **В.В. Давыдов**[1], **Е.В. Афанасьева**[1], **Н.Ю. Ефимов**[2]
[1]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Peterburg, Russia
[2]JSC «NRI «Electron», St. Peterburg, Russia
✉leonch3rnov@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты изучения поверхности эпитаксиальных структур арсенида индия (InAs) на лазерном анализаторе Nanoreflex после их обработки различными химическими составами. Проведено сравнение органических растворителей (ДМФА, ИПС, NMP) и неорганических растворов (АПР, HCl, «пиранья») для очистки. Установлено, что агрессивные кислотные составы вызывают появление поверхностных дефектов и не рекомендуются для обработки эпитаксиальных структур InAs. Показано, что наиболее эффективным методом для финишной отмывки поверхности является использование N-метил-2-пирролидона (NMP) с последующей обработкой в аммиачно-перекисном растворе (АПР), что позволило значительно снизить количество адгезивов без повреждения структуры поверхности.

Ключевые слова: арсенид индия (InAs), эпитаксиальные структуры, очистка поверхности, морфология, N-метил-2-пирролидон (NMP).

Введение

Эпитаксиальные структуры на основе арсенида индия (InAs) находят широкое применение в микроэлектронике, оптоэлектронике и СВЧ-электронике, что обусловлено уникальными транспортными свойствами данного материала [1]. Эксплуатационные характеристики приборов, созданных на их основе, напрямую зависят от качества подготовки поверхности перед различными технологическими операциями, такими как: эпитаксиальный рост или формирование контактов. Присутствие органических загрязнений, остаточных адгезивов и естественного оксидного слоя негативно сказывается на адгезии и приводит к возникновению дефектов в гетерограницах (границах раздела разнородных материалов) [2]. В связи с этим, целью работы является разработка оптимальных составов очищающих растворов, способных эффективно удалять загрязнения с поверхности без нарушения её кристаллической структуры. В задачи работы входили анализ морфологии поверхности с последующим определением режимов обработки, обеспечивающих минимизацию травления, минимальное количество посторонних частиц и предотвращение появления вторичных дефектов.

Материалы и методы

В работе исследовались эпитаксиальные структуры n типа InAs, ориентированные в направлении 100. Очистка проводилась по единой схеме, включающей предварительное обезжиривание в органических растворителях и финишную химическую обработку в неорганических растворах.

В роли органических очистителей использовались:

1) Диметилформамид (ДМФА) и его растворы с HCl;
2) Изопропиловый спирт (ИПС) и его растворы с HCl;
3) N-метил-2-пирролидон (NMP).

В качестве финишных очистителей использовались:

1) Аммиачно-перекисный раствор (АПР);
2) Раствор соляной кислоты в воде ($HCl: H_2O = 1: 10$);
3) Раствор «пиранья» ($H_2SO_4: H_2O_2 = 3: 1$);
4) Раствор соляной кислоты, перекиси водорода и воды ($HCl: H_2O_2: H_2O = 1: 1: 50$).

Контроль чистоты и дефектности поверхности осуществлялся с помощью прибора Nanoreflex с подсчетом количества частиц заданного размера (диапазон от ~10 нм до 5000

нм) до и после обработки, а также визуальной оценкой дефектов структуры с помощью оптического микроскопа.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что стандартная процедура очистки, включающая обработку в ДМФА и АПР, приводит к существенному снижению количества частиц на рабочей поверхности с 14111 до 983. Тем не менее, наличие остаточных загрязнений в виде «россыпи частиц» указывает на недостаточную эффективность данного метода в отношении удаления посторонних примесей. Схожие результаты наблюдаются и с ИПС. Обработка путем кипячения в растворе ДМФА+HCl и ИПС+HCl с последующей обработкой в АПР продемонстрировала менее выраженный эффект. В первом случае количество частиц уменьшилось до 1304, а во втором до 5478.

Обработка в кислотном растворе $HCl{:}H_2O$ в соотношении 1:10 с механическим перемешиванием привела к увеличению числа частиц на рабочей поверхности с 34871 до 41009. Кроме того, наблюдалось появление дефектов, таких как «подтравы» и «мелкая сыпь», что свидетельствует о вскрытии внутренних дефектов материала под воздействием раствора. Эксперименты с раствором «пиранья» ($H_2SO_4{:}H_2O_2$) выявили его чрезмерную химическую активность: поверхность образца приобрела матовый вид вследствие интенсивного травления, что сделало невозможным дальнейший анализ ввиду отсутствия отражения от нее.

Наибольшая эффективность очистки была достигнута при использовании NMP в качестве основного растворителя с последующей обработкой в АПР. Результаты, представленные на рисунках 1 и 2, демонстрируют значительное снижение количества частиц на рабочей поверхности с 8166 до 36. Данный эффект, вероятно, обусловлен более высокой очищающей способностью NMP по сравнению с ДМФА.

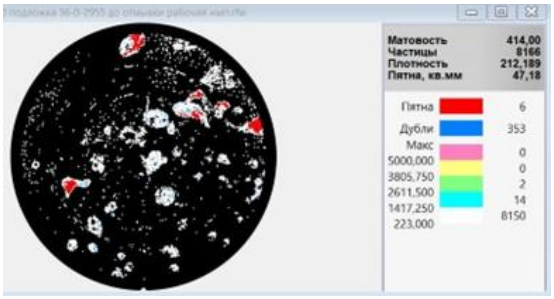


Рис. 1. Поверхность структуры до очистки в NMP.

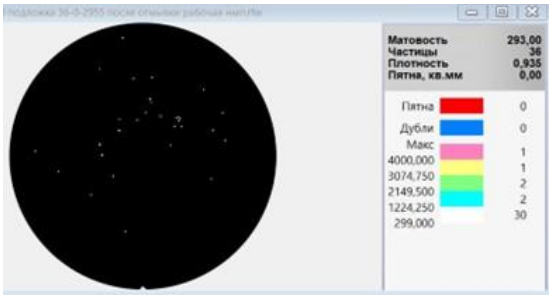


Рис. 2. Поверхность структуры после очистки в NMP.

Заключение

В ходе проведенного анализа было установлено, что наиболее результативным способом очистки поверхности эпитаксиальных структур InAs (100) является применение N-метил-2-пирролидона (NMP). Финишная отмывка с использованием данного растворителя обеспечивает существенное снижение количества частиц посторонних примесей (с 8166 до 36) при сохранении исходной морфологии поверхности. Альтернативные методы, включающие обработку в растворах ДМФА+HCl и ИПС+HCl с последующим использованием АПР, демонстрируют приемлемые, но менее оптимальные результаты по сравнению с NMP. Агрессивные кислотные растворы (например, $HCl{:}H_2O$ (1:10) или «пиранья») способны вызывать дефектообразование на поверхности.

Список литературы

[1] Балакирев С. В. и др. Влияние давления мышьяка при заращивании квантовых точек InAs тонким низкотемпературным слоем GaAs на их оптические свойства //Физика и техника полупроводников. – 2023. – Т. 57. – №. 4. – С. 276-281.

[2] Щербакова Е. Н. Технологии нано- и микросистемной техники. – 2018.

Деформационная модуляция спектра фотолюминесценции монослоя WSe_2 на плазмонных нанобампах

А. В. Николаева [1,2✉], **М. А. Аникина** [1,2], **Д. В. Павлов** [3], **Ф. М. Максимов** [1], **А. Кузнецов** [1], **В. М. Кондратьев** [1,2], **В. А. Шаров** [2,4], **А. А. Кучмижак** [3,5], **А. Д. Большаков** [1]

[1] МФТИ, Физтех, Долгопрудный, Россия

[2] СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия

[3] Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

[4] Институт Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

[5] Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

✉nikalex2000@bk.ru

Аннотация. Монослои дихалькогениды переходных металлов (TMDC) широко известны благодаря своим уникальным оптическим и электрическим свойствам. Интеграция монослоев TMDC с наноструктурированными поверхностями позволяет расширить их функциональные возможности, однако поведение таких гибридных систем изучено неполно. В данной работе исследуется гибридная система, состоящая из монослоя WSe2, интегрированного с плазмонной поверхностью упорядоченных Au-нанобампов, изготовленных методом фемтосекундной лазерной печати. Оптическая характеризация такой структуры показала модуляцию спектра фотолюминесценции двумерного WSe_2 в зависимости от профиля его деформации над нанобампом. Результаты работы открывают возможности для управления оптическими свойствами гибридных наноструктур через контролируемую деформацию, что перспективно для интегральной фотоники и сенсорики.

Ключевые слова: двумерные материалы, WSe_2, плазмонные наноструктуры, фотолюминесценция.

Введение

Монослои дихалькогенидов переходных металлов (TMDC), такие как MoS_2, WS_2 и $MoSe_2$, привлекательны для оптоэлектроники благодаря прямой запрещённой зоне и перестраиваемым экситонным свойствам [1]. Интеграция с наноструктурированными поверхностями, в частности с металлическими наноструктурами, поддерживающими плазмонные резонансы, позволяет преодолеть ограничения, присущие двумерным материалам. Спектральное положение таких резонансов можно точно настраивать, варьируя геометрию наноструктур. Значительным прогрессом стало развитие метода фемтосекундной лазерной печати, обеспечивающего доступную и масштабируемую альтернативу традиционной литографии [2]. Тем не менее, оптические свойства деформированных монослоев TMDC на плазмонных наноструктурах остаются систематически не изученными. В данной работе исследована гибридная система на основе монослоя WSe_2, интегрированного с массивом золотых нанобампов. Результаты позволяют перейти от эмпирического подхода к направленному дизайну оптоэлектронных устройств и углубляют фундаментальное понимание деформационных эффектов в гибридных системах.

Материалы и методы

Золотые плазмонные нанобампы (Au-нанобампы) были изготовлены методом фемтосекундной лазерной печати. Геометрия нанобампов близка к конической с закруглённым профилем вершины, а их высота эмпирически зависит от мощности лазерного импульса и определяет положение соответствующего плазмонного резонанса. Монослои WSe_2 (1L-WSe_2) получены методом механической эксфолиации с последующим сухим переносом на подложку с Au-нанобампами высотой около 140 нм.

1. Результаты и обсуждение

Оптические свойства структуры были охарактеризованы с помощью микроспектроскопии фотолюминесценции на длине волны засветки 532 нм, что близко к

плазмонному резонансу нанобампов, использованных в рамках данной работы. Измерения проводились на спектрометре Horiba LabRAM HR 800.

Установлено, что геометрия профиля монослойного WSe_2 над Au-нанобампом определяет характер модуляции его фотолюминесценции (рис. 1). Для монослоя, плотно облегающего нанобамп, спектр ФЛ идентичен спектру на плоскости (тип 1). В случае широкого профиля наблюдается уширение спектра и значительный длинноволновый сдвиг пика ФЛ (тип 2). Для профиля среднего размера также зафиксированы уширение спектра, длинноволновый сдвиг пика ФЛ, а также появление плеча в области 770 нм (тип 3).

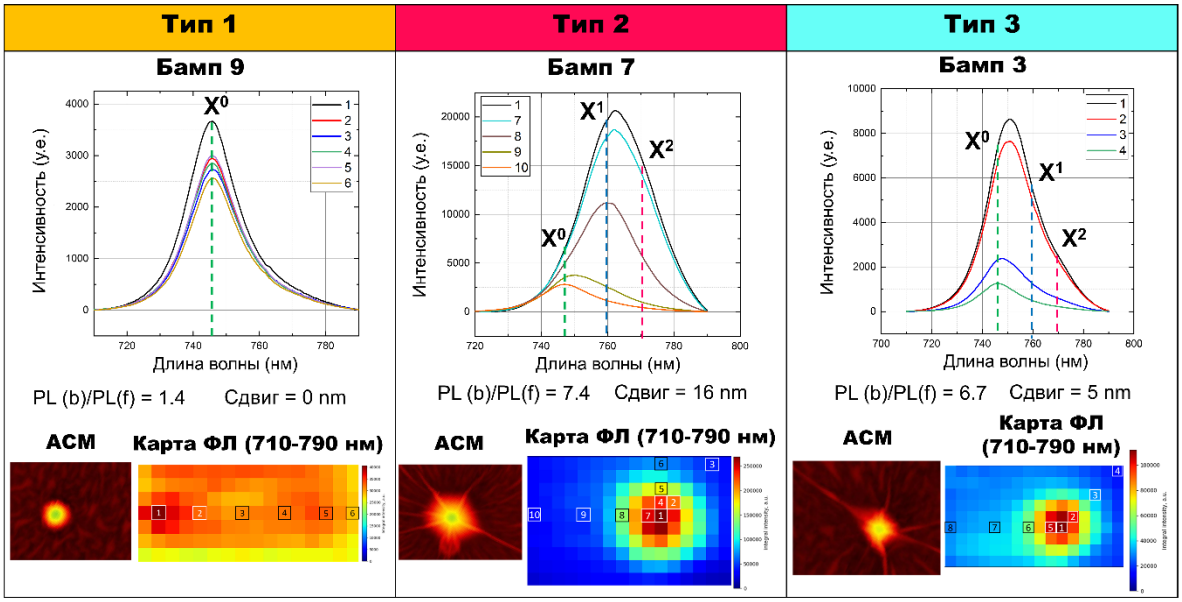


Рис. 1. Типы спектров ФЛ 1L-WSe_2, обозначенные точками на карте интегральной интенсивности, а также соответствующие им АСМ-изображения 1L-WSe_2 на Au-нанобампах

Заключение

Исследована гибридная система на основе монослоя WSe_2 на массиве Au-нанобампов, изготовленных методом фемтосекундной лазерной печати. Установлено, что геометрия профиля деформации монослоя определяет характер модуляции его фотолюминесценции. Обнаружены три типа спектрального поведения: спектр идентичный недеформированному монослою, уширенный спектр с длинноволновым сдвигом и уширенный спектр с плечом при 770 нм. Результаты открывают возможности управления оптическими свойствами гибридных структур для применений в оптоэлектронике, интегральной фотонике и сенсорике.

Благодарности

А.В.Н. выражает благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSRM-2026-0004) за поддержку в фабрикации образцов и анализе экспериментальных данных. А.Д.Б. благодарит Российский научный фонд (Грант 24-12-00225) за поддержку в проведении экспериментов.

Список литературы

[1] A. Kuznetsov, M. A. Anikina, A. N. Toksumakov, A. N. Abramov, V. V. Dremov, E. Zavyalova, ... A. D. Bolshakov. *Small Struct.*, **6**(4), 2400476 (2025).

[2] K. A. Sergeeva, D. V. Pavlov, A. A. Seredin, E. V. Mitsai, A. A. Sergeev, E. B. Modin, A. V. Sokolova, Tsz Chun Lau, K. V. Baryshnikova, M. I. Petrov, S. V. Kershaw, A. A. Kuchmizhak, Kam Sing Wong, A. L. Rogach. *Adv. Funct. Mater.*, **33**(33), 2307660 (2023).

Метод исследования границы раздела углеводородных смесей с помощью дифференциальных измерений

R.P. Klimenko[✉,1], **V.I. Danilova**[1], **D. S. Provodin**[2]

[1]The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, Russia;

[2]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia;

[✉]79213866205@yandex.ru

Abstract. Для повышения универсальности измерений разработана треугольная кювета с герметичной крышкой. Предложена методика на основе регистрации линейного смещения лазерного луча вместо классического измерения угла преломления. Эксперименты с углеводородными смесями и моторными маслами подтвердили адекватность подхода. Погрешность измерений составила ±0,0001, что удовлетворяет требованиям экспресс-контроля в топливной промышленности и экологическом мониторинге.

Keywords: гониометрические системы, треугольная кювета, показатель преломления, углеводородные смеси, граница раздела.

Introduction

Контроль жидких сред, особенно углеводородных, актуален в нефтегазовой отрасли, экологии и при разработке новых топлив [1]. Интерес представляют смеси (бензин с бензином или маслом), компоненты которых не реагируют химически, но могут расслаиваться [2]. Для изучения границ раздела необходимы методы с высокой точностью и возможностью длительных экспериментов без потери летучих компонентов. Традиционные рефрактометры и гониометрические системы часто негерметичны [3]. Предлагаются новая треугольная кювета с герметичной крышкой и методика, основанная на регистрации смещения лазерного луча.

Materials and Methods

Разработана экспериментальная установка (рис. 1). Ключевой элемент – треугольная кювета с прямым углом и герметичной крышкой, на грани кюветы располагается шкала объёма для контроля. Кювета перемещается по высоте для исследования слоёв при расслоении смеси.

В отличие от классических методов, измеряется не угол преломления, а линейное смещение ΔL оптической оси лазера фотодиодной линейкой (поз. 7). Это исключает калибровку поворотных устройств и повышает точность. Смещение ΔL связано с показателем преломления среды n_m через геометрические параметры кюветы (угол φ, толщина стенок) и расстояние до фотоприемника. Получено аналитическое выражение для n_m по ΔL. Использование перестраиваемого лазера позволяет исследовать дисперсию.

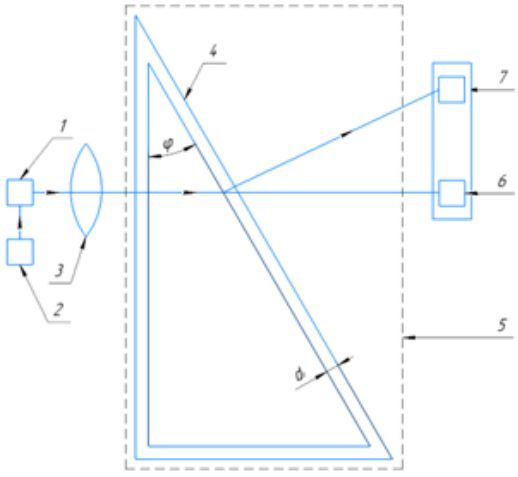


Рис 1 Конструкция экспериментальной установки:: 1 – источник лазерного излучения; 2 – система управления мощностью лазерного излучения блок питания лазера; 3 – коллиматорная линза; 4 – прямоугольная кювета; 5 – подъемное устройство; 6 – фотоприемник; 7 – измерительное устройство для перемещения фотоприемника

Для верификации измерены показатели преломления различных жидкостей и смесей, результаты сравнены с промышленным рефрактометром Abbemat WR/MW.

В табл. 1 представлены результаты для бензина АИ-92 с разным сроком годности при различных температурах. Совпадение значений в пределах погрешности ±0,0001 подтверждает достоверность метода.

Таблица 1. Показатели преломления бензина АИ-92 при различной температуре

T, K	АИ-92 (истекший срок)	АИ-92 (реальный срок)
283,1	1,4189 ± 0,0001	1,4241 ± 0,0001
295,2	1,4127 ± 0,0001	1,4177 ± 0,0001
311,1	1,4046 ± 0,0001	1,4096 ± 0,0001

Для моторного масла GENESIS ARM 5W-30 исследована температурная зависимость показателя преломления в диапазоне 283–313 К. Полученные значения совпали с эталонными в пределах погрешности (например, при 283 К: 1,4704; при 313 К: 1,4589), что дополнительно подтверждает работоспособность разработанной установки.

Results and Discussion

Разработанная конструкция герметичной треугольной кюветы и новый метод измерения показателя преломления по смещению лазерного луча позволяют проводить исследования летучих и токсичных углеводородных сред с высокой точностью ($\Delta n \leq 0{,}0001$). Метод пригоден для изучения границ раздела в смесях и определения концентраций компонентов. Дальнейшие работы будут направлены на автоматизацию измерений и расширение диапазона исследуемых сред.

REFERENCES

1. Davydov V. V., et al. New Method for State Express Control of Unstable Hydrocarbon Media and Its Mixtures // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 6. – P. 2529.

2. Stepanenkov G. V., Vakorina D. V., Reznikov B. K. A New Method of Express Control in Fuel Industry by Using Small-Sized Mobile Refractometer // Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon). – 2024. – P. 773–776.

3. Grebenikova N. M., et al. Features of optical signals processing for monitoring the state of the flowing liquid medium with a refractometer // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1368, No. 2. – P. 022057.

APPLICATION OF POLARIZATION-DEPENDENT PS CHAIN STRUCTURES IN BIODETECTION

Zhao Danni[1]✉, Sun Yali[2], Pavel Filatov[1], Dmitry Zuev[1]

1. School of Physics and Engineering, ITMO University, Saint Petersburg 197101, Russia;
2. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

✉danni.zhao@metalab.ifmo.ru

Abstract Hybrid nanostructures show great promise in biosensing due to their optical field manipulation and localization enhancement. This study systematically investigates the optical anisotropy and polarization-dependent near-field characteristics of one-dimensional polystyrene (PS) chain structures assembled on silicon substrates. Using finite-element simulations in the visible band (400–1000 nm), we demonstrate significant polarization-dependent scattering, localized field enhancement, and spectral shifts upon target binding. The results provide a theoretical basis for label-free, high-sensitivity biosensor chips based on printed PS chains.

Keywords: polarization-dependent, optical anisotropy, biosensing, localized field enhancement.

Introduction

Hybrid nanostructures, due to their superior performance in optical field manipulation and localization enhancement, show great promise for applications in biosensing and photodetection. Among them, one-dimensional chain structures assembled from dielectric nanoparticles, with their anisotropic optical response and structural designability, have become an important platform for studying light-matter interactions. Polystyrene (PS) nanoparticles, due to their low loss, ease of functionalization, and good biocompatibility, possess unique advantages in label-free optical sensing. This study systematically investigated their optical anisotropy and polarization-dependent near-field manipulation characteristics, such as their scattering properties in the visible light band, polarization-dependent optical response, and localization enhancement mechanism, providing a theoretical basis for the design of high-performance biosensor chips.

Materials and Methods

Numerical simulations based on the finite element method (FEM) were performed to systematically investigate the optical properties of a one-dimensional PS chain structure in the visible light band (400–1000 nm). The PS chain consists of spherical nanoparticles with a diameter of 270 nm arranged linearly on a silicon substrate. A plane wave with different incident polarizations (p-polarization and s-polarization) was used as the excitation source. The scattering spectra, near-field distributions, and changes upon binding of a target object were computed. The binding of the target was modelled as a homogeneous layer covering the PS chain, and the number of bound targets was varied to quantify the optical response.

Results and Discussion

Simulation results show that the optical response of the PS chain structure exhibits significant polarization dependence, with varying scattering intensities at the resonance peak under different incident polarizations. Under p-polarized excitation, a strong resonance peak is observed around 626 nm, whereas s-polarization gives a weaker response (figure 1 a)). Simulations of the electromagnetic field distribution further demonstrate the physical mechanism of localized field enhancement: the

electric field is strongly confined in the gaps between adjacent PS nanoparticles (figure 1 b)).

Further simulations of the optical response changes after the PS chain binds to a target object reveal that the binding of the target significantly alters the localized electromagnetic field distribution of the PS chain. The transfer of electric field energy leads to a detectable redshift and intensity change in the scattering spectrum. The color change of the PS chain from purple to bright orange is highly consistent with this (figure 1 b)). Furthermore, the simulations reveal that variations in the number of target objects bound to the PS chain cause changes in the scattering intensity at the resonance peak, providing a theoretical basis for the quantitative detection of viruses. Specifically, at 439 nm and 626 nm, a quantitative optical response relationship related to the target quantity is established.

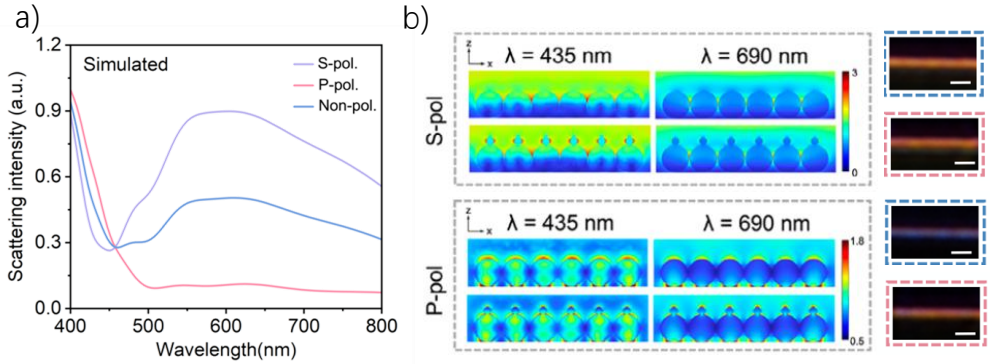


Figure 1. a) Scattering spectrum of PS chain under S-, P-, Non- polarization respectively. b) Comparison of near-field distributions of the PS nanochains before and after binding silica nanoparticles at different polarized incidence.

Conclusion

This study systematically reveals the optical anisotropy and polarization-dependent local field enhancement mechanism of one-dimensional PS chain structures on silicon substrates. Simulation results accurately reproduce the experimentally observed scattering spectral characteristics and colour variation patterns, verifying the high-sensitivity optical response of the PS chain structure to target binding. The study shows that by optimizing the PS chain particle size (270 nm) and the incident light polarization state (p-polarization), a significant local field enhancement effect can be achieved. This research provides systematic theoretical support for the design of label-free biosensor chips based on printed PS chain structures, which have broad application prospects in the rapid and highly sensitive detection of pathogens such as respiratory viruses.

Acknowledgments

This work was supported by Russian Science Foundation (25-25-00982).

List of sources used

1. Yang Y, Zhang Z, Sun Y, et al. A Printed Polarization-Sensitive Biochip for Rapid and Accurate Detection of Respiratory Infections[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(43): 2505794.
2. V. G. Panferov, N. A. Ivanov, T. Mazzulli, D. Brinc, V. Kulasingam, S. N. Krylov, Electrophoresis-Assisted Multilayer Assembly of Nanoparticles for Sensitive Lateral Flow Immunoassay. Angew. Chem. Int. Ed. 2023, 62, e202215548.
3. Z. Zhang, M. Zhao, M. Su, Y. Sun, E. Ponkratova, S.-J. Tan, Q. Pan, B. Chen, Z. Li, Z. Cai, H. Wang, D. Wu, L. Shi, Y. Song, Self-Assembled 1D Nanostructures for Direct Nanoscale Detection and Biosensing. Matter 2022, 5, 1865-1876.

Экспериментальное исследование технологического процесса изготовления дифракционных фильтров для реализации оптической обработки информации

Д. Р. Иванчук [1✉], **А. Ю. Иванчук** [1], **С. А. Фомченков** [1,2], **А. И. Цибикина** [1]
[1] Samara National Research University, Samara, Russia;
[2] Department «ISOI – Samara» of the Kurchatov Institute, Samara, Russia
✉danila.ivanchuk@yandex.ru

Аннотация. В работе показано моделирование и расчёт дифракционных оптических элементов (ДОЭ) для реализации оптической обработки информации. Предложены технологические процессы по изготовлению ДОЭ. Исследованы режимы и технология создания элементов, оптимизированы параметры. Изучены изготовленные элементы.

Ключевые слова: матричные вычисления, распознавание образов, магнетронное напыление, плазмохимическое травление, фотолитография, 4F система.

Введение

Популярной на сегодняшний день задачей в научной среде является увеличение вычислительной мощности систем и рост скорости выполнения тех или иных расчетов. Одно из основных направлений, в котором идет работа: разработка оптических логических и вычислительных элементов. Данная тема активно используется в пространственных преобразованиях оптических сигналов, а именно в пространственном интегрировании и дифференцировании.

Материалы и методы

В качестве метода кодирования ДОЭ был выбран метод кодирования с использованием локального скачка фазы.

В ходе экспериментальной работы были изготовлены два ДОЭ, предназначенные для дифференцирования изображения и распознавания объектов, с помощью магнетронного напыления с последующим плазмохимическим травлением (ПХТ) и фотолитографии с прямой лазерной записью.

Технологический процесс изготовления ДОЭ для дифференцирования изображения состоял из трёх основных этапов: напыление, запись, травление. Напыление хрома производилось на установке вакуумного магнетронного напыления EPOS PVD. С целью создания маски для травления в плёнке хрома, использовалась станция лазерной записи CLWS 200, которая предназначена для записи микрорельефа с помощью сфокусированного лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Рассчитанная маска для записи имела разрешение 8192 × 8192 пикселей. Затем следовал процесс ПХТ. Глубина травления составила 600 нм и отличается от рассчитанной 590 нм менее чем на 2 %.

Для решения задачи распознавания объектов в работе был рассчитан и изготовлен ДОЭ в плёнке фоторезиста. Запись элемента осуществлялась УФ-лазером с длиной волны 405 нм. Толщина элемента контролировалась с помощью профилометра KLA Alpha-step D-500. Высота микрорельефа изготовленного ДОЭ составила 480 нм и отличается от рассчитанной 430 нм на 6%. Для экспонирования фоторезиста была использована станция круговой лазерной записи CLWS 200. При генерации машинного файла записи размером 8192 × 8192 пикселей использовалось 256 уровней градаций микрорельефа. Данный подход позволяет аппроксимировать непрерывный фазовый микрорельеф многоступенчатыми структурами. Далее, после прямой лазерной записи, на поверхности подложки была сформирована структура ДОЭ.

Результаты и обсуждение

ДОЭ были экспериментально исследованы. Использовался лазер с длиной волны 532нм и мощностью 1 Вт. В ходе эксперимента были получены результаты, представленные на рис. 1.

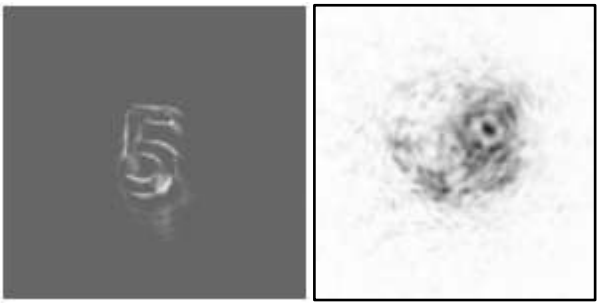


Рис. 1. Результат работы ДОЭ, выполняющий дифференцирование по оси X (слева), результат работы ДОЭ для распознавания образов (справа)

Как видно по полученным результатам, ДОЭ, изготовленные предложенными методами, исправно выполняют свою функцию. Конечно, имеются погрешности в работе, но для первого и второго случаев отчетливо видны контур фигуры и корреляционный пик.

Список литературы

[1] Мисиевич С.К., Скиданов Р.В. // Разработка итеративного алгоритма расчета фазовой функции для пространственного модулятора света.

[2] Волков А.В., Головашкин Д.Л., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Котляр В.В., Павельев В.С., Скиданов Р.В., Сойфер В.А., Соловьев В.С., Успленьев Г.В., Харитонов С.И., Хонина С.Н. // Методы Компьютерной оптики // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

Численное моделирование и анализ модовых характеристик субволновых щелевых волноводов на основе нитевидных нанокристаллов GaP

М. А. Аникина [1,2]✉, **Д. В. Грудинин** [1], **А. Д. Большаков** [1,2]

[1] МФТИ, Физтех, Долгопрудный, Россия;

[2] СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия

✉ mari.a.nikina@yandex.ru

Аннотация. Исследованы щелевые волноводы на основе нитевидных нанокристаллов GaP для локализации света в видимом диапазоне. Численным моделированием выявлены две основные моды – волноводная TM и щелевая TE. Последняя обеспечивает усиленную концентрацию поля в зазоре. Показано, что уменьшение зазора приводит к экспоненциальному росту локализации и субдифракционному сжатию света при низких потерях (~0,1 дБ/см). Установлено влияние геометрических параметров и длины волны на характеристики мод. Результаты подтверждают перспективность изученной структуры для интегральной фотоники и сенсорных приложений.

Ключевые слова: щелевые волноводы, нитевидные нанокристаллы GaP, нанофотоника

Введение

Щелевые волноводы представляют собой диэлектрические структуры с высоким показателем преломления, разделённые узкой областью с низким показателем. Благодаря граничным условиям для электрического поля происходит его усиленная локализация в щели, что обеспечивает высокую пространственную локализацию и слабую зависимость от длины волны [1]. Такие структуры находят применение в нанофотонике, сенсорике и интегральной оптике [2, 3]. Наиболее широко щелевые волноводы реализуются на кремниевой платформе, а также исследуются в других высококонтрастных системах [4]. Однако кремний имеет ограничения, связанные с оптическими потерями в видимом диапазоне. Нитевидные нанокристаллы (ННК) фосфида галлия (GaP) представляют собой перспективную материальную платформу благодаря гибкости, высокому показателю преломления и широкому окну прозрачности в видимой области [5], что делает их привлекательными для создания субволновых щелевых волноводов с улучшенными характеристиками локализации и усиления поля.

Материалы и методы

Численное моделирование структуры проводилось с использованием программных пакетов COMSOL Multiphysics и MATLAB, связанных посредством LiveLink. Рассматриваемая модель представляла собой систему из двух параллельных ННК GaP с гексагональным поперечным сечением, расположенных на подложке SiO_2 и разделённых зазором. Расчёт оптических мод проводился с использованием метода конечных элементов в частотной области. На границах расчётной области использовались идеально согласованные слои (PML). С помощью MATLAB осуществлялась автоматизация параметрических расчётов и последующая обработка результатов. Были рассчитаны зависимости эффективного показателя преломления n_{eff}, фактора локализации Г, эффективной площади моды A_{eff} и оптических потерь от диаметра ННК d (140–180 нм), величины зазора g (0–50 нм) между ними и длины волны λ (700–900 нм).

1. Результаты и обсуждение

Проведён модовый анализ структуры из двух ННК GaP. В силу субволновых поперечных размеров реализуется квазиодномодовый режим с основной TM модой. Работа вблизи области отсечки приводит к делокализации поля и ослаблению взаимодействия между волноводами. Несмотря на существование чётной и нечётной супермод, малая разность их постоянных распространения соответствует большой длине связи, вследствие чего эффективный перенос мощности в режиме оптической связи слабо выражен. Наряду с

основной ТМ-модой в системе существуют щелевая ТЕ-мода, вклад остальных мод оказывается пренебрежимо малым по сравнению с ними.

Исследованы зависимости эффективного показателя преломления и потерь от диаметра ННК d, зазора g и длины волны λ. Показано, что отсечка щелевой моды происходит при больших длинах волн, однако её потери возрастают быстрее по сравнению с волноводной модой. Увеличение диаметра приводит к усилению локализации поля, росту эффективного показателя и снижению потерь, при этом плотность мощности щелевой моды сначала растёт из-за уменьшения потерь, а затем падает из-за улучшения локализации поля в волноводе. Щелевая мода обеспечивает более эффективную пространственную локализацию поля: плотность мощности в щели кратно выше, чем в волноводе. При этом достигается субдифракционная локализация, а её эффективность экспоненциально зависит от зазора между ННК. Потери на распространение для ТМ- и ТЕ-мод составляют порядка 0,1 дБ/см. Увеличение зазора увеличивает потери щелевой моды, тогда как изменение диаметра влияет на потери обеих мод.

Заключение

В работе показано, что щелевые волноводы на основе нитевидных нанокристаллов GaP являются эффективной платформой для реализации субволновой локализации оптического поля в видимом диапазоне. Численное моделирование выявило существование двух определяющих мод — основной ТМ и щелевой ТЕ, характеристики которых существенно зависят от геометрических параметров структуры. Анализ полученных результатов подтверждают перспективность использования ННК GaP для создания компактных интегральных фотонных устройств с высокой степенью локализации и низкими потерями, что открывает возможности их применения в нанофотонике, сенсорике и задачах усиления взаимодействия света с веществом.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSRM-2026-0004 и проект FSMG-2025-0005) и Российского научного фонда (грант № 25-12-00135).

Список литературы

[1] V.R. Almeida, Q. Xu, C.A. Barrios, M. and Lipson, Optics letters, **29**(11), 1209-1211 (2004).
[2] H.D. Yallew, M. Vlk, A. Datta, S. Alberti, R.A. Zakoldaev, J. Høvik, A. Aksnes, and J. Jagerska, ACS photonics, **10**(12), 4282-4289 (2023).
[3] J. Lim, J. Shim, D.M. Geum, and S. Kim, IEEE Photonics Journal, **14**(3), 1-9 (2022).
[4] N. Katash, S. Khateeb, and D. Malka, Micromachines, **13**(10), 1680 (2022).
[5] A. Kuznetsov, E. Moiseev, A.N. Abramov, N. Fominykh, V.A. Sharov, V.M. Kondratev, I.I. Shishkin, K.P. Kotlyar, D.A. Kirilenko, V.V. Fedorov, S.A. Kadinskaya, A.A. Vorobyev, I.S. Mukhin, A.V. Arsenin, V.S. Volkov, V.Kravtsov, and A.D. Bolshakov, Small, **19**(28), 2301660 (2023).

Экономически эффективная техника корпусирования ретинальных зрительных имплантов

М.М. Гагарина ✉, **А.А. Абелит, Н.А. Бойцова, Д.Д. Ступин**
[1] *СПбАУ РАН, Санкт-Петербург, Россия*
✉ antaryo@gmail.com

Аннотация. Настоящий доклад посвящен разработке внешнего механического оснащения для зрительных имплантов, имеющих как внутриглазные, так и внеглазные модули. Предлагаемая техника корпусирования таких приборов состоит в использовании напечатанных на 3D-принтере форм-отливок, с помощью которых из силикона создается модифицированная циркляжная лента, удерживающая имплант на склере и скрывающая его внешние модули от контакта с окружающими тканями. Поскольку используемые при этом материалы обладают низкой стоимостью, применение созданной нами технологии позволит удешевить производство зрительных протезов и сделает их более доступными для слепых пациентов.

Ключевые слова: имплант, сетчатка, силикон

Введение

Среди основных причин слепоты и слабовидения выделяются дегенеративные заболевания сетчатки, такие как пигментный ретинит и возрастная макулярная дегенерация [1]. Для этих патологий характерно постепенное разрушение фоторецепторов при частичном сохранении жизнеспособности остальных клеток сетчатки, что открывает возможность восстановления утраченного зрения с помощью их электрической стимуляции. Для этой цели используется так называемые зрительные протезы, представляющие собой массив из стимулирующих микроэлектродов, соединенных с электронным оснащением, которое непосредственно управляет стимуляцией. Среди существующих зрительных протезов распространена практика изготовления микроэлектродов на гибком плоском транссклеральном шлейфе, который соединяет его с упомянутым блоком внешней электроники [1]. В то же время такой прибор должен быть надежно закреплен на склере, для чего применяются специальные эластичные механические фиксаторы. Поскольку высокая стоимость зрительных протезов до сих пор ограничивает их применение в практической офтальмологии [2] в данной работе мы предлагаем экономических эффективную технику прототипирования таких фиксаторов, которые могут быть использованы для корпусирования гибких ретинальных имплантов.

Материалы и методы

Литьевые формы для изготовления модифицированной циркляжной ленты-фиксатора из силикона 40 SilcoPlat (Shenxhen YiJiasan Silicone Co., Itd, Китай) были смоделированы в программе Blender 4.5 и напечатаны из PETG пластика (Guangzhou Zhiwen Technology, Китай) на 3D принтере FlyingBear S1 (Zhejiang FlyingBear 3D Technology Co., Ltd, Китай). Полученная таким образом механическая система состояла из полоски 4 мм×70 мм×500 мкм (размеры адаптированы для глаза кролика), в середине которой располагался двойной карман для установки гибкого импланта и для защиты его внешних контактных площадок. Для изготовления такого кармана сначала форма заливалась жидким силиконом, после на нее устанавливался фантом зрительного импланта (полиимидная лента не содержащая электродов, но повторяющая форму импланта), затем после отверждения силикона (около 8 часов) поверх фантома устанавливалась небольшая вставка из плотного полиэтилена, которая также покрывалась поверх тонким слоем силикона. После застывания силикона, вставка удалялась, формируя карман для контактных площадок, а место сгиба также покрывалось жидким силиконом, скрывая острые углы. Фантом импланта был разработан с использованием нашего оригинального программного обеспечения PiPer4 (доступно по запросу) и изготавливался из полиимидной пленки с помощью лазерного гравера Creality Falcon 2 Pro (60 Вт, 15% мощности, скорость сканирования 10 мм/с). Для фиксации импланта на склере так же из

силикона с помощью отливки в напечатанных литьевых формах изготавливались специальные колечки-стяжки, предназначенные для соединения концов циркляжной ленты.

Результаты и обсуждение

Полученный образец скорпусированного прототипа зрительного протеза приведен на Рис. 1. Как видно из данных фотографий, предлагаемая техника позволяет успешно корпусировать зрительные протезы на основе полиимидной пленки, а благодаря применению в ней современных дешевых и легкодоступных материалов возможно легкое масштабирование создаваемых приборов под анатомические особенности пациента.

Рис. 1. Образец фантома зрительного импланта, корпусированный в силикон.

Заключение

Разработанная нами технология корпусирования ретинальных имплантов, основанная на применении доступных расходных материалов и оптимизированном технологическом процессе, позволяет многократно снизить себестоимость производства зрительных протезов, что в свою очередь, делает их экономически доступными для широкого круга пациентов с дегенеративными заболеваниями сетчатки. Снижение финансового барьера не только открывает реальную перспективу возвращения способности видеть слепым людям, но и способствует значительному повышению интенсивности исследований в области искусственного зрения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Гагарину А.Г., Лихачёву А.И. и Дубине М.В. за всестороннюю помощь и поддержку. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации (FSRM-2024-0001).

Список литературы

[1] Нероев В.В., Астахов Ю.С., Лобанова М.М., Ступин Д.Д., Верлов Н.А., Рязанцев М.Н., Зайцева О.В., Богданов А.А., Васильев В.Н., Дубина М.В. Искусственное зрение: успехи, проблемы, перспективы (обзор) // Российский офтальмологический журнал, 11(1), 3-27 (2018)

[2] O.C. Van Stuijvenberg, A.L. Bredenoord, M.L. Broekman,K.R. Jongsma. AJOB Neurosci.,13 (4), 233 (2022). DOI: 10.1080/21507740.2022.2126545

Электроды на основе медно-оловянных композитов как экономически эффективная замена золотым биоэлектродам

Н.А. Бойцова [1 ✉], **А.А. Абелит** [1], **Котляр К.П.**[1] **и Д.Д. Ступин** [1]
[1] СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия;
[✉] natab2002@yandex.ru

Аннотация. Сегодня дальнейший прогресс в биоэлектронике значительно ограничен высокой стоимостью биоэлектронных технологий. В данном исследовании мы представляем новый метод создания биосовместимых электродов из олова — недорогого металла, который может заменить дорогостоящие классические материалы для биоэлектродов. Используя электрохимические методы осаждения олова на медь, мы продемонстрировали, что биосовместимость таких медно-оловянных электродов для клеток HeLa близка к биосовместимости золота и стекла, а также что адгезия клеток HeLa к оловянным электродам аналогична адгезии к стеклу. Учитывая существенную разницу в цене между оловом, медью и золотом, мы можем заключить, что медно-оловянные композиты могут быть использованы для создания новых высококачественных биоэлектронных устройств, обладающих более низкой стоимостью, чем их современные аналоги.

Ключевые слова: биоэлектроды, медь, композитные материалы, биосовместимость, HeLa

Введение

Сегодня создание биоэлектронных устройств является перспективным научно-техническим направлением, представляющим большой интерес для таких биотехнологических приложений, как биосенсорная инженерия, восстановление потерянного зрения и слуха, биомедицинская тераностика и т.д. [1]. Однако, несмотря на уже достигнутый значительный прогресс в области биоэлектронных технологий, их дальнейшее развитие и распространение лимитируется высокой стоимостью производства приборов на их основе, которая не последнюю очередь возникает из-за необходимости использования биосовместимых, но дорогих и сложных в обработке материалов устройстве биоэлектронных систем. В частности, для изготовления т.н. биоэлектродов – интерфейсов между электроникой и живой материй – как правило используется золото. В данной работе мы предлагаем альтернативный и более экономически эффективный композитный материал для создания биоэлектродов, который представляет собой медь, поверхность которой покрыта слоем электрохимически осажденного олова. Такой подход не только снижает стоимость изготовления биоэлектродов, но и позволяет использовать для данной цели высокоразвитый набор методов обработки меди, включая методы прямой литографии. В то же время оловянное покрытие нивелируют цитотоксические свойства меди, что продемонстрировано в последующих разделах.

Материалы и методы

Для исследования биосовместимости медно-оловянных электродов использовались клетки HeLa, которые культивировались на медно-оловянных, медных, золотых и стеклянных подложках. После инкубации в течение 24 и 72 часов мы оценивали цитотоксичность образцов следующим образом. Клетки окрашивались красителями Hoechst (ThermoFisher, США, визуализация ядер всех клеток) и иодистым пропидием (ThermoFisher, США, визуализация ядер мертвых клеток). Поскольку мертвые клетки HeLa теряют свои адгезивные свойства и смываются в процессе окрашивания, в качестве оценки цитотоксичности было выбрано количество живых клеток на единицу площади по отношению к количеству живых клеток на стеклянной подложке. Для полуавтоматического подсчета клеток был написан скрипт на языке MatLab, который распознает ядра клеток по уровню их свечения, а также по площади, которую они занимают (иными словами, наша программа способна автоматически находить находить

одиночные клетки и сообщать пользователю о наличии на флуоресцентных фотографиях кластеров из плохо различимых клеток).

Результаты и обсуждение

Результаты исследования жизнеспособности клеток HeLa для разных образцов приведены на Рис. 1., из панели (а) которого видно, во-первых, что оловянное покрытие значительно подавляет цитотоксичность медной основы, а во-вторых, что выживаемость клеток на олове и золоте сопоставима с выживаемостью клеток на стекле (контроле). На панелях (б), (в) и (г) приведены результаты исследования адгезии клеток к олову, золотоу и стеклу, соответственно. Здесь зеленый канал соответствует флуоресценции красителя ABDS [3], а синий – флуоресценции красителя Hoechst (Sigma Aldrich, США). Видно, что клетки одинаково хорошо прикрепляются ко всем трем поверхностям, что также подтверждает перспективность применения медно-оловянных композитов для замены дорогих золотых биоэлектродов.

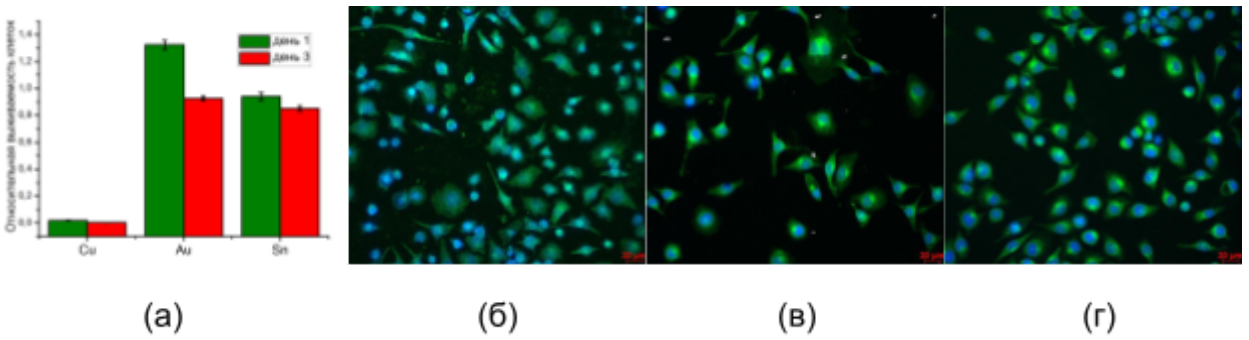


Рис. 1. Демонстрация биосовместимости медно-оловянных электродов.(а) Относительная выживаемость клеток на первый и третий дни инкубации, (б) фотографии клеток HeLa на на оловянном электроде (б), на золотом образце (в) и на стекле (г, контрольный образец).

Заключение

Таким образом, в данной работе нами было продемонстрировано, что благодаря высокой биосовместимости дешевые медно-оловянные композиты могут с успехом применяться для изготовления биоэлектродов вместо дорогостоящего золота. Мы надеемся, что внедрение предложенной нами технологии значительно расширит сферу применения биоэлектроники в биологических лабораториях и откроет путь к созданию новых проблемно-ориентированных цитосенсоров для широкого спектра применений, включая изучение индивидуальных реакций пациентов на различные фармацевтические препараты, косметику и пищевые продукты.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Лихачеву А.И. и Дубине М.В. за всестороннюю помощь и поддержку. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадания FSRM-2024-0001 и FSRM-2026-0027).

Список литературы

[1] Stupin, Daniil D., Ekaterina A. Kuzina, Anna A. Abelit, Anton K. Emelyanov, Dmitrii M. Nikolaev, Mikhail N. Ryazantsev, Sergei V. Koniakhin, and Michael V. Dubina. ACS Biomaterials Science & Engineering 7, no. 6 (2021): 1962-1986.

[2] O.C. Van Stuijvenberg, A.L. Bredenoord, M.L. Broekman,K.R. Jongsma. AJOB Neurosci.,13 (4), 233 (2022). DOI: 10.1080/21507740.2022.2126545

[3] Abelit, Anna A., Natalia A. Boitsova, Liudmila E. Yakovleva, Anton A. Kornev, and Daniil D. Stupin. bioRxiv (2025): 2025-04.

Визуализация цитоплазматической мембраны клеток HeLa с помощью красителя ABDS и методов искусственного интеллекта

А.А. Абелит,✉ Н.А. Бойцова и Д.Д. Ступин
СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия;
✉anna.abelit@gmail.com

Аннотация. Настоящая работа посвящена технике визуализации цитоплазматических мембран клеток HeLa с помощью комбинированного использования технологий машинного зрения и бюджетного красителя “ABDS” на основе чернил красного перманентного маркера. Представленная методика производит *in silico* обработку флуоресцентных фотографий, полученных с помощью ABDS, и подавляет в них сигналы от эндоплазматического ретикулума и клеточного ядра, в результате чего формируются изображения цитоплазматических мембран, которые по качеству сопоставимы с их изображениями, получаемыми с помощью коммерческого мембранного красителя Deep Red Cell Mask. Таким образом, результаты данной работы могут использованы как для создания новых методов визуализации данных в биологии, так и для снижения расходов на проведение биомедицинских экспериментов.

Ключевые слова: Клеточная мембрана, ABDS, машинное зрение, искусственный интеллект

Введение

На сегодняшний день использование флуоресцентных красителей является одним из ключевых методов исследования в биологии и медицине [1, 2]. В частности, с их помощью сегодня активно изучается морфология клеток, проводится тестирование различных фармакологических препаратов и визуализируются сложные внутриклеточные процессы [2]. Однако, несмотря на большое разнообразие представленных на рынке флуоресцентных красителей, адаптированных под различные задачи, большинство коммерчески доступных красителей обладают двумя существенными недостатками – высокой стоимостью и специфическими условиями хранения. Ранее мы предложили использовать для прижизненной визуализации клеток экономически эффективный краситель ABDS на основе чернил красного перманентного маркера Edding E-140S (edding International GmbH, Япония), который с высокой вероятностью состоит из Rhodamine 6G и который данных недостатков лишен. В ходе проведения экспериментов с ABDS и Rhodamine 6G мы также обнаружили, что данные красители визуализируют не только эндоплазматический ретикулум (что на сегодняшний день хорошо известно [3]), но и клеточную мембрану. И поскольку для задач цитологии крайне важно обладать инструментами для специфического окрашивания клеток, в настоящей работе мы создали метод *in silico* постобработки ABDS/Rhodamine 6G фотографий клеток с помощью искусственных нейронных сетей, который позволяет выделять из исходного ABDS/Rhodamine 6G изображения только сигнал, соответствующий свечению цитоплазматической мембраны.

Материалы и методы

В данной работе мы использовали технологию окрашивания клеток HeLa с помощью ABDS, приведенную в [1]. В качестве контрольного мембранного красителя использовался Deep Red Cell Mask (Thermofisher Scientific, США). Фотографии клеток были получены с помощью флуоресцентного конфокального микроскопа Zeiss ObserverZ.1 (Zeiss, Германия). Для выделения сигнала с мембраны применялась сверточная нейросеть, обученная в пакете Matlab в инструментарии Deep Learning ToolBox.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты представлены на Рис. 1. На приведенных фотографиях отчетливо видно, что сигнал от цитоплазматической мембраны, выделенный с помощью сверточных нейросетей из ABDS-изображения клетки HeLa, пространственно перекрывается с Deep Red-изображением цитоплазматической мембраны. Следовательно, во-первых, в сигнале

ABDS присутствует изображение клеточной мембраны в явном виде, а во-вторых, оно может быть отделено от сигнала эндоплазматического ретикулума и ядра с помощью сверточных нейросетей.

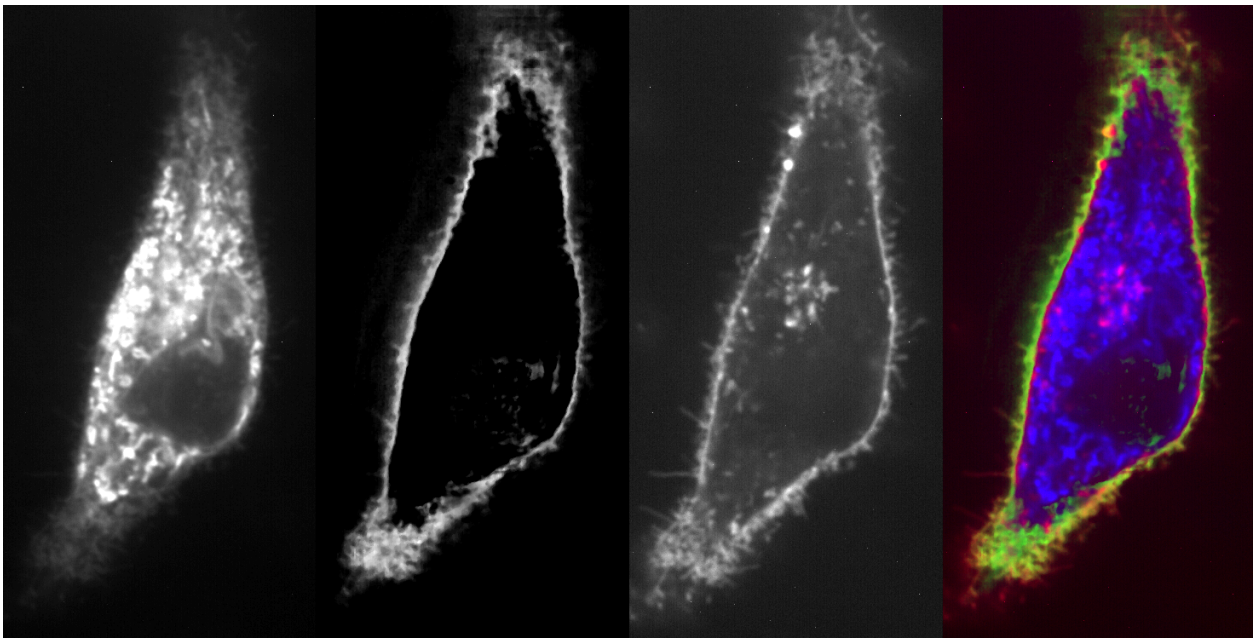


Рис. 1. Результат выделения сигнала от мембраны из изображения, полученного с помощью красителя ABDS (Rhodamine 6G). Слева направо: исходная фотография клетки HeLa, окрашенной ABDS; сигнал от мембраны, выделенный из этой фотографии с помощью обработки сверточными нейросетями; фотография клетки, окрашенной мембранным красителем Deep Red CellMask; наложение этих изображений (красным обозначен сигнал от Deep Red CellMask, синим – от исходного ABDS-изображения, зеленым – выделенный нейросетями сигнал от мембраны).

Заключение

Таким образом, в данной работе мы предложили и успешно апробировали метод визуализации цитоплазматической мембраны с помощью красителя ABDS и последующей постобработки его флуоресценции сверточными нейросетями. Полученные изображения обладают микронной детализацией и не уступают по качеству дорогостоящим мембранным красителям. Мы надеемся, что предложенная нами технология позволит существенно упростить исследование процессов, происходящих в эукариотических клетках, удешевит тестирование различных медицинских препаратов, например противоопухолевых и ранозаживляющих средств, а также найдет применение в устройстве экономически эффективных биосенсоров, в частности в биоэлектронных приборах.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Блиновой М.И. и Дубине М.В. за всестороннюю помощь и поддержку. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадания FSRM-2024-0001 и FSRM-2026-0027).

Список литературы

[1] A. A. Abelit, N. A. Boitsova, L. E. Yakovleva, A. A. Kornev, D. D. Stupin. 2025, bioRxiv.

[2] C. Foglieni, C. Meoni, A. M. Davalli. Histochemistry and cell biology. – 2001. – T. 115. – C. 223-229.

[3] R. Köchl, M. Alken, C. Rutz, G. Krause, A. Oksche, W. Rosenthal, R. Schülein, Journal of Biological Chemistry 277 (2002) 16131–16138.

Метод оценки тромбообразования нанокомпозитных покрытий в динамических условиях модельных жидкостей

К. Д. Ефремова [1,2]✉, **П. В. Гасаров**[1]

[1] Институт биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники, Москва, Зеленоград, Россия;

[2] ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия

✉kristal_p@mail.ru, popovich_k@staff.sechenov.ru

Аннотация. В работе представлена микрофлюидная платформа для доклинического тестирования гемосовместимости нанокомпозитных покрытий на основе углеродных нанотрубок в контролируемых гидродинамических условиях. Методом вычислительной гидродинамики выполнено моделирование течения фосфатно-буферного раствора и 4% раствора бычьего сывороточного альбумина. Определены оптимальные высоты микроканала, обеспечивающие генерацию напряжений сдвига 150, 100 и 50 Па. Разработана конструкция платформы, обеспечивающая герметичный контакт исследуемых образцов покрытий к потоку модельных жидкостей.

Ключевые слова: гемосовместимость, напряжение сдвига, композитные покрытия.

Введение

Современное развитие биомедицинской инженерии требует создания прецизионных инструментов для оценки взаимодействия имплантируемых материалов с кровью. Микрофлюидные системы позволяют моделировать физиологические потоки с высоким контролем гидродинамических параметров и минимальным расходом реагентов [1]. Ключевым фактором, определяющим тромбогенность покрытий, является напряжение сдвига на стенке (WSS), которое в кровеносной системе может достигать значений, индуцирующих деформацию и гемолиз эритроцитов. Статические методы тестирования, регламентируемые стандартом ГОСТ ИСО 10993, не учитывают влияние потока, что приводит к занижению адгезии тромбоцитов и активации свертывания [2]. Динамические системы, напротив, позволяют воспроизводить режим потока с заданными WSS, приближая условия эксперимента к in vivo.

Материалы и методы

Для достижения целевых значений WSS (50, 100 и 150 Па) проведено CFD-моделирование в ANSYS. Рассматривались две модельные жидкости: фосфатно-буферный солевой раствор (ФБС, pH 7,4) и раствор бычьего сывороточного альбумина (БСА, 4 масс.%), имитирующий белковый состав плазмы. Вязкость и плотность жидкостей измерены экспериментально при 37°C. Геометрия микроканала варьировалась по высоте (Рис. 1), на входе задавался объемный расход.

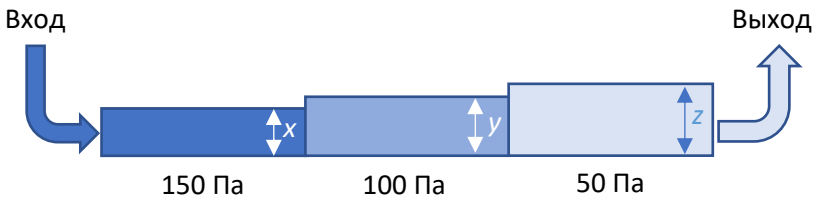


Рис. 1. Схема геометрии микроканала при 150, 100, 50 Па, где x, y, z – высоты секций микроканала

Решались уравнения Навье-Стокса для ламинарного течения с контролем сходимости. Параметр Y+ использовался для оценки качества пристеночной сетки. На основе расчетов методом мягкой литографии из полидиметилсилоксана изготовлены пластины с микроканалами высотой 120, 148 и 208 мкм. Корпус платформы выполнен методом FDM-печати.

1. Результаты и обсуждение

Для PBS при постоянном расходе 21 мл/мин получены следующие значения WSS (Табл. 1): при высоте канала 120 мкм — 153,28 Па, при 148 мкм — 101,27 Па, при 208 мкм — 51,63 Па. Для раствора БСА расход снижен до 17,5 мл/мин, что компенсирует повышенную вязкость. При этом WSS составило 149,74 Па, 98,99 Па и 50,56 Па для тех же высот. Значения Y+ не превышали 0,54, что подтверждает корректное разрешение пограничного слоя. Разработанная платформа обеспечивает герметичность проточной части, быструю смену образцов покрытий на титановых подложках и совместимость с периферийным насосным оборудованием.

Таблица 1

Результаты моделирования напряжения сдвига в микроканале с фосфатно-буферным раствором и раствором бычьего сывороточного альбумина

		x	y	z
ФБС	h, мкм	120	148	208
	WSS, Па	153,28	101,27	51,63
	Y+	0,54	0,43	0,31
БСА	h, мкм	120	148	208
	WSS, Па	149,74	98,99	50,56
	Y+	0,44	0,36	0,26

Заключение

Создана микрофлюидная платформа, позволяющая генерировать напряжения сдвига в диапазоне 50–150 Па, соответствующие сублетальным повреждениям и гемолизу эритроцитов. Установлены оптимальные высоты микроканала (120, 148 и 208 мкм) и режимы расхода для PBS и раствора БСА. Платформа пригодна для доклинических испытаний гемосовместимых композитных покрытий медицинских изделий, в частности, углеродных покрытий, контактирующих с кровью, в условиях, приближенных к физиологическим.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Центр лазерных технологий в медицине» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-669 от 05 августа 2025 г.)

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (Проект FSMR-2024-0003).

Список литературы

[1] K. D. Popovich, S. A. Vagner, D. T. Murashko, G. N. Ten, D. I. Ryabkin, et al. Stability and Thrombogenicity Analysis of Collagen/Carbon Nanotube Nanocomposite Coatings Using a Reversible Microfluidic Device. Membranes, **13**(4), 40 (2023).

[2] A. S. Hönicke et al. Dynamic blood compatibility assessment of coronary stents using an innovative pneumatic blood pump to generate physiological flow rates in small sample chambers. Journal of Materials Science: Materials in Medicine. **36**(1), 38 (2025).

Биоинтегрируемые тензочувствительные конструкции: влияние сенсорной архитектуры на функциональные свойства

А. С. Морозова [1✉], **А. Ю. Герасименко** [1,2]

[1] National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, Russia;

[2] I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

✉nastya-morozova-2002@list.ru

Аннотация. Разработка гибких биосовместимых конструкций с высокой чувствительностью к деформации является актуальной задачей в рамках развития персонализированной медицины. В данной работе предложена лазерная технология формирования сенсорных архитектур на основе тонкоплёночных композитов многостенных углеродных нанотрубок и силикона. Стабильность электрических характеристик продемонстрирована в течение 15000 циклов нагружения. Биосовместимость конструкций исследована с помощью клеток фибробластов эмбриона человека.

Ключевые слова: пьезорезистивность, тонкие плёнки, многостенные углеродные нанотрубки, лазерная литография.

Введение

Гибкие тензочувствительные конструкции на основе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) и полимеров, интегрируемые в биологические системы, способны отслеживать движения конечностей и органов человека с большей точностью и эффективностью по сравнению с металлическими или полупроводниковыми сенсорами. Углеродные наноматериалы (УНМ) являются одними из наиболее востребованных наполнителей за счёт своих уникальных свойств: высокой электропроводности и прочности, повторяемости при циклических нагрузках, а также выраженного пьезорезистивного эффекта [1]. Изменение сопротивления под действием деформации обеспечивается как самими свойствами УНМ за счёт изменения геометрии гексагональной решётки, так и благодаря туннельному эффекту [2]. Задача разработки гибких углеродных конструкций сопряжена со сложностью повышения стабильности электрических характеристик при увеличении чувствительности [3]. Данная работа посвящена исследованию метода модификации характеристик тензочувствительных конструкций с помощью лазерной литографии и сравнению двух типов сенсорных архитектур.

Материалы и методы

Тензочувствительные конструкции сформированы на основе плёнок МУНТ, функционализированных карбоксильными группами (-COOH: 0.1–1.0 ммоль/г) с наружным диаметром не более 50 нм. МУНТ в концентрации 0,1 мг/мл размешивались в этиловом спирте и дистиллированной воде (соотношение 1:2) и гомогенизировались ультразвуком в течение 35 мин при мощности 35 Вт. Плёнки были получены методом спрей-осаждения на силиконовые подложки (силикон на основе платины, твёрдость по Шору А: 0) размером 5×25 мм. Формирование сенсорных архитектур производилось с помощью импульсного иттербиевого лазера при следующих параметрах: длина волны. – 1064 нм, длительность импульса – 100 нс, диаметр пятна – 35 мкм, частота 30 кГц, плотность энергии – 3,1 Дж/см^2.

Исследование чувствительности (коэффициент GF_I) и циклической стабильности производилось с помощью автоматизированной установки, основанной на системе трёхкоординатного позиционирования с шаговым двигателем. Сопротивление конструкций во время растяжения и сжатия на 20 % от начальной длины определялась с помощью цифрового мультиметра. Для исследования биосовместимости конструкций клетки фибробластов эмбриона человека (ФЭЧ) высаживались на поверхность плёнок, затем инкубировались в течение 48 часов в среде диоксида углерода, после чего окрашивались флуоресцентным красителем Hoechst 33342. Оценка выживаемости клеток проведена с помощью флюоресцентной микроскопии.

Результаты и обсуждение

Сформировано два типа сенсорных архитектур на основе плёнок МУНТ: 1) в виде тензорезисторной батареи и 2) в виде параллельных линий, локально изменяющих толщину (Рис. 1). Обнаружено, что коэффициент чувствительности после формирования архитектуры увеличивался в обоих случаях. Для архитектур первого типа его значение составило 26,2±1,3, второго типа – 42±3. Конструкции без заданной архитектуры обладали чувствительностью порядка 28±3. Архитектура 1-го типа способствовала распределению деформации по всей длине углеродной плёнки в то время, как в архитектуре 2-го типа концентрировались локальные напряжения. На это косвенно указывают и значения гистерезиса: для первого типа его значение составило 3,9±0,1 %, для второго – 2,22±0,07 %.

Исследование циклической стабильности показало, что конструкции обоих типов сенсорных архитектур способны выдержать без разрушения до 15000 циклов (Рис. 2). Период «тренировки», связанный с перераспределением сети МУНТ, составил порядка 1000 циклов, при этом рост сопротивления конструкций 1-го типа имел более ступенчатый вид, а 2-го типа – более плавный. После «тренировки» сопротивление конструкций устанавливалось около 50 кОм.

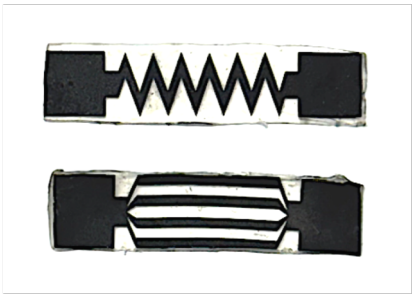


Рис. 1. Сенсорные архитектуры из плёнок МУНТ первого типа (сверху) и второго типа (снизу).

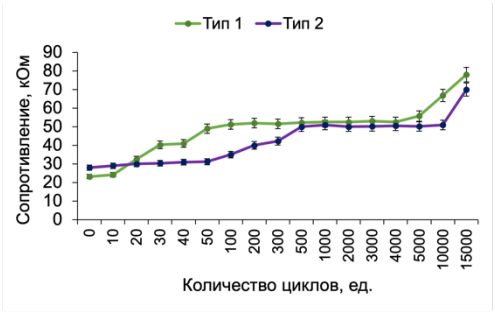


Рис. 2. Изменение сопротивления при циклическом нагружении

Исследование биосовместимости конструкций показало их применимость для накожного измерения физиологических сигналов. Обнаружен активный рост клеток ФЭЧ на поверхности углеродных плёнок. Выживаемость клеток на контрольном образце чистого силикона составила около 95 %, на плёнках МУНТ – 98 %.

Заключение

В настоящей работе представлена технология формирования сенсорных архитектур на основе плёнок МУНТ, одна из которых способствовала увеличению чувствительности к деформациям в 1,5 раза, вторая – снижению гистерезиса до 2 %. Оба типа конструкций демонстрируют высокую циклическую стабильность, выдерживая до 15000 циклов нагружения без разрушения. Результаты исследования цитотоксичности подтверждают биосовместимость разработанных конструкций. Таким образом, предложенные сенсорные архитектуры являются перспективными для использования в устройствах гибкой биоэлектроники. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Центр лазерных технологий в медицине» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-669 от 05 августа 2025 г.).

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (Проект FSMR-2024-0003).

Список литературы

[1] Hu. N. Alamusi, H. Fukunaga, S. Atobe, Y. Liu, J. Li. Sensors, **11**(11), 10691-10723 (2011).
[2] Y. S. Chong, K. H. Yeoh, P. L. Leow, P. S. Chee. Sensor Review, **38**(4), 494-500 (2018).
[3] L. Wang, W. H. Chiang, K. J. Loh. Scientific Reports, **12**(1), 9179 (2022).

Рефрактометрический экспресс-метод определения плотности и осмолярности мочи для оценки поражения почек на ранней стадии

Гусева Ю.А.[1]✉, Якушева М.А.[2], Давыдова Д.В.[3]

[1]Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия;

[2]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия;

[3]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия;

✉julia.guseff@yandex.ru

Аннотация. Ранние стадии хронической болезни почек (ХБП) часто протекают бессимптомно. Существующие методы (осмометрия, урометрия) требуют сложного оборудования и не пригодны для массового скрининга. В работе предложен оптический экспресс-метод на основе рефрактометрии. Установлены линейные зависимости между показателем преломления мочи (n), плотностью (ρ) и осмолярностью (O_s) в диапазоне температур 288–303 K. Погрешность определения осмолярности не превышает 2 мОсм/л, что достаточно для выявления ранних признаков ХБП.

Ключевые слова: рефрактометрия, моча, показатель преломления, плотность, осмолярность, экспресс-диагностика, хроническая болезнь почек.

Введение

Биофизические константы водных биологических растворов (показатель преломления n, плотность ρ, осмолярность O_s) играют важную роль в оценке физиологического состояния организма, в частности – функции почек и водно-солевого баланса [1]. Отклонения этих параметров могут наблюдаться уже на ранних стадиях хронической болезни почек (ХБП). Однако стандартные методы (осмометрия, урометрия) требуют значительных временных и ресурсных затрат. Одним из перспективных подходов является использование рефрактометрии, позволяющей определять показатель преломления растворов с высокой точностью [2].

Цель настоящей работы – установить количественные зависимости между n, ρ и Os в биологических растворах (на примере мочи) при разных температурах для последующей разработки рефрактометрического экспресс-метода диагностики.

Материалы и методы

Для установления отмеченных связей проведены измерения показателя преломления, плотности и осмолярности более 150 образцов мочи, отобранных у пациентов с разным физиологическим статусом (нормогидратация, дегидратация, нарушения водно-солевого обмена). Для каждого образца проводили синхронные измерения показателя преломления, плотности и осмолярности при температурах 288, 293, 298 и 303 K Показатель преломления определяли рефрактометром СНЕЛ-105 (λ = 589,3 нм, точность ±0,0001), плотность – ультразвуковым плотномером DSA 5000 M (точность ±0,1 кг/м³), осмолярность – осмометром ОСКР-1М (диапазон 0–2000 мОсм/кг, погрешность ±2%). Измерения проводили синхронно на трёх приборах при каждой температуре, не менее 5 повторений Полученные данные использовали для построения калибровочных зависимостей методом наименьших квадратов.

Результаты и обсуждение

Экспериментально установлено, что зависимости показателя преломления и плотности мочи от температуры в диапазоне 288–303 K носят линейный характер, что позволяет вводить температурную поправку при экспресс-анализе. На рис. 1 представлена зависимость плотности от показателя преломления для одного из образцов – точки хорошо аппроксимируются прямой линией.

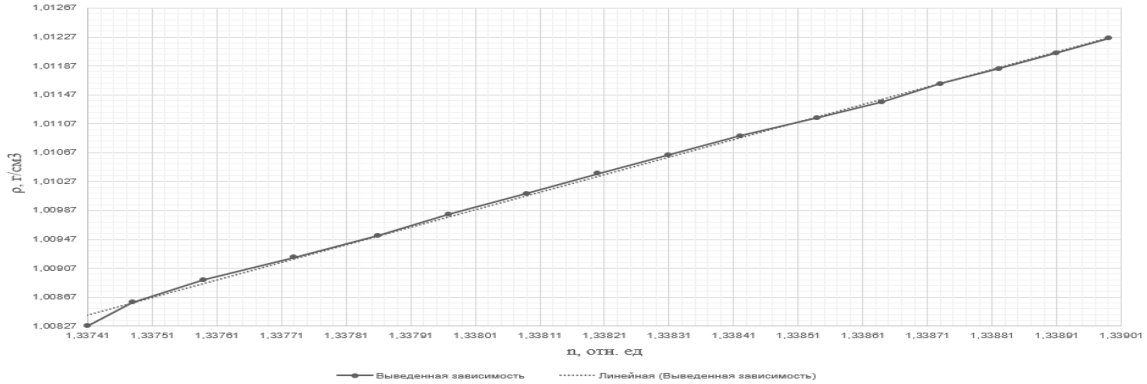


Рис. 1. График зависимости плотности ρ от показателя преломления n.

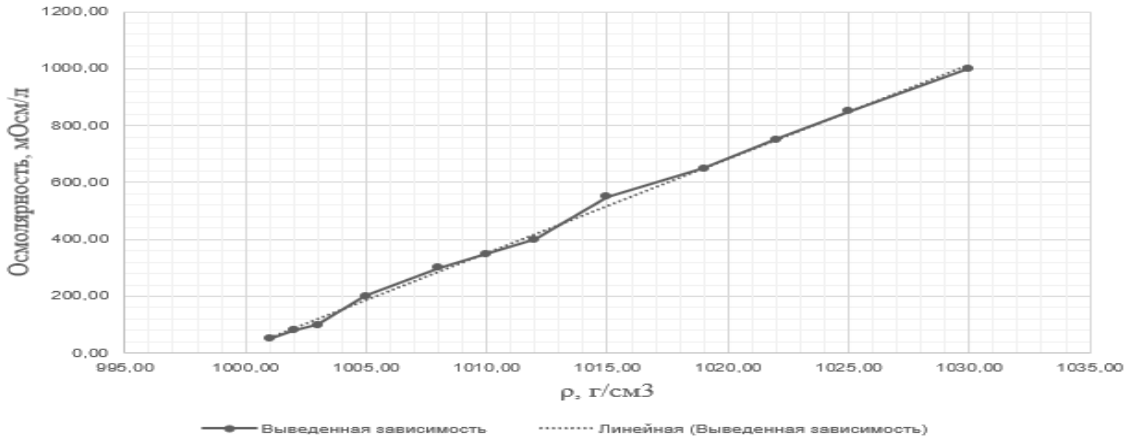


Рис. 2. График зависимости плотности ρ от осмолярности Os.

Зависимость плотности от показателя преломления аппроксимирована линейной функцией: $\rho = 2{,}4322 \cdot n - 2{,}2444$ (рис. 1, пунктирный график). Осмолярность, в свою очередь, линейно возрастает с плотностью: $O_s = 33{,}128 \cdot \rho - 33{,}107$ (рис. 2, пунктирный график).

Для проверки устойчивости коэффициентов проанализированы 10 образцов контрольной группы (здоровые добровольцы). Отклонение коэффициента a в уравнении $\rho = an + b$ составило не более ±0,0215 (~1%), коэффициента b – не более ±0,0127 (<1%). Это позволяет использовать усреднённые коэффициенты с погрешностью определения осмолярности до 2 мОсм/л, что соответствует требованиям экспресс-диагностики.

Заключение

Разработанный рефрактометрический экспресс-метод позволяет по одному измерению показателя преломления мочи (с учётом температуры) одновременно определять плотность и осмолярность с погрешностью, достаточной для выявления ранних признаков хронической болезни почек. Полученные градуировочные зависимости могут быть заложены в программное обеспечение портативных рефрактометров, что делает метод пригодным для использования в поликлиниках, фельдшерских пунктах, а также для домашнего мониторинга пациентами с риском развития ХБП. Метод не требует дорогостоящих реагентов и сложного обслуживания, что существенно снижает барьеры для массового скрининга.

Список литературы

[1] Антонов, В. Г. Водно-электролитный обмен и его нарушения: руководство для врачей / В. Г. Антонов, С. Н. Жерегеля, А. И. Карпищенко, Л. В. Минаева; под ред. А. И. Карпищенко. - Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2020. - 208 с.

[2] Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. – Л.: Химия, 1974. – 400с.

Слияние модельной системы «ооцит –цитопласт» при помощи фемтосекундного лазерного скальпеля.

А. Д. Залесский [1✉], **А. М. Шахов** [1], **А. А. Осыченко** [1]

[1]N.N. Semenov Federal Research Center of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ aleksandr.zalesskij@phystech.edu

Аннотация. В работе используется фемтосекундное лазерное излучение ближнего инфракрасного диапазона для реализации методики лазерного слияния клеток. Такой подход обладает рядом преимуществ по сравнению с использованием классических методик слияния клеток, а именно высокой степенью локализации воздействия. Эта перспективная методика в будущем может найти своё применение во вспомогательных репродуктивных технологиях.

Ключевые слова: Фемтосекундный лазерный скальпель, ооцит, слияние клеток.

Введение

Фемтосекундное лазерное излучение ближнего инфракрасного диапазона в последнее время зарекомендовало себя как малоинвазивный и высокоточный инструмент для манипулирования биологическими объектами. Благодаря фокусировке фемтосекундных лазерных импульсов объективами микроскопа с высокой числовой апертурой может быть достигнуто высоколокализованное разрушение биоматериала с субмикронным разрешением (так называемая нанохирургическая техника). Нами ранее было продемонстрировано успешное применение такого подхода для реализации слияния бластомеров внутри эмбриона и соматических клеток [1,2]. В настоящей работе мы демонстрируем успешное слияние модельной системы «ооцит – цитопласт» при помощи фемтосекундного лазера. Система «ооцит – цитопласт» используется нами для моделирования важной стадии слияния энуклеированного ооцита и соматической клетки в процессе клонирования. Более того, технология слияния ооцита и цитопласта может быть использована во вспомогательных репродуктивных технологиях (например, ребёнок от трёх родителей).

Материалы и методы

Ооциты, которые далее использовались в экспериментах, получали по стандартному протоколу: проводили суперовуляцию мышей путем внутрибрюшинной инъекции 10 МЕ гонадотропина сыворотки жеребой кобылы, и спустя 48 часов – 10 МЕ хорионического гонадотропина человека. Ооциты очищали от кумулюсных клеток гиалуронидазой (1 мкг/мл) в среде M2 (Sigma Aldrich) на протяжении 3-5 минут. Далее ооциты культивировали в среде KSOM (Merck).

Для получения цитопласта ооциты 40 минут инкубировали в среде KSOM с добавлением 1 мкг/мл цитохалазина B под минеральным маслом (ПанЭко) в CO2-инкубаторе (37ºC, 5% CO2). По завершению инкубирования с цитохалазином B ооциты отмывали в чистой среде и помещали в каплю среды M2 в чашку Петри размером 35 мм (с центральным отверстием и покровным стеклом); для предотвращения высыхания каплю покрывали слоем минерального масла. Ооцит фиксировали при помощи присоски, и далее при помощи диодного лазера с длиной волны 1,48 мкм (Fitel, FOL1435R50-317, 150 мВт) в блестящей оболочке делали перфорацию размером 15-20 мкм. Далее при помощи микроиголки проводили аспирацию цитопласта из случайного места ооцита. Цитопласт подсаживали к тому же ооциту, от которого этот цитопласт получили, как показано на Рисунке 1. Внесение цитопласта под блестящую оболочку ооцита осуществлялось той же иголкой. После подсаживания цитопласта под блестящую оболочку ооцита, в место соприкосновения двух мембран направляли фемтосекундное лазерное излучение. В момент действия фемтосекундным лазерным излучением появлялся парогазовый пузырек (Рисунок 1), благодаря которому, как мы полагаем, проводится перфорация цитоплазматических мембран, что в дальнейшем может привести к слиянию клеток.

Результаты и обсуждение

Воздействие фемтосекундным лазерным излучением выполнялось на длине волны 1033 нм, длительности импульса 250 фс. Импульсы подавались в виде цуга импульсов на частоте 200 кГц, всего 2000 импульсов, энергия в одном импульсе составляла от 20 до 35 нДж. В работе использовался объектив микроскопа 50x, N.A. 0,7. В таком режиме лазерного воздействия сильное нелинейное поглощение в каждом импульсе приводило к быстрому нагреву и образованию короткоживущих парогазывых пузырей, наряду с нано- и микрокавитацией для энергий от 30 нДж. Одновременное воздействие нанокавитации и тепла, предположительно, синергично воздействует на место контакта мембран и позволяет создать поры в мембранах и удержать их раскрытие для дальнейшего успешного слияния.

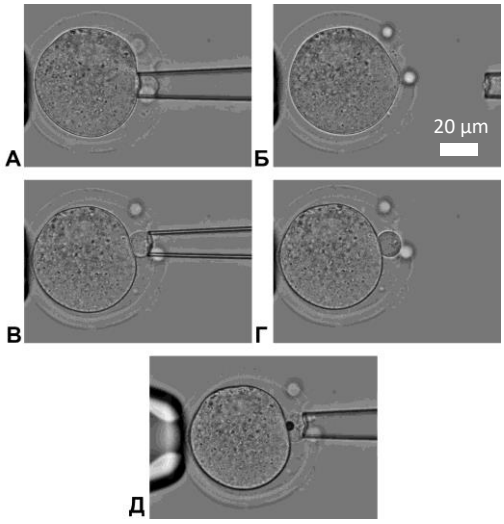


Рис. 1. Общий ход получения и переноса цитопласта. А, Б, В, Г – процесс аспирации и подсаживания цитопласта под перивителлиновую оболочку; Д – момент действия фемтосекундным лазерным излучением.

Подбор режима воздействия осуществляли таким образом, чтобы добиться появления парогазового пузыря за один акт воздействия с размером 2-4 мкм. Механизм слияния, опосредованного появлением парогазового пузыря, точно не известен, однако считается, что пузырь разрывает цитоплазматические мембраны клеток, образуя пору, и мембраны с некоторой вероятностью замыкаются друг на друга.

Заключение

В ходе работы продемонстрировано успешное слияние модельной системы «ооцит – цитопласт» при помощи высоко локализованного фемтосекундного лазерного воздействия.

Благодарности

Работа поддержана грантом РНФ № 25-75-20020.

Список литературы

[1] A.A. Osychenko, A.D. Zalessky, A.N. Kostrov, A.V. Ryabova, A.S. Krivokharchenko, V.A.Nadtochenko, *Femtosecond laser surgery of two-cell mouse embryos: effect on viability, development, and tetraploidization.* J. Biomed. Opt, 22(12), p. 1-9, 2017.

[2] D.Y. Martirosyan, A.A. Osychenko, A.D. Zalessky et al. *Use of a Fluorescent Dye for Controlling the Laser Absorption in the Femtosecond Laser Nanosurgery of Cells*. Jetp Lett. 117, 873–878 (2023).

Влияние инфекции гриппа А на долговременную потенциацию гиппокампа у мышей с моделью болезни Альцгеймера

К. Д. Кулясов[1✉], А.И. Ерофеев[1, 2], Е. К. Винокуров[1],
О.Л. Власова[1], И. Б. Безпрозванный[1, 2]
1. Лаборатория молекулярной нейродегенерации, Высшая школа биомедицинских систем и технологий, Институт биомедицинских систем и биотехнологий, Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия;
2. Лаборатория молекулярной нейробиологии, Институт физиологии им. Павлова, Российская академия наук, Санкт-Петербург, Россия;
✉kirka_kul@mail.ru

Аннотация: Целью работы было оценить влияние перенесённой инфекции вируса гриппа A/H1N1pdm09 на синаптическую пластичность гиппокампа у мышей C57BL/6J и трансгенных мышей 5xFAD. Для анализа долговременной и посттетанической потенциации регистрировали полевые возбуждающие постсинаптические потенциалы. Показано, что у мышей 5xFAD долговременная потенциация снижена по сравнению с мышами C57BL/6J, тогда как перенесённая инфекция не оказывала статистически значимого влияния на исследуемые параметры. Полученные данные указывают на преимущественную роль генотипа в нарушении синаптической пластичности.
Ключевые слова: болезнь Альцгеймера, синаптическая пластичность, долговременная потенциация

Введение

Синаптическая пластичность представляет собой фундаментальное свойство нервной системы, обеспечивающее способность синапсов изменять эффективность передачи сигнала в ответ на активность и опыт. Одним из ключевых механизмов пластичности является долговременная потенциация (ДВП), наиболее выраженно проявляющаяся в гиппокампе [1]. Нарушение ДВП рассматривается как один из ранних функциональных маркеров болезни Альцгеймера [2]. В последние годы особое внимание уделяется роли периферических инфекций как факторов, модифицирующих течение нейродегенерации. Вирус гриппа А, несмотря на отсутствие выраженной нейротропности, способен индуцировать системный воспалительный ответ, что может опосредованно влиять на центральную нервную систему [3]. В связи с этим актуальным является изучение влияния перенесённой инфекции гриппа А на механизмы синаптической пластичности в условиях нейродегенеративной патологии.

Материалы и методы

Для проверки гипотезы о влиянии перенесенной инфекциии вируса гриппа формировали 4 групы мышей: мышей дикого типа линии C57BL/6J (WT) и мышей с моделью болезни Альцгеймера трансгенной линии 5xFAD (AD). Животных интранозально инфицировали адаптированным штаммом вируса гриппа A/H1N1pdm09, контрольные группы получали буферный раствор. Регистрацию полевых возбуждающих постсинаптических потенциалов (пВПСП) проводили на переживающих срезах гиппокампа (область CA1). Долговременную потенциацию индуцировали высокочастотной стимуляцией (ВЧС), после чего регистрировали изменения наклона пВПСП относительно средней величины наклона пВПСП до высокочастотной стимуляции (базового уровня). Посттетаническую потенциацию оценивали в первые две минуты после стимуляции. Статистический анализ выполняли с использованием однофакторного дисперсионного анализа с последующим тестом Тьюки.

Результаты и обсуждение

У мышей группы WT+A/H1N1pdm09, статистически значимых изменений ДВП по сравнению с неинфицированным контролем не выявлено. Аналогично, у группы AD+A/H1N1pdm09 дополнительного снижения данного показателя по сравнению с неинфицированными трансгенными животными не наблюдалось. Статистически значимая разница между группами AD и WT соответствует представлениям о нарушении механизмов синаптической пластичности при нейродегенеративном процессе. Данные в виде диаграмм представлены на рисунке 1. Анализ посттетанической потенциации также не выявил статистически значимых различий между экспериментальными группами. Данные в виде диаграмм представлены на рисунке 2.

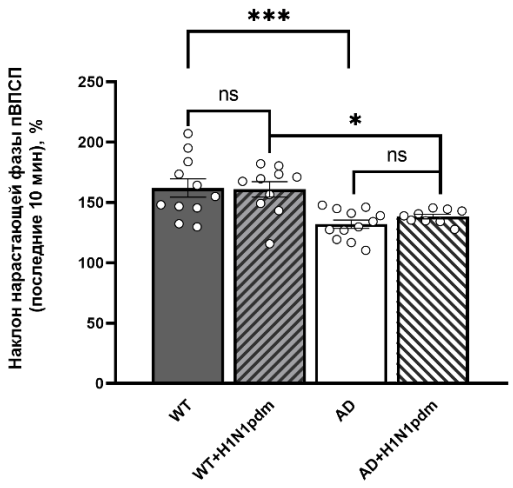


Рис. 1. Долговременная потенциация, оцененная по наклону нарастающей фазы пВПСП в последние 10 минут после ВЧС. Данные представлены как среднее значение наклона ± стандартной ошибки среднего (SEM).

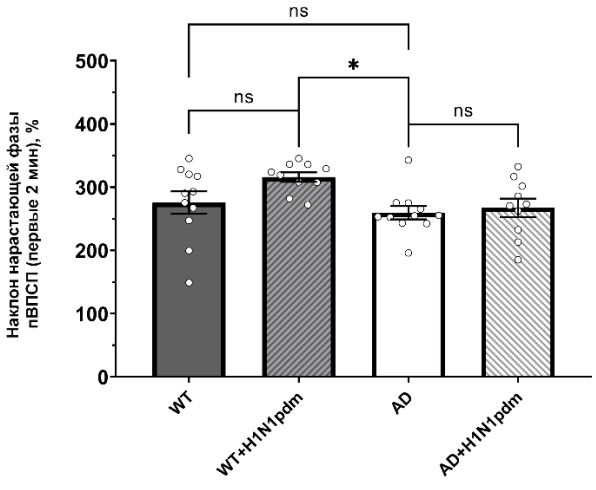


Рис. 2. Посттетаническая потенциация, оцененная по наклону нарастающей фазы пВПСП в первые 2 минуты после ВЧС. Данные представлены как среднее значение наклона ± стандартной ошибки среднего (SEM).

Заключение

Полученные результаты указывают на то, что основным фактором нарушения синаптической пластичности в данной работе является генотип 5xFAD, тогда как перенесённая инфекция вируса гриппа A/H1N1pdm09 в выбранный срок наблюдения не приводит к дополнительному угнетению показателей долговременной и посттетанической потенциации. Отсутствие статистически значимой разницы может быть обусловлено тем, что постинфекционное воздействие реализуется на иных уровнях организации ткани и не сопровождается выраженными изменениями исследованных параметров. В связи с этим дальнейшее изучение данного вопроса требует проведения дополнительных исследований с привлечением молекулярных, морфологических и поведенческих методов анализа.

Список литературы

[1] Y. Murai, A. Goto. Curr. Opin. Neurobiol., 92, 102996 (2025).
[2] G.M. Shankar, D.M. Walsh. Mol. Neurodegener., 4, 48 (2009).
[3] S. Hosseini, E. Wilk, K. Michaelsen-Preusse, I. Gerhauser, W. Baumgärtner, R. Geffers, K. Schughart, M. Korte. J. Neurosci., 38(12), 3060–3080 (2018).

Разработка и исследование тонкоплёночного биодеградируемого электропроводящего композита на основе хитозана и одностенных углеродных нанотрубок для регенерации нервной ткани

А. С. Иванова[1✉], **В. В. Сучкова**[1,2], **А. Ю. Герасименко**[1,2]
[1] НИУ «МИЭТ», г. Москва, Россия;
[2] Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, г. Москва, Россия
✉ivanovasasha1444@gmail.com

Аннотация. Разработан биодеградируемый электропроводящий композит на основе сукцината хитозана и одностенных углеродных нанотрубок для регенерации нервной ткани. Гибкие пластыри предназначены для использования в качестве локального нейроинтерфейса, обеспечивающего повышенную электропроводность, механическую прочность, направленный рост аксонов и противовоспалительное воздействие.

Ключевые слова: хитозан; углеродные нанотрубки; электропроводящие композиты; регенерация нервной ткани; нейроинтерфейс.

Введение

Повреждения нервной ткани остаются серьёзной медицинской и социальной проблемой вследствие ограниченной способности нервной системы к регенерации. В клинической практике механические повреждения стволов периферических нервов составляют около 1–3 % от общего числа травматических случаев, в период активных военных действий возрастая до 12 % [1], при этом около 60 % пострадавших остаются инвалидами со стойкой утратой трудоспособности [2]. Традиционные методы, такие как нейрорафия, ограничены низкой эффективностью и травматичностью, поэтому актуальна разработка новых биосовместимых материалов для восстановления нервной ткани.

Цель работы: разработка биодеградируемого электропроводящего композита на основе хитозана и одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и формирование пластырей для повышения электропроводности и регенерации нервной ткани.

Материалы и методы

В качестве материалов использовались сукцинат хитозана, ОУНТ, холат натрия и индоцианин зелёный. Хитозан широко используется в инженерии нервной ткани благодаря биосовместимости, биорезорбции и поддержке клеточной активности [3]. Предварительно была получена стабильная водная дисперсия ОУНТ с использованием холата натрия в качестве диспергатора. Затем при постоянном перемешивании добавлялись сукцинат хитозана и краситель, а полное растворение компонентов обеспечивалось ультразвуковой обработкой. Полученный гель разливался в формы и высушивался при комнатной температуре в течение 24 часов, формируя гибкие пластыри толщиной около 100 мкм.

Удельная электропроводность определялась четырёхзондовым методом. Эффективность пластыря оценивалась по значению импеданса выбранного участка спинного мозга на частоте 1 кГц с помощью прецизионного измерителя импеданса LCR-76100 (рис. 1, А). Импеданс измерялся на разных этапах: целая нативная ткань (рис. 1, Б), после разреза твёрдой оболочки спинного мозга и после наложения пластыря с фиксацией лазером (рис. 1, В). Воздействие ИК-лазера (AlGaAs, λ = 800 нм) с обратной связью на пластыри обеспечивает локальное нагревание, размягчение полимерной матрицы, улучшение адгезии и более однородное распределение нанотрубок. Механические свойства исследовались методом наноиндентирования при различных уровнях влажности.

Результаты и обсуждение

Введение 0,1 масс.% ОУНТ в биополимерную матрицу привело к формированию перколяционной сети, повышению электропроводности, прочности и имитации свойств внеклеточного матрикса. Матрица сукцината хитозана обеспечила гибкость и мукоадгезию.

Удельное сопротивление плёнок составило 3,59 ± 0,17 Ом·см, что на порядки ниже сопротивления нервной ткани. В сухом состоянии пластыри обладают высокой твердостью и модулем упругости (H = 0,88 ГПа, E = 25,3 ГПа). Установлено, что с увеличением влажности наблюдается значительное снижение твёрдости (с ~0,88 ГПа до ~0,02 ГПа) и модуля упругости (с ~25,3 ГПа до ~1,1 ГПа) композита вследствие набухания и пластификации полимерной матрицы. Материал становится более биомиметичным.

После продольного рассечения спинного мозга длиной 1 см импеданс увеличился с 2,8 кОм до 5,7 кОм (рис. 2). После наложения хитозанового пластыря с последующим воздействием лазера импеданс уменьшился до 1,7 кОм, что свидетельствует о высокой эффективности композита в восстановлении локальной электропроводности.

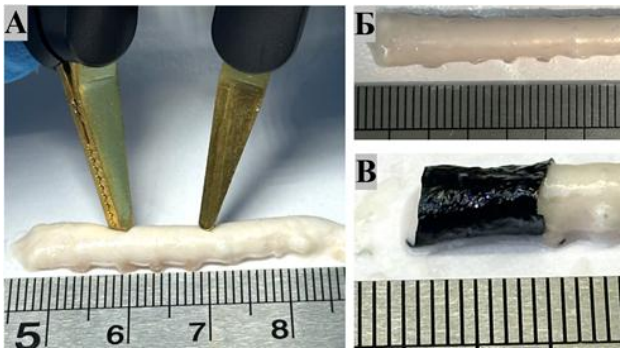


Рис. 1. Фотоизображения спинного мозга *ex vivo*: А – процесс измерения импеданса; Б – образец биоткани; В – зафиксированный лазерным излучением пластырь

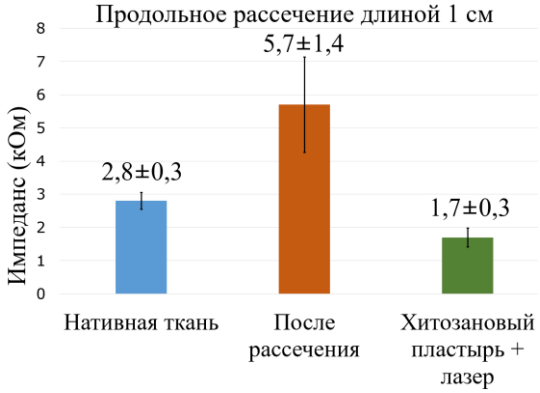


Рис. 2. Импеданс спинного мозга. Данные представлены в виде среднего значения ± стандартного отклонения.

Разработанные хитозановые пластыри с ОУНТ могут обеспечивать локальную электропроводность, защищать нерв от внешнего механического раздражения, армировать нервный ствол. Электропроводящие сети ОУНТ и ионная проводимость гидратированной матрицы хитозана формируют локальный нейроинтерфейс, который поддерживает эндогенные биоэлектрические сигналы, стимулирует пролиферацию клеток Шванна и направленный рост аксонов, что делает материал перспективным для восстановления периферических нервов. Пластыри биодеградируют без необходимости удаления.

Заключение

Таким образом, применение биоразлагаемых электропроводящих композитов на основе хитозана и углеродных нанотрубок в составе комплексных хирургических и инженерных подходов является перспективным направлением восстановления повреждённых нервов. Сочетание биосовместимости, электрической активности и элементов тканевой инженерии обеспечивает стабильные морфологические и функциональные результаты.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания «Биоинтегрированная электроника на основе углеродных нанотрубок и графена» (Проект FSMR-2024-0003).

Список литературы

[1] Molotkovets V.Yu. et al. Restoration of the Integrity of a Transected Peripheral Nerve with the Use of an Electric Welding Technology // Neurophysiology. – 2020. – Vol. 52. – P. 31–42.

[2] Масгутов Р.Ф. и др. Современные тенденции лечения повреждений периферических нервов // Практическая медицина. – 2013. – Т. 2. – С. 99–103.

[3] Li L. et al. BDNF-loaded chitosan-based mimetic mussel polymer conduits for repair of peripheral nerve injury // Frontiers in Cell and Developmental Biology. – 2024. – Vol. 12.

Зеленый синтез наночастиц серебра с применением экстракта шиповника

Водяшкин А.А.[1] ✉, **Макеев М.О.** [1], **Рыженко Д.С.** [1], **Кошевая Е.Д.** [1]
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
✉av.andrey2013@yandex.ru

Аннотация. В данной работе были подобраны условия синтеза наночастиц серебра с использованием экстракта шиповника в качестве восстановителя и стабилизатора. Исследовано влияние pH и концентрации прекурсора на свойства наночастиц.

Ключевые слова: наночастицы серебра, зеленый синтез, экстракт шиповника, коллоидная устойчивость.

Введение

Наночастицы металлов находят всё более широкое применение в различных промышленных и потребительских сферах, включая медицину, электронику, текстиль и упаковку. Одним из наиболее широко используемых материалов в этой области являются наночастицы серебра, известные своими выраженными антибактериальными, проводящими, плазмонными оптическими и каталитическими свойствами [1]. К числу активно развивающихся методов их синтеза относятся так называемые «зелёные» подходы, включающие синтез с использованием растительных экстрактов в качестве восстановителей и стабилизаторов [2]. Такие методы особенно актуальны для областей применения, где необходимо минимизировать потенциальную токсичность наноматериалов, таких как медицинские изделия, упаковочные материалы, косметика и антимикробные покрытия для текстиля.

Материалы и методы

В качестве прекурсора для синтеза использовали нитрат серебра ($AgNO_3$). Для приготовления всех водных растворов использовали бидистиллированную воду. В качестве источника биоредукторов использовали сухие плоды шиповника коммерческого образца марки Orexand.

Плоды шиповника предварительно измельчали в кофемолке до получения однородного порошка. Для экстракции 2,0 г порошка заливали 40 мл бидистиллированной воды при соотношении твёрдой фазы к жидкости 2:40 (м/об). Экстракцию проводили при температуре 50 °C в ультразвуковой ванне марки Tegler в течение 30-90 минут. Полученный экстракт очищали путём центрифугирования при 12000 ×g в течение 20 минут с последующей фильтрацией через мембранный фильтр PES с размером пор 0,22 мкм для удаления нерастворимых частиц.

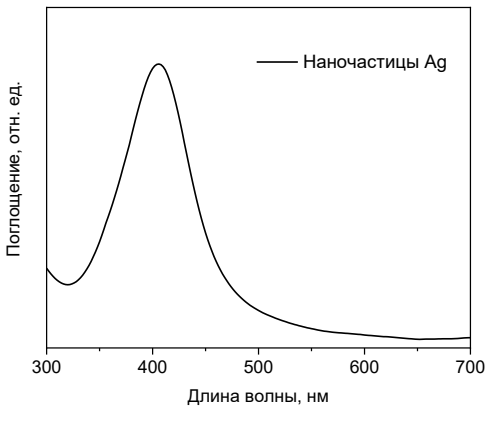
Очищенный экстракт добавляли к водному раствору нитрата серебра (2–10 мМ) при перемешивании на магнитной мешалке со скоростью 550 об/мин. Полученную реакционную смесь нагревали при 65 °C в течение 2 часов. Осадок наночастиц отмывали тремя циклами центрифугирования при 14000 об/мин в течение 20 минут с последующей ресуспензией в бидистиллированной воде и хранили в холодильнике при +5 °C.

Полученные дисперсии были охарактеризованы с помощью комплекса физико-химических методов анализа: просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), УФ-видимой и инфракрасной спектроскопии, динамического (DLS) и электрофоретического рассеяния света (дзета-потенциал).

Результаты и обсуждение

Было показано, что в полученных дисперсиях наблюдается характерный плазмонный пик серебра, что свидетельствует о формировании наночастиц металлического серебра с выраженным поверхностным плазмонным резонансом. При увеличении концентрации нитрата серебра на спектрах поглощения появляется дополнительный максимум в области 500 нм, что указывает на развитие агрегации частиц и формирование более крупных или анизотропных структур. В то же время увеличение pH реакционной среды способствует

более полному восстановлению ионов серебра, что проявляется в росте интенсивности плазмонного пика и свидетельствует о повышении выхода синтеза. При оптимальных значениях pH и концентрации прекурсора полученные дисперсии демонстрировали однородный узкий плазмонный максимум в области ~400 нм (см. рис.1). Коллоидная устойчивость образцов сохранялась в течение как минимум одной недели после синтеза, что подтверждается отсутствием заметного осаждения и сохранением положения и формы плазмонного пика, что указывает на эффективную стабилизацию наночастиц компонентами растительного экстракта. Полученные данные хорошо согласуются с результатами DLS и ПЭМ. По данным ИК-спектроскопии были зарегистрированы полосы поглощения, соответствующие функциональным группам компонентов растительного экстракта, присутствующим на поверхности наночастиц серебра.



м

Рис. 1. Спектр поглощения синтезированных наночастиц серебра в воде.

Заключение

Показано, что наночастицы серебра могут быть эффективно синтезированы «зелёным» методом с использованием водного экстракта шиповника в качестве биоредуктора и стабилизатора. По данным УФ-видимой спектроскопии подтверждено формирование частиц с характерным плазмонным пиком серебра, при этом оптимизация концентрации прекурсора и pH реакционной среды позволила повысить выход синтеза и сохранить коллоидную устойчивость дисперсий не менее недели после получения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (шифр темы FSFN-2026–0010).

Список литературы

[1] D. T. Rejepov, A. A. Vodyashkin, A. V. Sergorodceva, Y. M. Stanishevskiy. Drug Dev. Regist., 10(3), 176 (2021).
[2] S. Shahzadi, S. Fatima, Z. Shafiq, M. R. S. A. Janjua. RSC Adv., 15(5), 3858 (2025).
[3] R. R. Patel, S. K. Singh, M. Singh. Mater. Adv., 4(8), 1831 (2023).

Исследование излучения кожи в терагерцовом диапазоне частот

Малюкова П.А[1]✉, Бакшеева К.А[1,2], Рудаков К.И[3,4], Назаров Г.П[3,4], Ожегов Р.В[1,2], Гольцман Г.Н[1,2].

[1]Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия;
[2]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия;
[3]Астрокосмический центр ФИАН, Москва, Россия;
[4]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия;
✉p.malukova@mail.ru

Аннотация. В работе исследуется возможность регистрации ментального состояния человека на примере терагерцового излучения потовых желез. В проведённых экспериментах использовался детектор на основе перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник и датчик кожно-гальванической реакции. Исследована зависимость терагерцового излучения потовых желез от ментальной нагрузки.

Ключевые слова: ментальная нагрузка, человеческая кожа, детектор сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник, терагерцовый диапазон.

Введение

Одними из основных проявлений стресса являются учащенное сердцебиение и повышенное потоотделение. В начале 2000-х годов при помощи оптической томографии были получены изображения потовых желез, на основе которых возникло предположение, что верхняя часть потовых протоков может функционировать как спиральная антенна в терагерцовом диапазоне частот [1,2]. Одним из мест с высокой концентрацией потовых желез является ладони рук, которые удобны для изучения изменения терагерцового излучения под влиянием ментальных нагрузок.

Методика эксперимента

Экспериментальная установка была основана на детекторе, работающем на переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) [3] измеряемый на частоте 247 ГГц. Ладонь фиксировалась в кожух для обеспечения стабильности измерений, а на пальцы был закреплен датчик кожно-гальванической реакции (GSR), позволяющий непрерывно регистрировать изменение электрической проводимости кожи.

На основе ранее проведенных исследований [4], был разработан протокол испытаний, который составил 20 минут. Сценарий протокола включал несколько этапов: 5 минут расслабления, 5 минут умственной нагрузки, 5 минут расслабления, 2 минуты физической нагрузки, 3 минуты расслабления.

В эксперименте принимали участие 5 мужчин и 7 женщин в возрасте от 18 до 73 лет.

Результаты

По полученным данным были рассчитаны корреляции с СИС-детектора и GSR-датчика. Значения корреляций необработанных сигналов были неоднозначны и лежали в диапазоне от –0,8 до +0,2. Средний коэффициент корреляции составил -0,1. На рисунке 1 представлен пример получаемых графиков зависимости нормированных значений сигналов СИС-детектора и GSR-датчика от времени.

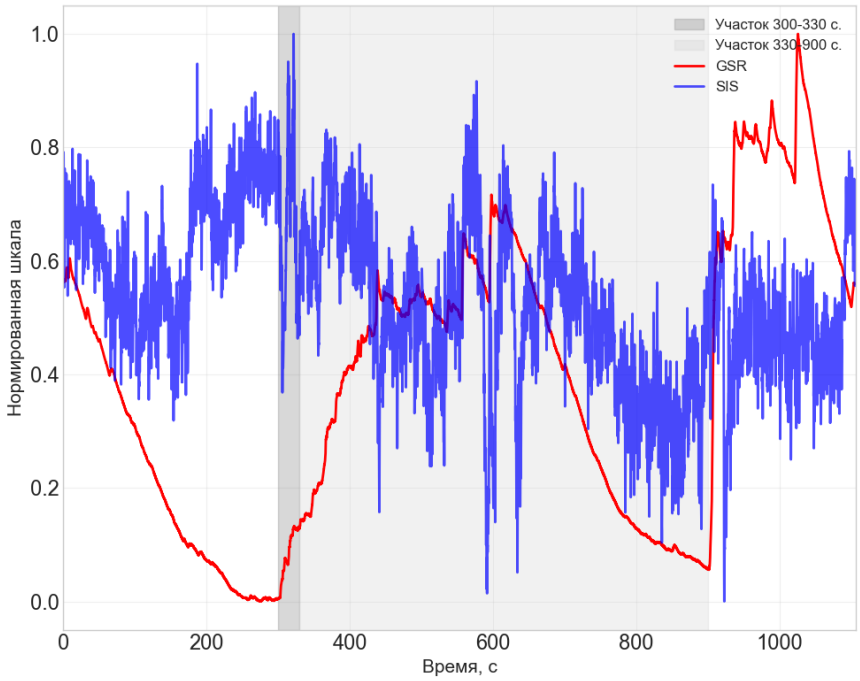


Рис. 1. График зависимости нормированных показаний СИС-детектора и GSR-датчика.

Для повышения корреляции была выполнена дополнительная обработка данных. Обработка данных заключалась в разделении временной шкалы на четыре интервала. Первый участок с 0 до 300 с. и четвертый с 900 до 1080 с. оставили без изменений. Второй интервал, проходящий с 300 до 330 с., сжимался до 20% от его исходной длительности, а третий участок, проходящий с 330 до 900 с., растягивался на тот же процент. Коэффициенты сжатия и растяжения подбирались методом перебора с целью поиска наилучшей корреляции.

Диапазон корреляций после дополнительной обработки данных составил -0,8 - +0,4, при этом средний коэффициент составил -0,3.

Заключение

Полученные данные демонстрируют возможность измерения ментального состояния в терагерцовом диапазоне. Несмотря на небольшую выборку испытуемых, предложенный подход показывает перспективность для дальнейших исследований в области бесконтактной диагностики психофизиологических состояний человека.

В дальнейшем целесообразно увеличить число испытуемых, уточнить параметры обработки сигналов и провести более детальный анализ факторов, влияющих на корреляцию, что позволит повысить достоверность и воспроизводимость результатов.

Благодарности

Данная работа выполнена в рамках гранта РНФ № 23-72-00046.

Список литературы

[1] J. Lademann, N. Otberg, H. Richter, L. Meyer, H. Audring, A. Teichmann, S. Thomas, A. Knuttel and W. Sterry, Skin Res. and Tech., **13**, 119-32 (2007).

[2] Yu. Feldman, A. Puzenko, P. Ben Ishai, A. Caduff and A. J. Agranat, Phys. Rev. Lett., **100**, 128102-4 (2008).

[3] K.I. Rudakov, A.V. Khudchenko, L.V. Filippenko, M.E. Paramonov, R. Hesper, D.A. Lima, A.M. Baryshev, and V.P. Koshelets, THz Range Low-Noise SIS Receivers for Space and Ground-Based Radio Astronomy, Applied Sciences., **11**, 10087 (2021)

[4] K. Baksheeva, R. Ozhegov, G. Goltsman, N. Kinev, V. Koshelets, A. Kochnev, N. Betzalel, A. Puzenko, P. Ben Ishai, Y. Feldman IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology., 11, 4 (2021).

Воздействие импульсного УФ излучения медного лазера на жизнеспособность микроскопических грибов

В. А. Парфенов [1,2]✉, **И. Ю. Кирцидели** [3], **Ю. М. Мокрушин** [4]

[1] Санкт-Петербургский институт истории Российской Академии наук, Санкт-Петербург, Россия;
[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия;
[3] Ботанический институт им. В. Л. Комарова Российской Академии наук, Санкт-Петербург, Россия;
[4] Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия;
✉ microfungi@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование воздействия излучения второй гармоники импульсного лазера на парах меди с длиной волны 255,5 нм на жизнеспособность спор микроскопических грибов, являющихся биодеструкторами различных материалов. Определены дозы энергии лазерного излучения, необходимые для инактивации этих микроорганизмов. Исследованы механизмы их разрушения под воздействием УФ-излучения.

Ключевые слова: микроскопические грибы, биодеструкторы, лазерное облучение, лазер на парах меди, биоцидная обработка, ультрафиолетовое излучение.

Введение

В настоящее время биологические повреждения являются одной из основных причин разрушения инженерных конструкций и сооружений, зданий и объектов культурного наследия. Это комплексная проблема, которая затрагивает различные материалы, включая камень (мрамор, известняк, песчаник), органические материалы (бумагу, кожу, ткань, дерево и т.д.), а также керамику и даже металл [1-3]. К биодеструкторам относятся бактерии, микроскопические грибы, микроводоросли, лишайники, мхи, а иногда и высшие семенные растения. Микроскопические грибы (микромицеты) являются наиболее распространенной группой биодеструкторов. Их появление на поверхности предметов приводит к их постепенному разрушению в результате физических и химических воздействий. Проникая в материал пораженных объектов и выделяя продукты жизнедеятельности (экзоферменты и органические кислоты) на их поверхность, они постепенно разрушают их структуру, что в случае, например, каменных зданий и сооружений, расположенных на открытом воздухе, приводит к отслаиванию отдельных фрагментов поверхностного слоя, что значительно ускоряет скорость разрушения. Традиционные методы борьбы с биологическими повреждениями основаны на использовании специальных химических реагентов, так называемых биоцидов. Однако эффективность биоцидной обработки невысока, в том числе из-за способности микромицетов адаптироваться к их воздействию. По этой причине существует необходимость в разработке новых методов и подходов, и одним из возможных способов решения этой проблемы является использование лазеров. В данной работе была изучена возможность подавления жизнеспособности микромицетов с помощью ультрафиолетового лазерного излучения.

Материалы и методы

В экспериментах использовались модельные образцы, представлявшие собой прямоугольные полированные пластинки из мрамора и известняка, искусственно зараженные микромицетами (*Aspergillus flavus* и *Alternaria consortiale*) а также суспензия спор *Thelebolus microsporus* и *Pseudogymnoascus pannorum.* Использованные в экспериментах культуры микроскопических грибов (из коллекции Ботанического

института им. В.Л.Комарова) выращивались при температуре 20°С в течение 7 – 15 или 45 – 60 дней на среде Чапека. Микроскопические грибы выделялись на экспоненциальной фазе роста колоний. Суспензия спор была получена методом смыва с поверхности колоний и фильтрацией. Число КОЕ (колониеобразующих единиц) в 1 мл суспензии доводилось до $5 – 10 \times 10^3$ КОЕ/мл. Помимо модельных образцов проводилось облучение суспензий спор, находившихся в чашке Петри в воде, а также под тонким слоем почвы, имитировавшим условия жизни микромицетов в полярных районах.

Во всех случаях микромицеты подвергались облучению при помощи лазера на парах меди с удвоением частоты, имеющего следующие выходные характеристики: длина волны излучения – 255,5 нм, максимальная средняя мощность – 1 Вт, длительность импульса – 15 нс, частота повторения импульсов – 15 кГц, диаметр пучка – 12 мм, расходимость излучения – 0,3 мрад, энергия в импульсе – 0,2 мДж.

Для исследования результатов воздействия УФ-излучения на микроскопические грибы применялись культуральные методы определения жизнеспособности микроорганизмов в эксперименте и в контроле. После облучения суспензия или смыв с поверхности мраморных пластинок культивировались на агаризированной среде при температуре 14°С в течение 10 – 15 дней. Далее определялась их вероятность выживания как отношение числа жизнеспособных КОЕ облученных спор к необлученным. В ходе экспериментов проводилась 3-х кратная лазерная обработка образцов.

Состояние поверхности спор и контроль монослойности образцов контролировались методами оптической и атомно-силовой микроскопии (АСМ). В частности, АСМ-измерения проводились при помощи атомно-силового микроскопа, работавшего в полуконтактном режиме с пространственным разрешением 0.02 мкм.

Заключение

Для летального воздействия на микроскопические грибы на поверхности мрамора и известняка необходимые уровни плотности энергии составляют $0{,}251 \times 10^5 – 0{,}547 \times 10^5$ Дж/см^2. При этом летальная доза облучения для темнопигментированного микромицета *Alternaria consortiale* более чем в 2 раза превышала летальную дозу для светлоокрашенного вида *Aspergillus flavus*, что подтверждает защитную роль меланина. Для видов микромицетов *Thelebolus microsporus* и *Pseudogymnoascus pannorum*, выделенных из экстремальных условий Антарктиды летальная доза была еще выше и составляла $0{,}88 \times 10^5 – 0{,}95 \times 10^5$ Дж/см^2. Это позволяет сделать вывод об адаптационном потенциале микромицетов экстремафилов. Кроме того, было обнаружено, что на сохранение жизнеспособности микроорганизмов оказывают влияние их видовые особенности, концентрация спор в образце, а также возраст чистой культуры.

Проведенные эксперименты показали перспективность применения УФ излучения медного лазера в борьбе с биопоражениями.

Список литературы

[1] Gorbushina A.A., Lyalikova N.N., Vlasov D.Y., Khizhnyk T.V. Microbial communities on the monuments of Moscow and St. Petersburg: Biodiversity and trophic relations // Microbiology, 2002.V. 71. N3. P. 350-356.

[2] Clas, R. M., Chowdhury, A. N. and Gauri, L. K. 19Microbial calcification of gypsum-rock and sulfated Marble // Stud. Conserv., 1988, 33, P. 149–153

[3] Webster, A.M., Vicente, E. and May, E. Bacteria and the bioremediation of stone: the potencial for saving cultural heritage. In W. Verstreate (ed.) *Proceeding of the uropean Symposium on Environmental Biotechnology*: Taylor and Francis Group, 2004.

Исследование излучения кожи человека при воздействии ментальной нагрузки при помощи однопиксельной ТГц камеры

К.А. Бакшеева [1]✉, **Ю.В. Журин**[1], **Р.В. Ожегов**[1,2], **Н.В. Кинев**[3], **В.П. Кошелец**[3], **Г.Н. Гольцман**[1,2]

[1] Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия;
[2] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия;
[3] Институт радиотехники и электроники им. Котельникова РАН, Москва, Россия
✉ baksheeva.kseniya@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследований возможности использования терагерцового излучения кожи для мониторинга психологического состояния человека. В ходе работы были получены радиояркостные изображения лиц добровольцев в разных состояниях. Анализ полученных изображений показал связь изменения интенсивности излучения в области лба, переносицы и надбровных дуг с ментальной и физической нагрузкой.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон частот, сканатор, человеческая кожа, ментальный стресс, сверхпроводниковый интегральный приемник.

Введение

В современном мире вопрос психологического здоровья является столь же важным, как и вопрос физического здоровья. В настоящее время мониторинг стресса может осуществляться при помощи разнообразных способов, таких как измерение пульса, кровяного давления, кожно-гальванической реакции (GSR) и других физиологических параметров. Однако все эти способы требуют непосредственного контакта с кожей, что может дополнительно повлиять и изменить состояние стресса человека.

Проведенные ранее исследования [1] показали, что терагерцовый сигнал, излучаемый верхней частью потового протока под действием ментальной нагрузки, коррелирует с кожно-гальванической реакцией и вариабельностью сердечного ритма. Таким образом было показано, что ТГц излучение кожи человека несет в себе информацию об уровне ментальной и физической нагрузки у человека. В этих исследованиях снимались показания собственного излучения кожи ладони человека, однако для практического использования подобной информации необходимо перейти от наблюдения в одной точке к построению терагерцовых изображений.

Методика эксперимента

Для проведения исследований ТГц излучения лица человека была подготовлена экспериментальная установка с использованием разработанной однопискельной ТГц камеры. В качестве приемного устройства камеры служит сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП), разработанный в ИРЭ РАН [2]. СИП является уникальным приемником на основе туннельных сверхпроводниковых наноструктур. Все элементы супергетеродинного приемника интегрированы в одной сверхпроводниковой микросхеме, которая включает в себя СИС (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник) смеситель с планарной сверхпроводниковой приемной антенной, сверхпроводниковый генератор гетеродина и гармонический смеситель для фазовой синхронизации частоты гетеродина. Микросхема СИП работает при температуре около 4,2 К и располагается в вакуумном заливном криостате с жидким гелием.

При помощи однопиксельной ТГц камеры снимались радиояркостные изображения лиц добровольцев в разных состояниях. Измерения проводились на частоте 500 ГГц по протоколу испытаний, содержащему этапы состояний покоя, ментальной и физической нагрузки.

Результаты и обсуждение

Были получены изображения 59 добровольцев, среди которых было 30 мужчин и 29 женщин со средним возрастом 24 года. На рисунках 1 и 2 предоставлены примеры получаемых радиояркостных изображений для одного из добровольцев в состоянии покоя

и при воздействии ментальной нагрузки соответственно. На изображениях видно, что при воздействии нагрузки, область лба светит интенсивнее. Это согласуется с теорией о работе верхней части протоков потовых желез, плотность распределения которых на лице человека наибольшая в области лба, работает как терагерцовая антенна, модулирующим фактором излучения которой служит стресс.

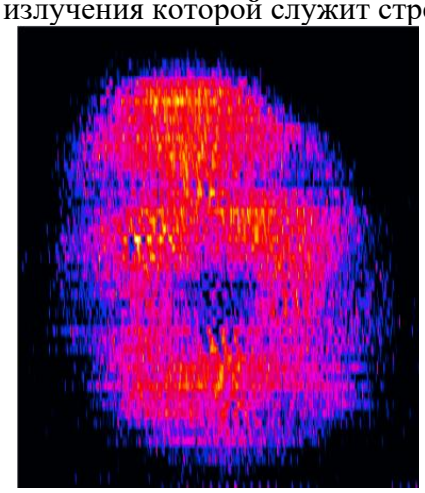


Рис. 1. Пример получаемых изображений в состоянии покоя.

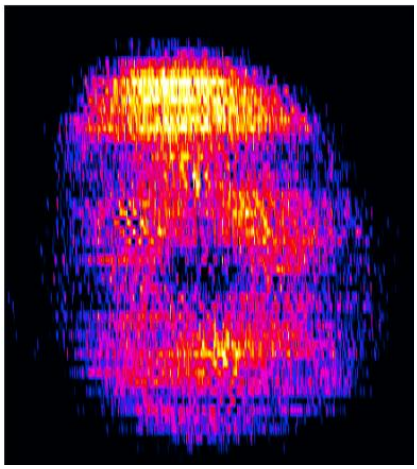


Рис. 2. Пример получаемых изображений при воздействии нагрузки.

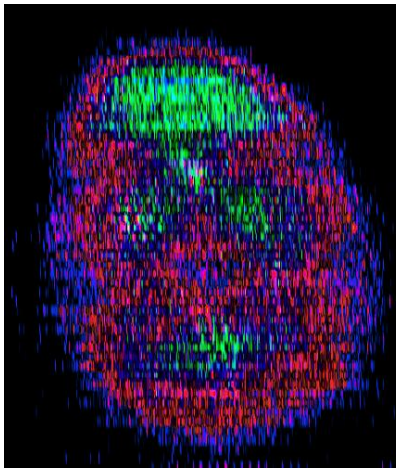


Рис. 3. Разница изображений в состоянии покоя и при воздействии нагрузки.

У большинства испытуемых наблюдаются выбросы в области переносицы и надбровных дуг, которые можно наблюдать на изображениях первого этапа расслабления в начале эксперимента, а также этапах ментальной и физической нагрузок. В ходе исследования было отмечено, что у некоторых людей эти выбросы пропадают к концу эксперимента, а у некоторых такие выбросы возникают на этапах нагрузок, если их не было изначально. В то же время такие выбросы отсутствуют в ИК изображениях добровольцев.

На рисунке 3 представлен пример разницы изображений, получаемых в состоянии покоя и при воздействии нагрузки. В результате разностного сравнения радиояркостных изображений отличающихся состояний добровольцев видно изменение интенсивности излучения в области лба, а также изменение выбросов в области переносицы и надбровных дуг.

Заключение

Выбросы в области переносицы наблюдаемые на радиояркостных изображениях лиц, получаемых при воздействии ментальной и физической нагрузок, могут свидетельствовать о связи интенсивности ТГц излучения кожи человека с его психологическим состоянием. Такие выбросы отсутствуют в ИК изображениях, что свидетельствует о том, что они являются особенностью ТГц излучения кожи.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 23-72-00046.

Список литературы

[1] K. Baksheev, R. Ozhegov, G. Goltsman, N. Kinev, V. Koshelets, A. Kochnev, N. Betzalel, A. Puzenko, P. Ben Ishai, Y. Feldman, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. **11**(4), 99 (2021)

[2] V. P. Koshelets et al., IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, **5**(4), pp. 687-694, (2015).

Электродные интерфейсы на основе лазерно-индуцированных углеродных гетероструктур

А. В. Куксин [1]✉, **А. С. Морозова** [1], **А. Ю. Герасименко** [1,2]

[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Зеленоград, Россия;

[2] Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия

✉artemkuks1n@yandex.ru

Аннотация. Разработаны гибкие и эластичные сухие электродные интерфейсы на основе гетероструктур из углеродных наноматериалов (одностенных углеродных нанотрубок и восстановленного оксида графена), сформированных в матрице полидиметилсилоксана под воздействием лазерного излучения. Структурные характеристики интерфейсов исследовались с помощью сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Установлено, что значения электропроводности, импеданса и модуля упругости образцов сформированных интерфейсов соответствуют аналогичным значениям коммерческих интерфейсов на основе соединений металлов. Проведенные исследования выживаемости клеток на поверхностях интерфейсов продемонстрировали их высокую степень биосовместимости. Полученные результаты исследований подтвердили высокий потенциал сформированных интерфейсов для мониторинга биопотенциалов организма человека.

Ключевые слова: интерфейсы, углеродные нанотрубки, графен, лазерное излучение.

Введение

Классические электродные интерфейсы на основе металлических соединений, таких как Ag/AgCl, имеют ряд существенных недостатков: необходимость в наличии электролитического гелевого слоя и риск аллергических реакций. Высокая электропроводность углеродных наноматериалов и созданных из них лазерно-индуцированных гетероструктур открывает значительный потенциал для разработки гибких электронных компонентов [1]. Интеграция углеродных нанотрубок и графена в полимерные матрицы, такие как полидиметилсилоксан (ПДМС), позволит создавать гибкие биомедицинские интерфейсы, например, сухие электроды [2]. Разработанные в данной работе сухие электродные интерфейсы способны заменить традиционные электроды на основе металлических соединений при измерении электрокардиограммы (ЭКГ), электромиограммы (ЭМГ) и электроэнцефалограммы (ЭЭГ).

Материалы и методы

Для формирования электродных интерфейсов использовались одностенные углеродные нанотрубки (OCSiAl), восстановленный оксид графена (Graphenox), полидиметилсилоксан (Sylgard 184). Углеродные наноматериалы гомогенизировались в объеме полимера с использованием растворителя и наносились в формы для отверждения. На следующем этапе сформированные композиты подвергались обработке лазерным излучением (1064 нм, 100 нс, 30 кГц) для формирования ковалентных связей между частицами углеродных наноматериалов. Морфология поверхностей образцов исследовалась с использованием сканирующего электронного микроскопа FEI Helios G4. Спектры комбинационного рассеяния света электродов регистрировались на спектрометре Horiba LabRam HR Evolution. Измерение сопротивления образцов проводились с использованием четырехзондового измерительного комплекса Cascade Microtech PM5, подключенного к мультиметру Keysight 34401A.

Результаты и обсуждение

Установлено, что импульсное лазерное воздействие с длиной волны 1064 нм и интенсивностью 15 кВт/см² изменяет морфологию поверхности композита на основе одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и восстановленного оксида графена (ВОГ). Углеродные наноматериалы образуют электропроводящие сети, которые повышают

электропроводность композита. Исследования методом спектроскопии комбинационного рассеяния света выявили увеличение отношения I_D/I_G и, следовательно, образование связей между углеродными наноматериалами в местах дефектов.

Модуль упругости сформированных электродных интерфейсов на основе углеродных гетероструктур составил 180±5,3 кПа, что соответствует модулю упругости человеческой кожи. Сопротивление интерфейсов составило 103±7 кОм при низкой концентрации ОУНТ/ВОГ 0,5/0,5 масс.%. Лазерное воздействие позволило снизить сопротивление в 13 раз до 8±2 кОм. После 7 дней взаимодействия со средой, имитирующей человеческий пот, электродные интерфейсы продемонстрировали более высокую стабильность импеданса (Рисунок 1) по сравнению с традиционными электродами на основе Ag/AgCl (Рисунок 2). Биосовместимость электродных интерфейсов была продемонстрирована путем исследования жизнеспособности клеток фибробластов эмбриона человека (ФЭЧ) на их поверхностях. Согласно результатам исследования, клетки переходили в фазу активного роста с последующим заполнением поверхностей интерфейса.

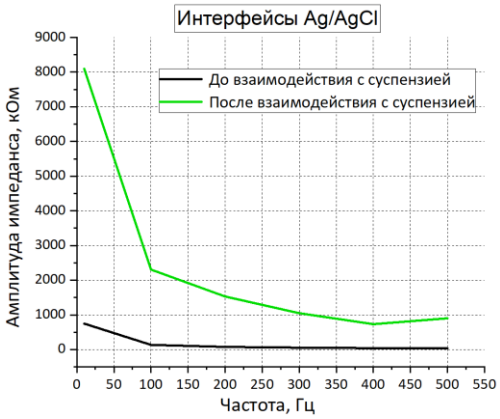


Рис. 1. Зависимость амплитуды импеданса от частоты интерфейсов на основе Ag/AgCl до и после их взаимодействия с суспензией, имитирующей пот человека.

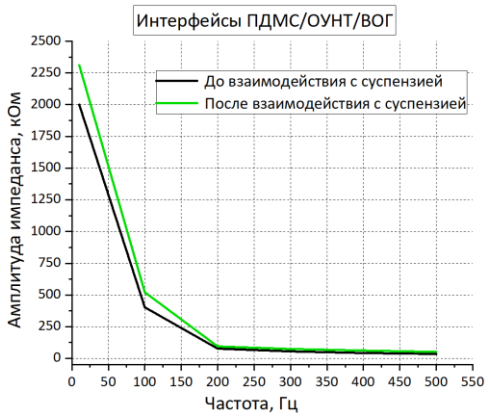


Рис. 2. Зависимость амплитуды импеданса от частоты интерфейсов ПДМС/ОУНТ/ВОГ до и после их взаимодействия с суспензией, имитирующей пот человека.

Заключение

Разработаны электродные интерфейсы на основе гетероструктур из одностенных углеродных нанотрубок и восстановленного оксида графена в матрице полидиметилсилоксана. Лазерное воздействие позволило сформировать связи между углеродными наноматериалами с образованием углеродных гетероструктур. Разработанные интерфейсы продемонстрировали более высокую стабильность импеданса по сравнению с электродами на основе Ag/AgCl. Отсутствие гелевого слоя в сухих интерфейсах является преимуществом по сравнению с коммерческими аналогами при длительном использовании. Полученные результаты подтверждают, что разработанные электродные интерфейсы пригодны для использования в составе носимых устройств, включая устройства для непрерывного мониторинга ЭКГ в течение как минимум 7 дней.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского Научного Фонда (РНФ № 25-29-00938 от 26.12.2024).

Список литературы

[1] A.Y. Gerasimenko, A.V. Kuksin, Y.P. Shaman, E.P. Kitsyuk, Y.O. Fedorova, A.V. Sysa, A.A. Pavlov, O.E. Glukhova. Nanomaterials, **11**(8), 1875 (2021).

[2] A.V. Kuksin, A.S. Morozova, Y.O. Vasilevskaya, E.M. Eganova, K.D. Popovich, A.Yu. Gerasimenko. Diam. Relat. Mater., **159**(A), 112895 (2025).

Автоматизированное формирование волоконно-оптического полимерного датчика температуры на основе интерферометра Фабри-Перо

Э. В. Пермякова[1]✉, **В. А. Шаньгин**[1], **А. Р. Буслаева**[1], **М. А. Чеснокова** [1], **Р. С. Пономарев** [1]

[1] Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия;

✉evelina.v.permyakova@gmail.com

Аннотация. В работе представлен автоматизированный метод изготовления датчика температуры на основе торцевого интерферометра Фабри-Перо. Чувствительным элементом датчика служит часть полимерного «моста». Проверка работоспособности проводилась с помощью оптического анализатора спектра. Благодаря малым размерам датчик может применяться для высокоточных измерений: в биологии — для мониторинга микромасштабных образцов, в медицине — при операциях с использованием мощных лазеров.

Ключевые слова: датчик температуры, оптическое волокно, интерферометр Фабри-Перо, полимерный мост.

Финансирование: Исследование выполнено за счет средств Министерства высшего образования и науки РФ (проект FSNF-2024-0001)

Введение

Основными методами формирования датчиков на основе интерферометра Фабри–Перо являются комбинация нескольких структур фотонно-кристаллических волокон [1] или полых волокон [2]; однако эти компоненты являются весьма специфичными и имеют высокую стоимость, что увеличивает цену конечного продукта.

В данной работе предлагается формировать интерферометр Фабри–Перо на торце оптического волокна из доступного и распространённого фотополимерного материала с использованием простого метода изготовления.

Формирование чувствительного элемента

В качестве материала для чувствительной части датчика температуры используется полимер, прозрачный для видимого света и ближнего ИК-диапазона и отверждаемый под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения. Процесс формирования датчика основан на технике формирования полимерного «моста» [3] между торцевыми поверхностями двух оптических волокон.

Торцы двух одномодовых волокон скалываются под прямым углом и помещаются в держатели (рис.1). Перемещение элементов осуществляется с помощью трёхосных микропозиционеров с точностью 10 мкм с ручным управлением и одного моторизованного 4-осного позиционера производства компании Lassard (Россия) (точность 0,2 мкм), управление которого осуществляется программно.

По изображению с камер 1-2 (рис.1) с помощью нейронной сети, написанной на языке python с использованием библиотеки tensorflow, проводится юстировка оптических волокон друг напротив друга, и записываются координаты их положения.

Нанесение капли полимерного материала на подвижное волокно осуществляется с помощью микродозатора жидкости LongerPump TS-2A. За счет смачиваемости и сил поверхностного натяжения между торцами оптических волокон формируется полимерный «мост». Процесс полимеризации происходит путём пошагового чередующегося облучения УФ источником FUWO (FUV-6L) и разведения оптических волокон. Управление характеристиками УФ источника позволяет контролировать длину, толщину и форму получаемой структуры. Скол полученного полимерного «моста» вблизи одного из торцов волокна обеспечивает формирование «столбика» с прямым торцом. Таким образом, две границы раздела сред: оптическое волокно/полимер и полимер/воздух в совокупности формируют интерферометр Фабри-Перо на торце волокна (рис.2).

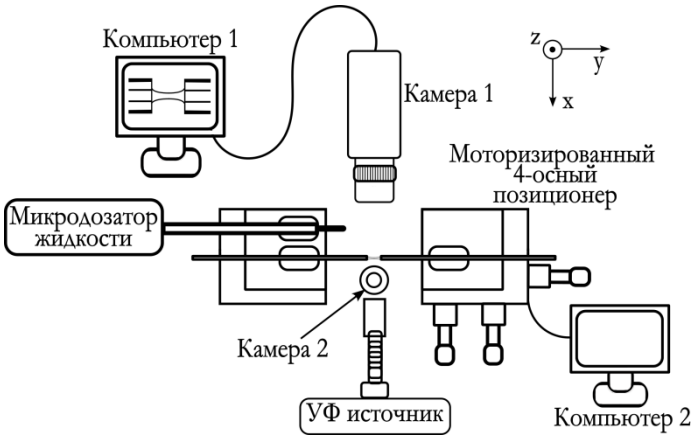


Рис.1. Схема установки

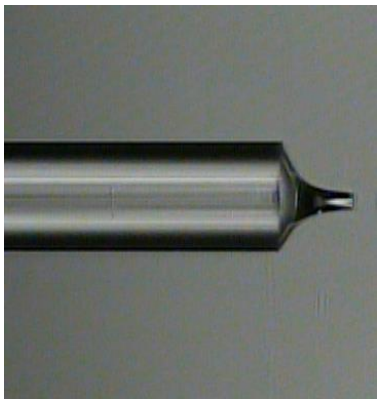


Рис.2. Фото датчика

Результаты и обсуждение

Для опроса датчика была собрана установка (рис.3), позволяющая получить спектр отражения, на котором можно наблюдать наличие интерференции (рис.4).

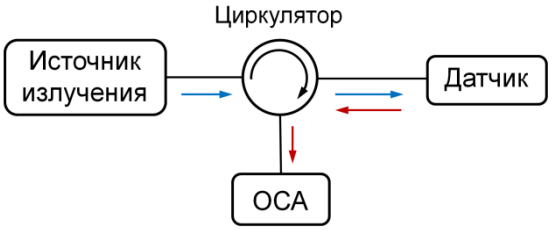


Рис.3. Схема установки опроса

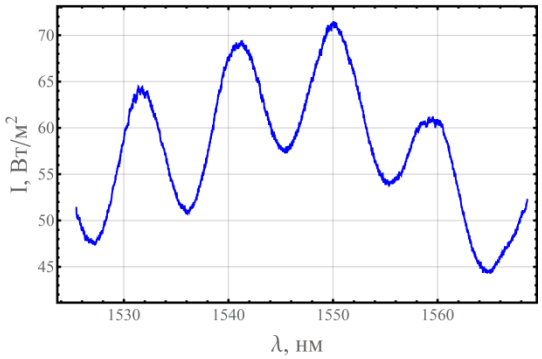


Рис.4. Пример полученного спектра отражения

Пики и провалы, видимые на спектре отражения широкополосного источника излучения Golight OS TL (рис.4), свидетельствуют о правильной работе интерферометра Фабри-Перо, а их смещение при изменении температуры образца позволяет измерить чувствительность предложенного типа датчика [4].

Заключение

Переход к автоматизации обусловлен необходимостью добиться повторяемости параметров. Текущие результаты подтвердили работоспособность датчиков, в дальнейшем планируется улучшить метод, чтобы свести к минимуму различия между отдельными прототипами.

Список литературы

[1] C. Wu, H. Y. Fu, K. K. Qureshi, B.-O. Guan, H. Y. Tam, High-Pressure and High-Temperature Characteristics of a Fabry–Perot Interferometer Based on Photonic Crystal Fiber, в *Opt. Lett.* **36**, pp. 412–414 (2011).

[2] M. S. Ferreira, L. Coelho, K. Schuster, J. Kobelke, J. L. Santos, O. Frazao, Fabry–Perot Cavity Based on a Diaphragm-Free Hollow-Core Silica Tube, в *Opt. Lett.* **36**, p. 4029 (2011).

[3] P. A. Mohammed, W. J. Wadsworth, Long Free-Standing Polymer Waveguides Fabricated Between Single-Mode Optical Fiber Cores, в *J. Light. Technol.* **33**, pp. 4384–4389 (2015).

[4] M. Chesnokova, D. Nurmukhametov, R. Ponomarev, T. Agliullin, A. Kuznetsov, A. Sakhabutdinov, O. Morozov, R. Makarov, Microscopic Temperature Sensor Based on End-Face Fiber-Optic Fabry–Perot Interferometer, в *Photonics* **11**(8), p. 712 (2024).

Полиномиальная и гауссова модели спектральной огибающей как инструмент ранней диагностики ишемической болезни сердца по данным электрокардиографа сверхвысокого разрешения

Е. А. Денисова [1]✉

[1] Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

✉tiranderel@yandex.ru

Аннотация. В статье проводится исследование полиномиальной и гауссовой моделей спектральной огибающей биоэлектрических сигналов при острой ишемии миокарда. На основе данных электрокардиографа сверхвысокого разрешения рассматриваются изменения на этапах стабилизации, ишемии и реперфузии. Показано, что гауссова модель обеспечивает более высокую точность регистрации локальных спектральных изменений, что имеет значение для диагностики. Предложенные методы могут найти применение в клинической практике, способствуя ранней диагностике ишемической болезни сердца и оптимизации лечебных подходов.

Ключевые слова: Электрокардиография сверхвысокого разрешения, аппроксимация, анализ, маркер, ишемическая болезнь сердца.

Введение

Ишемическая болезнь сердца (ИБС) остаётся одной из главных причин смертности в мире [1]. Раннее выявление ишемических изменений в миокарде имеет решающее значение для успешного лечения. Электрокардиосигналы (ЭКС), регистрируемые с помощью электрокардиографа сверхвысокого разрешения, макет которого был разработан на базе лаборатории 235 «Радио- и оптоэлектронных приборов ранней диагностики заболеваний человека» Института аналитического приборостроения Российской академии наук, позволяют анализировать спектральную плотность мощности (СПМ) высокочастотных микропотенциалов, изменения которой могут служить доклиническим маркером ишемии [2].

Однако прямой спектральный анализ электрокардиосигналов сверхвысокого разрешения (ЭКС СВР) осложняется наличием шумов, артефактов и неоднозначностью интерпретации. Для решения указанной проблемы требуется разработка подходов, позволяющих свести исследование изменений СПМ к изучению компактных и интерпретируемых моделей. В данной статье рассматриваются полиномиальная и гауссова модели аппроксимации спектральной огибающей. Целью является создание математического инструмента, обеспечивающего выделение диагностически значимых изменений характеристик ЭКС СВР, что может быть интегрировано в системы мониторинга и ранней диагностики ИБС.

Материалы и методы

Записи ЭКС СВР были полученных в ходе экспериментов по моделированию острой ишемии миокарда на крысах, выполняемых совместно с Институтом экспериментальной медицины им. В. А. Алмазова [3]. Регистрация сигналов осуществлялась с помощью электрокардиографа сверхвысокого разрешения в частотном диапазоне 100–2000 Гц с последующей предварительной фильтрацией для минимизации шумов и артефактов.

Исследовались два метода аппроксимации: полиномиальная и гауссова модели СПМ ЭКС СВР. Первый подход основан на полиномиальной регрессии. Гауссова модель описывает спектральную огибающую через взвешенную сумму 50 нормальных распределений, равномерно распределенных по частотному диапазону, что позволяет учитывать локальные особенности спектра ЭКС СВР и обеспечивает гибкость.

1. Результаты и обсуждение

На рисунках 1 и 2 представлены спектральные огибающие ЭКС СВР, полученные с помощью описанных моделей, на разных стадиях эксперимента (стабилизация, ишемия,

реперфузия). Полиномиальная модель показала хорошую степень соответствия данным, однако полученные результаты свидетельствуют о более высокой точности гауссовой аппроксимации при выявлении тонких локальных изменений в спектре.

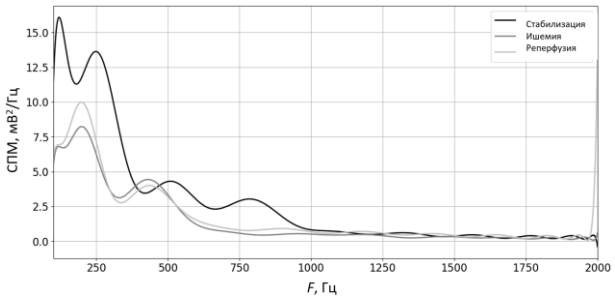


Рис. 1. Пример полиномиальной аппроксимации огибающей спектра ЭКС СВР на этапах эксперимента

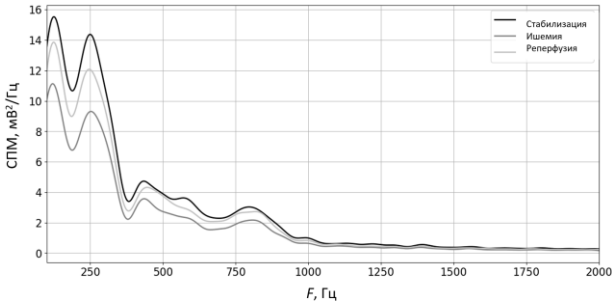


Рис. 2. Пример аппроксимации с помощью гауссовой модели огибающей спектра ЭКС СВР на этапах эксперимента

В таблице 1 представлены статистические показатели, такие как коэффициент детерминации (R^2), значения *AIC* и *BIC* для обеих моделей. Высокие значения R^2, наблюдаемые при гауссовой моделировании, подчеркивают его надежность в сравнении с полиномиальным подходом.

Таблица 1

Сравнительные статистические показатели моделей

Параметр	Тип модели	
	Полиномиальная	Гауссова
R^2	0.991	0.999
AIC	273.3	-136.1
BIC	350.6	47.91

Заключение

Исследование показало, что полиномиальная и гауссова модели спектральной огибающей являются полезными инструментами для ранней диагностики ишемической болезни сердца на основе данных электрокардиографа сверхвысокого разрешения. Гауссовая модель продемонстрировала лучшую способность к улавливанию локальных изменений в спектре и более высокие оценки статистических показателей по сравнению с полиномиальной моделью. Выявленные методы могут быть использованы для разработки новых диагностических инструментов и усовершенствования существующих протоколов лечения.

Благодарности

Финансовая поддержка работы была оказана Минобрнауки РФ, номер гос. регистрации темы 125032604386-2.

Список литературы

[1] Y. Wang, X. Sun, X. Zhang, et al., Global, regional, and national burden of early-onset ischemic heart disease: trends and projections among adults aged 15–44 years from 1990 to 2046, Front. Cardiovasc. Med., 12, 1653335 (2025).

[2] K. V. Zaichenko, A. A. Afanasenko, A. A. Kordyukova, D. O. Shevakov, E. A. Denisova, Cardiocycle Scaling for Ultra-high Resolution Electrocardiography, в Systems and Technologies of the Digital HealthCare (STDH): Proc., 138–141 (2023).

[3] K. V. Zaichenko, A. A. Kordyukova, D. L. Sonin, M. M. Galagudza, Ultra-High-Resolution Electrocardiography Enables Earlier Detection of Transmural and Subendocardial Myocardial Ischemia Compared to Conventional Electrocardiography, Diagnostics, 13(17), 2795 (2023).

Влияние внешней температуры на результат измерения биоимпеданса

В.В. Антипенко [1]✉, **Е. А. Печерская** [1], **Н. С. Шалаев**[1]
[1] Penza State University, Penza, Russia
✉v.antipenko7@yandex.ru

Аннотация. Биоимпедансный анализ остается одним из наиболее доступных методов оценки состава тела в клинической практике и спортивной медицине. Однако точность получаемых данных существенно зависит от множества внешних факторов, которые часто игнорируются при интерпретации результатов. В настоящей работе рассматривается влияние температуры окружающей среды на результат измерений. Представлены математические модели для корректировки измерений, демонстрирующие характер изменений биоэлектрических показателей. Это способствует повышению точности диагностики и разработки персонализированных протоколов мониторинга состава тела. Работа содержит практические рекомендации по стандартизации условий измерения и интерпретации данных с учетом влияния внешней температуры.

Ключевые слова: биоимпеданс, состав тела, внешние факторы, импеданс, температурная зависимость, погрешность измерений.

Введение

Биоимпедансный метод основан на регистрации электрического сопротивления биологических тканей при пропускании через них слабого переменного тока, обычно в частотном диапазоне от 1 до 2000 кГц. Сопротивление определяется соотношением жидкостных сред, клеточных мембран и внеклеточного матрикса. Активное сопротивление (R) характеризует преимущественно водную составляющую, реактивное (X_c) – емкостные свойства клеточных мембран. Классическая формула импеданса Z представляется в следующем виде [1]:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2}. \quad (1)$$

Данная модель не учитывает динамический характер биологических тканей. Исследования последних лет подтверждают, что параметры импеданса изменяются под воздействием температуры на 2,3–2,7% на каждый градус Цельсия [2]. Механизм этого явления связан с изменением вязкости внутри- и внеклеточной жидкости, а также с температурной зависимостью проводимости ионов. На практике температурную зависимость импеданса можно описать уравнением [3, 4]:

$$Z(T) = Z_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (2)$$

где Z_0 – импеданс при базовой температуре T_0 (обычно 36,6°C), α – температурный коэффициент (около –0,024 °C^{-1}).

Материалы и методы

Температура кожных покровов варьируется в зависимости от условий окружающей среды в диапазоне 28–34°C, что существенно влияет на результаты измерений. Практика показывает, что дистальные отделы конечностей (кисти, стопы) обладают более высокой температурной чувствительностью по сравнению с проксимальными. Это объясняется особенностями терморегуляции – периферические сосуды активно участвуют в теплообмене, изменяя свой тонус в ответ на внешние воздействия. Для корректировки температурных артефактов предложена следующая модель:

$$Z_{\text{кор}} = \frac{Z_{\text{изм}}}{1+\beta \cdot T_{\text{кож}}}, \quad (3)$$

где $Z_{\text{кор}}$ – скорректированное значение импеданса, $Z_{\text{изм}}$ – измеренное значение, $T_{\text{кожи}}$ – температура кожи в градусах Цельсия, β – эмпирический коэффициент (от 0,019 до 0,026 °C^{-1} в зависимости от области измерения).

Исследования показывают, что акклиматизация испытуемого в условиях стабильной температуры (от 20 до 22°C) в течение 10–15 минут снижает вариабельность измерений с 8,4% до 2,1%. Интересная картина наблюдается при анализе суточной динамики температуры тела. Минимальные значения регистрируются в 8–10 часов утра (35,8–36,2°C), максимальные – в 16–18 часов (36,8–37,2°C). Это создает систематическую погрешность при сравнении измерений, выполненных в разное время суток.

Таблица 1

Влияние температуры кожи на параметры биоимпеданса

Температура кожи , °C	*Z* , Ом	Относительное изменение *Z*, %
28	772	+5,6
30	754	+3,2
32	731	0 (базовое)
34	720	-1,5
36	705	-3,6

Данные получены на выборке из 20 испытуемых (возраст 18–22 лет, индекс массы тела 18–24 кг/м², данные для частоты 500 кГц).

Результаты и обсуждение

Точность измерения корректирующих параметров сопоставима с величиной самой коррекции, что ограничивает эффективность предлагаемого подхода. Более реалистичной представляется стратегия максимальной стандартизации условий измерения, нежели попытка математической компенсации всех возможных влияний.

Заключение

Внешнее воздействие температуры способно изменять регистрируемые параметры на 5–15%, что сопоставимо с ожидаемыми изменениями состава тела в результате диетических или тренировочных вмешательств. Математическая модель коррекции, представленная в работе, позволяет количественно оценить влияние отдельного фактора и, в ограниченной степени, компенсировать температурную погрешность. Однако более надежной стратегией остается максимальная стандартизация условий измерения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке АО «Альфа – Банк» в рамках программы «Альфа – Будущее Гранты преподавателям».

Список литературы

[1] Ж.В. Куимова, Е.В. Коломиец, Д.Х. Исмаилова Биоимпеданс: применение в клинической медицине *Терапевт*. 2022. № 6. С. 13-17.

[2] О.В. Шаталова, Н.С. Стадниченко, М.А. Ефремов, А.Ю. Новоселов, И.А. Башмакова Развитие технологии биоимпедансной спектроскопии в системах поддержки принятия врачебных решений *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2023. Т. 13. № 1. С. 143-169.

[4] V.V. Antipenko, E.A. Pecherskaya, T.O. Zinchenko, D.V. Artamonov, K.Yu. Spitsina, A.V. Pecherskiy Development of an automated bioimpendance analyzer for monitoring the clinical condition and diagnosis of human body diseases, в сборнике: *JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies*. *Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations.* Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 52075.

[4] V.V. Antipenko, E.A. Pecherskaya, D.E. Tuzova, D.V. Yakushov, D.V. Artamonov, Development of an automated system for measuring bioimpedance for the study of body composition, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 16 (3.2) (2023) 294-300.

Рассеяние ультракоротких лазерных импульсов различной формы на азотистом основании ДНК

А. А. Харламова [1]✉

[1] Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В.Ломоносова, Архангельск, Россия;

✉Kharlamova.anastasya2015@yandex.com

Аннотация. В работе рассмотрены особенности расчета рассеяния ультракоротких лазерных импульсов двух форм: гауссов импульс и импульс «мексиканская шляпа». В качестве примера расчета рассмотрено рассеяние импульса на модели азотистого основания молекулы ДНК аденина. Показано, что существует зависимость получаемых спектров рассеяния от формы импульса.

Ключевые слова: ультракороткие лазерные импульсы, ДНК, аденин, форма импульса.

Введение

В настоящее время для исследования многоатомных молекул применяется дифракционный анализ с использование ультракоротких лазерных импульсов (УКИ). Особый интерес вызывают эксперименты по рассеянию УКИ на молекулах ДНК и РНК. В отличие от кристаллов они имеют более сложную многоатомную структуру, анализ которой другими методами затруднен [1-3]. Обычно в теоретических моделях рассеяние УКИ рассматривают как рассеяние плоских волн бесконечной длительности [4]. При этом влияние формы УКИ на спектры рассеяния изучено недостаточно и обычно считается, что различная форма, в случае многоциклового импульса, не влияет на дифракционную картину, а только на амплитудные значения спектров рассеяния. В данной работе показано, что форма УКИ может сильно влиять на дифракционную картину.

Материалы и методы

Метод расчета основан на теоретическом описании взаимодействия УКИ и молекулы с использованием численного моделирования и модели Дирака–Хартри-Фока-Слейтера [5]:

$$\frac{d^2\varepsilon}{d\Omega_{\mathbf{k}}} = \frac{\tau\left[\mathbf{E}_0\mathbf{n}\right]^2 \int\limits_{-\infty}^{\infty} \left|f(x)\right|^2 dx}{\left(2\pi\right)^2 c^3} \left\langle \sum_{i=1}^{s} N_{e,i} N_{A,i} \left(1-\left|F_i\right|^2\right) + \sum_{i,j=1}^{s} \gamma_{i,j} N_{e,i} N_{e,j} F_i F_j^* \right\rangle, \quad (1)$$

$$\gamma_{i,j} = \sum_{A_i, A_j'} e^{-i\mathbf{p}_0 \Delta\mathbf{R}_{A_i, A_j'}} \beta\left(\mathbf{p}_\tau \Delta\mathbf{R}_{A_i, A_j'}\right), \quad (2)$$

$$\beta\left(\mathbf{p}_\tau \Delta\mathbf{R}_{A_i, A_j'}\right) = \frac{\int\limits_{-\infty}^{\infty} f^*(x - \mathbf{p}_\tau \Delta\mathbf{R}_{A_i, A_j'}) f(x) dx}{\int\limits_{-\infty}^{\infty} \left|f(x)\right|^2 dx}. \quad (3)$$

где $N_{e,i}$ - число электронов i-го атома; $N_{A,i}$ - число атомов i-го типа; $F_i = \frac{1}{N_{e,i}} \int \rho_{e,i}(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{pr}} d^3\mathbf{r}$ = 1 – форм-фактор атома i-го типа с электронной плотностью $\rho_{e,i}(\mathbf{r})$; $\mathbf{p}_\tau$ - импульс рассеяния; $\mathbf{R}_{Ai}$ – радиус-вектор, задающий положение центра атома i-го типа с числом атомов Ai этого типа, при этом параметр $\Delta\mathbf{R}_{A_i, A_j'} = \mathbf{R}_{A_i}(t) - \mathbf{R}_{A_j'}(t)$. Здесь функция $f(x)$ задает форму импульса, в данном расчете используется гауссов импульс $f(x) = e^{-x}$ и импульс «мексиканская шляпа» $f(x) = \left(1-x^2\right)e^{-x^2/2}$.

1. Результаты и обсуждение

В качестве примера рассчитано рассеяние на азотистом основании молекулы ДНК аденине.

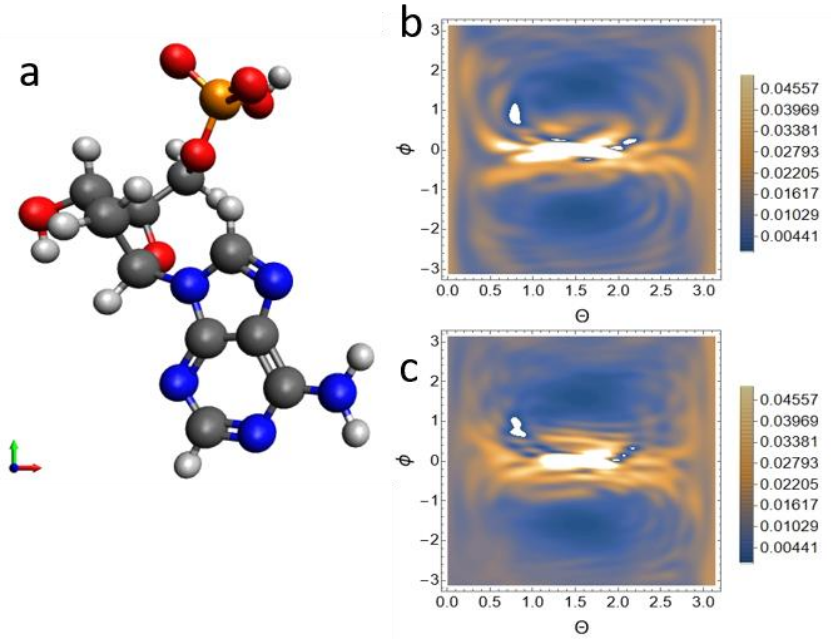


Рис. 1. Результаты теоретического расчета спектров взаимодействия ультрокороткого импульса различной формы с аденином: a форма молекулы; b спектр рассеяния при гауссовом импульсе; c спектр рассеяния при импульсе формы «мексиканская шляпа».

Заключение

Как показали результаты расчета, спектры рассеяния значимо отличаются в зависимости от формы падающего импульса. При этом необходимо учитывать, что расчет был проведен на простейшей структуре ДНК – азотистом основании. Для исследования более крупной структуры, состоящей из большего количества атомов погрешность, вносимая в расчет при отсутствии учета формы импульса, будет иметь значительный вклад в результаты моделирования. Необходимо проводить дальнейшие исследования с целью выявления величины погрешности при расчетах рассеяния импульсов разной формы.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке государственного задания Российской Федерации №FSRU-2024-0005.

Список литературы

[1] Z.S. Derewenda, A. Godzik, The “Sticky Patch” Model of Crystallization and Modification of Proteins for Enhanced Crystallizability Methods in Molecular Biology, в Protein Crystallography. (2017) pp. 77–115.

[2] J. Bernal, D. Crowfoot, X-Ray Photographs of Crystalline Pepsin, в *Nature*. (1934) pp. 794–795.

[3] R. Neutze et al. Potential for biomolecular imaging with femtosecond X-ray pulses в *Nature*. (2000) pp. 752–757.

[4] M.K. Eseev, V.I. Matveev, D.N. Makarov, Diagnostics of Nanosystems with the Use of Ultrashort X-Ray Pulses: Theory and Experiment (Brief Review) в *JETP*. (2021).

[5] D.N. Makarov, A.A. Kharlamova, Scattering of Attosecond Laser Pulses on a DNA Molecule during Its Nicking and Bending в *Int. J. Mol. Sci.* (2023).

Исследование выходных характеристик магнитометрического сенсора для измерения слабых магнитных полей на базе аморфного микроволокна

А. Е. Шепелева [1]✉, М. Д. Новичков [1], С. А. Гурин [1], А. А. Рыжов [1], Е. А. Печерская [2], Д. В. Агафонов [1]

[1] Joint-stock company "Scientific Research Institute of Electronic-Mechanical Devices", Penza, Russia;

[2] Federal State Budgetary Educational Institution "Penza State University", Penza, Russia

✉e-mail@mail.com

Аннотация. В данной статье представлена технология получения аморфных микроволокон с различным составом и диаметром. Аморфное микроволокно использовалось в качестве чувствительного элемента благодаря его высокой чувствительности к магнитному полю. Представлены результаты исследования морфологии поверхности микроволокон на растровой электронной микроскопии. Собраны макеты чувствительных элементов с аморфными микроволокнами разных диаметров: 10 мкм, 30 мкм и 90 мкм, а также исследованы их выходные характеристики на разных частотах.

Ключевые слова: аморфное микроволокно; преобразователь магнитного поля; МЭМС; технология получения; чувствительный элемент.

Введение

Перспективным конструктивным решением для преобразования слабых магнитных полей в электрический сигнал является использование аморфного ферромагнитного микроволокна – тонких стеклянных нитей с металлической жилой из специальных сплавов диаметром от 1 мкм, имеющих особую аморфную и доменную структуры. Изменение сопротивления обусловлено особенностями магнитных свойств материала и на сегодняшний день чувствительность изменения импеданса по отношению к магнитному полю может достигать до 600%/Э. Такое большое изменение импеданса высокочастотным токам в присутствии внешнего магнитного поля – эффект гигантского магнитного импеданса (эффект ГМИ). Он обусловлен высокой динамической восприимчивостью переменного циркулярного магнитного поля, наводимого высокочастотным током, по отношению к изменениям магнитной структуры микроволокна при его перемагничивании.

Современные научно-технические задачи обусловливают интерес к магнитным датчикам со сверхвысокой чувствительностью. Высокая чувствительность к внешнему магнитному полю за счет эффекта ГМИ позволяет создавать датчики, основанные на нем. ГМИ-датчики магнитного поля превосходят обычные магнитные датчики, феррозондовые, датчики анизотропного или гигантского магнитосопротивления по высокому уровню чувствительности, скорости отклика и низкому энергопотреблению [1].

ГМИ-датчики имеют потенциал для применений в самых различных областях, но наибольший интерес они представляют в медицине для регистрации магнитных полей от различных органов (магнитная кардиография). В случае их миниатюрного исполнения ГМИ-элементы могут быть использованы для кардиографов-имплантатов и портативных устройств.

Материалы и методы

Аморфное микроволокно на основе Со имеет более высокую скорость изменения импеданса, чем аморфная лента и аморфная пленка, поэтому оно является наиболее подходящим чувствительным материалом для ГМИ-датчика. Преимуществом аморфного микроволокна на основе Со для эффекта ГМИ, изготавливаемого по методу Улитовского-Тейлора, является высокая поперечная проницаемость, обусловленная поперечно ориентированной конфигурацией доменов [2].

Учитывая преимущества аморфного микроволокна, разработка на их основе конструктивно-технологических решений для создания высокочувствительных преобразователей магнитного поля является актуальным направлением развития.

Исследования проведены на образцах аморфного сплава Co + (Fe,Ni) + (Cr,Mo,Nb,Ta,W) + B,Si, а также с добавками Ga и Ge в виде проводов цилиндрической формы длиной 12 мм диаметрами 10 мкм, 30 мкм и 90 мкм.

Температуру сплавов поддерживали во всех случаях – 1100 ± 40 ºС. Контроль температуры осуществляли пирометром. Сопротивление аморфного микроволокна контролировали омметром. Среднюю скорость вытяжки поддерживали – 4 м/с. При этом для провода диаметром 10 мкм скорость – 5 м/с, для провода диаметром 30 мкм скорость – 4 м/с, для провода диаметром 90 мкм скорость – 3 м/с.

Результаты и обсуждение

Для получения выходных характеристик была разработана схема измерений, приведенная на рисунке 1.

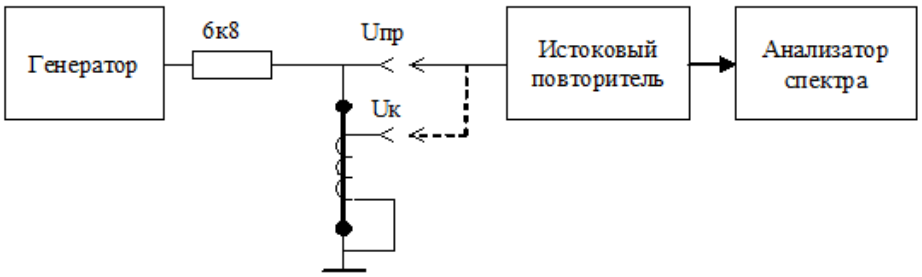


Рис. 1. Схема измерений.

Получены вольт-эрстедные характеристики макетных образцов с аморфными микроволокнами диаметра 10 мкм, 30 мкм и 90 мкм соответственно. Выходной сигнал измеряли на частотах, на которых наблюдалась максимальная чувствительность микроволокна. При этом макеты преобразователей имеют одинаковые геометрические размеры.

Для оценки влияния напряжения питания на магнитные свойства аморфного микроволокна производили контроль чувствительности к магнитному полю макетного образца при фиксированной величине внешнего магнитного поля.

Заключение

В данной работе была представлена технология получения аморфных микроволокон с различным составом и диаметром. Аморфное микроволокно было интегрировано в чувствительные элементы с помощью технологии МЭМС (микроэлектромеханической системы), затем были измерены их выходные характеристики. Установлено, что наиболее технологичным решением является применение аморфного микроволокна наименьшего диаметра. Частота питающего напряжения подбиралась по максимальному выходному напряжению с микрокатушки с помощью разработанной электрической схемы и системы калибровки магнитного поля.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и электронных устройств» (№ 124041700069-0).

Список литературы

[1] Bichurin, M.; Petrov, R.; Sokolov, O.; Leontiev, V.; Kuts, V.; Kiselev, D.; Wang, Y. Magnetoelectric Magnetic Field Sensors: A Review. Sensors 2021, 21, 6232. https://doi.org/10.3390/s21186232.

[2] V. Lobekin, R. Petrov. Magnetoelectric sensor for measuring weak magnetic biological field// IOP Conference Series Materials Science and Engineering 441(1):012035. https://doi.org/10.1088/1757-899X/441/1/012035.

Методика обработки сигналов плавления ДНК, основанная на удалении базовой линии

Р. Р. Морозов [1], **А. Л. Буляница** [1], **Д. А. Белов** [1]✉

[1] Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация;

✉belov.da@list.ru

Аннотация. Предложена методика обработки сигналов плавления ДНК, основанная на методе удаления из сигнала экспоненциального фона и обладающая высоким уровнем автоматизации для обработки больших выборок.

Ключевые слова: Плавление ДНК, флуоресценция, High-Resolution Melting, базовая линия

Введение

Метод плавления высокого разрешения (High-Resolution Melting, HRM) позволяет быстро и экономично анализировать вариации в последовательностях ДНК с высокой точностью [1]. Приборы, реализующие метод HRM, измеряют интенсивность флуоресцентного отклика красителей, находящихся в исследуемых образцах, и формируют сигналы плавления – графики зависимости интенсивности флуоресценции от температуры.

Существуют различные методики обработки сигналов плавления ДНК, состоящие, как минимум, из двух этапов: (i) определения и удаления базовой линии - неинформативного фонового сигнала и (ii) нормализации. Наиболее распространенными подходами к реализации первого этапа являются [2]:

- метод базовой линии, основанный на определении углов наклона линейных участков;
- метод удаления экспоненциального фона, основанный на определении экспоненциальной функции.

Общим в обоих методах является необходимость определения значений температур начала и конца плавления ДНК. Наиболее точным из известных вариантов определения этих значений является построение касательных к первой производной сигнала плавления по температуре. Существенный недостаток этого метода, препятствующий его автоматизации, — сильное влияние шумов и шага дискретизации температуры на точность определения искомых температур. Одним из вариантов уменьшения влияния этих факторов является аппроксимация, однако аппроксимация всего сигнала плавления приводит к искажению его формы, особенно, в случае выявления гетерозиготных мутаций. В работе предложена новая методика обработки сигналов плавления ДНК, основанная на аппроксимации участков сигнала в окрестностях температур начала и конца плавления и определении на их основе базовой линии.

Материалы и методы

Вследствие небольшой длины анализируемых участков и их детерминированной формы для аппроксимации предложено использовать полиномиальную функцию второй степени. Для определения границ участков в окрестности искомых температур предложено внутренние границы определять с помощью поиска экстремумов второй производной, а внешние границы - с помощью системы штрафов, подобной критерию Акаике [3]. Предусмотрены два вида штрафов: штраф за использование ресурса, то есть длины анализируемого участка, и штраф за сдвиг анализируемого участка относительно начального положения. Значимость штрафов учитывается в соотношении 2:1 соответственно. Подходящие участки выбираются из всех возможных вариантов по критерию максимума коэффициента детерминации R^2, а оптимальный из них определяется по критерию минимума суммарного штрафа.

Значения температур начала и конца плавления ДНК определяются с помощью построения касательной к анализируемым участкам, при этом критерием выбора служит минимальный угол наклона касательной относительно оси абсцисс.

Предложенная методика была реализована на языке Python с использованием как общедоступных библиотек, так и специальных функций.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 изображён результат работы фрагмента программы, реализующего предложенный подход к определению температур начала и конца плавления ДНК. Температуры определены с точностью до второго знака после запятой. Оба анализируемых участка смещены относительно положения, определяемого по экстремумам второй производной.

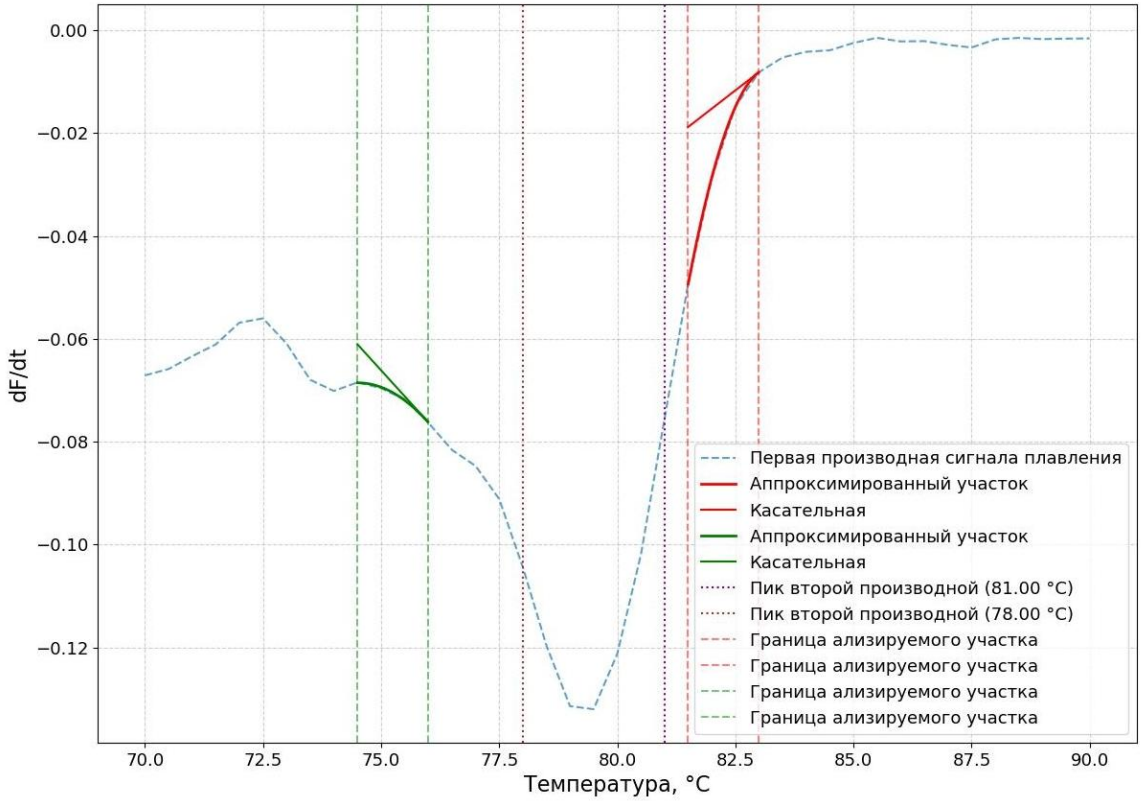


Рис. 1. Результат определения температур начала и конца плавления

Выполнено сравнение предложенной методики с известной на выборках экспериментальных и имитационных сигналов плавления. Выявлено преимущество предложенной методики, обусловленное более точным определением температур начала и конца плавления ДНК.

Заключение

Предложенная методика обработки сигналов плавления ДНК показала преимущества по сравнению с известной методикой и продемонстрировала высокую степень автоматизации. Методику целесообразно реализовать в виде программы, адаптированной под использование экспериментальных сигналов плавления, полученных с коммерческих приборов различных производителей.

Список литературы

[1] N. Kim, J. S. Kwon, W. H. Kang, S. I. Yeom. Methods Mol Biol., 2638, 337–349 (2023).
[2] R. Palais, C.T. Wittwer. Methods Enzymol., 454, 323–343 (2009).
[3] H. Akaike, B.N. Petrov, F. Csaki. Second International Symposium on Information Theory, 267–281 (1973).

Исследование чувствительности метода кругового дихроизма для определения конформационных изменений структур терапевтических пептидов

А.Д. Микушина[1], И.Е. Елисеев[1,2]
[1] Алферовский университет, г. Санкт-Петербург, Россия;
[2] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Санкт-Петербург, Россия
✉annamikushina303@gmail.com

Аннотация. Определение вторичной структуры белков — важная задача в фармакологии, поскольку небольшие конформационные изменения в белках могут сильно влиять на их функцию. Оптическая анизотропия позволяет использовать для этой цели круговой дихроизм (КД) в дальнем УФ-диапазоне, однако для крупных белков этот метод не всегда чувствителен. В данной работе проверено, сохраняется ли это ограничение для более простых молекул — терапевтических пептидов — на примере агонистов рецептора GLP-1 тирзепатида и семаглутида. Сравнение спектров прямым методом (доверительный интервал 2σ) и по корреляционным коэффициентам показало, что для пептидов небольшие конформационные изменения достоверно определяются методом КД. Это позволяет рассматривать КД как инструмент контроля качества пептидных лекарственных средств.

Ключевые слова: спектроскопия, круговой дихроизм, вторичная структура, пептиды

Введение

Круговой дихроизм (КД) — альтернатива трудоёмким методам анализа структуры белков (рентгеноструктурный анализ, крио-ЭМ, ЯМР). Однако часто спектры КД недостаточно чувствительны к конформационным изменениям крупных белков, содержащих несколько доменов [1,2]. В то же время фармацевтический рынок всё активнее осваивает лекарственные средства на основе более простых коротких пептидов. Это делает пептиды потенциально привлекательным объектом для КД-анализа, однако обработка данных КД требует статистически обоснованных подходов, а единый стандарт такой обработки до сих пор не выработан [3]. В связи с этим цель настоящей работы — на примере пептидов тирзепатида и семаглутида проверить, позволяет ли сочетание прямого сравнения спектров и корреляционных коэффициентов надёжно детектировать конформационные различия в пептидах, что необходимо для применения КД в контроле качества пептидных препаратов.

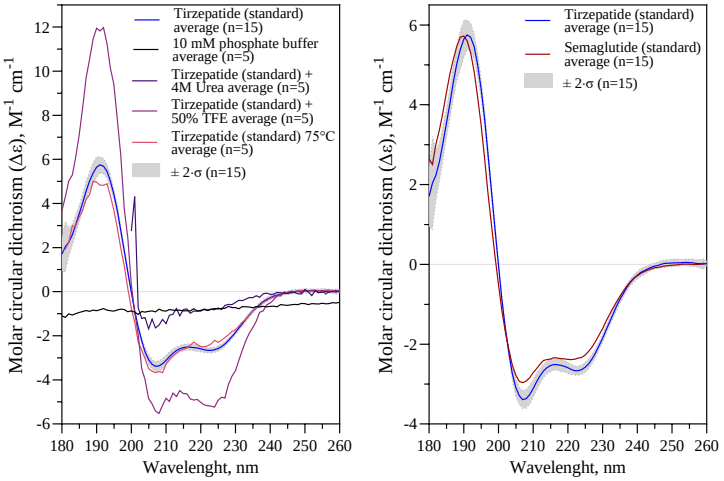
Материалы и методы

Спектры КД измерены на приборе Chirascan в диапазоне 180–260 нм (кювета 0,01 см) для сертифицированных стандартов тирзепатида и семаглутида в 10 мМ фосфатном буфере pH 7,4. Измерения образцов выполнены тремя операторами в разные дни для оценки прецизионности. Помимо нативных условий, образцы тирзепатида изучены при 75°C, а также в присутствии 4 М мочевины и 50% TFE. Для последующего анализа первичная обработка спектров проведена путём вычитания базовой линии и сглаживания (Савицкий–Голай, 5 точек). Сравнение проведено двумя методами: прямым сопоставлением сигнала в каждой точке с построением доверительного интервала 2σ [4] и расчётом корреляционных метрик (коэффициенты Пирсона, Престрельски, перекрытия площадей и корреляции производных DCA) [5].

Результаты и обсуждение

Проведён сравнительный анализ спектров КД стандартного образца тирзепатида и того же пептида в условиях термической (75°C) и химической денатурации (мочевина), индукции α-спиральности (TFE), а также пептида семаглутида. Прямое сравнение спектров с построением доверительного интервала 2σ показало статистически значимые различия для всех модифицированных образцов и семаглутида относительно стандарта как указано

на рисунке 1. Дополнительный корреляционный анализ (Пирсон, Престрелски, перекрытие площадей, DCA) подтвердил эти результаты, выявив градацию конформационных изменений от умеренных (нагрев, TFE) до выраженных (мочевина). Таким образом, КД с предложенной статистической обработкой позволяет надёжно детектировать структурные изменения пептидов и перспективен для фармацевтического контроля качества.



	Pearson	Prestrelski	DCA	Area of Overlap
Tirzepatide vs Tirzepatide	0,9984 ± 0,0012	0,9979 ± 0,0014	0,992 ± 0,0064	0,9845 ± 0,0041
Tirzepatide vs Semaglutide	0,9908 ± 0,002	0,9904 ± 0,0021	0,9709 ± 0,0107	0,9360 ± 0,0055
Tirzepatide vs Tirzepatide + TFE	0,9953 ± 0,0009	0,9935 ± 0,001	0,9796 ± 0,0056	0,9499 ± 0,0048
Tirzepatide 20°C vs Tirzepatide 75°C	0,9923 ± 0,0023	0,99 ± 0,0032	0,9544 ± 0,0165	0,9380 ± 0,0102
Tirzepatide vs Tirzepatide + Urea	0,9362 ± 0,0102	0,9689 ± 0,008	0,7280 ± 0,0434	0,8822 ± 0,0113
Tirzepatide vs Buffer	-0,1136 ± 0,062	0,0211 ± 0,0135	0,0641 ± 0,0242	0,4454 ± 0,0039

Рис. 1. Спектры КД тирзепатида в нативных и модифицирующих условиях (слева) и семаглутида (справа). Ниже указаны значения коэффициентов корреляции относительно стандартного образца тирзепатида.

Заключение

Показано, что метод КД в сочетании с прямым сравнением спектров и корреляционным анализом позволяет надёжно детектировать конформационные различия между близкородственными пептидами (тирзепатид, семаглутид), а также структурные изменения образца, вызванные влиянием температуры, мочевины и TFE. Характерные для крупных белков ограничения применимости КД не проявляются для пептидов, что позволяет рассматривать метод как инструмент фармацевтического контроля качества.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова (тема № FSRM-2026-0027).

Список литературы

[1] O. Leka, F. Vallese, M. Pirazzini, P. Berto, C. Montecucco, G. Zanotti. FEBS J. **281** (9). 2115–2122 (2014).
[2] G. Stockdale, B.M. Murphy, J. D'Antonio, M.C. Manning, W. Al-Azzam. J. Pharm. Sci. **104** (1). 25–33 (2015).
[3] C. Jones. J. Pharm. Biomed. Anal. **219**. 114945 (2022).
[4] H. Bierau, A. Perrett, C. Johnson, R. O'Brien. Bioprocess Int. (6). 52–59 (2008).
[5] B.M. Teska, J. Li, S.R. Krishnan, T.W. Randolph, J.F. Carpenter. Anal. Biochem. **434** (1). 153–165 (2013).

Моделирование неканонического пути активации рецептора CCR6 пептидом врожденного иммунитета β-дефенсином 1

А.Ю. Полевщиков[1], И.Е. Елисеев[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург, Россия;
[2] Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия
✉aypolevschikov@edu.hse.ru

Аннотация. Представлен подход для моделирования возможного неканонического пути активации хемокинового рецептора CCR6 пептидом врожденного иммунитета β-дефенсином 1. β-дефенсины человека активируют CCR6-зависимый хемотаксис, однако их взаимодействие с рецептором CCR6 остается неизученным. Конформации CCR6 были получены с помощью подходов на базе AlphaFold. Полученные модели анализировались по структурному соответствию активным и неактивным экспериментальным структурам рецептора. Отобранные конформации рецептора использовались для моделирования комплексов CCR6 с лигандом CCL20, которые были проверены на соответствие экспериментальной структуре с помощью DockQ и карт контактов, после чего модели применялись для предсказания потенциальных комплексов CCR6 с β-дефенсином 1.

Ключевые слова: CCR6, hBD1, активация GPCR, AlphaFold, моделирование

Введение

CCR6 — это хемокиновый рецептор, сопряженный с G-белком, который участвует в миграции иммунных клеток. Его канонический лиганд, CCL20, индуцирует CCR6-зависимый хемотаксис и способствует привлечению иммунных клеток в очаги воспаления. Экспериментально установленная структура комплекса CCR6-CCL20 выявила необычный механизм активации рецептора, при котором CCL20 связывается в неглубоком кармане и аллостерически вызывает перестройку неканонического «переключателя» [1]. β-дефенсины человека представляют собой небольшие пептиды врожденного иммунитета, известные в основном своей прямой антимикробной активностью. Помимо этого что они индуцируют хемотаксис иммунных клеток через CCR6-зависимый механизм [2]. Это позволяет предположить, что β-дефенсины могут участвовать во взаимодействии между врожденным и адаптивным иммунным ответом. Однако структурные основы распознавания CCR6 дефенсинами остаются неясными. В частности, на данный момент нет экспериментально расшифрованной структуры комплекса CCR6 с дефенсином. В данной работе моделирование на базе AlphaFold использовалось для анализа возможных состояний рецептора и способов связывания лигандов, участвующих в активации CCR6 [3].

Материалы и методы

Конформации CCR6 получены с помощью AlphaFold2 с использованием различной глубины множественного выравнивания (MSA) и метода SPEACH_AF. Модели рецептора были выровнены по трансмембранному ядру и сопоставлены с активной и неактивной эталонными структурами CCR6 по среднеквадратичному отклонению атомов Cα (RMSD). Дополнительно были проанализированы внутримолекулярные контакты, связанные с активацией, для классификации моделей на активные и неактивные состояния. Отобранные конформации CCR6 затем использовались для моделирования комплексов CCR6-CCL20. Предсказанные комплексы были кластеризованы и проверены на соответствие экспериментальной структуре CCR6-CCL20 с использованием DockQ и карт контактов аминокислотных остатков. Состояния рецептора и способы связывания, наиболее соответствующие экспериментальному комплексу, в дальнейшем применялись для предсказания потенциальных комплексов CCR6 с дефенсином.

Результаты и обсуждение

Полученные модели CCR6 имеют широкое распределение конформаций относительно активной и неактивной экспериментальных структур (Рис. 1). Это указывает на то, что подходы на базе AlphaFold позволяют проводить сэмплинг различных конформационных состояний рецептора, включая структуры, смещенные в сторону активного комплекса CCR6-CCL20. Таким образом, анализ на основе RMSD может использоваться в качестве первого этапа отбора для выявления конформаций рецептора, подходящих для дальнейшего моделирования комплексов. Для повышения надежности этого отбора карта RMSD была дополнительно рассмотрена совместно с внутримолекулярными контактами в трансмембранном ядре, связанными с активацией. Выбранные состояния рецептора в дальнейшем использовались для моделирования комплексов CCR6-CCL20, которые являются способом валидации подхода за счет наличия экспериментальной структуры.

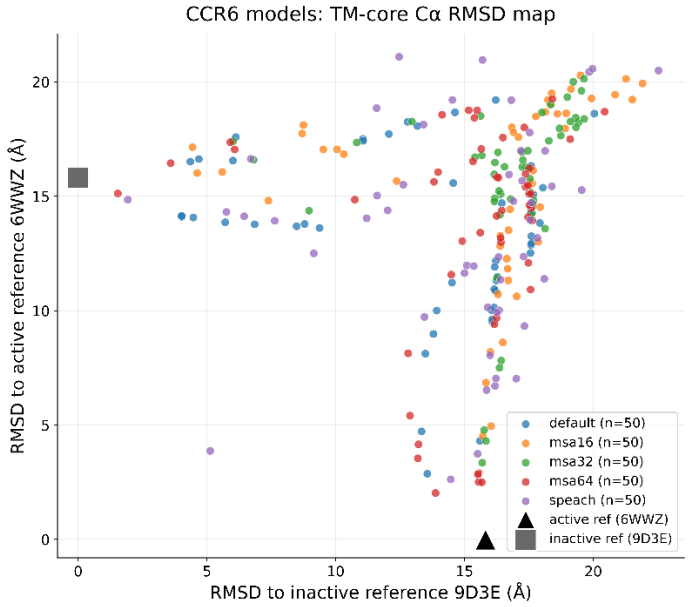


Рис. 1. Конформационное распределение моделей рецептора CCR6, полученных с помощью AlphaFold2 с различной глубиной множественного выравнивания (MSA) и с использованием метода SPEACH_AF.

Заключение

Подходы на базе AlphaFold способны генерировать разнообразные конформации рецептора CCR6, включая состояния подобные активным. Анализ RMSD в сочетании с изучением связанных с активацией внутримолекулярных контактов позволяет отобрать качественные модели CCR6 для последующего предсказания комплексов рецептор-пептид. Представленный подход представляет основу для последующего предсказания и анализа потенциальных комплексов CCR6 с β-дефенсином 1.

Благодарности

Работа выполнена в рамках научно-учебной группы структурной биологии в НИУ ВШЭ (проект № 26-00-067)

Список литературы

[1] D.J. Wasilko, Z.L. Johnson, M. Ammirati, Y. Che, M.C. Griffor, S. Han, H. Wu. Nat. Comm. **11**. 3031 (2020).

[2] D. Yang, O. Chertov, S.N. Bykovskaia, Q. Chen, M.J. Buffo, J. Shogan, M. Anderson, J.M. Schröder, J.M. Wang, O.M.Z. Howard, J.J. Oppenheim. Science **286**(5439). 525-528 (1999).

[3] J. Jumper, R. Evans, A. Pritzel, T. Green, M. Figurnov, O. Ronneberger et al. Nature **596**. 583-589 (2021).

Влияние предварительной озонации кремниевых пластин на однородность нанесения калибровочных микросфер

Е. Е. Корякова [1,2✉], **Р. М. Гиниятуллин** [1,2], **А. Н. Строкачук** [2], **А. М. Исляйкин** [2]

[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Россия, Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., 9.

[2]АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

✉ekoryakova@niime.ru

Аннотация. Исследовано влияние предварительной озонации поверхности кремниевых пластин на равномерность нанесения калибровочных латексных микросфер (Ø 300 нм). Показано, что обработка озоном повышает гидрофильность поверхности, минимизируя капиллярную агломерацию частиц при высыхании суспензии.

Ключевые слова: Латексные сферы, озонация поверхности, гидрофилизация, агломерация частиц, распределение Джонсона.

Введение

В современном производстве микроэлектроники одним из важнейших экономических показателей является выход годных кристаллов, который напрямую зависит от уровня дефектности, генерируемой в технологических процессах производства интегральных схем. В первую очередь контролируется механическая дефектность (микрочастицы). Для обнаружения и классификации частиц в микроэлектронике используются лазерные анализаторы поверхности. С развитием уровня технологий критерии по минимальному размеру и количеству частиц ужесточаются [1], что влечет за собой повышение требований к качеству калибровки анализаторов.

Для калибровки сканирующих лазерных анализаторов по размерам частиц традиционно применяются эталонные кремниевые пластины с нанесенными монодисперсными латексными микросферами заданного диаметра. Ключевой проблемой при жидкостном нанесении микросфер является естественная гидрофобность кремния. Поэтому при высыхании капли капиллярные силы стягивают частицы в агломераты, которые дают отличающийся для данного диаметра микросфер оптический отклик что искажает калибровку прибора.

Целью данной работы являлось исследование влияния предварительной озонации поверхности кремниевых пластин на качество формирования монослоя микросфер.

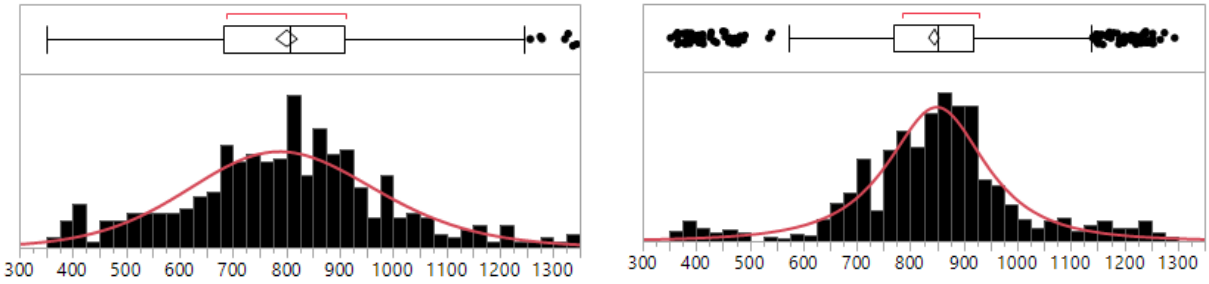
Материалы и методы

Нанесение микросфер осуществлялось на поверхность кремневой пластины из водной суспензии латексных микросфер диаметром 300 нм. Эксперимент проводился для двух групп образцов: без подготовки поверхности и с предварительной обработкой пластины в УФ-озонаторе (UV-Ozone Cleaner, Zhengzhou CY Scientific Instrument CO., Китай). Обработка проводилась в течении 2 мин УФ излучением с длинами волн 185 нм и 254 нм при комнатной температуре. Целью являлось разрушение органических загрязнений и гидрофилизация поверхности для обеспечения равномерного растекания капли и предотвращения агрегации частиц [2].

Измерение оптического отклика (интенсивности лазерного отражения) от поверхности пластин с нанесенным монослоем микросфер проводилось на лазерном анализаторе частиц (Нанорефлекс CLSM», ООО «Рефлекс лайт», Россия). Для аппроксимации эмпирических гистограмм применялось непрерывное распределение Джонсона S_U (Johnson Unbounded) [3]. Данная математическая модель характеризуется четырьмя параметрами: γ (форма/асимметрия), δ (форма/эксцесс), θ (локация) и σ (масштаб/разброс), что позволяет высокоточно описывать несимметричные выборки с наличием экстремальных выбросов.

Результаты и обсуждение

Сравнение гистограмм интенсивности отражения (Рис. 1) выявило радикальные изменения в характере рассеяния света в зависимости от подготовки подложки. Для образца без предварительной обработки поверхности (Рис. 1(а)) параметры аппроксимации Джонсона S_U составили: $\gamma = -0.341$, $\delta = 2.589$, $\theta = 733.19$, $\sigma = 472.95$. Высокое значение параметра масштаба указывает на широкий разброс интенсивности фиксируемого сигнала. Значение параметра асимметрии γ математически описывает выраженный левый «хвост» распределения. Физически смысл данного эффекта заключается в наличии капиллярных агломератов: кластеры слипшихся частиц обладают сложной геометрией и генерируют хаотичный, усиленный оптический отклик по сравнению с равномерно распределенными на поверхности пластины одиночными сферами.



а) б)

Рис. 1. Гистограммы распределения интенсивности отражения: а) пластина без предварительной обработки, Б) пластина, обработанная в УФ-озонаторе.

Применение озонации привело к кардинальной трансформации профиля распределения (Рис. 1(б)). Параметр масштаба σ снизился в 4 раза – до 117.34. Это доказывает существенное сужение разброса интенсивности отражения: монослой сформирован однороднее, частицы лежат изолированно, генерируют стабильный лазерный отклик. Ключевым маркером устранения дефектов агрегации стало изменение параметра формы до $\gamma = 0.042$, а само распределение приобрело практически идеальную симметрию. Это подтверждает успешное подавление эффекта капиллярного слипания сфер за счет гидрофилизации поверхности. Сопутствующее изменение параметра эксцесса δ (до 1.08) и смещение параметра локации θ (до 852.17) математически отражают консолидацию сигнала вокруг единого базового уровня, характерного строго для целевой сферы (Ø 300 нм).

Заключение

В ходе работы доказано, что гидрофилизация поверхности кремниевых пластин в УФ-озонаторе является важным этапом при создании качественных калибровочных образцов. Статистический анализ с применением распределения Джонсона S_U подтвердил, что озонация снижает разброс оптического сигнала в 4 раза и устраняет асимметрию гистограммы, вызванную агломерацией. Предложенный метод подготовки подложек обеспечивает хорошую однородность монослоя сфер. Это увеличивает точность калибровки лазерных анализаторов, гарантирует корректную классификацию частиц по размерам, обеспечивает быстрое выявление источников загрязнений и, как следствие, способствует повышению выхода годных полупроводниковых приборов.

Список литературы

[1] Красников Г. Я., Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм, Наноиндустрия Т. 13. No. S5-1(102) (2020), 13-19.

[2] Раводина А. М., Зюзин С. С., Резванов А. А., Исследование влияния параметров образцов, полученных атомно-слоевым осаждением, на фазовый состав слоев оксидов металлов // Москва: Рекламно-издательский центр "Техносфера", 2025 – С. 1142-1143.

[3] Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 357 - 368 с.

Лазерная постобработка деталей из AlSi10Mg, изготовленных методом селективного лазерного плавления

М. Салхаб [1✉], **С. А. Квашнина** [1], **В. А. Парфенов** [1,2], **В. И. Альмяшев** [1,3], **И. И. Михайлов** [1]

[1] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия;

[2] Санкт-Петербургский институт истории РАН, Санкт-Петербург, Россия;

[3] АО «НИТИ им. А.П. Александрова», Сосновый Бор, Ленинградская область, Россия

✉mhmadsalhab@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены методы постобработки образцов из сплава AlSi10Mg, изготовленных методом селективного лазерного плавления (SLM), с целью снижения шероховатости поверхности. Исследованы гидроабразивная, лазерная и комбинированная обработка. Средняя арифметическая шероховатость R_a исходной поверхности составляла 4,15 мкм. После гидроабразивной обработки значение R_a снизилось до 1,0 мкм, после лазерной полировки - до 0,458 мкм, а при последовательном сочетании двух методов - до 0,27 мкм. Показано, что комбинированная постобработка наиболее эффективна для выравнивания поверхности AlSi10Mg SLM-деталей.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, AlSi10Mg, лазерная полировка, постобработка, шероховатость поверхности.

Введение

Технология селективного лазерного плавления широко применяется для изготовления металлических деталей сложной формы, востребованных в аэрокосмической, медицинской, машиностроительной и энергетической отраслях. Однако поверхность таких изделий часто характеризуется высокой шероховатостью вследствие неравномерного теплового воздействия, эффекта комкования (balling effect) и прилипания нерасплавленных частиц порошка [1]. Это ухудшает геометрическую точность и эксплуатационные свойства изделий, поэтому постобработка является необходимым этапом. Одним из наиболее распространенных методов постобработки является механическая обработка, однако для SLM-деталей она имеет ряд ограничений, обусловленных сложностью их геометрии и затрудненным доступом инструмента к отдельным участкам поверхности [2]. Поэтому для решения данной проблемы в работе были рассмотрены механический и лазерный подходы к постобработке.

Материалы и методы

В работе использовали тестовые образцы размером 10×10×30 мм из алюминиевого сплава AlSi10Mg, изготовленные методом SLM в вертикальной ориентации. Начальная шероховатость поверхности составляла 4,15 мкм. Для измерений применяли стилусный профилометр NORGAU NSRT-100, в качестве основного параметра шероховатости был выбран параметр R_a. Исследованы три варианта постобработки: гидроабразивная полировка, лазерная полировка и их последовательное сочетание. Лазерную обработку образцов проводили с использованием волоконного лазерного источника MFSQ-150/1500W в квазинепрерывном режиме.

1. Результаты и обсуждение

Гидроабразивная обработка обеспечила снижение шероховатости до 1,0 мкм, однако результат зависел от режима ручной обработки. Лазерная полировка при мощности излучения 900 Вт, частоте следования импульсов 500 Гц и длительности импульса 40 мкс позволила получить более стабильное качество поверхности и снизить R_a до 0,458 мкм. Наилучший результат достигнут при комбинированной схеме: предварительное удаление крупных неровностей гидроабразивной обработкой и последующее лазерное

выравнивание. В этом случае средняя шероховатость уменьшилась до 0,27 мкм. Следовательно, сочетание двух методов является наиболее эффективным для постобработки SLM-деталей из AlSi10Mg. На рисунке 1 представлены РЭМ-изображения поверхности образца до и после обработки различными методами.

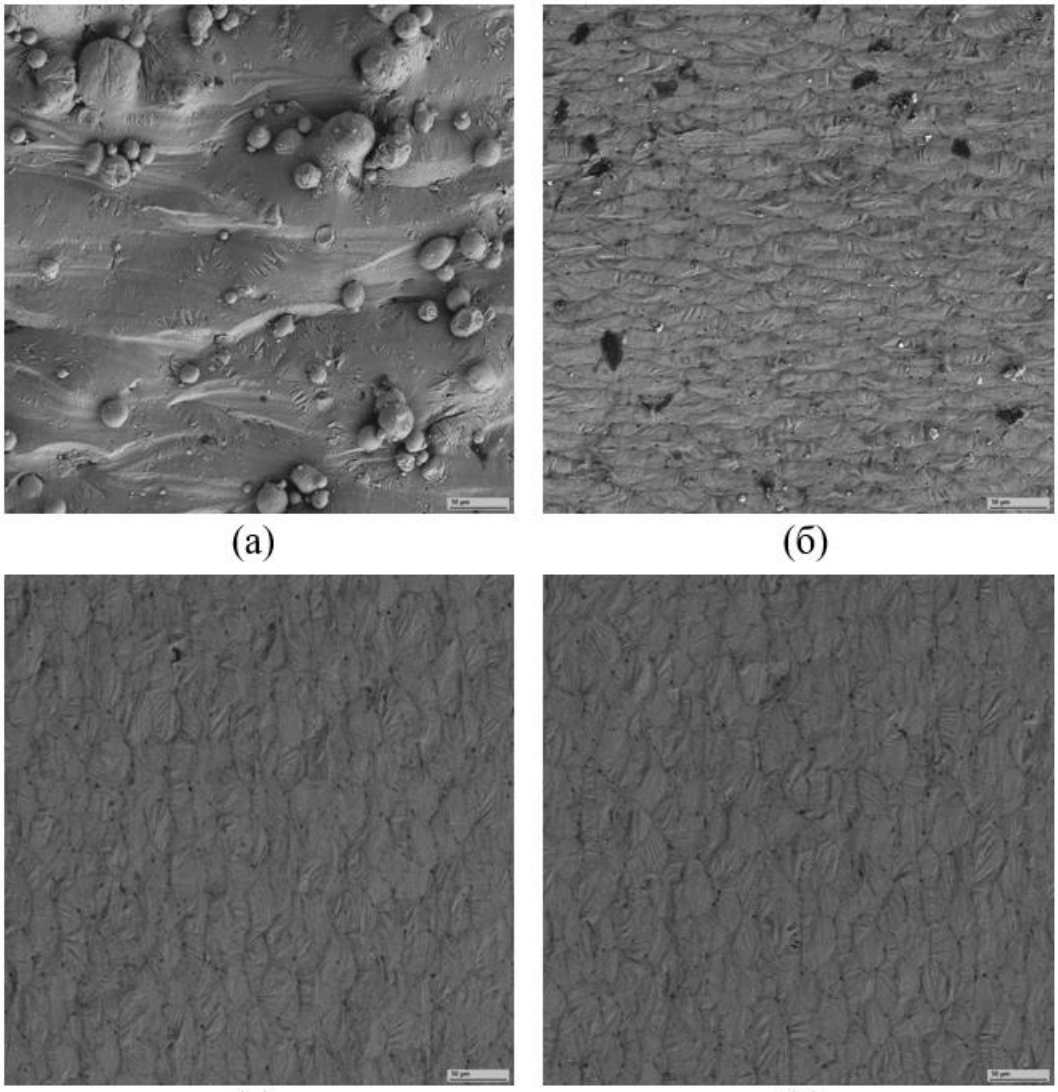


Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности алюминиевого образца (увеличение 200×, масштаб 50 мкм): а) до обработки, б) после гидроабразивной обработки, в) после лазерной полировки, г) после комбинированной гидроабразивной и лазерной обработки.

Заключение

Показано, что лазерная полировка эффективно снижает шероховатость поверхности SLM-деталей из сплава AlSi10Mg, а последовательное сочетание гидроабразивной и лазерной обработки дает наилучший результат. Комбинированный подход позволяет уменьшить R_a с 4,15 до 0,27 мкм и может быть рекомендован для постобработки изделий сложной формы.

Список литературы

[1] A. Wahab Hashmi, H. Singh Mali, A. Meena. Improving the surface characteristics of additively manufactured parts: A review. Mater. Today: Proc., **81**(2), pp. 723–738 (2023).

[2] J.-P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T.H.C. Childs. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. CIRP Ann. - Manuf. Technol., **56**(2), pp. 730–759 (2007).

Исследование электрических характеристик ультратонких неоднородных металл-оксидных плёнок

В. А. Ячук [1], **А. В. Лубенченко** [1], **М. А. Андреев** [1], **О. Н. Павлов** [1], **О. И. Лубенченко** [1]
[1] НИУ «МЭИ», Москва, Российская федерация
dr.yachuk@mail.ru

Аннотация. Мемристорные структуры позволяют создавать энергонезависимые элементы памяти. Энергонезависимость возможна благодаря изменению фазового состава структур, из которых состоят мемристоры. Изменения в структуре, появление проводящих каналов, происходят из-за приложения внешнего электрического поля и изменения температуры. Одними из самых распространённых в мемристорных технологиях являются металл-оксидные тонкие и ультратонкие пленки. В данной работе проводилось исследование структуры Nb-Nb_xO_y. Для определения проводящих свойств структуры снимались вольтамперные характеристики как при нагреве, так и без него. Анализ послойного фазового и химического состава ультратонких плёнок проводился с помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Были получены вольтамперные характеристики, на которых видны различные режимы работы исследуемой структуры, а именно: переключение с высокоомного на низкоомный режим. Полученные вольтамперные характеристики в различных режимах работы показывают возможность использования структуры Nb-Nb_xO_y для создания мемристорных устройств.

Ключевые слова: металл-оксидные пленки, ниобий, мемристор, РФЭС.

Введение

Из-за роста объёмов данных активно развиваются твердотельные накопители. Одно из ведущих направлений — мемристорная память [1]. Она позволяет хранить, передавать и обрабатывать большие объёмы данных, превосходя по плотности размещения традиционные NAND-структуры на транзисторах [2,3]. Мемристоры обеспечивают многоуровневую организацию памяти, а их ключевое преимущество — энергонезависимость: информация сохраняется за счёт долговременных изменений структурного и фазового состава до следующей записи.

Одна из самых распространённых структур, используемых при создании мемристоров, – металл-оксидная структура. В данной работе изучались окисленные ультратонкие пленки ниобия толщиной оксидного слоя 10 и 15 нм. Крайне важно контролировать толщину оксидного слоя, образующегося при атмосферном окислении. Если оксидный слой становится слишком большим, производительность устройства может ухудшиться. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия отлично подходит для получения необходимых данных о составе пленки. Целью данной работы было исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) изучаемых ультратонких пленок при различных толщинах структуры Nb-Nb_xO_y. А также исследование зависимости ВАХ от предварительного нагрева образцов.

Материалы и методы

В работе исследовались окисленные ультратонкие пленки ниобия с заявленной толщиной оксидного слоя порядка 10 и 15 нм. Пленки получались с помощью метода магнетронного напыления на кремниевую подложку с последующим окислением на воздухе. Были проведены послойный фазовый и химический анализ [4] исследуемых структур с помощью метода РФЭС на установке Нанофаб 25. Вольтамперные характеристики были получены после предварительного нагрева до 400 К и 500 К. При снятии использовались следующие режимы подачи напряжения. Полный цикл приложения напряжения выглядит следующим образом: $0\text{-}U_{max}\text{-}0\text{-}U_{min}\text{-}U_{max}$. Нагревание осуществлялось с помощью нагревательной спирали внутри измеряемой

(теплоизолированной) области. Температура в исследуемой области контролировалась с помощью термопары, находящейся в той же области.

Результаты и обсуждение

С помощью полученных РФЭ-спектров был произведен количественный и фазовый анализ исследуемых пленок (рис.1). Так, для пленки 10 нм были полученные следующие результаты: верхний слой – Nb_2O_5 толщиной порядка 7 нм; средний слой – переходные оксиды ниобия толщиной порядка 2 нм; далее слой не окислившегося ниобия.

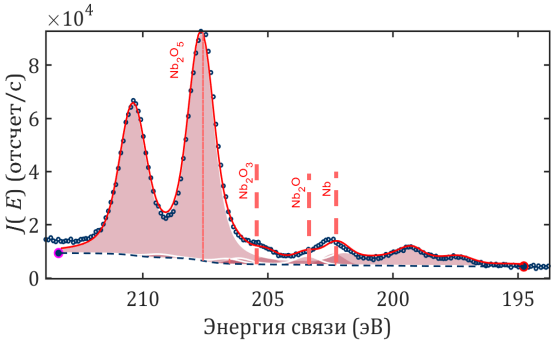


Рис. 1 РФЭ-спектр линии Nb 3d.

После выполнения анализа состава исследуемых объектов снимались ВАХи как без предварительного нагрева, так и после предварительного нагрева и последующим охлаждением. При снятии ВАХ ограничение по току составляло 3 мА. Было замечено, что без предварительного нагрева исследуемые ультратонкие пленки вели себя как проводники с низкой проводимостью. После термоциклирования вольтамперные характеристики были схожи с полупроводниками. Для пленки в 10 нм переключение с высокоомного режима на низкоомный происходило в районе 1 В. Вид ВАХ изменяется, так как сразу несколько процессов начинают оказывать свое влияние на протекание тока в возникающих проводящих каналах в оксиде ниобия. Два основных механизма, участвующих в переносе носителей заряда при повышенных температурах: 1. создаются проводящие каналы, под действием электрического поля; 2. в результате нагрева, при протекании тока, происходит изменение фазового состояния оксидов и, как следствие, изменение их проводимости.

Заключение

Проведено исследование ультратонких пленок методом РФЭС. Получены послойный фазовый и химический профиль исследуемых пленок.

В ходе выполнения работы получены ВАХи от нескольких тонких пленок. Показана зависимость ВАХ от процесса термоциклирования исследуемых объектов и структуры ультратонкой пленки. В полученных характеристиках заметно переключение режимов проводимости пленок. Таким образом использование структуры Nb-Nb_xO_y возможно в мемристорных устройствах.

Список литературы

[1] Kim H. et al. Memristor-based multilevel memory //2010 12th International Workshop Cellular Nanoscale Networks and their Applications, IEEE, 2010. – С. 1-6 (2010).

[2] Zhou H. et al. Recent advances in in-memory computing: exploring memristor and memtransistor arrays with 2D materials //Nano-Micro Letters. Т. 16. – №. 1. – С. 121 (2024).

[3] Li C. et al. Long short-term memory networks in memristor crossbar arrays //Nature Machine Intelligence. Т. 1. – №. 1. – С. 49-57 (2019).

[4] Lubenchenko A.V., et al. XPS study of multilayer multicomponent films. Applied Surface Science, Vol. 427, 711-721 (2018).

Разработка симулятора направленного осаждения наночастиц с самосогласованной эволюцией электрического поля

В.О. Давыдов, А.Н. Патарашвили, А.А. Ефимов
МФТИ, Москва, Российская Федерация;
✉davydov.vo@phystech.edu

Аннотация. Представлен двумерный симулятор электрокинетического осаждения наночастиц на подложку через подвижную маску-электрод с зазором. Ключевой особенностью является самосогласованная обратная связь. Декларативные сценарии движения маски позволяют программировать зону роста и формировать протяжённые паттерны, недостижимые при статической конфигурации.

Ключевые слова: фокусировка наночастиц, наночастицы, самосогласованное моделирование, гексагональные воксели, подвижная маска-электрод

Введение

Наночастицы благородных металлов являются перспективными функциональными элементами для плазмоники, поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии и наноэлектроники [1]. Пространственное упорядочение ансамбля частиц определяет его оптические и каталитические свойства, поэтому управляемое формирование наноструктурных паттернов представляет значительный практический интерес.

Одним из инструментов управления топологией фокусируемой структуры является маска-электрод с регулируемым зазором: приложенное напряжение создаёт электрическое поле, фокусирующее траектории частиц в область зазора. Смещение зазора в ходе осаждения позволяет программировать зону роста структуры.

Моделирование данного процесса в коммерческих пакетах, таких как COMSOL, наталкивается на принципиальное ограничение: каждое событие осаждения изменяет геометрию расчётной области и требует перестроения сетки конечных элементов. При последовательном осаждении сотен частиц это становится вычислительно неприемлемым.

Целью данной работы является разработка специализированного высокопроизводительного симулятора, в котором обратная связь между растущей структурой и электрическим полем реализована без перестроения сетки, а стохастическая динамика наночастиц учитывается через симплектический интегратор Ланжевена.

Материалы и методы

Расчётная область. Моделируется двумерный канал с задаваемой конфигурацией (Рис. 1). На подложке, маске и верхней границе задаются потенциалы Дирихле, а на боковые стенки условия Неймана. Электрическое поле и поле скоростей жидкости рассчитываются из уравнения Лапласа на фиксированной разностной сетке методом последовательной сверхрелаксации (SOR).

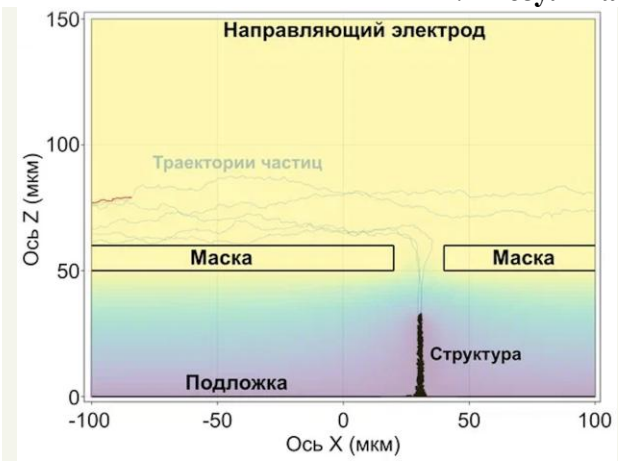
Самосогласованная обратная связь. Подложка дискретизирована гексагональной сеткой. При осаждении частицы заполненная ячейка немедленно вносится как узел Дирихле при потенциале подложки. Шесть равноправных соседей гексагональной упаковки обеспечивают изотропность роста структуры в отличие от квадратной сетки (Рис. 2). Определение принадлежности частицы к ячейке выполняется аналитически через кубические аксиальные координаты с вычислительной сложностью O(1).

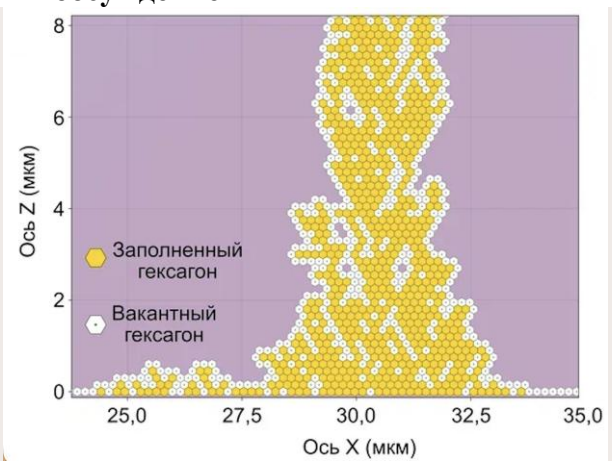
Тёплый старт. При каждом изменении граничных условий: осаждении частицы или смещении маски — поле пересчитывается не с нуля, а от предыдущего сошедшегося решения.

Динамика частиц. Движение заряженных наночастиц интегрируется симплектической схемой, в которой каждый шаг разделён на пять подшагов [2]. Для субмикронных частиц в газе (число Кнудсена много больше единицы) явно учитывается поправка Каннингема к Стоксовому трению.

Движение маски. Траектория маски задаётся декларативно как последовательность фаз с приращениями горизонтального и вертикального положения зазора на каждую выпущенную частицу, с целью обеспечения наиболее правдоподобной асинхронности.

1. Результаты и обсуждение





При разработке симулятора использовались передовые методы оптимизации и разработки. В частности, в качестве используемого инструмента был выбран язык программирования Julia за счет высокой производительности для релевантных вычислительных задач. На представленных изображениях можно увидеть эволюцию структуры при фокусировке аэрозольных заряженных наночастиц золота размером 5 нм и зарядом в 1e в гексагональные воксели с единичной вместимостью.

Заключение

Разработан двумерный симулятор электрокинетического осаждения наночастиц, в котором самосогласованная обратная связь между растущей структурой и электрическим полем реализована без перестроения расчётной сетки. Тёплый старт итерационного решателя, гексагональная дискретизация подложки и симплектический интегратор Ланжевена позволяют моделировать последовательное осаждение сотен частиц с учётом броуновской динамики. Декларативные сценарии движения маски открывают возможность систематического исследования влияния траектории зазора на топологию фокусируемой структуры и генерации обучающих данных для задач обратного дизайна наноструктур.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант FSMG-2025-0056).

Список литературы

[1] A. Patarashvili, M. R. Ghorbani Fard, A. Efimov, M. Ivanov, E. Kameneva, V. Davydov, D. Kornyushin, D. Maslennikov, A. Shishlyannikov, V. Torgunakov, V. Ivanov, Three-dimensional aerosol printing by enlarged, optimized and charged nanoparticles, *Journal of Aerosol Science 184, 106515 (2025).*

[2] B. Leimkuhler & C. Matthews, *Rational Construction of Stochastic Numerical Methods for Molecular Sampling // Applied Mathematics Research eXpress. — Oxford University Press, 2012. Vol. 2012, June.* ISSN 1687-1197.

Математическое моделирование петли диэлектрического гистерезиса с учетом влияния поляризационного шума

У. С. Чихрина [1]✉, **Е. А. Печерская** [1], **П. Е. Голубков**[1]
[1]Penza State University, Penza, Russia;
✉chikhulyana@yandex.ru

Аннотация. Выполнено экспериментальное исследование зависимости поляризованности от напряженности внешнего электрического поля монокристалла титаната бария ($BaTiO_3$). Выполнена аппроксимация экспериментальной петли диэлектрического гистерезиса, модифицированной поляризационным шумом, с использованием функции гиперболического тангенса и метода Монте-Карло с целью восстановления идеальной петли гистерезиса. Выполнено сравнение используемых методов аппроксимации с целью определения оптимального метода по критерию точности и применимости в условиях зашумленности.

Ключевые слова: титанат бария, петля диэлектрического гистерезиса, математическое моделирование, аппроксимация гиперболическим тангенсом, метод Монте-Карло.

Введение

Актуальность темы исследования сегнетоэлектрических материалов обусловлена растущей интенсивностью применения материалов в элементах функциональной электроники [1]. В настоящее время сегнетоэлектрики используются при изготовлении эффективных устройств неразрушаемой (статической) памяти (FRAM), динамической памяти (DRAM), а также находят применение в изготовлении системы быстрого запуска автомобилей и других устройствах [2]. При синтезе новых сегнетоэлектрических структур актуальны как измерения их электрофизических свойств, так моделирование параметров в зависимости от влияющих факторов [3].

Однако поляризационные шумы, возникающие вследствие флуктуаций спонтанной поляризации, могут искажать значения экспериментальных данных, поэтому с развитием электронной промышленности устанавливаются более высокие требования к точности измерения критически важных параметров материала.

Материалы и методы

С помощью автоматизированной лабораторной установки получена экспериментальная зависимость поляризованности от напряженности электрического поля *P(E)* образца титаната бария. Моделирование полученной петли диэлектрического гистерезиса выполнялось с использованием уравнения гиперболического тангенса (1), как показано в [1].

$$P(E) = P_s * th\frac{E-E^0}{\xi}, \quad (1)$$

где P_s – поляризация насыщения (Кл/м^2); E – электрическое поле; E_0 – коэрцитивное поле; ξ − параметр крутизны перехода (В/м).

Для имитации влияния поляризационного шума на экспериментальную петлю диэлектрического гистерезиса накладывался «розовый» шум со спектральной плотностью, обратно пропорциональной частоте. Из полученного сигнала методом Монте-Карло восстанавливалась идеальная петля диэлектрического гистерезиса. Для сравнения методов аппроксимации петли гистерезиса (гиперболический тангенс и Монте-Карло) по критерию точности определялась погрешность адекватности моделей в относительном виде, где за действительное значение принимались результаты эксперимента без зашумленности. Расчеты выполнялись в среде моделирования MATLAB.

1. Результаты и обсуждение

На рис.1 представлено моделирование петли гистерезиса с учетом влияния поляризационного шума с использованием функции гиперболического тангенса и метода Монте-Карло. Максимальная относительная погрешность аппроксимации петли гистерезиса гиперболическим тангенсом составляет ±9,5 %, методом Монте-Карло ±4,7 %.

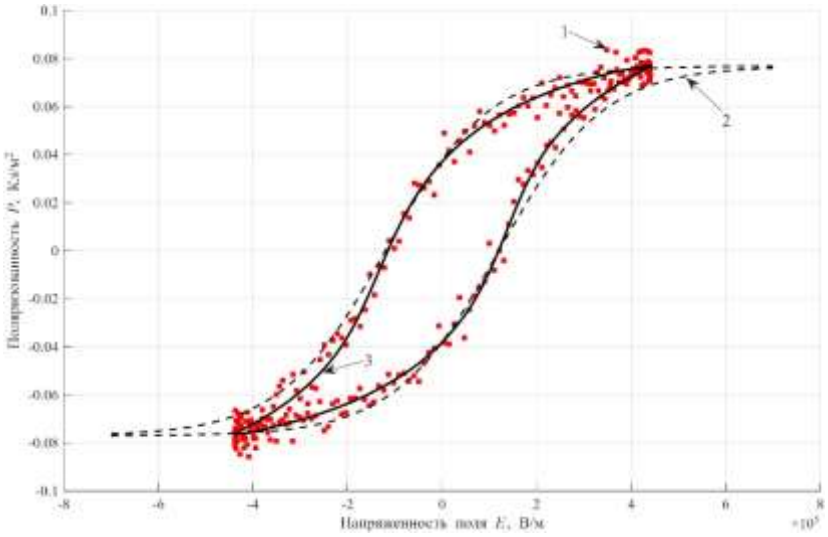


Рис. 1. Зависимость поляризованности от напряженности электрического поля монокристалла титаната бария (BaTiO3): 1 – экспериментальная кривая с поляризационным шумом; 2 – аппроксимация гиперболическим тангенсом; 3 – аппроксимация по методу Монте-Карло

Заключение

Таким образом, для моделирования петли диэлектрического гистерезиса сегнетоэлектрических материалов (титаната бария) в условиях влияния поляризационных шумов целесообразно использовать метод Монте-Карло, обладающий повышенной точностью и относительной простотой реализации.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект «Синтез тонких пленок активных диэлектриков с заданными параметрами, получение и исследование структур на их основе».

Список литературы

[1] Берман, Л. С. Моделирование вольт-фарадных характеристик сегнетоэлектрика / Л. С. Берман // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, № 12. – С. 1436-1439. – EDN RCZIWF.

[2] Захаров, А. Ю. Моделирование гистерезисных кривых кристаллических сегнетоэлектриков с помощью параметров управляющего электрического поля / А. Ю. Захаров, М. И. Бичурин // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, № 12. – С. 69-73. – EDN UJMQYX.

[3] Pecherskaya E.A. Controlling the temporal instability of the dielectric parameters of ferroelectrics / Pecherskaya E.A., Solov'ev V.A., Metal'nikov A.M., Varenik Y.A., Gladkov I.M., Ryabov D.V. //Semiconductors. 2013. Т. 47. № 13. С. 1720-1722.

Новая модель волоконно-оптического датчика для контроля радиационной обстановки в дистанционном режиме с возможностью замены поврежденного оптического волокна

Д. С. Дмитриева [1✉], **Л. В. Никифоров** [1,]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия;

✉dmitrievadiana1405@gmail.com

Аннотация. Развитие современного мира привело к повсеместному использованию радиоактивных материалов на различных производствах. Существующие системы мониторинга в условиях повышенного радиационного фона нуждаются в постоянном обслуживании, что часто представляет опасность для технического персонала. В статье предложена новая модель волоконно-оптического датчика для системы мониторинга γ-излучения в дистанционном режиме с возможностью проведения эксплуатационных работ по замене поврежденного волокна без необходимости нахождения в зоне утечки. Определены материалы для изготовления датчика и его функциональные характеристики.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, γ-излучение, мощность дозы излучения.

Введение

Современная промышленность всё чаще обращается к использованию радиоактивных материалов. Они нашли свое применение в различных сферах – от ядерной энергетики до дефектоскопии и медицинской диагностики [1-2]. Однако использование радиоактивных материалов требует применения на объектах специальных систем мониторинга утечек. У подобных существующих систем присутствует ряд проблем, связанных с эксплуатацией. Датчики, входящие в их структуры, часто подвергаются воздействию повышенного радиационного фона, что приводит к существенному сокращению срока эксплуатации и их выходу из строя. Замена комплектующих может представлять собой очень сложную и опасную для технического персонала процедуру.

При разработке систем мониторинга γ-излучения все чаще обращаются к использованию оптического волокна. Действительно, датчики, спроектированные на его основе, имеют большую устойчивость к влиянию γ-излучения, однако при значительных изменениях мощности дозы излучения даже такие системы выходят из строя из-за возникновения необратимых повреждений в оптических волокнах. Соответственно, разработка новой модели волоконно-оптического датчика для системы дистанционного мониторинга с возможностью замены поврежденного волокна без необходимости посещения зоны утечки является актуальной.

Материалы и методы

Ранее нами были разработаны модели волоконно-оптических датчиков для системы мониторинга радиоактивного излучения [3]. Предыдущие модели обладали рядом недостатков, а именно: наличие конструктивных элементов, накапливающих радиацию, сложности в размещении датчика в предполагаемой зоне утечки, необходимость посещения техническим персоналом такой зоны в случае утечки для замены поврежденного волокна.

Соответственно, нами была разработана новая модель волоконно-оптического датчика, предназначенного для организации системы дистанционного мониторинга окружающей обстановки. Разработанная модель датчика роликового типа позволяет организовать замену оптического волокна без необходимости посещения аварийной зоны.

Разработанная модель представляет собой катушку из радиационно-стойкого полимера, расположенную на платформе из того же материала. Платформа оснащена двумя парами роликовых колес, обеспечивающих проворот катушки при необходимости замены волокна и перемещение всей платформы целиком. В предыдущих экспериментах было установлено, что цилиндрическая форма катушки не оказывает существенного влияния на результаты измерений. Положение катушки на платформе фиксируется с помощью

цельного цилиндра, сделанного также из полимерного радиационно-стойкого материала. Катушка имеет направляющую резьбу, позволяющую укладывать новое волокно без возможности спутывания и образования узлов. Выводные направляющие планки, закрепленные на платформе, позволяют контролировать аккуратность подачи нового оптического волокна. Модель представлена на рис. 1.

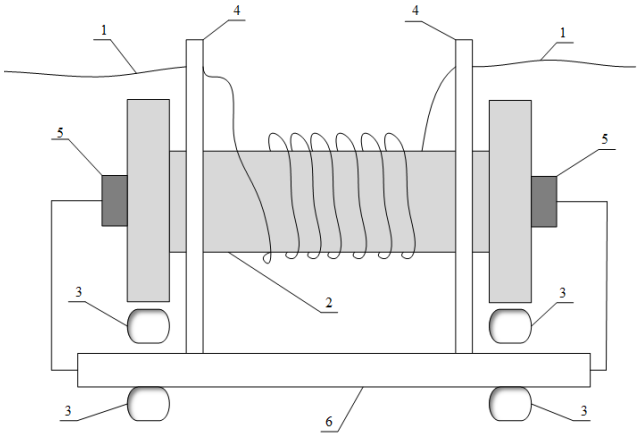


Рис.1. Новая модель ВОД роликового типа. На рисунке отмечены составляющие модели: 1 – оптическое волокно, 2 – катушка из полимерного материала, 3 – роликовые полимерные колеса, 4 – выводные направляющие планки, 5 – цилиндр, обеспечивающий фиксацию катушки, 6 – платформа.

В случае необратимых повреждений в структуре оптического волокна, конструкция позволяет вытянуть его с катушки, заменив целым. За пределами зоны размещения ВОД располагаются барабаны с запасом оптического волокна в размере 2 км, что позволяет продлить срок работы системы. Сварные соединения для подключения катушки к линии связи также располагаются за пределами зоны размещения датчика, что позволяет вытянуть поврежденный участок волокна из зоны возможной утечки и оперативно удалить его.

Для поддержания работоспособности предложенной модели и сохранении оптических характеристик волокна будет применяться разработанный ранее метод компенсации радиационно-наведенных потерь [4]. Новая модель лишена главного недостатка предыдущих версий – необходимости присутствия обслуживающего технического персонала в зоне возможной утечки радиации. Представленная конструкция позволит увеличить срок эксплуатации системы мониторинга в несколько раз.

Заключение

Разработанная модель волоконно-оптического датчика, являющегося основой системы мониторинга мощности поглощенной дозы, позволяет обеспечить долгосрочную его эксплуатацию за счет замены волокна утратившего свои оптические свойства по причине деградации от длительного воздействия радиации,

Список литературы

[1] R. Davydov, V. Dudkin, S. Logunov, and A. Bobyl, Optical Method for Controlling the Flow Rate of the Coolant in Nuclear Reactors, *Proceedings of the 2021 International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2021*, vol. 2021. pp. 179-183.

[2] M. S. Mazing, and et. al. Monitoring of oxygen supply of human tissues using a noninvasive optical system based on a multi-channel integrated spectrum analyzer, International Journal of Pharmaceutical Research, vol. 12, pp. 1974 – 1978.

[3] V. V. Davydov, D. S. Dmitrieva, Fiber-optic sensor for long-term remote monitoring of γ-radiation at nuclear power facilities, *Atomic Energy*, vol. 138(1-2), pp. 78–86.

[4] D. S. Dmitrieva, V. M. Pilipova, V. I. Dudkin, The possibility of controlling the relaxation rate of color centers in the optical fibers, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1697, no. 1, pp. 012145.

Разработка метода получения композита на основе поливинилиденфторида и аморфных наночастиц диоксида титана

А. А. Водяшкин [1]✉, **Е.Л. Бурьянаская** [1], **М.О. Макеев**[1]

[1] Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия;

✉av.andrey2013@yandex.ru

Аннотация. В данном исследование предложен и оптимизирован способ введения наночастиц в полимерную матрицу поливинилиденфторида. В качестве допантов были использованы аморфные наночастицы диоксида титана. В работе были изучены структурны, морфологические и электрофизические параметры композитных пленок.

Ключевые слова: наночастицы диоксида титана, поливинилиденфторид, композитные полимерные материалы, пьезоэлектрики.

Введение

Поливинилиденфторид (ПВДФ) – является перспективным материалом, для применения в электротехнических устройствах и сенсорах. Он сочетает в себе гибкость, прочность и устойчивость к химическим вещества, а также пьезоэлектрические свойства, обеспечивающие их интеграцию в различные устройства [1]. Для оптимизации электрофизических свойств могут быть использованы механическая, термическая, плазменная обработка, и другие. Допирование нано- и микроматериалов в матрицу полимера также является перспективным способом настройки фазового состава и электрофизических свойств ПВДФ. Наночастицы диоксида титана (TiO_2NPs) являются безопасными, экологичными, биосовместимыми материалами, которые могут быть использованы для настройки электрофизических свойств ПВДФ [2].

Материалы и методы

Синтез наночастиц диоксида титана:

Бутооксид титана (TTIB) 29,70г растворяли в 6.23г изопропилового спирта (ИПС), после чего 5,98 г этой смеси по каплям в течение 3 минут вносили вносили в 18,72 мл воды, после чего перемешивали при 50°C 500 rpm, в течение 3 ч. После чего содержимое стакана перелили в чашку Петри и поставили сушиться в сушильный шкаф при 80°C в течение 3 ч, а затем дополнительно прокаливали при температуре 350°C (3ч).

Синтез композитной пленки ПВДФ/TiO_2NPs:

Предварительно синтезированные TiO_2NPs суспендировались в N,N-диметилформамиде (ДМФА) с помощью УЗ-обработкой и гомогенизации. После чего 5% раствор ПВДФ в ДМФА смешивался с суспензией TiO_2NPs с помощью УЗ-обработки (30 минут), и перемешивание в мультиротаторе в течение 12ч, после чего смесь выливалась в чашку петри и была выдержана в сушильном шкафу в течение 5ч.

Характеризация:

Измерения электрической прочности проводились в ванночке, заполненной вазелиновым маслом. Для каждого образца было зарегистрировано 10 измерений. Определение значений напряженности пробойного поля производилось с использованием двухпараметрической модели Вейбулла [3,4].

Макроскопические пьезоэлектрические коэффициенты d_{33} определяли квазистатическим методом Берлинкура на d_{33}-метре YE2730A (Sinocera Piezotronics, INC, Китай).С использованием поляризационного микроскопа A15.1302 Polarizing Microscope (Opto-Edu, Пекин, Китай) полученные микрофотографии поверхности пленок.

Результаты и обсуждение

Синтез наночастиц диоксида титана приводили к получению белого порошка, который в процессе сушки собирались в агломераты. С помощью рентгенофазового анализа (РФА) подтверждена аморфная структура наночастиц диоксида титана. После допирования наночастиц в матрицу полимера в различном количестве (1%,2%,5%) они были подвержены характеризации с помощью ИК-спектроскопии и атомно-силовой микроскопии.

Введение НЧ в полимерную матрицу существенно меняет структурно-морфологические свойства материала, представлено на рисунке 1.

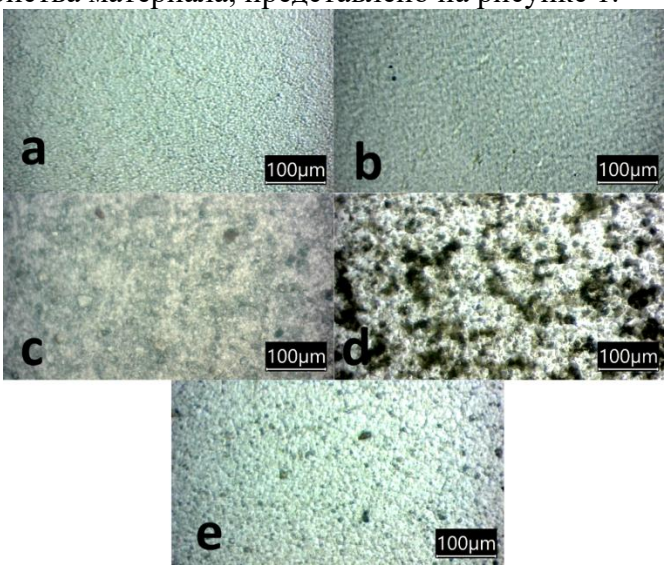


Рис. 1. Оптические микрофотографии пленок с различным содержанием НЧ, где a – контрольная пленка, b – коммерческая пленка, c – образец №1, d – образец №2, e – образец №3

Замечено, что для пленок, полученных из раствора (рис.1.a,c,d,e) характерна сферолитная структура. При этом размер сферолитов на поверхности пленки меняется в зависимости от концентрации НЧ. Максимальный размер сферолитов показал образец с 5% наночастиц, а минимальный размер характерен для чистой пленки.

В таблице 1 предоставлены результаты измерений электрофизических свойств исследуемых образцов.

Таблица 1

Электрофизические свойства композитных пленок

Образец	Контроль	5%	2%	1%	ГИПХ
Электрическая прочность, МВ/м	107	321	265	285	231
d_{33}, пКл/Н	0	4.5	6.3	6.4	5.0

Показано, что введение НЧ TiO_2 в полимерную матрицу ВДФ/ТФЭ увеличивает электрическую прочность композитных пленок более чем в 2,5 раза (до 321 МВ/м против 107 МВ/м у чистого полимера). Это обеспечивает эффективную поляризацию без предварительной высокотемпературной ориентационной вытяжки. Величина пьезокоэфициента d_{33} композитной пленки составляет 6,4 пКл/Н.

Заключение

В рамках данного исследования предложен метод получения композитной пленки на основе ПВДФ/TiO2, а также оптимизирована концетрация частиц для повышения электрофизических показателей. Измеренная величина электрической прочности композитного материала превышает величину электрической прочности коммерчески выпускаемой пленки.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (шифр темы FSFN- 2025-0004).

Список литературы

1. Andrey V. et al., Biomaterials Science. **12**(20), (2024).
2. Zhang X. et al., Journal of Electronic Materials. **51**(10), 2022.
3. C. Laurent, C. Chauvet, J. Berdala, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. **1**, 1 (1994).
4. V. V. Kochervinskii, O. V. Gradov, and M. A. Gradova, Russ. Chem. Rev. **91**(11), (2022).

Defect formation in GaAs due to Focused Ion Beam irradiation

А.М Коршунков [1]✉, **Г.В Вознюк** [1], **В.П. Евтихиев**[1]
[1] ФТИ им. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
✉amkorshunkov@edu.hse.ru

Аннотация. В работе исследуется распределение радиационных дефектов в GaAs при травлении сфокусированным ионным пучком. Несмотря на широкое применение технологии в нанолитографии, распределение дефектов за фронтом травления остаётся недостаточно изученным. Экспериментально измерено изменение удельного сопротивления GaAs в зависимости от глубины травления. Показано, ёчто при остаточной толщине проводящего слоя более 250 нм удельное сопротивление постоянно, а при дальнейшем травлении наблюдается его экспоненциальный рост.

Ключевые слова: Сфокусированный ионный пучок, радиационные дефекты, GaAs

Введение

Технология прямой нанолитографии сфокусированным ионным пучком (СИП) широко используется для создания прототипов и диагностики приборов на основе полупроводниковых структур [1]. При такой литографии под поверхностью вытравленной области образуются радиационные дефекты [2]. Сведения о профиле распределения дефектов под поверхностью вытравленной области недостаточны. Обычно профиль дефектов рассчитывается в программном пакете SRIM, но ряд экспериментальных работ не подтверждают этих результатов [3]. Известно, при травлении GaAs СИП основной возникающий дефект – вакансии As, являющиеся глубокими ловушками для носителей заряда [4], [5]. В данной работе изучается изменение удельного сопротивления сильнолегированного слоя GaAs при травлении СИП на разные глубины.

Материалы и методы

Все измерения проводятся на образцах, представляющих собой выращенный методом газофазной эпитаксии слой GaAs-p+ ($p = 1{,}5*10^{18}$ $см^{-3}$) толщиной 0,7 мк на подложке собственного GaAs. Часть сильнолегированного слоя была удалена в процессе фотолитографии до собственного слоя, на сильнолегированный слой были нанесены золотые контакты. Получилось семейство полосок с золотыми контактами и открытой поверхностью сильнолегированного GaAs. Точные размеры указаны на рис. 1. Травление проводилось СИП Ga^+ с энергией 30 кэВ на поперёк площадок трёх типов – 75, 35 и 15 мк длиной, на глубины от 50 до 700 нм. Глубина вытравленной канавы контролировалась измерениями на атомно-силовом микроскопе (АСМ) (рис. 2).

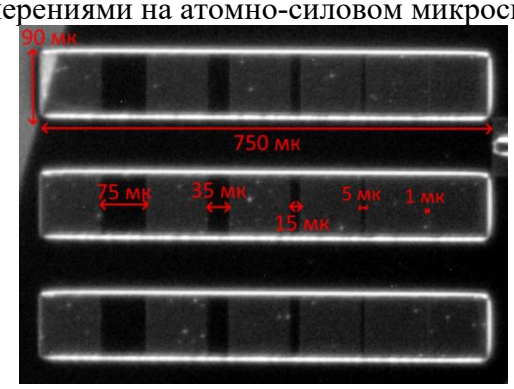


Рис. 1. Фотография части образца

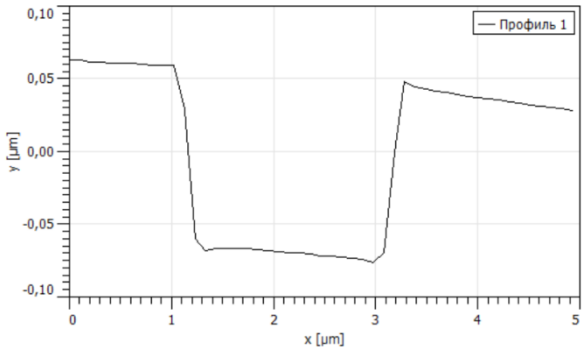


Рис. 2. Профиль АСМ измерения вытравленной канавы

Результаты и обсуждение

Между двумя золотыми контактами существует электрическое сопротивление, которое при травлении СИП канавы поперёк образца будет увеличиваться. Причин для этого две: уменьшение толщины образца и концентрации свободных носителей в результате их захвата на радиационные дефекты. Можно представить себе образец как три последовательно соединённых резистора R1, R2, R3 (вставка на рис. 3). Сопротивления R1 и R3 остаются неизменны в результате травления, R2 увеличивается. При помощи этой модели можно показать, что удельное сопротивление ρ травящегося участка, отнесённое к изначальному удельному сопротивлению образца ρ_0, выражается следующей формулой:

$$(\frac{dR}{R_{2,0}} + 1)\frac{h}{H} = {}^{\rho}/_{\rho_0}$$

Здесь $R_{2,0}$ – начальное сопротивление вытравленного участка R2, dR – изменение сопротивления всего образца, H – изначальная толщина слоя R2, h – оставшаяся после травления. В случае, если травление СИП не приводит к образованию дефектов, $\rho=\rho_0$. Таким образом, по отклонению измеренного сопротивления площадки от теоретического предсказания можно оценить влияние дефектов.

Были проведены измерения сопротивления до и после травления СИП на 45 площадках трёх типов. Значения удельного сопротивления ρ, нормированного на ρ_0, представлены на рис. 3. для площадки длиной 35 мк. Эти же значения для площадок длиной 75 и 15 мк почти не отличаются.

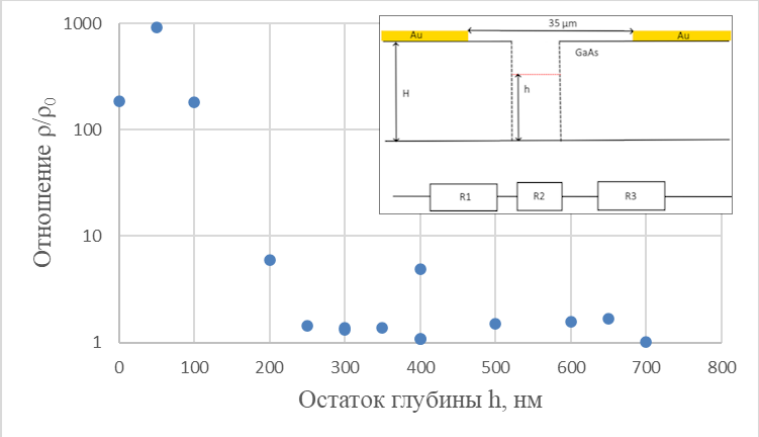


Рисунок 3. Экспериментальная зависимость отношения ρ/ρ_0 от оставшейся глубины. На вставке слева сверху схематическое представление одной площадки как трёх резисторов.

При остаточной глубине проводящего слоя более 250 нм удельное сопротивление ρ остаётся примерно постоянным на уровне 1.5 от изначального ρ_0, после удельное сопротивление ρ начинает экспоненциально расти. При травлении СИП вносятся дефекты, захватывающие свободные дырки, то есть уменьшающие концентрацию свободных носителей заряда. Эти дефекты почти не накапливаются и их профиль распределения остаётся почти неизменным независимо от глубины травления. Таким образом, наблюдаемую зависимость можно обосновать следующим образом: при больших остаточных толщинах проводящего слоя ток течёт как через дефектную область, так и через область, свободную от дефектов, что обуславливает постоянную прибавку к удельному сопротивлению. При остаточной толщине менее 250 нм дефектная область достигает подложки и ток течёт только через неё. В этих случаях изменение сопротивления отражает изменение концентрации свободных носителей заряда, то есть концентрацию ловушек на данном удалении от поверхности вытравленной области.

Заключение

Оценено влияние дефектов на сопротивление в зависимости от глубины травления СИП. Полученные результаты подтверждают необходимость учёта дефектообразования при проектировании полупроводниковых структур с использованием технологии СИП.

Список литературы

[1] P. Li et al. // Nanoscale, 2021, 13, 1529

[2] A. Lugstein et al. // Journal of Vacuum Science & Technology A 21, 1644 (2003); doi: 10.1116/1.1590964

[3] C. Lehrer et al. // "Defects and gallium-contamination during focused ion beam micro machining," *2000 International Conference on Ion Implantation Technology Proceedings. Ion Implantation Technology - 2000 (Cat. No.00EX432)*, Alpbach, Austria, 2000, pp. 695-698, doi: 10.1109/IIT.2000.924248.

[4] Hofmann, F. et al. 3D lattice distortions and defect structures in ion-implanted nano-crystals. Sci. Rep. 7, 45993; doi: 10.1038/srep45993 (2017).

[5] С. Н. Гриняев. // Глубокие уровни вакансий в сверхрешетке $(AlAs)_1(GaAs)_3$, Физика и техника полупроводников. — 1997. — № 31. — С. 545-556.

Моделирование процесса микродугового оксидирования методом резервуарных вычислений

П. Е. Голубков [1], **А. Д. Семенов** [1], **Е. А. Печерская** [1], **А. А. Максов** [1], **Н.С. Шалаев**[1]✉

[1] Penza State University, Penza, Russia;

✉ m-conference@mail.ru

Аннотация. Разработана нейросетевая модель процесса микродугового оксидирования, реализующая метод резервуарных вычислений. В состав модели входят две нейронные сети, соединенные последовательно. Первая нейронная сеть моделирует вольтамперную характеристику гальванической ячейки. Вторая нейронная сеть, на вход которой подается матрица весовых коэффициентов первой нейронной сети, моделирует зависимость толщины формируемого оксидного покрытия от электрических параметров процесса микродугового оксидирования. Модель может быть использована в качестве одного из элементов цифрового двойника процесса микродугового оксидирования.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, резервуарные вычисления, нейросетевые алгоритмы.

Введение

В настоящее время во многих отраслях промышленности все большую популярность приобретают цифровые двойники. Они используются при управлении производством, в процессе проектирования высокотехнологичной продукции и т.д. [1]. В связи с этим, перспективной является разработка цифровых двойников современных технологический процессов, таких, как микродуговое оксидирование (МДО). Выбор этой технологии обусловлен не только значительными преимуществами при широком внедрении в микродуговых оксидных покрытий во все сферы жизни, но и сложностью и недостаточной изученностью механизма формирования покрытий. Процесс МДО имеет сложный междисциплинарный характер, он объединяет группу физико-химических, электрических, акустических и микроплазменных явлений, происходящих одновременно, в результате которых на подложке из вентильного металла образуется слой оксидной керамики, обладающий специальными свойствами. Аналитическое системное описание такого процесса с использованием традиционного математического аппарата на основе дифференциальных уравнений чрезвычайно сложно [2], в связи с чем необходима разработка нового научного подхода для моделирования процесса МДО. В данной работе для моделирования зависимости толщины покрытий от технологических параметров процесса МДО предлагается использовать метод резервуарных вычислений на основе нейронных сетей. Преимуществом данного метода является возможность работы со сложными нелинейными процессами при минимальных вычислительных затратах, недостатком – зависимость результатов моделирования от качества обучающей выборки.

Материалы и методы

МДО-покрытия наносились на образцы из технического алюминия АД31 в синусоидальном токовом режиме в электролите, содержащем 2 г/л Na_2SiO_3 и 9 г/л NaOH. Ток оксидирования варьировался в диапазоне от 0,125 до 1,5 А, время оксидирования – от 1 до 15 минут и соотношение анодного и катодного токов – от 20 до 80 %, согласно плану эксперимента. Через каждую минуту измерялись вольтамперные характеристики гальванической ячейки при помощи измерительных каналов установки МДО. По окончании обработки образцы вынимались из гальванической ячейки, промывались проточной водой и высушивались на воздухе. Толщина МДО-покрытий измерялась с помощью вихретокового толщиномера. Обработка полученных данных осуществлялась в MATLAB с использованием прикладного пакета Neural Network Toolbox.

1. Результаты и обсуждение

Структура нейросетевой модели процесса МДО, реализующей метод резервуарных вычислений, представлена на рисунке 1.

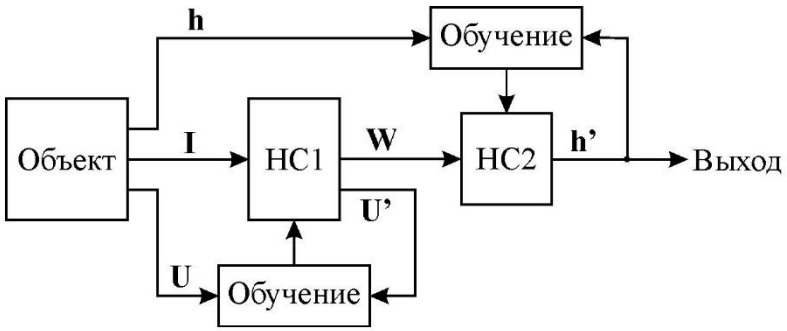


Рис. 1. Структура нейросетевой модели процесса МДО: НС1, НС2 – нейронные сети; **I** – вектор входа, соответствующий току оксидирования; **U** – вектор целевых значений напряжения гальванической ячейки; **h** – вектор целевых значений толщины покрытия; **W** – матрица весовых коэффициентов; **U'**, **h'** – выходные векторы нейронных сетей, соответствующие напряжению гальванической ячейки и толщине покрытия.

Основными элементами модели являются две нейронные сети различного типа: нейронная сеть НС1 рекуррентная, нейронная сеть НС2 радиально-базисная. На вход первой нейронной сети от объекта исследования подается набор значений, описывающих осциллограмму тока оксидирования **I**, на выход – соответствующие им значения осциллограммы напряжения гальванической ячейки **U**. Результатом обучения первой нейронной сети является матрица **W** весовых коэффициентов, описывающая вольтамперную характеристику (ВАХ) гальванической ячейки. Эта матрица подается на вход второй нейронной сети, выходным вектором которой является набор значений толщины покрытия **h'**. В процессе обучения второй нейронной сети устанавливается соответствие между толщиной покрытия и ВАХ процесса МДО. Обучающая выборка для первой нейронной сети формируется на основе результатов моделирования схемы замещения гальванической ячейки [3]. Обучающая выборка для второй нейронной сети формируется на основе результатов экспериментов. Верификация нейросетевой модели осуществляется путем подачи на вход первой нейронной сети экспериментальных значений осциллограмм тока и напряжения, получения на выходе второй нейронной сети расчетных значений толщины покрытия и сравнения их с экспериментальными данными путем определения погрешности адекватности модели.

Заключение

Предлагаемая модель может служить одним из элементов цифрового двойника процесса МДО. Несмотря на то, что в данной работе модель применяется для синусоидального режима МДО, наибольшая практическая значимость модели реализуется для импульсных режимов, которые характеризуются большим количеством технологических параметров.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 26-19-20032.

Список литературы

[1] M. A. Hafeez, A. Procacci, A. Coussement, A. Parente. Resour. Conserv. Recycl., **209** 107796 (2024).

[2] Z. Li, Y. Wang, M. Yuan, B. Wang, M. Xun. Journal of Mechanical Science and Technology, **39**(3) 1131-1140 (2025).

[3] E. A. Pecherskaya, S. V. Konovalov, A. D. Semenov, P. E. Golubkov, S. A. Gurin, M. D. Novichkov. J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech., **18**(3), 551-556 (2024).

Измерение сопротивления и емкости микродуговых оксидных покрытий

П. Е. Голубков [1✉], **Е. А. Печерская** [1], **С.А. Гурин**[1], **А.Э. Шепелева**[1], **Д.В. Артамонов**[1]
[1] Penza State University, Penza, Russia
✉golpavpnz@yandex.ru

Аннотация. Предложен новый метод измерения сопротивления и емкости микродуговых оксидных покрытий вентильных металлов и сплавов в процессе их формирования. В отличие от аналогов, метод предполагает периодическое прерывание процесса микродугового оксидирования и измерение импеданса гальванической ячейки на синусоидальном измерительном сигнале малой амплитуды в диапазоне частот. метода измерения толщины и пористости покрытий на основе фундаментальных физико-химических закономерностей и результатов измерения импеданса гальванической ячейки. Метод позволяет повысить точность измерений сопротивления и емкости покрытий и может быть использован при разработке информационно-измерительных и управляющих систем микродугового оксидирования.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, синусоидальный токовый режим, измерение сопротивления и емкости покрытий, схема замещения, диффузионный импеданс.

Введение

В настоящее время для создания на подложках из вентильных металлов функциональных оксидных покрытий, в том числе наноструктурных, используется метод микродугового оксидирования (МДО). Данная технология применяется во многих отраслях промышленности, в том числе в приборостроении, электронике и медицине, однако не получила широкого распространения ввиду недостаточной изученности механизма формирования покрытий и, как следствие, сложности в подборе технологических параметров МДО-обработки [1]. На данный момент не существует комплексной математической интерпретации процесса МДО, объясняющей в рамках единого подхода группу разнородных явлений, сопровождающих формирование микродуговых оксидных покрытий [2]. Наиболее полно описаны физико-химические процессы на границе раздела фаз для импульсных режимов МДО, но не для синусоидальных. В связи со сложностью и междисциплинарностью рассматриваемых явлений, для моделирования процесса МДО широко применяется метод эквивалентных схем, при котором объект исследования заменяется электрической схемой замещения, в той или иной степени воспроизводящей электрические характеристики объекта. Преимуществом метода является простота и возможность использования для создания автоматизированных систем управления процессом МДО, недостатком – неизбежная потеря точности, связанная с использованием линейных электрических моделей вместо электрохимических импедансов, а также с наличием электрических пробоев при формировании покрытий. Данная работа позволяет устранить эти недостатки путем введения пауз в процесс МДО, в которых происходит измерение сопротивления и емкости покрытия.

Материалы и методы

МДО-покрытия получали на заготовках из алюминиевого сплава АД31 размером 20х20 мм при помощи автоматизированной лабораторной установки в симметричном синусоидальном анодно-катодном режиме (ток оксидирования 0,25 А, время обработки 30 минут). Через каждые 2 минуты измерялись динамические вольтамперные характеристики гальванической ячейки при помощи встроенных измерительных каналов установки МДО. После каждого такого измерения при этом процесс МДО прерывался, и гальваническая ячейка подключалась к RLC-метру Keysight E4980A, с помощью которого измерялись частотные зависимости сопротивления и емкости покрытия. Толщина покрытий измерялась вихретоковым толщиномером. Обработка полученных данных осуществлялась средствами MATLAB.

1. Результаты и обсуждение

В отличие от существующих работ [3], в которых электрические параметры гальванической ячейки (ток, напряжение, импеданс) измеряются во время нанесении покрытия, в данной работе предлагается прерывать процесс МДО на время измерения, а сами измерения проводить на синусоидальном сигнале малой амплитуды в диапазоне частот от 20 Гц до 2 МГц. Это позволяет упростить задачу моделирования и одновременно повысить точность измерения сопротивления и емкости покрытия, поскольку исключается возможность электрического пробоя оксидной пленки, а само покрытие в этих условиях представляет собой твердый диэлектрик, а не расплав. Схема измерения импеданса и схема замещения гальванической ячейки представлены на рисунках 1 и 2.

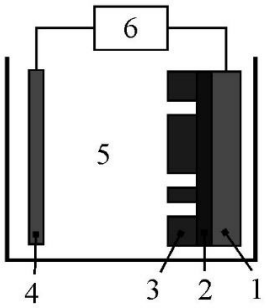


Рис. 1. Схема измерения импеданса гальванической ячейки МДО: 1 – покрываемый образец (анод); 2- барьерный слой; 3 – пористый слой покрытия; 4 – катод; 5 – электролит; 6 – RLC-метр.

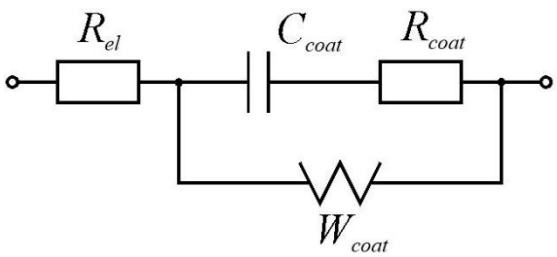


Рис. 2. Схема замещения гальванической ячейки МДО: R_{el} – сопротивление электролита; R_{coat}, C_{coat} – сопротивление и емкость покрытия; W_{coat} – диффузионный импеданс Варбурга.

При измерении импеданса на низком напряжении МДО-покрытие можно представить в виде последовательно соединенных активного сопротивления R_{coat} и емкости покрытия C_{coat}. Однако на схеме замещения присутствует также импеданс Варбурга W_{coat}, наличие которого, вероятно, связано с диффузией ионов электролита через тонкий барьерный слой покрытия на дне сквозных пор.

Предложено аналитическое описание метода измерения толщины и пористости покрытий на основе фундаментальных физико-химических закономерностей и результатов измерения импеданса гальванической ячейки. Толщина и пористость покрытия рассчитываются по формуле плоского конденсатора с утечкой через поры, в которой ток утечки определяется током диффузии. Получены зависимости изменения толщины и пористости покрытия в ходе процесса МДО.

Заключение

Результаты исследования могут быть использованы при разработке информационно-измерительных и управляющих систем микродугового оксидирования.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 26-19-20032.

Список литературы

[1] X. Liu, C. Wang, J. Lei, P. Song, T. Huang, X. Zhang, T. Yang, V. Ji. Adv. Eng. Mater., **27**(10), 2402748 (2025).

[2] Z. Li, Y. Wang, M. Yuan, B. Wang, M. Xun. Journal of Mechanical Science and Technology, **39**(3) 1131-1140 (2025).

[3] A. Semenov, E. Pecherskaya, P. Golubkov, S. Gurin, D. Artamonov, Y. Shepeleva. Heliyon, **9**(9), e19995 (2023).

Байесовская оптимизация процесса спрей-пиролиза для целевых электрофизических параметров оксидных пленок

Т. О. Зинченко ✉, **Е. А. Печерская**, **А. Э. Каташов, В. С. Александров, В. Е. Гусаров**
[1] Penza State University, Penza, Russia;
✉ scar0243@gmail.com

Аннотация. Рассмотрено применение байесовской оптимизации для автоматизированного управления параметрами процесса спрей-пиролиза при получении тонкопленочных покрытий прозрачных проводящих оксидов (ППО) на основе SnO_2:Sb. Предложена процедура, в которой модель на основе гауссовского процесса последовательно уточняется по мере накопления экспериментальных данных.

Ключевые слова: спрей-пиролиз, байесовская оптимизация, прозрачные проводящие оксиды, SnO_2:Sb, гауссовский процесс, электрофизические параметры.

Введение

Прозрачные проводящие оксиды [1] являются ключевым материалом современной опто- и наноэлектроники. Метод спрей-пиролиза занимает особое место среди технологий получения ППО. Однако свойства осаждённых пленок определяются сложной многопараметрической зависимостью от технологических факторов [2]. Традиционные методы оптимизации требуют большого числа опытов и не эффективны при наличии нелинейных взаимодействий между факторами.

Материалы и методы

Пленки SnO_2:Sb осаждали методом спрей-пиролиза на стеклянные подложки. Прекурсором служил раствор тетрахлорида пентагидрата олова цинка в этаноле с добавлением трихлорида сурьмы в качестве перкурсора примеси. Давление в распылителе было 2 бара, температура подложки — от 420 до 480 °C, концентрация прекурсора — от 0.04 до 0.15 моль/л. После осаждения пленки отжигали в атмосфере воздуха при 500 °C.

Целевой функцией оптимизации является составной показатель качества пленки на основе удельного сопротивления ρ (ρ_{target} - целевое значение удельного сопротивления) и коэффициента пропускания T (T_{target} – целевое значение коэффициента пропускания,T_{550} – коэффициент пропускания при 550 нм):

$$F = w_1 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_{target}}\right)^{-1} + w_2 \cdot \left(\frac{T_{550}}{T_{target}}\right),\ w_1 = 0.6,\ w_2 = 0.4,$$

где $\rho_{target} = 5\times10^{-4}$ Ом·см, $T_{target} = 85\%$. В качестве модели использовался гауссовский процесс.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена кривая сходимости байесовской оптимизации: значение целевой функции F монотонно улучшается с каждой новой итерацией. Уже на 12-й итерации БО достигается $\rho = 3.8\times10^{-4}$ Ом·см при $T_{550} = 88.5\%$, что соответствует превышению обоих целевых показателей.

Из таблицы 1 следует, что режим, предложенный алгоритмом БО (опыт 4), обеспечивает концентрацию носителей $n = 1.6\times10^{21}$ см$^{-3}$ и подвижность $\mu = 10.3$ см^2/(В·с), что сопоставимо с результатами вакуумных методов осаждения. Сопоставление с апостериорной моделью гауссовского процесса (рис. 2) подтверждает высокую предсказательную точность модели: отклонение рассчитанного и экспериментального значений ρ не превышает 8%. Оптимальный режим расположен вблизи границы термодинамической стабильности тетрагональной фазы рутила SnO_2. При T > 480 °C наблюдается ухудшение морфологии поверхности и рост дефектности пленки, что отражается в снижении подвижности.

Таблица 1

Электрофизические параметры пленок SnO_2:Sb при различных режимах спрей-пиролиза

№	T, °C	C, моль/л	v, мл/мин	ρ, Ом·см	T_{550}, %	n, $см^{-3}$	μ, $см^2/(В·с)$
1	420	0.05	5.0	8.5×10^{-3}	74	3.1×10^{20}	2.4
2	430	0.07	6.0	3.2×10^{-3}	80	5.8×10^{20}	3.4
3	440	0.08	6.5	4.5×10^{-4}	87	1.4×10^{21}	9.8
4 (ВО)	450	0.082	6.4	3.8×10^{-4}	88.5	1.6×10^{21}	10.3
Цель	—	—	—	$<5.0\times10^{-4}$	>85	$>10^{21}$	>8

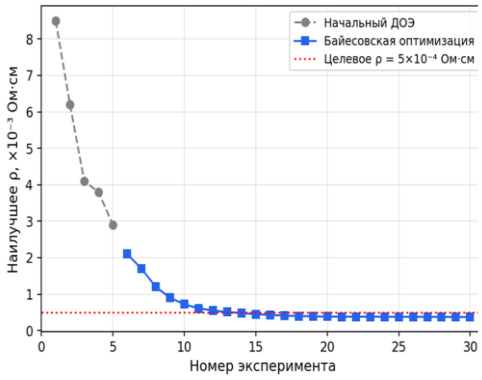


Рис.1. Кривая сходимости байесовской оптимизации

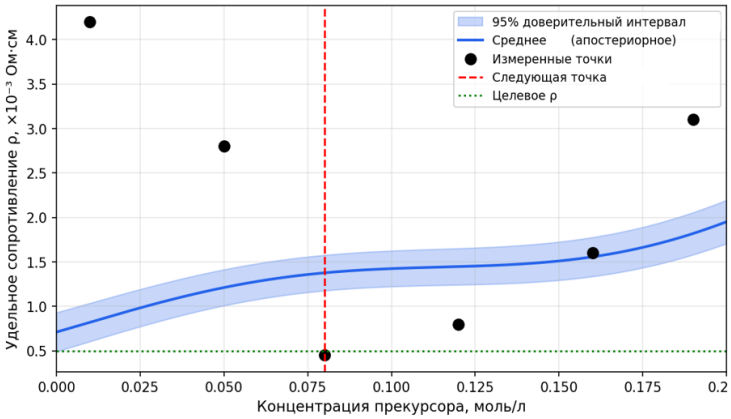


Рис. 2. Апостериорное распределение гауссовского процесса в зависимости от концентрации прекурсора

Заключение

Разработана процедура байесовской оптимизации параметров спрей-пиролиза для получения пленок SnO_2:Sb с заданными электрофизическими характеристиками [3]. Предложенный подход применим к широкому классу оксидных ППО-пленок и открывает перспективы создания замкнутых систем автоматизированного управления качеством покрытий.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и электронных устройств» (№ 124041700069-0).

Список литературы

[1] Morales-Masis M., De Wolf S., Woods-Robinson R., Ager J. W., Ballif C. Transparent Electrodes for Efficient Optoelectronics // Advanced Electronic Materials. — 2017. — Vol. 3, № 5. — P. 1600529.

[2] Deokate R. J., Pawar S. M., Moholkar A. V. [et al.]. Influence of Spray Solution Quantity on Microstructural and Optical Properties of In_2O_3 Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis // Macromolecular Symposia. — 2020. — Vol. 393, № 1. — P. 1900152.

[3] Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Antipenko V. V. [et al.] Methodology for the Selection of Technological Modes for the Synthesis of Transparent Conducting Oxides with Desired Properties / // Materials Science Forum : Selected peer-reviewed full text papers, Vol. 1049. – Krasnoyarsk, Russian Federation.: Trans Tech Publications Ltd, 2022. – P. 198-203.

Этапы формирования частиц кремнезема со сверхвысокой удельной поверхностью

З. С. Балыш [1], Д. В. Володина [1✉], Д. А. Еуров [1], С. А. Грудинкин [1], Д. А. Курдюков [1], Е. Ю. Стовпяга [1]

[1] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

✉dasha13129@gmail.com

Аннотация. Разработан подход последовательного удаления органических порообразующих темплатов, формирующих структуру сферических микро-мезопористых частиц кремнезема, путем их промывки и отжига в различных средах, приводящий к открытию пор и соответствующему росту удельной поверхности до рекордных значений - 2050 м^2/г.

Ключевые слова: сферические частицы, кремнезем, микропоры, мезопоры, сверхвысокая удельная поверхность.

Введение

В последнее время возрастает интерес к пористым материалам с развитой удельной поверхностью (УП), наибольшие значения которой (1200–2300 м²/г) [1] характерны для нанопористых углеродов. Подобные материалы находят применение в системах хранения водорода, литий-ионных батареях и катализаторах. Однако для ряда химических процессов (очистка промышленных и автомобильных выхлопных газов, окислительные каталитические процессы) требуются негорючие носители, в них применяются синтетические цеолиты (УП 400–600 м²/г) [2] и мезопористые кремнеземы (M41S, SBA и др.) с УП до1200 м²/г [3].

Целью настоящей работы было получение субмикронных сферических частиц кремнезема типа MCM-41 со сверхвысокой УП. Удельная поверхность порядка 2050 м²/г была достигнута замещением 25 мол.% тетраэтилортосиликата (ТЭОС) на [3-(метакрилокси)пропил]триметоксисилан (МПТМОС), позволившим сформировать дополнительную систему микропор в пределах мезопористого кремнеземного каркаса.

Результаты и обсуждения

Микро-мезопористые частицы со сверхвысокой УП синтезировали по ранее разработанной методике щелочного гидролиза ТЭОС и МПТМОС в присутствии алкиламина цетилтриметиламмоний бромида (ЦТАБ) [4,5]. Мольное соотношение МПТМОС:ТЭОС:NH_3:H_2O:C_2H_5OH:ЦТАБ составляло 1:3:240:3120:1250:0,4. Синтез проводили при 42 °С в течение 1 ч. Далее для неразрушающего удаления органических компонентов с целью формирования и стабилизации пористой структуры SiO_2 проводили постобработку частиц, включающую этап промывки **(wash),** предварительного **(air350)** и окончательного **(air430** или **wet$O_2$430)** отжига. Для этого частицы одно- или двукратно промывали спиртовым раствором HCl (0,01 М) при 70 °С, затем отжигали на воздухе при 350 °С и далее в течение 5 ч при 430 °С в потоке влажного O_2 (содержание H_2O ~20 г/м^3). Полученные частицы, согласно результатам ПЭМ (рис. 2а, вставка), имеют субмикронный размер (средний диаметр 450 нм) и сферическую форму.

На рис. 1 показаны ИК-Фурье спектры частиц после синтеза и процедур постобработки. Идентификация полос осуществлялась согласно [6]. Все спектры содержат колебательные моды, характерные для кремнезема. Полосы при 1630 см$^{-1}$ и 3450 см$^{-1}$ соответствует деформационным колебаниям H–O–H и валентным колебаниям OH-групп физически адсорбированной воды соответственно. Широкая полоса в области 3650–3700 см$^{-1}$ и узкий пик при 3745 см$^{-1}$ свидетельствуют о наличии поверхностных вицинальных и изолированных силанольных групп. Для синтезированных, промытых и предварительно отожженных при 350 °С частиц отмечается набор слабых полос поглощения в диапазонах 1300−1500 см$^{-1}$ и 2750−3025 см$^{-1}$ (рис. 1а, б, кривые 1-3), относящихся к колебательным модам групп CH, CH_2, CH_3, C-O, C=O, C=C и N-CH_3 в ЦТАБ и МПТМОС. Полоса в области 1540−1570 см$^{-1}$ (рис. 1а, кривые 1-2) соответствует колебаниями связей N−H и C−N аминогрупп продуктов разложения

ЦТАБ. Наибольшее количество изолированных силанолов при отсутствии органических составляющих, отмечается для частиц, отожженных в потоке влажного O_2.

а) б)

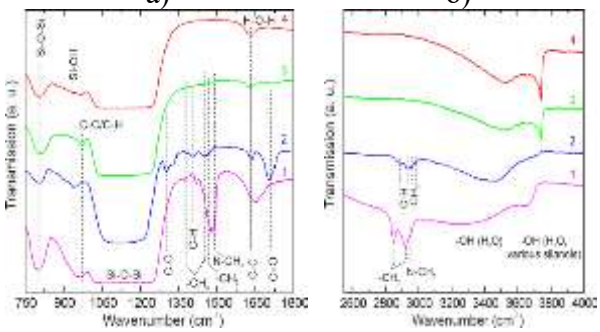


Рис. 1. ИК-Фурье спектры в диапазоне волновых чисел 750-1800 $см^{-1}$ (а) и 2575-4000 $см^{-1}$ (б) для частиц кремнезема на разных этапах формирования : (*1*) – **после синтеза**, (*2*) – **2wash**, (*3*) – **2wash, air350**, (*4*) – **2wash, air350, wetO$_2$430**.

а) б)

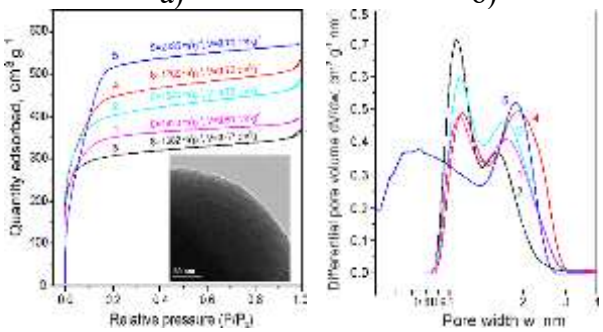


Рис. 2. Изотермы адсорбции N_2 (*1-4*) и Ar (*5*) при 77 K (а) и распределение пор по размерам согласно НТФП (б) для частиц кремнезема на разных этапах формирования: 1 – **1wash, air350**, 2 – **2wash, air350**, 3 – **2wash, air350, air430**, 4,5 – **2wash, air350, wetO$_2$430**. На вставке рис. (а) представлено ПЭМ-изображение частицы SiO_2.

Изотермы адсорбции (рис. 2а) имеют ступенчатую форму, характерную для материалов M41S [3]. На распределении пор по размерам, рассчитанным нелокальной теорией функционала плотности (НТФП) видно, что частицы характеризуются наличием микро- и мезопористых подсистем (рис. 2б). Отметим, что двукратная промывка приводит к повышению пористости, вероятно, вследствие более полного удаления ЦТАБ. Оптимальной температурой конечного отжига является 430 °C: более низкие температуры не обеспечивают полного окисления органики (рис. 1а,б), тогда как более высокие вызывают спекание материала и разрушение пор, что также наблюдается при отжиге в сухой среде **(2wash, air350, air430)**. Отжиг в потоке влажного O_2 приводит к резкому изменению УП (рис. 2а,б) вследствие образования большого количества поверхностных силанольных групп, замещающих органические компоненты, ранее стабилизировавшие структуру.

Заключение

Синтезированы субмикронные сферические микро-мезопористые частицы SiO_2 с внешним диаметром 450 нм и рекордной для оксидных материалов УП в пределах 2050 $м^2/г$. Разработанная технология постсинтетической обработки частиц обеспечивает удаление органики и образование пор, предотвращая поликонденсацию или иную деструкцию структуры SiO_2, за счет ее стабилизации поверхностными силанольными группами.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 25-23-00189.

Авторы благодарят Д.А. Кириленко за исследования, проведенные методом ПЭМ.

Список литературы

[1] Y. Gogotsi, V. Presser *Carbon Nanomaterials 2nd ed.* (CRC Press, 2013) 529 p.

[2] D. W. Breck *Zeolite molecular sieves: structure, chemistry, and use* (Wiley, 1973) 771 p.

[3] D. Zhao, Y. Wan, W. Zhou *Ordered Mesoporous Materials* (Wiley, 2013) 523 p.

[4] E. Yu. Trofimova et al. Nanotechnology, 24, 155604 (2013).

[5] D. A. Eurov, D. A. Kurdyukov, A. V. Medvedev, D. A. Kirilenko, M. V. Tomkovich, V. G. Golubev. Nanotechnology, 32, 215604 (2021).

[6] D. Lin-Vien. *The Handbook of Infrared and Raman Characteristic Frequencies of Organic Molecules* (Academic Press, 1991) 503 p.

Аналитическая модель электропроводности поликристаллических оксидных пленок с учетом барьеров на границах зерен

Т. О. Зинченко [1]✉, Е. А. Печерская, У.С. Чихрина, В. С. Александров, Н. С. Шалаев

[1] Penza State University, Penza, Russia;

✉pea1@list.ru

Аннотация. Поликристаллические оксидные плёнки, получаемые методом спрей-пиролиза, широко применяются в качестве прозрачных проводящих электродов. Электрические свойства таких плёнок в значительной мере определяются потенциальными барьерами на границах зёрен, которые ограничивают подвижность носителей заряда. В настоящей работе построена аналитическая модель электропроводности поликристаллических оксидных плёнок на основе механизма термоэлектронной эмиссии через двойной барьер Шоттки.

Ключевые слова: Прозрачные проводящие оксиды, граница зёрен, барьер Шоттки, электропроводность, аналитическая модель.

Введение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) занимают ключевое место в современной оптоэлектронике [1]. Среди методов осаждения ППО-плёнок метод спрей-пиролиза выделяется возможностью нанесения покрытий при относительно низких температурах [2]. Существующие модели переноса заряда через границы зёрен основаны на классическом механизме термоэмиссии. Однако классическое приближение теряет точность при высоких уровнях легирования [3], что подчеркивает актуальность разработки аналитической модели, применимой в широком диапазоне концентрации носителей.

Материалы и методы

Рассмотрена поликристаллическая плёнка в виде периодической цепочки зёрен со средним размером L и границами зёрен толщиной $\delta \ll L$. На каждой границе зерна локализованы поверхностные состояния-ловушки с поверхностной плотностью N_t (см$^{-2}$). Захват электронов ловушками приводит к формированию объёмного заряда в приграничной области зерна и возникновению двойного потенциального барьера Шоттки (рис. 1). Высота потенциального барьера определяется из условия электронейтральности.

Эффективная подвижность поликристаллической плёнки определяется как результирующая внутризёренной подвижности μ_g (ограниченной рассеянием на ионизованных примесях) и подвижности через барьер μ_{GB}.

В результате получена аналитическая зависимость проводимости от трёх ключевых параметров: размера зерна L, плотности ловушек N_t и концентрации носителей n:

$$\sigma_{eff}(n, N_t, L) = qn\left[\frac{1}{\mu_g} + \frac{1}{\mu_0}\left(\frac{2\pi m^* k_B T}{q\Phi_B}\right)^{1/2} exp\left(\frac{q\Phi_B}{k_B T}\right)\right]^{-1}, \quad (1)$$

где σ_{eff} — эффективная электропроводность поликристаллической плёнки, n — концентрация свободных носителей заряда в объёме зерна, N_t — поверхностная плотность состояний-ловушек на границе зерна, L — средний размер зерна, q — элементарный заряд электрона, μ_g — внутризёренная подвижность носителей, ограниченная рассеянием на ионизованных примесях, μ_0 — предэкспоненциальный множитель подвижности, связанный с частотой термоэмиссионных переходов через барьер, m* — эффективная масса электрона в материале зерна, k_B — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, Φ_B — высота потенциального барьера Шоттки на границе зерна.

Модель применима до полного перекрытия обеднённых областей соседних границ зёрен.

Результаты и обсуждение

Расчёт по предложенной аналитической модели (1) выполнен для параметров, характерных поликристаллическим ППО-плёнкам на основе ZnO:Al и SnO_2:Sb, полученных

методом спрей-пиролиза. На рис. 2 представлены расчётные зависимости эффективной подвижности носителей μ_{eff} от среднего размера зерна L.

Сравнение моделированных и экспериментальных значений электрических параметров приведено в таблице 1.

/

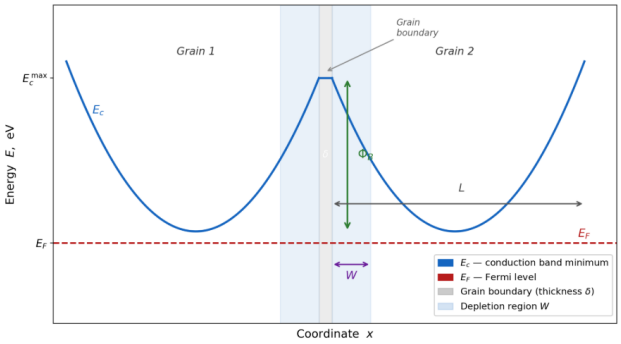


Рис. 1. Энергетическая диаграмма двух соседних зёрен поликристаллической оксидной плёнки

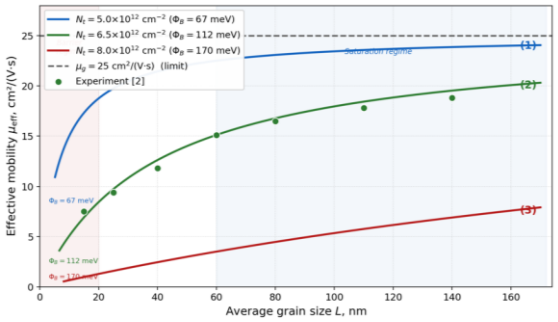


Рис. 2. Зависимость эффективной подвижности носителей μ_{eff} от среднего размера зерна L для плёнок SnO_2:Sb при различной плотности ловушек N_t

Таблица 1

Сравнение расчётных и экспериментальных значений эффективной подвижности и удельной проводимости

Материал	μ_{eff} расч., см²/(В·с)	μ_{eff} эксп., см²/(В·с)	σ_{eff} расч., (Ом·см)$^{-1}$	σ_{eff} эксп., (Ом·см)$^{-1}$
SnO_2:Sb	18,4	17,1 ± 1,5	1470	1370 ± 120
ZnO:Al	11,2	12,3 ± 1,5	538	591 ± 80

Расхождение между расчётными и экспериментальными данными не превышает 10%, что свидетельствует об удовлетворительной адекватности предложенной модели.

Заключение

Предложена аналитическая модель электропроводности поликристаллических оксидных плёнок, учитывающая механизм термоэлектронной эмиссии через двойной потенциальный барьер Шоттки на границах зёрен. Модель позволяет аналитически связать эффективную проводимость плёнки с тремя ключевыми микроструктурными параметрами: средним размером зерна L, плотностью состояний-ловушек N_t и концентрацией свободных носителей заряда n.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и электронных устройств» (№ 124041700069-0).

Список литературы

[1] Analysis of the Influence of Technological Parameters on the Properties of Transparent Conductive Oxides / E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko, P. E. Golubkov [et al.] // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 58, No. 3. – P. 798-806.

[2] Joseph D. P., Radha R., Fernandes J. M. [et al.]. Investigation of the transparent conducting properties of spray-pyrolyzed Li and F co-doped SnO_2 thin film electrodes // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. — 2022. — Vol. 33, № 10. — P. 8435–8445.

[3] Nguyen V. H., Gottlieb U., Valla A. [et al.]. Electron tunneling through grain boundaries in transparent conductive oxides and implications for electrical conductivity: the case of ZnO:Al thin films // Materials Horizons. — 2018. — Vol. 5, № 4. — P. 715–726.

Текстурированные плёнки нитрида алюминия для активных элементов микроэлектромеханических систем

С.А. Гурин [1], Е.А. Печерская [1], М.Д. Новичков [1]✉, В.Д. Агафонов[1], Е.А. Шепелева[1]
[1] ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», Пенза, Россия
✉novichkov1998maks@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты синтеза и исследования пьезоэлектрических плёночных структур нитрида алюминия, полученных методом реактивного высокочастотного магнетронного распыления. Показано, что формирование текстурированных плёнок AlN на кремниевых подложках позволяет достичь высоких пьезоэлектрических характеристик. Методом сканирующей электронной микроскопии выявлена столбчатая структура плёнок, обусловленная условиями осаждения. Приведены основные выходные параметры сенсорных структур на основе AlN, включая чувствительность, пьезомодуль, динамический диапазон и частотный диапазон. Полученные результаты подтверждают перспективность использования тонкоплёночных пьезоструктур AlN в качестве активных элементов микромеханических устройств.

Ключевые слова: Нитрид алюминия, реактивное магнетронное распыление, пьезоэлектрические свойства, текстурированные плёнки, тонкоплёночные сенсоры

Введение

Нитрид алюминия принадлежит к классу широкозонных полупроводников, что обусловливает его высокую термическую стабильность, химическую инертность и устойчивость к внешним воздействиям. Благодаря сочетанию этих свойств с выраженным пьезоэлектрическим эффектом, AlN находит широкое применение в современной микроэлектронике и микросистемной технике, в частности, в качестве активного материала для тонкоплёночных сенсоров, резонаторов и элементов микромеханических систем. Возможность осаждения плёнок AlN методом магнетронного распыления совместима с технологическими процессами кремниевой полупроводниковой технологии, что открывает перспективы для интеграции пьезоэлектрических компонентов с другими компонентами электронной техники на одном кристалле.

Материалы и методы

Синтез плёночных пьезоструктур нитрида алюминия проводили методом реактивного высокочастотного магнетронного распыления в вакуумной установке с турбомолекулярной откачкой на подложки монокристалического кремния с ориентацией (111) с предварительно сформированным контактным слоем Ti-Ni. Процесс осуществляли в плазме аргон-азотной смеси при распылении мишени из алюминия марки А99.

Критически важным для управления структурой осаждаемых слоев являлся контроль ключевых технологических параметр0в: остаточное давление в камере поддерживали на уровне $1…5\times10^{-5}$ мм рт.ст., напряжение смещения на электродах варьировали в диапазоне 60…150 В, температура подложки поддерживалась в интервале 450..500 °С. Затем был получен второй контактный слой аналогично первому. Далее полевым и температурным воздействием создавали в пленке AlN устойчивое поляризованное состояние.

Результаты и обсуждение

Структура выращенных пленок изучалась на сканирующем электронном микроскопе. На рисунке 1 представлено сечение образца, на котором видна столбчатая структура пленки.

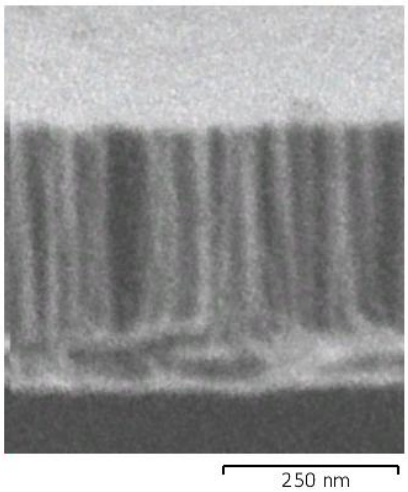


Рис. 1. Микрофотография плёнки AlN

На рисунке 1 хорошо видно, что пленка имеет двухслойную структуру. Верхний слой образован столбчатыми кристаллитами, а нижний, переходный слой, не имеет выраженной структуры.

Изучение выходных характеристик такого сенсора проводили на специализированном стенде путем иммитации одиночных ударов. На рисунке 2 приведена реакция сенсора на одиночный удар.

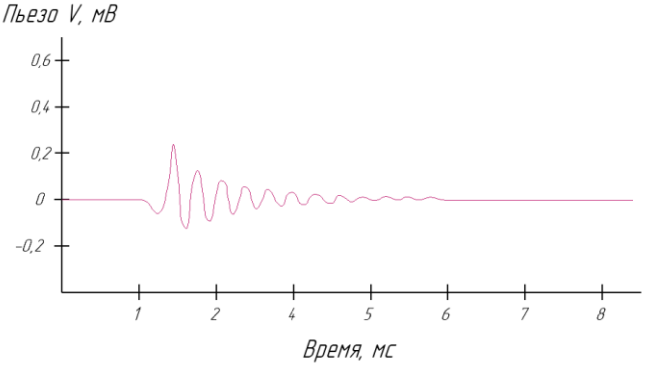


Рис. 2. Отклик сенсора на одиночный удар

Таким образом можно заключить, что текстурированная пленка AlN обладает пьезоэлектрическими свойствами, что создает возможности ее использования в качестве активного элемента микромеханических структур.

Заключение

В результате проведённого исследования установлено, что метод реактивного высокочастотного магнетронного распыления позволяет формировать текстурированные плёнки AlN с выраженными пьезоэлектрическими свойствами. Контроль технологических параметров, включая остаточное давление, напряжение смещения и температуру подложки, обеспечивает формирование столбчатой структуры плёнок, что подтверждено данными сканирующей электронной микроскопии.

Список литературы

[1] F. Meng, C. Zhang, G. Zhang [et. al], Micromachines. **16**(4), 454 (2025) doi: 10.3390/mi16040454.

[2] Ting Lv, V. Pelenovich, Chang Xu [et al.], Ceramics International, **50**(22), 47008-47016 (2024) https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.09.051.

Оптимальное управление процессом формирования толщины покрытия при микродуговом оксидировании

А. А. Максов [1]✉, **А. Д. Семенов**[1], **Е. А. Печерская**[1], **П. Е. Голубков**[1], **Г.В. Козлов**[1]
[1]Penza State University, Penza, Russia
✉maksov.01@mail.ru

Аннотация. На основе теоретических и экспериментальных исследований получена линеаризованная модель роста функционального оксидного покрытия, позволяющая решить задачу оптимального управления процессом формирования толщины покрытия как вариационную задачу с изопериметрическими ограничениями. Найденное точное и приближенное решение задачи позволило оценить технико-экономические показатели процесса. Приближенное решение описывается гиперболическим синусом, а его относительная ошибка не превышает 15 %. Для подтверждения теории, проведена экспериментальная оценка возможностей оптимального управления для случая снижения энергопотребления.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, оптимальное управление, модель роста покрытия, вариационная задача, энергоэффективность.

Введение

Процесс микродугового оксидирования (МДО) рассматривается как многопараметрический процесс, характеризующийся сочетанием электрических, электроплазмохимических, физико-химических явлений [1]. В рамках системного подхода его декомпозируют на ряд отдельных подпроцессов, основными из которых являются электрический и плазменно-электролитический процессы. Для решения задач управления и оптимизации необходимо располагать адекватной математической моделью, определяющей взаимосвязи между задаваемыми технологическими режимами оксидирования и функциональными характеристиками синтезируемых покрытий, к которым также относится толщина h [2, 3]. Например, в исследовании [4] отмечалось, что скорость роста покрытия пропорциональна действующему значению тока и уменьшается с ростом его толщины. В связи с этим актуальной является задача разработки таких моделей, включая модели роста покрытия, позволяющих на их основе решать задачи оптимального управления технологическим процессом и количественно оценивать технико-экономические показатели (энергопотребление, производительность и быстродействие).

Материалы и методы

Динамика роста покрытия описывается линеаризованным дифференциальным уравнением 1-го порядка:

$$T\frac{dh}{dt} + h = kI, \tag{1}$$

где h – толщина покрытия, t – время, T – постоянная времени, k – постоянный коэффициент, I – действующее значение тока, протекающего через формируемое покрытие. При этом считается, что сопротивление покрытия R пропорционально зависит от его толщины h.

Задача оптимального управления по критерию минимума энергии сформулирована как вариационная с изопериметрическими ограничениями:

$$\begin{gathered}\int_0^{T_o} dt = T_o;\\ \int_0^{T_o} \dot{h}dt = h_o;\\ \int_0^{T_o} RI^2 dt = min,\end{gathered} \tag{2}$$

где T_o – заданное время обработки; h_o – требуемая толщина покрытия, $\dot{h}$ – производная толщины покрытия h по времени t. Решение системы (2) методом множителей Лагранжа при условии $R = const$ с использованием уравнения (1) для исключения тока сводится к

уравнению Эйлера $\ddot{h} = h/T^2$. Интегрирование с граничными условиями $h(0) = 0$, $h(T_o) = h_o$ позволяет получить приближенное значение для толщины покрытия:

$$h = C \cdot sh\left(\frac{t}{T}\right), \quad (3)$$

где постоянная $C = \frac{h_o}{sh(T_o/T)}$ определяется условием получения толщины h_o за время T_o.

Экспериментально получены покрытия на образцах в виде пластин 20×15×2 мм из сплава АД31 погружением их в электролит, содержащий 0,5 г/л NaOH и 80 г/л Na_2SiO_3. Микродуговая обработка проводилась на синусоидальном токе в течение 30 минут. Плотность тока 10 А/дм^2, амплитуда анодного напряжения +400 В, соотношение анодного/катодного токов – 1. Экспериментальная реализация режима минимальных потерь выполнена с помощью трехступенчатого подключения балластных конденсаторов, обеспечив аппроксимацию оптимального закона изменения тока. Регистрацию осциллограмм напряжения и тока проводили каждую минуту. Затем рассчитывали действующее значение, мощность, энергопотребление и толщину покрытия.

Результаты и обсуждение

Теоретический анализ показал, что оптимальное управление позволяет существенно повысить технико-экономические показатели процесса, по сравнению с неуправляемым: снижено электропотребление в 1,49 раз; увеличена производительность в 1,29 раз; время обработки сокращено в 1,78 раза. Сравнение точного и приближенного решений показало, что относительная погрешность по току и толщине не превышает 15 %. Электропотребление в управляемом режиме составило 444 Дж, что в 1,67 раза меньше, чем в неуправляемом (740 Дж), при практически одинаковой толщине покрытия, что также хорошо согласуется с теоретической оценкой снижения энергопотребления (1,5 раза).

Заключение

Полученные математические модели роста покрытия и методы оптимального управления МДО-процессом целесообразно использовать при разработке систем управления технологических комплексов. Показано, что экстремаль приближенного решения описывается гиперболическим синусом, а погрешность адекватности моделей не превышает 15 %. Подтверждено, что оптимальное управление позволяет снизить потери энергии в 1,5 раза, повысить производительность в 1,3 раза и быстродействие в 1,7 раза.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 26-19-20032 «Исследование взаимосвязей факторов, влияющих на свойства биосовместимых покрытий, синтезируемых методом микродугового оксидирования на имплантатах и изделиях медицинского назначения».

Список литературы

[1] L. Rodriguez, J.-Y. Paris, J. Denape, K. Delbé, Micro-Arcs Oxidation Layer Formation on Aluminium and Coatings Tribological Properties-A Review, *Coatings*, 13(2), 373 (2023). DOI: 10.3390/coatings13020373

[2] X. Li, X. Li, Y. Li, C. Dong, H. Tian, S. Wang, Q. Zhao, Growth mechanism of micro-arc oxidation film on 6061 aluminum alloy, *Materials Research Express*, 6(6), 066404 (2019). DOI: 10.1088/2053-1591/ab0a20

[3] E.A. Pecherskaya, S.V. Konovalov, P.E. Golubkov, M.A. Mitrokhin, S.A. Gurin, M.D. Novichkov, Study of optical characteristics of micro-discharges in the micro-arc oxidation process, *Vacuum*, 229, 113558 (2024). DOI: 10.1016/j.vacuum.2024.113558

[4] G. Ma, Z. Li, X. Zhao, et al., Growth mechanism and product formation of Micro-arc oxide film layers on aluminum matrix composites: An analytical experimental and computational simulation study, *Applied Surface Science*, 686, 161968 (2025). DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.161968

Влияние линейной двуосной деформации и адсорбции аммиака на электронные свойства монослоя MoS_2: DFT-моделирование

Н. А. Свинкин [1✉], **В. М. Кондратьев**[1,2], **И. А. Круглов**[1], **А. Д. Большаков**[1,2,3]
[1] МФТИ, Долгопрудный, Россия;
[2] СПбАУ им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия
[2] СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия
✉nik-svinkin@mail.ru

Аннотация. Методами теории функционала плотности исследовано влияние линейной двуосной деформации и адсорбции молекулы аммиака на электронные свойства монослоя дисульфида молибдена (MoS_2). Построены зависимости ширины запрещенной зоны MoS_2 от степени деформации. Изучено влияние адсорбции молекулы NH_3 на зонную структуру MoS_2.

Ключевые слова: TMD; JTMD; монослой; DFT; сенсорика; NH_3; адсорбция; деформация.

Введение

Монослой MoS_2 сочетает прямозонную структуру, высокую механическую прочность и чувствительность к адсорбции, что важно для гибкой электроники и газовых сенсоров [1,2]. Экспериментально показана высокая селективность к NH_3 при комнатной температуре [1], а теоретические расчёты выявили особенности в изменении ширины запрещённой зоны при одноосной деформации [2]. В данной работе методом DFT исследовано совместное влияние линейной деформации и адсорбции NH_3 на электронные свойства монослоя MoS_2.

Материалы и методы

Монослой MoS_2 моделировался в суперячейке 3×3 (20 Å по вертикали). Расчёты проводились в пакете Quantum Espresso 7.3.1 [3] с псевдопотенциалами ONCVPSP [4]. Оптимизация геометрию проводилась в приближении PBE (сетка MP 2x2x1), ширину запрещённой зоны (Eg) уточнялась методом HSE (MP 4x4x1). Деформация менялась от -10% (сжатие) до +10% (растяжение) относительно равновесной постоянной решётки (9.48 Å) [5] с шагом 2%. Зонные структуры строились с поправкой на дисперсионное взаимодействие и ножничной поправкой на основе HSE.

1. Результаты и обсуждение

При растяжении или сжатии монослоя ширина запрещённой зоны падает (рис. 1). В недеформированном состоянии Eg = 2.13 эВ, что близко к известным данным (2.4 эВ). Интересно, что при слабом сжатии (98% от нормы) Eg достигает 2.42 эВ — почти как в эксперименте (2.4 эВ) [6]. При сильном растяжении (110%) щель практически исчезает.

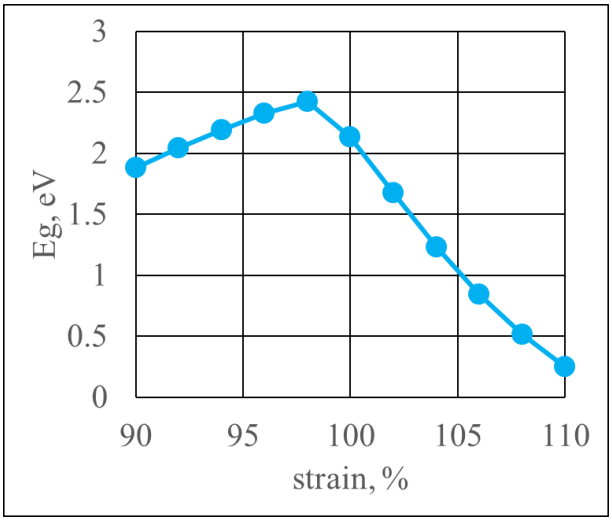


Рис. 1. Зависимость ширины запрещенной зоны от деформации MoS_2

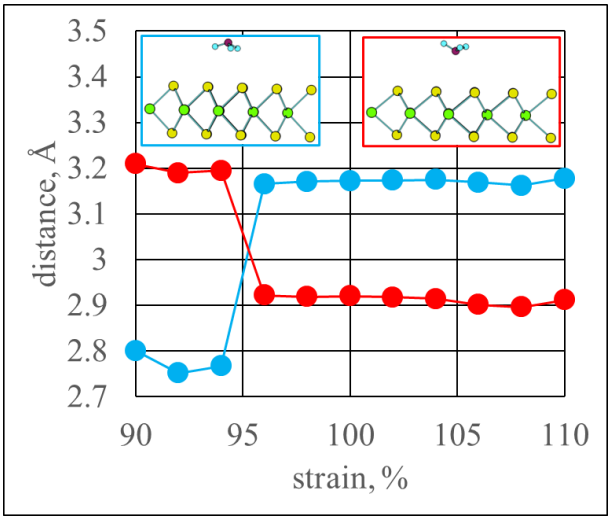
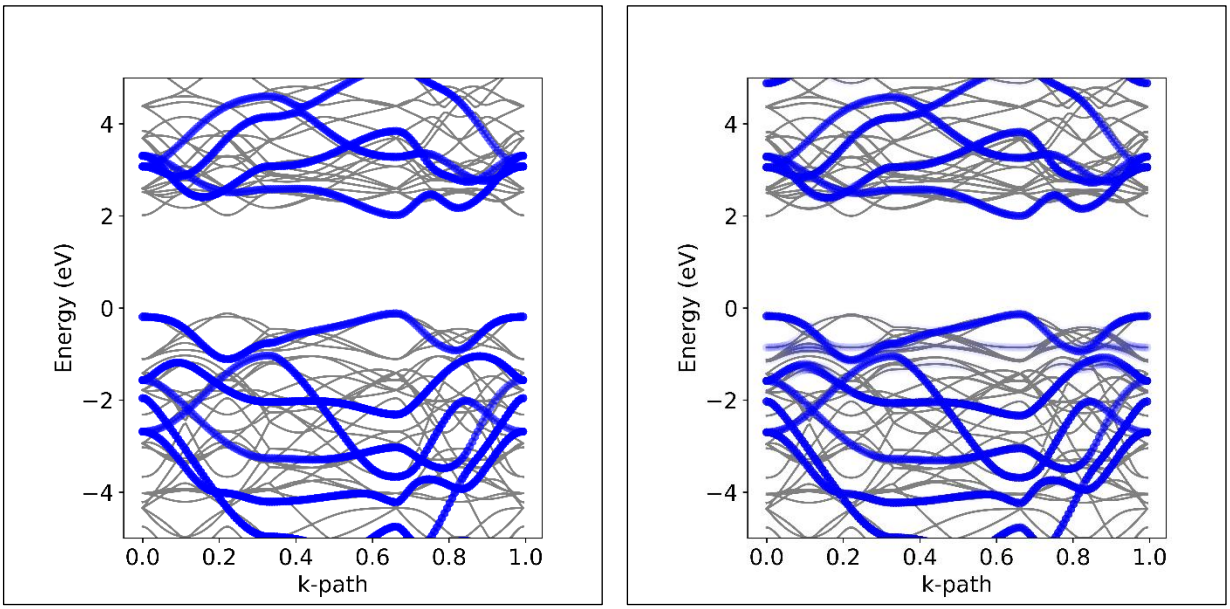


Рис. 2. Зависимость расстояния до молекулы NH_3 от деформации MoS_2



а) б)

Рис. 3. а) Зонная структура недеформированного MoS_2; б) Зонная структура недеформированного MoS_2 с адсорбированной молекулой аммиака

Молекула аммиака держится на поверхности на расстоянии ~ 3 Å, что соответствует ван-дер-ваальсову взаимодействию (рис. 2). При деформации от 94% до 96% она резко поворачивается: теперь к поверхности обращён атом азота, а не водороды (вставки на рисунке). На зонных диаграммах (рис. 3) после адсорбции появляется почти горизонтальный уровень в валентной зоне – ещё одно подтверждение слабого взаимодействия NH_3 с MoS_2.

Заключение

Расчёты показали, что при сжатии до 98% от равновесной решётки Eg возрастает до 2.42 эВ, а при растяжении до 110% зона практически исчезает. Адсорбция NH_3 имеет ван-дер-ваальсов характер (~ 3 Å), при деформации 94-96% молекула поворачивается к поверхности атомом азота, а в зонной структуре появляется слабо диспергирующий уровень. Результаты указывают на возможность управления свойствами MoS_2 комбинацией деформации и адсорбции для оптимизации газовых сенсоров.

Благодарности

Свинкин Н. А. выражает благодарность МИНОБРНАУКИ РОССИИ, Соглашение №075-15-2024-560 от 25.04.2024. Квантовохимическое моделирование проводилось с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.spbstu.ru).

Список литературы

[1] T. Järvinen, G. S. Lorite, J. Peräntie, G. Toth, S. Saarakkala, V. K. Virtanen, K. Kordas. Nanotechnology, **30**(40), 405501, (2019).

[2] R. K. Sah, H. Tang, C. Shahi, A. Ruzsinszky, J. P. Perdew. Phys. Rev. B, **110**(14), 144109, (2024).

[3] P. Giannozzi, S. Baroni, N. Bonini, M. Calandra, R. Car, C. Cavazzoni, et. al. J. Phys.: Condens. Matter, **21**(39), 395502, (2009).

[4] D. R. Hamann. Phys. Rev. B, **88**(8), 085117, (2013).

[5] S. Imani Yengejeh, J. Liu, S. A. Kazemi, W. Wen, Y. Wang. ACS omega, **5**(11), 5994-6002, (2020).

[6] Y. L. Huang, Y. Chen, W. Zhang, S. Y. Quek, C. H. Chen, L. J. Li, et. al. Nat. Commun., **6**(1), 6298, (2015).

13-я Школа-конференция с международным участием по Оптоэлектронике, Фотонике и Наноструктурам SPbOPEN 2026

СБОРНИК ТЕЗИСОВ