

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования "Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

На правах рукописи

Панов Дмитрий Вячеславович

**Получение металл-полимерных композитов и металлических нанопроволок
различной конфигурации, исследование их структуры и физико-химических
свойств**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук,
профессор Бондаренко Геннадий Германович

Москва 2024

Актуальность темы исследования

В настоящее время не ослабевает спрос на создание различных наноматериалов и структур на их основе. Работы в области создания, исследования и применения наноструктур становятся все более актуальными и востребованными, что обусловлено огромными возможностями их применения в различных отраслях микро- и наноэлектроники, радиоэлектронике, химической промышленности, медицине и др. Широкий спектр получаемых наноструктур обеспечивает многообразие возможностей их применения.

Одним из типов получаемых наноструктур являются металлические нанопроволоки (НП). Предполагается, что металлические НП могут обладать улучшенными, по сравнению с объемными металлическими материалами, электрическими свойствами и механической прочностью при повторяющихся механических воздействиях, что делает их многообещающим материалом для практических гибких/носимых устройств. Кроме того, данные объекты могут представлять практический интерес с точки зрения улучшенных химических свойств, в частности для использования в качестве сенсоров и катализаторов. Отличительной особенностью массивов НП является то, что они обладают развитой площадью поверхности при относительно низком общем количестве используемого материала, что может обеспечить их повышенную каталитическую активность. При этом перспективным способом получения катализаторов из НП является использование относительно недорогих материалов (например, меди, кобальта), по сравнению с широко используемыми металлами платиновой группы.

Особый интерес как с научной, так и с прикладной точек зрения представляют гибридные металл-полимерные композиты, состоящие из полимерной матрицы с внедренными в них металлическими НП. Этот интерес обусловлен возможностью совмещения свойств эластичности полимерного материала с электропроводностью металлического нанообъекта.

Таким образом, описанные направления исследований вполне актуальны, в связи с чем настоящая диссертация посвящена разработке методов получения эффективных наноразмерных металлических структур и металл-полимерных композитов, экспериментальному выявлению особенностей их формирования, морфологии и структуры, а также влиянию различных факторов на их физико-химические свойства и нахождению технических решений реализации улучшенных свойств наноразмерных материалов и композитов на их основе в различных технических приложениях для практического использования.

Степень разработанности темы исследования

Существует несколько методов получения наноструктур, например, электронная и фотолитография, эпитаксия и др [1-4]. Среди них выделяется метод матричного синтеза ввиду его простоты и вариативности получаемых структур. Суть метода заключается в заполнении пор матрицы необходимым материалом. Этот метод был описан в литературе [4-6], однако его возможности еще не полностью реализованы, в частности, при его использовании в таких отраслях, как электроника, химия, медицина и др. При этом существенное количество работ посвящено получению и исследованию свойств наноструктур, а не созданию продукта на их основе.

В основном в качестве матрицы для синтеза используются пористый оксид алюминия (ПОА) и трековые мембраны (ТМ) из полимерных материалов. Полимерные ТМ характеризуются хаотичным расположением пор с возможностью наложения друг на друга, что позволяет создавать проводящую цепь внутри самой мембраны. Они отличаются гибкостью и возможностью целенаправленного изменения формы и диаметра пор. Кроме того, в ТМ можно варьировать плотность пор в широких пределах независимо от их диаметра. Существенным отличием ТМ является возможность

изменения угла наклона пор при облучении тяжелыми ионами [7]. При использовании облученных под некоторым, непрямым углом, ТМ возможно повысить количество пересечений выращенных НП за счет увеличения плотности потока ионного облучения. Оценить количество пересечений в объеме трековой мембраны можно как с помощью расчета, так и экспериментально [8].

Поры трековых мембран могут быть заполнены химически и электрохимически. Электрохимический процесс более предпочтителен ввиду его большей скорости заполнения. В качестве материалов для осаждения широко используются металлы группы железа, медь, серебро и золото.

Становится возможным путем изменения структурных и размерных параметров (геометрических размеров пленок и нанопроволок, структуры границ раздела и др.) в широких пределах менять физико-химические характеристики создаваемых наноматериалов, а значит получать необходимую комбинацию различных свойств (механических, электрофизических, химических и др.). Появляется реальная возможность изменять свойства материала, придавая ему характеристики, недостижимые для объемных материалов. Конические НП могут применяться, например, в качестве эмиттеров электронов. Структура типа «сэндвич» может быть использована в качестве источника терагерцового излучения и гибкой кожи [9-13].

Одним из перспективных приложений является катализ в связи с его важностью, например, в доочистке загрязненных выхлопов или в химической промышленности [14-17]. Представляет интерес изучение каталитических свойств конических нанопроволок и наноструктуры типа «сэндвич». В настоящее время ключевыми материалами катализаторов для разного рода реакций являются металлы платиновой группы. Создание дешевых, но не уступающих по эффективности, катализаторов, является важной задачей для

развития химической отрасли.

Благодаря развитию методик синтеза наноматериалов становится возможным изготовление композитных материалов на основе наноструктур. Среди композитных проводников можно выделить тонкопленочные многослойные проводники [20, 21, 23] и композитные проводники с наночастицами, расположенными как на поверхности пленок [18, 22-24], так и интегрированными в их объем [19, 20].

Тонкопленочные многослойные проводники могут быть использованы для всех видов оптоэлектронных интерфейсных устройств, таких как сенсорные экраны [18, 20, 22, 23], солнечные элементы [20, 23], светоизлучающие устройства [18, 20]. Данные объекты могут быть получены различными способами, например, методом химического осаждения из паровой фазы, вакуумным термическим распылением и др.

К наиболее перспективным методам изготовления композитных проводников можно отнести, на наш взгляд, методы, основывающиеся на интеграции металлических нанопроволок в объем полимерных пленок. Металлические нанопроволоки из таких материалов как Ag [25], Au [25] и Pt [26] обладают хорошими электрическими свойствами [27, 28], повышенной механической прочностью по сравнению с массивными образцами из соответствующего материала в условиях повторяющихся механических напряжений [29, 30], поэтому одномерные проводящие наноструктуры можно рассматривать, например, как материалы для гибких электронных устройств и проводящих электродов, как это было указано в работе [24]. Экспериментальное получение и исследование физических свойств структуры «НП из серебра-полиэтилентерефталат (ПЭТФ)» явилось одной из задач настоящей работы.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является разработка методов получения наноразмерных металлических структур различной конфигурации и металл-полимерных композитов на их основе, экспериментальное выявление особенностей формирования, морфологии и структуры, а также влияния различных факторов на физико-химические свойства синтезированных наноразмерных структур и композитов, нахождение технических решений реализации свойств исследованных наноразмерных материалов и композитов в различных технических приложениях и выработка рекомендаций для их практического использования.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

- Разработка методов и отработка режимов получения НП различной конфигурации и структур типа «сэндвич», состоящих из НП, расположенных между двумя слоями металла;
- Выявление особенностей морфологии и структуры металлических НП различной конфигурации, связанных со способами их получения;
- Разработка способов получения катализаторов на основе медных и кобальтовых НП;
- Экспериментальное получение новых научных данных о каталитических свойствах НП из кобальта и меди, влиянии на них различных факторов;
- Разработка способа синтеза и отработка режимов получения композитов типа «металл-полимер» на основе полимерной пленки (ПЭТФ, поликарбонат, полиимид) и внедренных в нее металлических нанопроволок (из серебра, и кобальта);

- Экспериментальное получение новых научных данных о физических свойствах синтезированного композита «серебро-ПЭТФ» и влиянии на них различных факторов;
- Разработка способа изготовления пленочного нагревательного элемента на основе «серебро-ПЭТФ» с массивом пересекающихся токоведущих нанопроволок;
- Нахождение технических решений реализации свойств синтезированных НП и металл-полимерных композитов в различных технических приложениях и выработка рекомендаций для их практического использования.

Научная новизна диссертационной работы

- Предложены и практически реализованы методы получения нанопроволок (НП) различной конфигурации: цилиндрические НП, НП конической формы, структуры типа “сэндвич” (НП, находящиеся между двумя слоями подложек), разработаны режимы получения НП и металлизации поверхности матрицы;
- Выявлены особенности морфологии и структуры металлических НП различных конфигураций, связанные со способами их получения;
- Получены новые научные данные о каталитических свойствах медных НП и влиянии различных режимов электроосаждения на эти свойства; в частности, установлено, что использование медных пленок с расположенными на них медными НП значительно усиливает каталитический эффект при окислении окиси углерода, при этом наибольший эффект (возрастание степени окисления на 60–70%) достигается в случае использования НП цилиндрической формы; показано,

что эффект наблюдается при достаточно низких температурах 200–350°;

- Предложен и практически реализован способ изготовления катализатора для окисления CO в CO₂ на основе медных НП; показано, что максимальная эффективность окисления CO в CO₂ достигается в интервале температур от 300°С до 350°С для нанопроволок диаметром 100 нм; данный способ защищен патентом РФ;
- Впервые получены новые научные данные о каталитических свойствах кобальтовых НП; обнаружен эффект увеличения каталитической активности кобальта в реакции гидрирования этилена при увеличении (в десятки раз) площади поверхности кобальтового образца путём создания массива НП. Показано, что использование кобальтовых НП в качестве катализатора делает возможным проведение реакции гидрирования этилена при 200°С при величине конверсии 20%;
- Предложен и практически реализован новый способ синтеза композитов типа «металл-полимер» на основе полимерной пленки (ПЭТФ, поликарбонат, полиимид) и внедренных в нее металлических нанопроволок (из серебра, и кобальта);
- Получены новые научные данные о физических свойствах композита «ПЭТФ-серебряные нано/микро-проволоки»; рассчитаны вероятности пересечений серебряных нано- и микропроволок, расположенных в порах ПЭТФ для системы пересекающихся пор; с использованием выполненных расчетов и проведенных экспериментов установлено, что на механические свойства металл-полимерного композита оказывают существенное влияние количество взаимопересечений проволок и их диаметр; в частности, экспериментально показано, что изменяя диаметр проволоки от 400 до 600 нм можно увеличить пластичность композита в два раза. Также получена линейная зависимость, связывающая разность электрических потенциалов

с температурой нагрева композита;

- Разработан способ изготовления пленочного нагревательного элемента из полимерного материала с массивом сквозных пересекающихся цилиндрических каналов, в которых расположены токопроводящие элементы - серебряные НП; показано, что заполнение пор трековых мембран матрицы серебром позволяет поднимать температуру нагрева до 78°C без деформации и повреждения нагревательного элемента; данный нагревательный элемент предназначен для изготовления элементов гибкой электроники, способ его изготовления защищен патентом РФ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Представленные в диссертационной работе результаты расширяют спектр знаний о закономерностях формирования, морфологии, структурных особенностях, а также физико-химических свойствах одномерных наноструктур и металл-полимерных композитов, вносят весомый вклад в понимание различных процессов, происходящих в исследованных материалах под влиянием различных факторов – геометрических размеров и формы пор ТМ, режимов электроосаждения, температуры, окислительной среды и т.д. Предложенный в диссертации способ создания пленочного гибкого нагревательного элемента на основе композитной пленки из полимерного материала с массивом контактирующих токопроводящих НП серебра внутри неё может быть использован в элементах гибкой электроники, при создании нагревательной пленки для кожи человека, терморегулировании электронных устройств и т.д. Предложенный в диссертации способ увеличения каталитической активности кобальта в реакции гидрирования этилена позволяет использовать эффективный для катализа и относительно дешёвый (по сравнению с металлами платиновой группы) кобальт. Важным и

удобным для практического применения является и то, что каталитическая активность проявляется при достаточно низкой температуре - около 200 °С. В диссертации также разработан новый способ получения катализатора для окисления СО в СО₂ и обоснована возможность применения одномерных медных наноструктур в каталитическом окислении окиси углерода, что имеет важное значение для доочистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания.

Найденные технические решения - создание способов получения пленочного нагревательного элемента на основе композитной пленки из полимерного материала с массивом контактирующих токопроводящих НП серебра внутри неё и катализатора на основе нанопроволок из меди - были запатентованы, получены патенты РФ на изобретения.

Методы исследования

Для получения массивов нанопроволок (НП) в работе использовался метод матричного синтеза, основанный на гальваническом заполнении пор заранее подготовленной матрицы. Выбранная методика позволяет широко варьировать как геометрические, так и структурные параметры получаемых наночастиц. Для получения структур использовались промышленные трековые мембраны из полиэтилентерефталата толщиной 12 мкм с порами диаметром 100 нм с плотностью пор $1,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ производства ОИЯИ (г. Дубна, Россия). Ориентация пор составляла до $\pm 30^\circ$ по ходу прокатки пленки (по вертикали) при облучении ионами и $\pm 0,5^\circ$ перпендикулярно ходу прокатки пленки (по горизонтали). В том числе, в работе использовались пленки с диаметрами пор 30, 65, 100, 200, 300, 400, 600 нм.

Для создания контактной поверхности проводилось напыление методом вакуумного термического распыления меди на одну из поверхностей

полимера с помощью установки ВУП-4. Осаждение медной подложки на контактный слой проводилось в потенциостатическом режиме при 0,4 В. В качестве источника тока применялся потенциостат-гальваностат Р-2Х (Elins, Россия).

Гальваническое осаждение серебра в поры мембраны проводилось в вертикальной ячейке из полиэтилентерефталатгликоля (PET-G) с площадью рабочей зоны 15 см². Использовался электролит серебрения состава AgNO₃ – 0.177 моль/л; K₄[Fe(CN)₆] – 0.136 моль/л; K₂CO₃ – 0.289 моль/л; KSCN – 1.029 моль/л, при этом гальваническое осаждение проводилось при температуре электролита от 20 до 25 °С, катодной и анодной плотности тока от 1 до 10 мА/см².

Для получения пленочного проводника необходимо удалить вспомогательный слой меди. Селективное удаление меди проводилось с помощью раствора перекиси с добавлением C₆H₈O₇ – 1.561 моль/л; NaCl – 0.856 моль/л.

Гальваническое осаждение меди в поры мембраны проводилось с помощью электролита CuSO₄ · 5H₂O – 200 г/л; H₂SO₄ – 16 г/л. Осаждение проводилось в потенциостатическом режиме при потенциале от 0,2 В до 0,6 В.

Гальваническое осаждение кобальта в поры мембраны проводилось с помощью электролита CoSO₄ – 320 г/л; H₃BO₃ – 40 г/л. Осаждения проводилось в потенциостатическом режиме при потенциале 0,9 В.

Контроль длины получаемых НП проводился на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JCM 6000 Plus (Jeol, Япония) со встроенной приставкой энерго-дисперсионной спектроскопии (ЭДС). Исследования проводились в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 15 кВ. Следует отметить, что для проведения РЭМ-исследования матрица удалялась в растворе NaOH.

Рентгенофазовый анализ и расчет размера кристаллитов проводились с использованием порошкового рентгеновского дифрактометра X'pert Pro MPD (PANalytical, Нидерланды) при ускоряющем напряжении 40 кВ при токе 40 мА с медным излучением ($\text{Cu K}\alpha = 1.54 \text{ нм}$). Съемка производилась в геометрии по Брэггу-Брентано. Для расшифровки рентгенограмм использовалась программа High Score Plus с использованием базы данных ICSD PDF-4.

Механические свойства образцов исследовались экспериментально в режиме одноосного растяжения на универсальной испытательной машине Autograph AGS - 5kN (Shimadzu, Япония) при скорости растяжения 2 мм/мин. Данные обрабатывались с помощью встроенного программного обеспечения.

Исследование каталитических свойств проводилось путем измерения концентрации этилена в газовой смеси после реакции. Установка содержит трубчатый кварцевый реактор диаметром 6 мм, систему подачи и отвода газа, регулятор расхода газа, программируемую печь. Состав исходной газовой смеси $\text{CO}(2\%)\text{--O}_2(5\%)\text{--He}$ в случае медного катализатора и $\text{C}_2\text{H}_4(2\%)\text{--H}_2(10\%)\text{--N}_2$ в случае кобальтового катализатора. Скорость потока составляла 20 мл/мин. В реактор загружали образцы – медные пленки (плоские куски) с кобальтовыми нанопроволоками размером $9 \times 6 \text{ мм}$. Эти образцы помещали в трубку реактора вертикально, не деформируя пленку. Ширина образца пленки 6 мм соответствует внутреннему диаметру трубки, поэтому пленка располагалась вдоль центральной оси, и газовая смесь обтекала ее с двух сторон. Также были приготовлены два контрольных образца: кобальтовая пленка с размером $9 \times 6 \text{ мм}$ и медная плёнка (без нанопроволок) такого же размера. После проведения реакции часть газовой смеси отбирали с помощью петли для хроматографического анализа на хроматографе “Хроматек-2000”. Образцы ступенчато нагревали в интервале температур $150\text{--}300^\circ\text{C}$. Состав газа определяли через 5 мин после установления температуры.

Положения, выносимые на защиту:

- методы получения нанопроволок (НП) меди различной конфигурации;
- закономерности формирования НП различной конфигурации и изменения их морфологии и структуры в зависимости от способа их получения;
- новый способ синтеза композитов «металл-полимер» на основе полимерной пленки (ПЭТФ, поликарбонат, полиимид) и внедренных в нее металлических нанопроволок (из серебра, и кобальта);
- новый способ создания пленочного нагревательного элемента на основе композитной пленки из полимерного материала (ПЭТФ) с массивом контактирующих токопроводящих НП серебра внутри неё, предназначенного для применения в элементах гибкой электроники;
- экспериментальные данные о физических свойствах композита «ПЭТФ-серебряные нано/микро-проволоки» и влиянии на них различных факторов;
- новый способ получения катализатора на основе кобальтовых НП: экспериментальные данные о каталитических свойствах кобальтовых нанопроволок и влиянии различных факторов (геометрии образца, температуры) на эти свойства.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов, обусловлена достаточно хорошим совпадением данных, полученных на основе экспериментальных исследований, и численных расчетов. их

воспроизводимостью, использованием сертифицированного аналитического современного научно-исследовательского оборудования, взаимодополняющих экспериментальных методов исследования: растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа, рентгенофазового анализа. Разработанные технические решения - создание способов получения композитов «металл-полимер» на основе полимерной пленки (ПЭТФ, поликарбонат, полиимид) и внедренных в нее металлических нанопроволок (из серебра и кобальта), а также изготовления пленочного нагревательного элемента из данных композитов с массивом контактирующих токопроводящих металлических НП и катализатора на основе нанопроволок из меди - были запатентованы: получены патенты РФ на изобретение.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в диссертационную работу состоит в подготовке матриц для электрохимического заполнения; разработке режимов заполнения матриц – создании нанопроволок; подготовке образцов для проведения исследований; проведении исследований методами растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа, участии в подготовке публикаций и проведении исследований физико-химических свойств массивов получаемых нанопроволок, создании способов получения ряда композитов типа «металл-полимер» и пленочного нагревательного элемента из полимерного материала с массивом пересекающихся токопроводящих металлических нанопроволок внутри него, а также катализатора на основе нанопроволок из кобальта, проведении лично (в работе без соавторов) или с коллегами-соавторами анализа полученных результатов; формулировке выводов по диссертационной работе.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации были представлены на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2019». Российская Федерация. Москва. 8-12 апреля 2019. Разработка методов получения массива конусовидных наноструктур.
2. XXIX Международная конференция «Радиационная физика твердого тела». Российская Федерация. Севастополь. 8-13 июля 2019. Трековые матрицы для получения массива конусовидных наноструктур.
3. XXVIII Российская конференция по электронному микроскопии «Современные методы электронной, зондовой микроскопии и комплементарные методы в исследованиях наноструктур и наноматериалов». Российская Федерация. Черноголовка. 5-10 сентября 2020 г. Исследования наноструктур различной геометрии методом растровой электронной микроскопии.
4. XXX Международная конференция «Радиационная физика твердого тела». Российская Федерация. Севастополь. 24-29 августа 2020 г. Трековые мембраны в синтезе нанопроволок различной геометрии для применения в катализе.
5. XXX Международная конференция «Радиационная физика твердого тела». Российская Федерация. Севастополь. 24-29 августа 2020 г. Особенности гальванического заполнения пор трековых мембран для получения нанопроволок различных типов.
6. Международный молодежный научный форум "Ломоносов-2021". Российская Федерация. Москва. 12-23 апреля 2021 г. Получение нанопроволок из кобальта и их магнитные свойства.
7. Вторая Международная Конференция «Физика конденсированных состояний». Российская Федерация Черноголовка. 31.05-04.06 2021. Плёночный нагреватель с серебряными нанопроволоками.
8. Вторая Международная Конференция «Физика конденсированных состояний». Российская Федерация. Черноголовка. 31.05-04.06 2021. Нанопроволоки из меди как катализатор для окисления CO.

9. Вторая Международная Конференция «Физика конденсированных состояний». Российская Федерация. Черноголовка. 31.05-04.06 2021. Получение нанопроволок из кобальта с различным типом кристаллических решеток.
10. XXXI Международная конференция «Радиационная физика твердого тела». Российская Федерация. Севастополь. 2-9 июля 2021 г. Получение нанопроволок из кобальта и их магнитные свойства.

Список опубликованных статей по теме диссертации

Основные положения по теме диссертации изложены в 4 публикациях, проиндексированных в международной системе Scopus:

- 1) Panov D.V. Studying the Mechanical Properties and Structure of the Silver-Polyethylene Terephthalate» Composite / Inorganic Materials: Applied Research 2023. Vol. 14, No. 5, pp.1245-1250.
- 2) Kozhina E., Panov D., Kovalets N, Apel P., Bedin S. A thin-film polymer heating element with a continuous silver nanowires network embedded inside / Nanotechnology, 2024, Vol. 35, Issue 3, No. 035601, pp.1-8.
- 3) Panov D. V., Bichkov V. Yu., Tulenin Yu. P., Zagorskiy D. L. Cobalt Nanowires as a Catalyst for Ethylene Hydrogenation / Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2023. Vol. 17, No. 6, pp.1496-1501.
- 4) Panov D. V., Bichkov V. Yu., Tulenin Yu. P., Zagorskiy D. L., Kanevskiy V. M., Volchkov I. S. Copper Nanowires as Catalysts for CO Oxidation. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2021, Vol. 15, No. 6, pp. 1264–1269. DOI: 10.1134/S1027451021060380

Объекты интеллектуальной собственности

- 1) Панов Д.В., Бычков В.Ю., Тюленин Ю.П., Загорский Д.Л., Муслимов А.Э. Способ получения катализатора для окисления СО на основе медных нанопроволок. Патент на изобретение № 2787291, 09.01.2023;

- 2) Бедин С.А., Кожина Е.П., Панов Д.В., Апель П.Ю. Способ изготовления пленочного нагревательного элемента и пленочный нагревательный элемент, изготовленный таким способом. Патент на изобретение № 2809786, 18.12.2023.

Заключение

В диссертационном исследовании получены следующие результаты:

- При использовании матричного синтеза разработаны методы получения на металлической подложке нанопроволок меди различной конфигурации - цилиндрических нанопроволок, нанопроволок конической формы, структур типа “сэндвич” (нанопроволоки, находящиеся между двумя медными слоями).
- Выявлены особенности морфологии и структуры металлических нанопроволок различных конфигураций, связанные со способами их получения;
- Получены новые научные данные о каталитических свойствах медных нанопроволок и влиянии различных режимов электроосаждения на эти свойства; проведено сравнение НП различных типов – цилиндрических, конических, массивов между двумя поверхностями; установлено, что использование медных пленок с расположенными на них медными НП значительно усиливает каталитический эффект при окислении окиси углерода, при этом наибольший эффект (возрастание степени окисления на 60–70%) достигается в случае использования НП цилиндрической формы; показано, что эффект наблюдается при достаточно низких температурах 200–350°C.
- Разработан способ получения катализатора для окисления CO в CO₂ на основе медных НП, данный способ защищен патентом РФ; показано, что

максимальная эффективность окисления CO в CO₂ достигается в интервале температур от 300°C до 350°C для нанопроволок диаметром 100 нм; обоснована возможность применения одномерных медных наноструктур в каталитическом окислении окиси углерода, что имеет важное значение для доочистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания.

- Получены новые научные данные о каталитических свойствах кобальтовых нанопроволок и влиянии различных режимов электроосаждения на эти свойства; экспериментально продемонстрирован эффект увеличения каталитической активности кобальта в реакции гидрирования этилена. Способом увеличения активности было увеличение (в десятки раз) площади поверхности кобальтового образца путём создания массива НП; величина эффекта зависит от геометрических параметров нанопроволок; наибольший эффект наблюдался для нанопроволок с диаметром 100 нм. Показано, что использование кобальтовых НП в качестве катализатора делает возможным проведение реакции гидрирования этилена при 200°C при величине конверсии 20%. Предложенный способ позволяет использовать для катализа относительно дешёвый (по сравнению с металлами платиновой группы) кобальт; важным и удобным для практического применения является и то, что каталитическая активность проявляется при достаточно низкой температуре - около 200°C.
- Предложен и практически реализован новый способ синтеза композитов типа «металл-полимер» на основе полимерной пленки (ПЭТФ, поликарбонат, полиимид) и внедренных в нее металлических нанопроволок (из серебра, и кобальта); разработан способ изготовления пленочного нагревательного элемента из данных композитов с массивом контактирующих токопроводящих металлических НП;

- Получены новые научные данные о физических свойствах композита «ПЭТФ-серебряные нано/микропроволоки»; рассчитаны вероятности пересечений серебряных нано- и микроволокон, расположенных в порах ТМ ПЭТФ для системы пересекающихся пор; с использованием выполненных расчетов и проведенных экспериментов установлено, что на в частности, экспериментально показано, что, изменяя диаметр проволоки от 400 до 600 нм можно увеличить пластичность композита в два раза. Также в работе получена линейная зависимость, связывающая разность электрических потенциалов с температурой нагрева композита;
- При экспериментальном исследовании пленочного нагревательного элемента из полимерного материала ПЭТФ с массивом пересекающихся токопроводящих нанопроволок серебра внутри нее показано, что заполнение пор трековых мембран (ТМ) серебром позволяет поднимать температуру нагрева, измеряемую по электрическим характеристикам, до 78°C без деформации и повреждения нагревательного элемента. Способ изготовления данного нагревательного элемента защищен патентом РФ;

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

- Полученные в работе металл-полимерные композиты на основе серебросодержащих НП и созданный композитный пленочный гибкий нагреватель могут быть рекомендованы к использованию при создании элементов гибкой электроники, а также при терморегулировании электронных устройств;
- Полученные кобальтовые и медные НП могут быть рекомендованы к использованию в качестве каталитически активных материалов в химической промышленности, в автомобилестроении для доочистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания.

- В дальнейших исследованиях предполагается получение новых научных данных об эмиссионных свойствах алюминиевых и медных нанопроволок с различной геометрией, а также магнитных свойствах кобальтовых наноструктур. Кроме того, планируется проведение экспериментов по внедрению нагревательного элемента на основе серебро-полиэтилентерефталат в электронные устройства и приборы.

Список используемой литературы

1. Анищик В.М. Наноматериалы и нанотехнологии. Минск: Изд. БГУ. 2008. 375 с.
2. Борисенко В.Е., Данилюк А.Л., Мигас Д.Б. Спинтроника. М. Лаборатория знаний. 2017. С. 230.
3. Елисеев А.А., Лукашин А.В. Функциональные наноматериалы. М.: Физматлит. 2010. С. 456.
4. Martin C.R. // *Nanomaterials: a membrane-based synthetic approach*. Science. 1994. №. 266, P. 1961. DOI: 10.1126/science.266.5193.1961
5. Chakarvarti S.K., Vetter J. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1991. V. 62. № 109. P. 540.
6. Vetter J., Spohr R. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1993. № 79. P. 69.
7. Mitrofanov, A.V., Apel, P.Y., Blonskaya, I.V. et al. // *Tech. Phys.* 2006. V. 51. P. 1229. doi:10.1134/S1063784206090209.
8. Doludenko I.M., Volchkov I.S., Turenko B.A., Koshelev I.O., Podkur P.L., Zagorskiy D.L., Kanevskii V.M. // *Materials Chemistry and Physics*. 2022. V. 287. P. 126285.
9. Dangwal A., Muller G., Maurer F., Brotz J., Fuess H. // *J.Vac.Sci.Technol.B*. 2007. №. 25, P. 586.
10. Dangwal A., Pandey C.S., Muller G., Karim S., Cornelius T.W., Trautmann C. // *Applied Physics Letters*. 2008. V.92, P.063115-1. DOI: 10.1063/1.2844853
11. Maurer F., Dangwal A., Lysenkov D., Muller G., Toimil-Molares M.E., Trautmann C., Brotz J., Fuess H. // *Nuclear Instrum. Meth. Phys. Res. B*. 2006. V. 245. P.337.
12. Oleinikov V.A., Zagorski D.L., Bedin S.A., Volosnikov A.A., Emelyanov P.A., Kozmin Y.P., Mchedlishvili B.V. // *Radiation Measurements*. 2008. V.43, P. 635.
13. Zagorskiy D.L., Bedin S.A., Oleinikov V.A., Polyakov N.B., Rybalko O.G., Mchedlishvili B.V.

- // Radiation measurements. 2009. V. 44, № 9, P. 1123.
14. Hong X.B. // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. V. 651 P. 92.
 15. Liu Q., Ranocchiari M. // *Chem. Soc. Rev.* 2022. №. 51. P. 186. DOI: 10.1039/D1CS00270H
 16. Nguyen L., Zhang S., Yoon S., and Tao F. // *ChemCatChem*. 2015. V. 7. P. 2346.
 17. Kombaiah D., Vijaya J., Kennedy L., Kaviyarasu K., Ramalingam R., Al-Lohedan Hamad A. // *Nanotechnol.* 2019. V. 19. №. 5. P. 2590.
 18. Lee J., Lee P., Lee H., Lee D., Lee S. S., Ko S. H. // *Nanoscale*. 2012. V. 4. P. 6408. doi: 10.1039/c2nr31254a.
 19. Ye S., Rathmell A. R., Chen Z., Stewart I. E., Wiley B. J. // *Adv Mater*. 2014. V. 26. P. 6670. doi: 10.1002/adma.201402710.
 20. Langley D., Giusti G., Mayousse C., Celle C., Bellet D., Simonato J. P. // *Nanotechnology*. 2013. V. 24. P. 452001. doi: 10.1088/0957-4484/24/45/452001.
 21. Hecht D. S., Hu L., Irvin G. // *Adv Mater*. 2011. V. 23. P. 1482. doi: 10.1002/adma.201003188.
 22. McCoul D., Hu W., Gao M., Mehta V., Pei Q. // *Advanced Electronic Materials*. 2016. V. 2. doi: 10.1002/aelm.201500407.
 23. Kumar A., Zhou P. // *ACS Nano*. 2010. V. 4. P. 11. doi: 10.1021/nn901903b.
 24. Mayousse C., Celle C., Moreau E., Mainguet J. F., Carella A., Simonato J. P. // *Nanotechnology*. 2013. V. 24. P. 215501. doi: 10.1088/0957-4484/24/21/215501.
 25. Pham S. H., Ferri A., Da A., Mohan M. M. S., Tran V. D., Nguyen D. P., Viville P., Lazzaroni R., Desfeux R. and Leclère P. // *Adv. Mater. Interfaces*, 2022. V. 9. P. 2200019.
 26. Xu H., Shang H., Wang C., Du Y. // *Adv. FuncV. Mater*. 2020. V. 30. P. 2000793. doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202000793>.
 27. Maisch P., et al., // *Org. Electron*. 2016. V. 38. P. 139.
 28. Zhang, L., Song, V., Shi, L. et al. // *J Nanostruct Chem*. 2021. V. 11. P. 323. doi: 10.1007/s40097-021-00436-3.
 29. Lee J., et al. // *Nanoscale*. 2012. V. 4. P. 6408.
 30. Lee P., et al. // *Adv. Mater*. 2012. V. 24. P. 3326.