

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

*На правах рукописи*

Приходько Анатолий Николаевич

**ТГц антенные решётки с использованием  
планарных диодов с барьером Шоттки**

**Резюме**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д-р физ.-мат. наук, доцент  
Чулкова Галина Меркурьевна

Москва — 2024

## Введение

Технология диодов с барьером Шоттки известна научно-техническому сообществу с конца 1930-х гг. [1; 2]. По мере возрастания требований к количеству и однородности диодных элементов в составе нелинейных устройств преобразования частоты в задачах беспроводной связи, радиолокации и дистанционного мониторинга ставшая исторически первой висцерная конструкция уступила место планарной. Более того, непрерывный прогресс терагерцовой (ТГц) техники [3] стимулирует внедрение новых и развитие уже существующих технологий как источников, так и приемников излучения данного частотного диапазона. На данный момент существует несколько основных технологий для гетеродина детектирования ТГц излучения. Так, смеситель на основе перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) крайне эффективен на частотах менее 1.4 ТГц [4]. Смеситель на основе эффекта электронного разогрева (НЕВ) в тонких пленках сверхпроводника в резистивном состоянии целесообразно использовать на более высоких частотах, в частности, он не имеет конкурентов по сочетанию чувствительности и быстродействия в пределах полосы 3–6 ТГц [5]. Нижняя граница данной частотной области является также верхним пределом полосы входных рабочих частот смесителя на основе планарного диода с барьером Шоттки (ПДБШ), которая ограничена значением  $\sim 3$  ТГц [6]. В отличие от сверхпроводниковых технологий СИС и НЕВ смесителей, технология диодов Шоттки является полупроводниковой и, главным образом, связана с использованием слоистой структуры на основе GaAs, что подразумевает отсутствие необходимости применения громоздкого и дорогостоящего криогенного оборудования для достижения приемлемых шумовых характеристик приемника. Отсутствие потребности охлаждения ПДБШ до температур жидкого гелия делает его довольно привлекательным для практического применения. Хотя в последние годы достаточно успешно развиваются технологии высокотемпературных НЕВ-детекторов, работающих при температурах жидкого азота [7], и, следовательно, менее энергозатратных, чем приемники, использующие в каче-

стве хладагента жидкий гелий, они все еще не способны заменить неохлаждаемые полупроводниковые устройства аналогичного класса. Важнейшим фактором успеха планарной технология, в отличие от технологии вискерных диодов, является то что первая позволяет четко контролировать параметры изготавливаемых устройств и легко интегрировать их со сложными высокочастотными схемами. Но несмотря на многочисленные преимущества, планарная технология имеет определенные недостатки, связанные с появлением последовательного сопротивления и шунтирующей емкости в собственной схемотехнике диода. Вихревые токи, индуцированные в слоистой структуре ПДБШ, также значительно влияют на его характеристики в ТГц диапазоне [8]. Эффект вихревых токов присутствует в устройствах с относительно толстыми мезами и зависит от их геометрии. С точки зрения эквивалентной схемы ПДБШ, это можно представить как последовательно включенную индуктивность, что определенным образом ограничивает ширину полосы входных рабочих частот диода. Однако за счет уменьшения толщины мезы до некоторого значения, сравнимого с глубиной скин-слоя на соответствующей частоте, данный негативный эффект можно смягчить [9]. При этом на субмикронных толщинах эта манипуляция может привести к значительному увеличению сложности структурирования диода.

В настоящем исследовании используются ПДБШ с толщиной мезы порядка одной толщины скин-слоя. Это сделано для того, чтобы потенциально смягчить эффект вихревых токов, а также скин-эффект и эффект близости ПДБШ, потери которого на радиочастоте будут определяться лишь его а) паразитными параметрами, включая шунтирующую емкость, последовательные индуктивность и сопротивление, и б) транспортными свойствами по постоянному току. Многоэлементные когерентные и некогерентные приемники на основе диодов Шоттки терагерцового диапазона востребованы в современных приборных радиоастрономических комплексах наземного, аэростатного и космического базирования, в агропромышленных системах мониторинга гидратации сельскохозяйственных культур, в многолучевых системах беспроводной связи [10—

13] и других прикладных задачах, требующих использования технологичных и энергоэффективных сенсоров терагерцового излучения.

Антенные решетки и метаповерхности, обеспечивающие маршрутизацию радиосигналов в реальном времени, призваны повысить устойчивость беспроводных соединений в сетях связи нового поколения. На сегодняшний день, потребности общества в возможностях обработки информации неизбежно растут. Это мотивирует активные исследования в области коммуникаций нового поколения [14]. Полоса частот терагерцового диапазона считается полезной для будущих беспроводных сетей связи шестого поколения (6G). Однако ее использование сопровождается необходимостью иметь дело с высокими потерями на распространении из-за атмосферного поглощения, рассеяния на препятствиях и динамических блокировках [A1]. Таким образом, беспроводные системы 6G должны опираться на ТГц передатчики и приемники с узконаправленными реконфигурируемыми пучками. Это вместе с использованием интеллектуальных отражающих поверхностей (IRS) предлагается как многообещающее решение для улучшения передачи сигнала на несущих частотах выше 100 ГГц [15].

Вообще говоря, IRS состоит из множества периодических элементов, обеспечивающих эффективный контроль волнового фронта, изменяя фазу, величину и поляризацию при маршрутизации пучка [16]. В последнее время предложено большое количество конструкций IRS. К ним относятся устройства с механизмами настройки на основе I) медленнодействующих жидких кристаллов и микроэлектромеханических систем, II) сверхбыстродействующей транзисторной и диодной электроники [17].

Рассматривая IRS как часть беспроводного ТГц канала, необходимо учитывать фазозависимую амплитудную характеристику его элементарных ячеек, а также перекрестную связь между ними [18]. Оптимизация диаграммообразования может быть выполнена либо аналитически, используя модель эквивалентной схемы обобщенной структуры IRS [19], либо численно, посредством электромагнитного (ЭМ) моделирования [20]. Однако большинство недавно опублико-

ванных моделей IRS ориентированы на рабочие частоты значительно ниже 100 ГГц, когда для фазового сдвига можно использовать дискретные полевые транзисторы металл-окисел-полупроводник и варакторные или PIN- диоды [21—23]. Это приводит к появлению множества неучтенных аспектов, связанных с разработкой и внедрением ТГц IRS в виде монолитной интегральной схемы (ИС). Более того, существующие модели элементарных ячеек IRS весьма косвенно связаны с физикой полупроводников. Они не позволяют легко прогнозировать изменения производительности при разных уровнях падающей мощности из-за температурно-зависимых транспортных свойств областей пространственного заряда в элементарных ячейках IRS [24; 25].

Использование диодов Шоттки в элементарной ячейке IRS обеспечивает время переключения ее состояний менее пикосекунды [26]. Учитывая принципиальную неинерционность носителей заряда, работоспособность диода Шоттки полностью определяется технологией изготовления [6] и ЭМ-конструкцией его ИС [27]. Таким образом, появление эффективных по времени расчета и надежных с точки зрения прогнозирования методов моделирования крайне важно для дальнейшего развития технологии ТГц диодов Шоттки и использующих их интегральных устройств.

Таким образом, **актуальность** настоящего диссертационного исследования обусловлена несколькими основными моментами: а) необходимостью увеличения полосы рабочих частот и скорости считывания сигнала неохлаждаемых диодных приемников терагерцового диапазона; б) необходимостью разработок параметризованных моделей и технологичных конструкций реконфигурируемых антенных решеток терагерцового диапазона со сверхбыстрым диаграммообразованием для обеспечения непрямого соединения в каналах связи нового поколения; в) необходимостью выявления практических требований к реконфигурируемым антенным решеткам терагерцового диапазона для каналов связи нового поколения с поддержкой непрямого соединения.

Также необходимо отметить, что большая часть исследований, описанных

в настоящей диссертации, была выполнена в рамках научно-исследовательских работ, включая 3 проекта в НИУ ВШЭ, а именно, «Исследование процессов динамической блокировки и микромобильности в сетях связи 6G» (2022 г.), «Исследование особенностей распространения терагерцовых волн внутри помещений для построения усредненной и трехмерной кластерной моделей каналов связи 6G» (2023 г.), «Исследование перспективных программно-аппаратных и алгоритмических решений для борьбы с блокировкой радиосигнала и эффектом микромобильности абонента в сетях 6G» (2024 г.), и 2 проекта РФФ в МПГУ, а именно, «Фотонные интегральные фазированные антенные решетки в терагерцовом диапазоне для создания систем связи нового поколения» (2021–2024 гг.), «Интеллектуальная отражающая поверхность миллиметрового волнового диапазона для систем связи нового поколения» (2022–2025 гг.).

**Целью** данной работы является исследование возможностей создания многоэлементных устройств маршрутизации и приема терагерцовых волн на основе планарных диодов с барьером Шоттки для систем беспроводной связи 6-го поколения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработаны методики и вспомогательные средства измерений характеристик антенных решеток, предназначенных для отражения и детектирования узких терагерцовых пучков, а именно, методика и стенд для измерения мощности эквивалентной шуму детекторного диода с барьером Шоттки при съеме сигнала с использованием СВЧ рефлектометра, методика и стенд для измерения диаграммы направленности отражателя с диодными ключами в терагерцовом диапазоне.
2. Экспериментально изучены особенности явления динамической блокировки узконаправленных терагерцовых пучков в связи прямой и не прямой видимости для формулирования требований к техническим характеристикам антенных решеток в составе современных сетей радиодоступа с

несущей частотой в диапазоне 130–160 ГГц. Созданы стенд и методика измерения динамики уровня принимаемого сигнала при блокировке радиосигнала телом пользователя в движении.

3. Разработаны модели для проектирования антенных решеток и их структурных элементов, а именно, электромагнитные и гибридные параметризованные модели планарного диода с барьером Шоттки с использованием  $W_0$ -функции Ламберта, компактного микрополоскового демультиплексора на перекрестных модах, ячейки реконфигурируемого отражателя с диодными микроключами.

В качестве **объекта** исследования выбран планарный диод с барьером Шоттки терагерцового диапазона. **Предметом** исследования являются основные радиофизические характеристики элементов моделей и конструкций устройств приемопередачи и маршрутизации электромагнитного сигнала основанных на планарных диодах с барьером Шоттки в терагерцовом диапазоне.

#### **Научная новизна.**

1. Предложена конструкция планарного диода с барьером Шоттки с Г-образным вывешенным анодным мостиком позволяющая снизить влияние паразитных параметров диода на высокочастотном токе или миниатюризировать конструкцию при сохранении паразитных составляющих на исходном уровне.
2. Разработана конструкция матричного диодного детектора с барьером Шоттки с построчным частотным разделением каналов и системой считывания отклика на основе СВЧ рефлектометра способна увеличить быстродействие пропорционально числу строк детектора при двукратном ухудшении чувствительности.
3. Определены величины времен динамической блокировки и пикового ослабления сигнала при его перекрывании движущимся человеком, в связи пря-

мой и непрямой видимости, для соединения «точка-точка» на частоте 156 ГГц.

4. Определены значения комплексной диэлектрической проницаемости для листового стекла, гипсокартона и газобетона, в диапазоне 132–162 ГГц, с использованием аппарата характеристической матрицы слоистой среды, а также модели для анализа пористых диэлектриков. Последняя рассматривает образец как однородную среду с эффективной диэлектрической проницаемостью и таким образом позволяет корректно оценить эту величину для газобетона.
5. Разработана модель элементарной ячейки реконфигурируемой антенной решетки терагерцового диапазона с микроконтактами Шоттки, учитывающая вольт-омную характеристику контакта в явном виде с использованием  $W_0$ -функции Ламберта, позволяющая улучшить возможности в проектировании устройств с дискретным и непрерывным диаграммообразованием в отраженном свете.

**Практическая значимость.** Многоэлементные когерентные и некогерентные приемники терагерцового диапазона востребованы в современных приборных радиоастрономических комплексах наземного, аэростатного и космического базирования, в агропромышленных системах мониторинга гидратации сельскохозяйственных культур, в многолучевых системах беспроводной связи и других прикладных задачах, требующих использования технологичных и энергоэффективных сенсоров терагерцового излучения. Антенные решетки и метаповерхности, обеспечивающие маршрутизацию радиосигналов в реальном времени, призваны повысить устойчивость беспроводных соединений в сетях связи нового поколения.

Использование описанных в настоящей диссертации методов расчета радиофизических свойств терагерцовых антенных решеток, интегрированных с

диодами Шоттки предлагаемых технологичных конструкций, способно обеспечить выигрыш на этапе проектирования, изготовления и практического использования в реальных терагерцовых системах. Полученные наработки были применены для создания и реализации коммерчески доступных диодных детекторов диапазона 110–170 ГГц компанией ООО «Тинфотоника», что обосновывает успешный **результат внедрения**.

**Методология и методы исследования.** В рамках проводимых исследований оценка чувствительности волноводного приемника изготовленного на основе планарного диода с барьером Шоттки осуществлялась путем измерения мощности эквивалентной шуму в режиме прямого детектирования и с использованием СВЧ-рефлектометрии. Для измерения характеристик диода с Г-образным анодным мостиком по постоянному току использовался метод длинной линии. Также для анализа вольт-амперных и вольт-омных характеристик планарного диода с барьером Шоттки применялся аппарат  $W_0$ -функции Ламберта. Измерения временных и амплитудных характеристик динамических блокировок в сценариях «точка-точка» беспроводного соединения проводились при передаче терагерцового сигнала между базовой станцией и пользовательским устройством в связи прямой не прямой видимости. При реализации такого сценария динамическая блокировка в канале связи производилась человеком движущимся поперек линии распространения сигнала. Анализ параметризованной модели элементарной ячейки реконфигурируемой антенной решетки с микроконтактами Шоттки осуществлялся с использованием метода конечных элементов и результатов анализа вольт-омной характеристики.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Использование Г-образного вывешенного анодного мостика в конструкции планарного диода с барьером Шоттки обеспечивает двукратную миниатюризацию без увеличения паразитной емкостной связи в его структурных элементах. Полная шунтирующая емкость составляет 3 фФ для длины

мостика 2 мкм, высоты и ширины полупроводниковой мезы 2 и 15 мкм соответственно, площади контакта Шоттки 0.785 мкм<sup>2</sup>.

2. Конструкция матричного диодного детектора с барьером Шоттки с построчным частотным разделением каналов и системой считывания отклика на основе СВЧ рефлектометра обеспечивает выигрыш в быстродействии пропорционально числу строк детектора при двукратном ухудшении чувствительности. Пиксель детектора на 150 ГГц обладает мощностью эквивалентной шуму не более 160–320 пВт Гц<sup>-0.5</sup>, динамическим диапазоном 30 дБ и 40 дБ при диаметрах контактов Шоттки 1 мкм и 3 мкм соответственно.
3. Модель элементарной ячейки реконфигурируемой антенной решетки с микроконтактами Шоттки, учитывающая вольт-омную характеристику контакта в явном виде с использованием  $W_0$ -функции Ламберта и решения уравнения Пуассона для заданного профиля легирования контактного слоя полупроводника, обеспечивает возможность проектирования устройств с дискретным и непрерывным диаграммообразованием в отраженном свете. Погрешность расчета отражательной способности составляет не более 1 дБ в диапазоне 132–162 ГГц.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные результаты работы докладывались на 5-ти международных конференциях и 1-й межвузовской конференции. При этом 3 доклада было представлено в устном виде и 3 доклада в стендовом.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 16 печатных изданиях 14 из которых изданы в журналах, входящих в перечень Scopus и Web of Science.

**Личный вклад автора.**

Автор принимал активное участие в:

- Формулировки темы, постановки цели и задач исследования.
- Постановке и проведении экспериментов по измерению временных и амплитудных характеристик динамических блокировок в сценариях «точка-точка» беспроводного соединения, эквивалентной мощности шума (ЭМШ) волноводного приемника изготовленного на основе планарного диода с барьером Шоттки.
- Разработке конструкции матричного волноводного приёмника с эффективным диапазоном рабочих частот 130-160 ГГц, на основе диодных элементов с использованием СВЧ-рефлектометра и аналогового КМОП мультиплексора, конструкции 2-битной IRS с мультисостоятельным диаграммообразованием в отражённом свете на НЧ в пределах 130-160 ГГц на основе планарных диодов с барьером Шоттки.
- Обработке и анализе данных, полученных в результате проведения экспериментов, численного и аналитического моделирования.
- Представлении результатов исследования в международных конференциях с устными и стендовыми (постерными) докладами.
- Подготовке публикаций в международных рецензируемых изданиях, в том числе входящих в перечень Scopus и Web of Science.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 92 страница, из них 80 страниц текста, включая 32 рисунка и 7 таблиц. Библиография включает 65 наименований на 7 страницах.

**Во Введении** изложено обоснование актуальности темы, научной новизны и практической значимости диссертационной работы, сформулирована цель и задачи, показана научная новизна исследований, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** представлен краткий обзор литературы по планарным диодам с барьером Шоттки и реконфигурируемым терагерцовым антенным решеткам с активными элементами способными обеспечивать быстрое диаграммообразование, состояние технологичности описанных в научных публикациях подобных конструкций, а также проблемы применения таких устройств в терагерцовом диапазоне и пути их преодоления. Также рассмотрены антенные решения использующие активные элементы с меньшим быстродействием.

**Во второй главе** представлена конструкция планарного диода с барьером Шоттки с Г-образным вывешенного анодным мостиком, что оптимизирует его паразитные параметры. Проведены измерения основных параметров диодов по постоянному току и проанализированы их вольт-амперные характеристики с использованием аппарата  $W_0$ -функции Ламберта. Также с использованием аппарата этой функции проанализирован микроконтакт Шоттки и представлена аналитическая модель описывающая его вольт-омную характеристику. Получены значения  $Y$ -параметров для планарного диода с барьером Шоттки встроенного в коаксиальную линию передачи. Разработана конструкция матричного диодного детектора с барьером Шоттки с построчным частотным разделением каналов и системой считывания отклика на основе СВЧ рефлектометра. Измерены и проанализированы мощности эквивалентные шуму с и без СВЧ рефлектометра, а также динамические диапазоны диодов с микроконтактами Шоттки. Разработана конструкция волноводного детектора на основе планарного диода Шоттки.

**В третьей главе** представлена модель распространения для канала сверхнаправленной связи внутри помещений. Проведена обширная компания измерений характеристик динамической блокировки в связи прямой и не прямой видимости. Применяя аппарат характеристической матрицы слоистой среды, изучены диэлектрические свойства листового стекла, гипсокартона и пористого газобетона в терагерцовом диапазоне. Для последнего материала составлена модель учитывающая пористость его заполнения. Представлена модель эле-

ментарной ячейки реконфигурируемой антенной решетки с микроконтактами Шоттки, учитывающая вольт-омную характеристику контакта в явном виде с использованием  $W_0$ -функции Ламберта. С использованием анализа порта Флоке, методом конечных элементов показано что такая элементарная ячейка в составе антенная решетки способна обеспечивать возможность проектирования устройств с дискретным и непрерывным диаграммообразованием в отраженном свете на частотах терагерцового диапазона.

**В Заключении** представлены основные результаты полученные по итогу выполнения диссертационного исследования.

## Апробация

- C1. Efficiency of a Microwave Reflectometry for Readout of a THz Multipixel Schottky Diode Direct Detector // 7th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint Petersburg OPEN 2020», Санкт Петербург, Россия, 27–30 апреля 2020г.
- C2. Разработка и изготовление микрополосковой СВЧ обвязки для I\Q - модулятора на базе ППВМ // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, Москва, Россия, 10–17 марта 2021г.
- C3. Towards multipixel THz Schottky diode detector with a single RF output line // 8th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint Petersburg OPEN 2021», Санкт Петербург, Россия, 25–28 мая 2021г.
- C4. Unit cell model of a terahertz intelligent reflecting surface with Schottky microcontacts // 35th European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2023), Афины, Греция, 18-20 сентября 2023г.

## Список публикаций автора

- A1. Empirical blockage characterization and detection in indoor sub-THz communications / A. Shurakov, D. Moltchanov, **A. Prikhodko**, A. Khakimov, E. Mokrov, V. Begishev, I. Belikov, Y. Koucheryavy, G. Gol'tsman // Computer Communications. — 2023. — Т. 201. — С. 48–58. — **Q1. Авторский вклад – 0,57 п.л.**
- A2. Dynamic Blockage in Indoor Reflection-Aided Sub-Terahertz Wireless Communications / A. Shurakov, P. Rozhkova, A. Khakimov, E. Mokrov, **A. Prikhodko**, V. Begishev, Y. Koucheryavy, M. Komarov, G. Gol'tsman // IEEE Access. — 2023. — Т. 11. — С. 134677–134689. — **Q1. Авторский вклад – 0,53 п.л.**
- A3. Integrated Circuit of an Intelligent Reflecting Surface for sub-THz Wireless Communication / A. Shurakov, **A. Prikhodko**, I. Belikov, A. Razakova, G. Gol'tsman // 2023 IEEE 18th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS). — IEEE. 2023. — С. 183–187. — **Авторский вклад – 0,28 п.л.**
- A4. Towards multipixel THz Schottky diode detector with a single RF output line / **A. Prikhodko**, I. Belikov, D. Mikhailov, A. Shurakov, G. Goltsman // Journal of Physics: Conference Series. Т. 2086. — IOP Publishing. 2021. — С. 012063. — **Q4. Авторский вклад – 0,49 п.л.**
- A5. Efficiency of a microwave reflectometry for readout of a THz multipixel Schottky diode direct detector / A. Shurakov, **A. Prikhodko**, D. Mikhailov, I. Belikov, N. Kaurova, B. Voronov, G. Goltsman // Journal of Physics: Conference Series. Т. 1695. — IOP Publishing. 2020. — С. 012156. — **Q4. Авторский вклад – 0,35 п.л.**
- A6. Planar Schottky diode with a  $\Gamma$ -shaped anode suspended bridge / A. Shurakov, D. Mikhailov, I. Belikov, N. Kaurova, T. Zilberley, **A. Prikhodko**, B. Voronov,

- I. Vasil'evskii, G. Goltsman // Journal of Physics: Conference Series. Т. 1695. — IOP Publishing. 2020. — С. 012154. — **Q4. Авторский вклад** — **0,27 п.л.**
- A7. Unit cell model of a terahertz intelligent reflecting surface with Schottky microcontacts / **A. Prikhodko**, T. Yaropolov, A. Shurakov, G. Gol'tsman // Proceedings of the 35th European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2023). — CAL-TEK. 2023. — **Авторский вклад** — **0,49 п.л.**
- A8. Blockage Attenuation and Duration Over Reflected Propagation Paths in Indoor Terahertz Deployments / **A. Prikhodko**, A. Khakimov, E. Mokrov, V. Begishev, A. Shurakov, G. Gol'tsman // International Conference on Distributed Computer and Communication Networks Proceedings of the International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN 2023). Lecture Notes in Computer Science. — Springer. 2023. — С. 423—434. — **Q2. Авторский вклад** — **0,62 п.л.**
- A9. Digital phase shifter arrays for beamforming in sub-THz communications / A. Shurakov, A. Lvov, **A. Prikhodko**, G. Gol'tsman // The 5-th International Conference “Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications” (TERA-2023). — 2023. — С. 91—92. — **Авторский вклад** — **0,07 п.л.**
- A10. Nondestructive KPFM-assisted Quality Control in Fabrication of GaAs High-Speed Electronics / A. Shurakov, N. Kaurova, I. Belikov, T. Zilberley, **A. Prikhodko**, B. Voronov, G. Gol'tsman // arXiv preprint arXiv:2212.01474. — 2022. — **Авторский вклад** — **0,12 п.л.**
- A11. Membrane-integrated planar Schottky diodes for waveguide mm-wave detectors / A. Shurakov, I. Belikov, **A. Prikhodko**, D. Mikhailov, G. Gol'tsman // Microwave and Telecommunication Technology. — 2021. — Т. 3. — С. 34. — **Авторский вклад** — **0,07 п.л.**

- A12. *Приходько А.* Разработка и изготовление микрополосковой СВЧ обвязки для I\Q - модулятора на базе ППВМ // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В.Арменского. — М.: МИЭМ НИУ ВШЭ. 2021. — С. 214—216. — **Авторский вклад – 0,23 п.л.**

## Список литературы

1. *Schottky W.* Zur halbleitertheorie der sperrschicht-und spitzengleichrichter // Zeitschrift für Physik. — 1939. — Т. 113. — С. 367—414.
2. *Schottky W.* [и др.]. Quantitative treatment of the space charge and boundary-layer theory of the crystal rectifier // Wiss. Veroff. Siemens-Werken. — 1939. — Т. 18. — С. 225—291.
3. *Siegel P. H.* Terahertz technology // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. — 2002. — Т. 50, № 3. — С. 910—928.
4. Low Noise 1 THz–1.4 THz Mixers Using Nb/Al-AlN/NbTiN SIS Junctions / A. Karpov [и др.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2007. — Т. 17, № 2. — С. 343—346.
5. *Shurakov A.* [и др.]. Superconducting hot-electron bolometer: from the discovery of hot-electron phenomena to practical applications // Superconductor Science and Technology. — 2015. — Т. 29, № 2. — С. 023001.
6. THz diode technology: Status, prospects, and applications / I. Mehdi [и др.] // Proceedings of the IEEE. — 2017. — Т. 105, № 6. — С. 990—1007.
7. Terahertz Direct Detection in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> Microbolometers / A. Hammar [и др.] // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. — 2011. — Т. 1, № 2. — С. 390—394.
8. *Tang A. Y.* [и др.]. Impact of eddy currents and crowding effects on high-frequency losses in planar Schottky diodes // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2011. — Т. 58, № 10. — С. 3260—3269.
9. Ti/Au/n-GaAs planar Schottky diode with a moderately Si-doped matching sublayer / A. Shurakov [и др.] // Microelectronic Engineering. — 2018. — Т. 195. — С. 26—31.

10. *Pearson J. C.* [и др.]. Instrumentation for THz spectroscopy in the laboratory and in space // IEEE Journal of Microwaves. — 2021. — Т. 1, № 1. — С. 43—54.
11. IceCube: spaceflight demonstration of 883-GHz cloud radiometer for future science / D. L. Wu [и др.] // CubeSats and SmallSats for Remote Sensing III. Т. 11131. — SPIE. 2019. — С. 1113103.
12. *Mehdi I.* THz Applications: Devices to Space System // Fundamentals of Terahertz Devices and Applications. — John Wiley & Sons, 2021. — Гл. 13. С. 511—545.
13. Terahertz spectroscopy and imaging: A review on agricultural applications / L. Afsah-Hejri [и др.] // Computers and Electronics in Agriculture. — 2020. — Т. 177. — С. 105628.
14. Toward 6G networks: Use cases and technologies / M. Giordani [и др.] // IEEE Communications Magazine. — 2020. — Т. 58, № 3. — С. 55—61.
15. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces / E. Basar [и др.] // IEEE access. — 2019. — Т. 7. — С. 116753—116773.
16. A Promising Technology for 6G Wireless Networks: Intelligent Reflecting Surface / W. Long [и др.] // Journal of Communications and Information Networks. — 2021. — Т. 6, № 1. — С. 1—16.
17. *Yang F.* [и др.]. Terahertz reconfigurable intelligent surfaces (RISs) for 6G communication links // Micromachines. — 2022. — Т. 13, № 2. — С. 285.
18. Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Overview of hardware designs, channel models, and estimation techniques / M. Jian [и др.] // Intelligent and Converged Networks. — 2022. — Т. 3, № 1. — С. 1—32.
19. Intelligent reflecting surface: Practical phase shift model and beamforming optimization / S. Abeywickrama [и др.] // IEEE Transactions on Communications. — 2020. — Т. 68, № 9. — С. 5849—5863.

20. *Costa F.* [и др.]. Electromagnetic model of reflective intelligent surfaces // IEEE Open Journal of the Communications Society. — 2021. — Т. 2. — С. 1577—1589.
21. Intelligent metasurfaces with continuously tunable local surface impedance for multiple reconfigurable functions / F. Liu [и др.] // Physical Review Applied. — 2019. — Т. 11, № 4. — С. 044024.
22. *Zhu B. O.* [и др.]. Active impedance metasurface with full 360 reflection phase tuning // Scientific reports. — 2013. — Т. 3, № 1. — С. 3059.
23. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: Antenna design, prototyping, and experimental results / L. Dai [и др.] // IEEE access. — 2020. — Т. 8. — С. 45913—45923.
24. Electro-thermal model for multi-anode Schottky diode multipliers / A. Y. Tang [и др.] // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. — 2012. — Т. 2, № 3. — С. 290—298.
25. The physical topological modeling of single radiation effects in submicron ultrahigh-frequency semiconductor diode structures with taking in account the heating of an electron-hole gas in the charged particle track / E. Tarasova [и др.] // Proceedings of the 33th European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2021). — CAL-TEK. 2021.
26. Air-bridged Schottky diodes for dynamically tunable millimeter-wave metamaterial phase shifters / E. Vassos [и др.] // Scientific Reports. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 5988.
27. Analytical extraction of a Schottky diode model from broadband S-parameters / A. Y. Tang [и др.] // IEEE transactions on microwave theory and techniques. — 2013. — Т. 61, № 5. — С. 1870—1878.