

На правах рукописи

Номоев Сергей Андреевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ МАЛОГАБА-  
РИТНЫХ ТГЦ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВЫРАЩЕННЫХ ПРИ  
НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР А3-As**

Специальность: 2.2.2 –Электронная компонентная база микро- и наноэлек-  
троники, квантовых устройств

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2023 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**Научный руководитель:**

**Васильевский Иван Сергеевич**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики конденсированных сред, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

**Официальные оппоненты:**

**Ладугин Максим Анатольевич**

доктор физико-математических наук, начальник научно-производственного комплекса, акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха»;

**Холодняк Дмитрий Викторович**

доктор технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой микроволновой электроники, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);

**Кузнецов Кирилл Андреевич**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Защита состоится 16 ноября 2023 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.2.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.т.н.



Веселов Д.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность темы

Диссертационное исследование посвящено решению актуальной научно-технической проблемы – разработке конструкционно-технологических подходов к увеличению мощности широкополосных источников терагерцового диапазона на основе фотопроводящих антенн (ТГц ФПА) с экспериментально полученными при низкой температуре гетероструктурами GaAs.

Существующие методы генерации и детектирования терагерцового излучения, основанные как на радиофизических принципах, так и на подходах нелинейной оптики, неэффективно работают в области частот электромагнитного спектра выше 1.0 ТГц, существенно осложняя развитие различных перспективных практических приложений терагерцовой оптоэлектроники: высокоскоростной беспроводной связи, медицинской и фармацевтической диагностики, бесконтактного контроля качества материалов и дистанционного обнаружения опасных объектов. Имеющиеся источники терагерцового излучения обладают либо малой выходной мощностью (резонансно-туннельные диоды, фотомиксеры), либо потребляют большую электрическую мощность и могут использоваться только в лабораторных исследованиях (лампы обратной и бегущей волны, лазеры на свободных электронах).

Источники и детекторы терагерцового излучения являются перспективными компонентами систем высокоскоростной беспроводной связи, медицинской и фармацевтической диагностики, бесконтактного контроля качества материалов и дистанционного обнаружения опасных объектов. Разработка и исследование подобных источников – новое, быстроразвивающееся направление в современной оптоэлектронике.

Сегодня в мире ведутся разработки по созданию методик применения терагерцового излучения для решения задач медицины, биологии, обнаружения взрывчатых веществ, неразрушающего технологического и эксплуатационного контроля.

Связано это прежде всего с тем, что ткани биологических объектов характеризуются различным содержанием воды, которая имеет сильные линии поглощения в терагерцовом диапазоне, что делает терагерцовые методы исследования чувствительными к составу тканей и позволяют достигать высокой контрастности изображений. Во-вторых, терагерцовое излучение не является ионизирующим и, следовательно, опасным для биологических объектов, как часто используемое рентгеновское, что дает возможность использовать терагерцовое излучение *in vivo*. Одной из важных проблем современной дерматологии является диагностика глубины поражения кожи ожогом в первые дни после получения такой травмы.

Важно отметить, что в терагерцовом диапазоне лежат спектры поглощения ряда взрывчатых веществ, вредных веществ, загрязнителей атмосферы. Кроме того, в терагерцовом диапазоне электромагнитное излучение погло-

щают сложные органические молекулы, например, белки и ДНК. Одним из возможных способов обнаружения взрывчатых веществ является использование отраженного от этих веществ терагерцового излучения, его анализ и выделение спектральной информации, несущей на себе свойства исследуемого объекта.

Особенности терагерцового излучения важны для обеспечения безопасности, поскольку позволяют осуществлять досмотр людей и багажа в аэропортах, контрольно-пропускных пунктах и т. п. с целью обнаружения скрытых, например, под одеждой предметов с достаточным для их идентификации пространственным разрешением ( $\sim 1$  мм), не нанося вреда здоровью лиц, проходящих досмотр. То же касается применения этого излучения для выявления террористов в местах массового скопления людей. Терагерцовое излучение хорошо отражается металлами за счет их большой проводимости, что обеспечивает высокий контраст изображения при детектировании холодного или огнестрельного оружия, скрытого под одеждой.

В рамках диссертационного исследования разрабатываемая ТГц ФПА может быть использована как в качестве источника излучения для систем терагерцового видения, так и в качестве детектора. Фактически она должна занять пустующую на сегодняшний день нишу высокостабильных терагерцовых источников, работающих на частотах нескольких ТГц. В настоящее время остаются актуальными проблемы повышения мощности компактных терагерцовых источников, выявления их оптимальных условий создания. Повышение мощности терагерцовых источников необходимо для улучшения чувствительности, разрешающей способности устройств терагерцового видения.

Благодаря высоким значениям мощности, разработанные и изученные терагерцовые устройства станут решением задачи разработки терагерцовой элементной базы и будут соответствовать современному мировому уровню исследований в данной области.

Обзор литературных источников выявил, что несмотря на значительное количество экспериментальных исследований, оптимальные условия отжига *ex-situ* низкотемпературного LT-GaAs по температуре и длительности с целью получения максимальной мощности терагерцового излучения от ТГц ФПА для систем терагерцовой спектроскопии временного разрешения недостаточно изучены, и есть возможности для ее увеличения. Как следует из литературных данных и собственных экспериментов с аналогичными ТГц ФПА ведущих зарубежных фирм, электрооптический пробой полупроводниковой структуры происходит при не столь высоких напряжениях, поэтому одним из путей увеличения мощности является повышение порогового напряжения смещения. Выявление физических причин, механизмов, обуславливающих повышение порогового напряжения смещения, является новой задачей.

Отсутствуют работы по зависимости мощности ТГц ФПА от концентрации избыточного мышьяка, структуры и шероховатости поверхности в облучаемой фотопроводящей области полупроводника.

В исследованиях по терагерцовым устройствам, интерпретирующих физические процессы в полупроводнике, рассматриваются в основном их протекание в монокристаллической структуре. Новым в предлагаемом диссертационном исследовании будет описание основных физических эффектов, протекающих в мощной ТГц ФПА с LT-GaAs в режиме темнового тока и при возбуждении фемтосекундным лазером, на основе комплексного качественного представления зонной структуры в монокристаллическом полупроводнике и зеренной структуры всего полупроводникового материала, изменяющимся с температурой отжига.

**Цель диссертационной работы** – разработка конструктивно-технологических подходов к увеличению мощности широкополосных источников терагерцового диапазона на основе ТГц ФПА с экспериментально полученными при низкой температуре гетероструктурами GaAs.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Выбор фотопроводящего материала, типа и геометрии металлических контактов, нанесенных на поверхность полупроводника ТГц ФПА, разработка конструкции терагерцового источника.

2. Исследование Вольт- и Ватт- амперных характеристик, изготовленных ТГц ФПА при разных условиях на основе выращенных при низкой температуре гетероструктуры LT-GaAs/AlGaAs.

3. Выявление влияния температуры роста, отжига, соотношения потоков мышьяка и галлия в методе молекулярно-лучевой эпитаксии на выходную мощность ТГц ФПА.

4. Разработка новых конструкций ТГц ФПА с разными топологиями, увеличивающие ее эффективную рабочую площадь и создающие распределенную планарную емкость для увеличения импульса фототока.

5. Расчет конструкции (топологии) плазмонных металлических наноструктур в составе ТГц ФПА методом моделирования.

6. Разработка технологии изготовления ТГц ФПА с плазмонными металлическими наноструктурами.

### **Научная новизна работы**

Экспериментально установлено, что для выращенных при низкой температуре (230 °С) LT-GaAs гетероструктур оптимальная температура постростового отжига в диапазоне 670 ÷ 680 °С приводит к увеличению мощности излучения ТГц ФПА до 6 раз.

Предложена оригинальная конструкция ТГц ФПА матричного типа со встречно-штыревыми контактами и двухуровневой металлизацией со встроенной распределенной металл-диэлектрик-металл (МДМ) емкостью, обеспечивающей увеличение удельной емкости до 300 раз в сравнении с традиционной структурой с одним уровнем металлизации. Применение встречно-штыревых контактов на выращенной при оптимальных условиях LT-GaAs структуре позволяет увеличить мощность ТГц ФПА (по фототоку в 40 раз).

На основании результатов моделирования и экспериментальной апробации реализованы ТГц ФПА с использованием плазмонных металлических наноструктур в электродном зазоре ТГц ФПА, позволяющие увеличить генерируемую терагерцовую мощность в 6.3 раза, по сравнению с ТГц ФПА без плазмонных наноструктур.

### **Практическая ценность работы**

1. Экспериментально реализована ТГц ФПА флажкового типа с превосходящими показателями по мощности терагерцового отклика (5 мкВт / 180 В против 3.3 мкВт / 90 В) в сравнении с аналогами.

2. Разработана и создана уникальная конструкция ТГц ФПА с встречно-штыревыми контактами, образующая конденсатор со встроенной распределенной МДМ емкостью обеспечивающей увеличение удельной емкости до 300 раз в сравнении с традиционной структурой с одним уровнем металлизации, одновременно обеспечивающая увеличение полезной площади прибора при возбуждении лазерным излучением и увеличение фототока (в 40 раз), а также снижение рабочего напряжения смещения (с 50 В до 2 В) при сохранении высокой напряженности электрического поля.

3. Путем расчетного моделирования и экспериментального исследования установлено, что использование вплавных омических контактов Ni/Ge/Au/Ni/Au в ТГц ФПА позволило увеличить величину фототока  $\approx$  в 2 раза по сравнению с широко используемыми неплавными омическими контактами Ti/Au.

4. Разработан технологический процесс изготовления ТГц ФПА с плазмонными металлическими наноструктурами с высокой мощностью терагерцового отклика (0.24 мкВт при напряжении смещения 25 В).

5. Разработанные ТГц ФПА могут использоваться в роли источников и детекторов терагерцового излучения для построения системы импульсной терагерцовой спектроскопии с динамическим диапазоном 65 Дб и спектральной шириной 3 ТГц.

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

1. Методика высокотемпературного отжига LT-GaAs гетероструктур для изготовления ТГц ФПА (670÷680 °С с длительностью 6 мин) для увеличения мощности терагерцового отклика.

2. Конструкция и технология создания ТГц ФПА с вплавными контактами на основе системы Ni/Ge/Au/Ni/Au с увеличенным фототоком до 2 раз по сравнению с ТГц ФПА с неплавной металлизацией контактов Ti/Au.

3. Технологический маршрут изготовления оригинальной конструкции антенны матричного типа со встречно-штыревыми контактами и использованием двухуровневой металлизации, со встроенной распределенной металл-диэлектрик-металл емкостью, приводящей к увеличению фототока в 40 раз при низких напряжениях смещения и малом темновом токе.

4. Оригинальная конструкция ТГц ФПА с плазмонными металлическими наноструктурами из золота, использование которых позволило увеличить фототок более чем в 2 раза, по сравнению с ТГц ФПА без наноструктур, и обеспечивающим увеличение мощности в 6.3 раза в спектральном диапазоне до 1 ТГц.

#### **Достоверность научных результатов и выводов**

Для решения поставленных задач использовались современные экспериментальные методы и подходы.

Молекулярно-лучевая эпитаксия для низкотемпературного роста арсенида галлия, создающего основу ТГц ФПА. Используемые гетероструктуры были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в известной лаборатории Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике, в которой выращиваются модулированно-легированные гетероструктуры с электрофизическими параметрами, соответствующими мировому уровню.

Для создания ТГц ФПА с одинаковыми плазмонными nanoостровками, наностержнями использовалась электронно-лучевая литография. Использовалась программа BEAMER (GenISys, Германия) для распределения доз и получения одинаковых образцов ФПА, при изготовлении также использовался популярный резист РММА 950А4 (Microchem, Япония).

Для характеристики структур использовались общепризнанные прецизионные методы исследования – измерения эффекта Холла и электропроводности, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Калибровка установки интегральной и спектральной терагерцовой спектроскопии с временным разрешением для определения интегральной мощности терагерцового отклика и спектральных характеристик ТГц ФПА, т. е. определяющей как суммарную, так и частотную зависимость интенсивности излучения, проводилась с использованием тестовых образцов РСА-GAAS-100-B (Zomega, США), РСА-40-05-10-800-h (ВАТОР, Германия), кристалл ZnTe. Осуществлялась юстировка оптического тракта установки на максимальное значение терагерцового сигнала изменением положения держателей по осям  $x$ ,  $y$ .

Моделирование напряженности электрического поля, плазмонных эффектов в междуэлектродном пространстве ТГц ФПА в зависимости от топологических размеров и структурных особенностей LT-GaAs проводилось известным методом конечных элементов; использовались отобранные проверенные литературные данные электрофизических параметров арсенида галлия – подвижность электронов и дырок, время жизни, диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, ширина запрещенной зоны и происходило сравнение с имеющимися результатами подобных работ.

Измерение характеристик зеренной структуры и изучение ее влияния на электрофизические характеристики, такие как темновой ток, выходная мощность проводилось методами атомно-силовой микроскопии с применением

тестовых образцов TZG1, TGQ1 (NT-MDT, Россия). Использовалась программа Image Analysis (НИН, США) для анализа топологии поверхности, позволяющей определить шероховатость поверхности.

Для обеспечения достоверности результатов рентгеновской дифракции образцов на основе низкотемпературного арсенида галлия использовались эталонные образцы LT-GaAs и  $\alpha$ -оксида алюминия для сравнения полученных дифрактограмм.

Повторяемость результатов обеспечивалась использованием серии образцов с малым шагом по условиям изготовления, а также применением современного высокоточного диагностического оборудования. Результаты подтверждались теоретическим моделированием, сопоставлением с данными из литературы и широкой апробацией на международных и российских конференциях. Исследования были опубликованы в рецензируемых журналах.

### **Реализация результатов работы**

Соискатель провел исследования в Центре радиофотоники и СВЧ-технологий НИЯУ МИФИ. Работа была выполнена в рамках грантовой программы Фонда поддержки образования и науки имени члена-корреспондента РАН Мокерова В. Г. "Стипендиат Фонда В. Г. Мокерова".

Автор является финалистом Всероссийского инженерного конкурса для студентов и аспирантов в области нанотехнологий (ВИК nano 2016 г.).

На основе предложенных в работе режимов электронно-лучевой нанолитографии с критическим размером до 200 нм была разработана методика получения Y-образного затвора НЕМТ транзисторов, применяемая в Центре радиофотоники и СВЧ технологии.

### **Апробация работы**

Результаты апробированы на 15-ти международных и российских конференциях: Мокеровские чтения: 8-я, 9-я, 10-я, 12-я, 13-я международные научно-практические конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники (Москва, Россия, 2017, 2018, 2019, 2021, 2022); Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine: The 2nd International Symposium (Moscow, Russia, 2017); Workshop LNIO X118 (Troyes, France, 2017); The 15th International conference of Near-field Optics and Nanophotonics (Troyes, France, 2018); The 7th International Conference on Material Science (Er-enhot, China, 2018); VII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (Москва, Россия, 2018); III Международная конференция молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций (Улан-Удэ, Россия, 2019); XXVII, XXVIII Всероссийские конференции с международным участием «Высокоэнергетические процессы в механике сплошной среды», посвященные 90-летию со дня рождения Р. И. Солоухина, 100-летию со дня рождения Н. Н. Яненко (Новосибирск, Россия, 2020, 2021); The 9th International Conference on Materials Science (Ulaanbaatar, Mongolia, 2020); V Российско-белорусский се-

минар-конференция «Новые наноматериалы и их электромагнитные свойства» (Томск, Россия, 2021).

### **Личный вклад автора**

Соискателем выполнен аналитический обзор по теме диссертационного исследования, выбраны состав и толщина слоев гетероструктур на основе низкотемпературных материалов для ТГц ФПА, проведен рост гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии, подобраны режимы отжига образцов, проведены измерения вольт-амперных характеристик, выполнена обработка результатов измерений. Личный вклад соискателя состоит в моделировании, разработке и исследовании оптоэлектронных, морфологических свойств ТГц ФПА различного типа: ТГц ФПА с флажковой геометрией контактов, ТГц ФПА с вплавными, ТГц ФПА с встречно-штыревыми контактами, гибридных ТГц ФПА с плазмонными металлическими наноструктурами, в исследовании свойств ТГц ФПА терагерцового излучения, анализе данных и формулировании выводов, связанных с эффективностью источников. Также соискатель внес определяющий вклад в подготовку 8 публикаций по теме диссертационной работы и 1 патента РФ на изобретение.

### **Публикации**

Автором работы опубликовано 8 научных работ, включённых в перечень рекомендованных ВАК и в системе цитирования Web of Science / Scopus, а также 16 работ в сборниках трудов конференций и семинарах. Получен патент Российской Федерации на изобретение.

### **Патенты**

Опубликован патент на изобретение: Васильевский, И.С., Виниченко А.Н., **Номоев С.А.**, Каргин Н.И. Способ формирования металлического Y-образного затвора сверхвысокочастотного транзистора // Патент РФ №2729510, опубликовано 07.08.2020.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, благодарности, списка литературы и приложения.

В приложении представлены документы о внедрении и использовании результатов диссертационной работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, определены цель и задачи диссертации. Сформулирована научная новизна, основные научные положения, выносимые на защиту, и практическая ценность полученных в работе результатов.

**Первая глава** диссертации представляет обзор научных публикаций по общей теме “Компактные источники терагерцового излучения для устройств микро- и наноэлектроники”.

В первом пункте обсуждаются наиболее популярные источники терагерцового излучения, их физические принципы. Компактные источники терагерцового излучения являются маломощными (порядка мкВт-мВт) и по принципу действия их можно разделить на две основные группы: 1) источники, использующие электрооптический эффект в фотопроводящих материалах с пикосекундными временами релаксации носителей заряда, например, в полупроводниковых кристаллах и 2) источники на других физических эффектах.

Второй пункт посвящен обзору современного состояния и развития по созданию широкополосных источников терагерцового диапазона на основе фотопроводящих антенн (ТГц ФПА) с полупроводниковыми эпитаксиальными пленками LT-GaAs и Si. Рассмотрены основные факторы, влияющие на мощность терагерцового излучения. В итоге выявлено, что электрофизические свойства LT-GaAs фотопроводящих слоев в значительной степени влияют на генерацию и детектирование характеристик терагерцовых волн. В терагерцовой генерации, высокая подвижность фотовозбужденных носителей и наличие нескольких кластеров As в LT-GaAs являются двумя важными факторами. Для создания детекторов, короткое время жизни носителя и отсутствие поликристаллической структуры в LT-GaAs являются важными факторами. Благодаря оптимизации этих физических свойств, мы можем улучшить общий динамический диапазон генерации и детектирования терагерцового излучения.

Третий пункт посвящен сравнению отечественных и зарубежных ТГц ФПА. Авторы работы из МИРЭА [1] создали ТГц ФПА на основе GaAs с кристаллографической ориентацией [111] и плазмонными стержнями в месте лазерного облучения. Показано, что применение перечисленных методов позволило увеличить мощность выходного излучения. В работе коллег из ИТМО [2], используя комплексный численный подход и экспериментальный, проведено исследование гибридной логопериодической ТГц ФПА на основе GaAs с решеткой серебряных наноантенн. Разработана конструкция гибридной ТГц ФПА и предложен подход к повышению ее производительности путем оптимизации размеров серебряных наноантенн и их расположения, достигнуто увеличения эффективности преобразования оптического излучения в терагерцовое в два раза по сравнению с результатами для аналогичных структур без наноантенн. Значительное улучшение наблюдалось в частотном

диапазоне вблизи 1 ТГц. Достигнуто значительное усиление генерации терагерцового излучения с помощью плазмонной решетки в ТГц ФПА с использованием антиотражающего покрытия сотрудниками ИСВЧПЭ РАН [3]. Мощность увеличилась в 3000 раз при мощности излучения возбуждающего лазера 0.1 мВт. С увеличением мощности накачки, эффект от плазмонной решетки в ТГц ФПА снижается. Исследования показывают, что с увеличением оптической мощности накачки с 0.1 мВт до 10 мВт, усиление фототока в ТГц ФПА уменьшается с 30 раз до 2 раз, а усиление мощности излучаемого терагерцового сигнала снижается с 3000 раз до 100 раз. Существуют два основных недостатка такой конструкции ТГц ФПА с плазмонной решеткой: сложность изготовления и снижение эффективности при увеличении мощности накачки.

Зарубежные исследователи в области создания ТГц ФПА на основе полупроводников также используют с целью оптимизации плазмонные структуры и антиотражающие покрытия, различные конфигурации электродов [4-10].

Таким образом, на основании проведенного анализа имеющихся разработок в области компактных ТГц ФПА можно утверждать, что конструкция ТГц ФПА с плазмонными контактами, антиотражающими покрытиями, конфигурацией электродов являются перспективными для повышения терагерцовой мощности. Вследствие отсутствия промышленно производимых терагерцовых излучателей в России, развитие отечественных ТГц ФПА имеет стратегическое значение для обеспечения безопасности и предотвращения террористических актов. Такие системы терагерцовой спектроскопии и визуализации на основе ТГц ФПА, позволяют оперативно и эффективно обнаруживать, идентифицировать потенциально опасные объекты и предотвращать возможные угрозы.

**Во второй главе** представлено оборудование, используемое в работе, методика получения эпитаксиальных мультислойных структур и исследования электрофизических свойств ТГц ФПА. Основные экспериментальные методики, использованные при выполнении исследования: метод молекулярно-лучевой эпитаксии, использованный для роста многослойных эпитаксиальных плёнок; метод растровой электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, рентгенофазовый анализ и рентгеновская дифракция - для исследования поверхности образцов и морфологических свойств, методы измерения темнового тока и фототока на зондовой станции, спектральных и интегральных характеристик - для исследования электрофизических свойств ТГц ФПА.

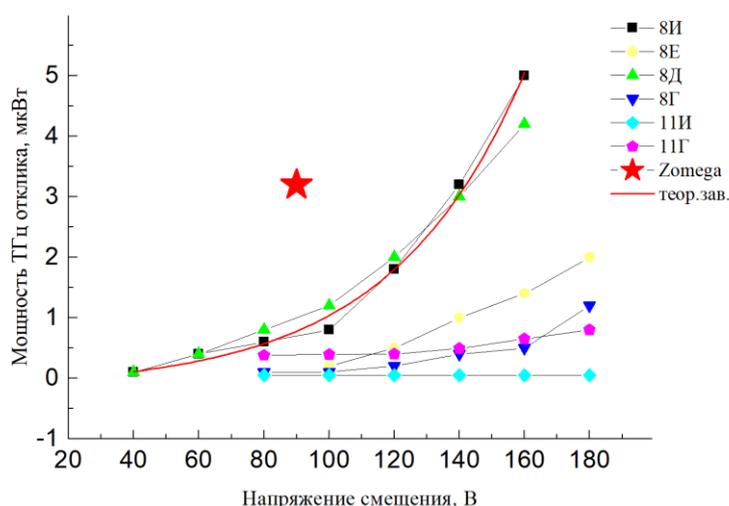
Приведено подробное описание технологического маршрута изготовления ТГц ФПА с обычными, вжигаемыми, встречно-штыревыми контактами и с плазмонными металлическими наноструктурами.

С целью повышения качества изготавливаемых контактов для ТГц ФПА и плазмонных металлических наноструктур автором освоен метод электронно-лучевой литографии и весь процесс формирования металлического Y-

образного затвора сверхвысокочастотного транзистора на подложке с гетероструктурой, также включающего в себя плазмохимическое осаждение для диэлектрика. С этой целью проведено изготовление Y - образного затвора и опубликован патент на изобретение.

**Третья глава** посвящена генерации терагерцового излучения ТГц ФПА на основе пленок низкотемпературного LT-GaAs. В этой главе описывается экспериментальная процедура и условия роста ТГц ФПА методом МЛЭ, а также результаты исследования вольтамперных, интегральных и спектральных характеристик. Определено содержание нестехиометрического мышьяка LT-GaAs методом кривых качания в дифракции рентгеновских лучей в зависимости от температуры отжига. Также приведены эксперименты по определению спектров обратного и прямого рассеяния видимого излучения, рамановского излучения от наночастиц кремния.

В результате выполненных измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ), сделанных для второй серии образцов №8 и у двух образцов при температурах отжига 670°C (образец 8И) и 720°C (образец 8Д) зарегистрирован терагерцовый отклик мощностью 5.0 мкВт и 4.2 мкВт соответственно, при мощности луча накачки 200 мВт. Полученные результаты сравнивались с параметрами серийно выпускаемой ТГц ФПА фирмы PCA-GAAS-100-B (Zomega, США) и представлены на рисунке 1. ТГц ФПА фирмы PCA-GAAS-100-B (Zomega, США) имеет максимальную мощность 3.25 мкВт при напряжении смещения 90 В. Повышение напряжения смещения выше 90 В для этой ТГц ФПА приводит к ее пробую.



**Рис.1.** Мощность терагерцового отклика ТГц ФПА в зависимости от напряжения смещения. 8И – ТГц ФПА с температурой отжига 670°C.

Основным отличием от традиционно используемых гетероструктур - наличие в структурах широкозонного AlGaAs подслоя перед LT-GaAs для снижения утечек в буферный слой GaAs, а также дополнительно увеличивающего поглощение возбуждающего излучения за счет обратного отражения.

График мощности ( $P$ , мкВт) терагерцового отклика ТГц ФПА 8И, 8Д в зависимости от напряжения смещения ( $U$ , В) имеет нелинейно возрастающую зависимость (аппроксимация по измеренным в эксперименте данным дала квадратичную зависимость –  $P(U) = 1.6 + 4.5 \cdot 10^{-4} \cdot U^2$ ), где  $P$  [мкВт],  $U$  [В], что согласуется с теоретическими оценками [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**1]. Изготовленные нами ТГц ФПА с флажковой геометрией контактов обладают более высокой мощностью терагерцового излучения при повышенных напряжениях смещения (выше 140 В) по сравнению с зарубежной фирмой PCA-GAAS-100-B (Zomega, США) и выдержали работу при напряжениях до 160–180 В.

**Таблица 1.** Параметры отжига структур и интегральная терагерцовая мощность ТГц ФПА на их основе

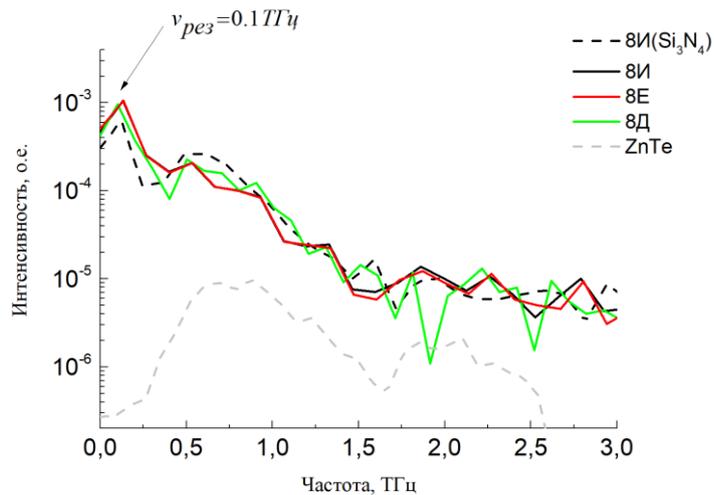
№ образца	$T_p$ , температура роста, °С	$T_{отж}$ , температура отжига, °С	$P$ – мощность терагерцового отклика, мкВт
8Г	230	600	0.65
8И	230	670	5.0
8Е	230	700	4.2
8Д	230	720	1.4
11Г	260	600	0.65
11И	260	670	0.05

Из данных таблицы 1 следует, что более высокая температура отжига приводит к более высокой выходной мощности терагерцового отклика. Это связано с тем, что отжиг приводит к образованию кластеров As в матрице GaAs с характерными размерами от единиц до десятков нанометров и улучшает их качество, т. е. получают четкие границы кристалла [12], которые придают материалу необходимые для эффективной генерации свойства (высокое удельное сопротивление до  $10^8$  Ом·см и чрезвычайно малое, менее 1 пс, время жизни носителей заряда).

На рисунке 2 представлены зависимости интенсивности терагерцового отклика ТГц ФПА 8И, 8Д, 8Е и ZnTe от частоты в диапазоне 0-4 ТГц при напряжении смещения 100 В, мощности луча накачки 300 мВт и мощности зондирующего луча 150 мВт. Источник из теллурида цинка исследовался для ее характеристик с изготовленными ТГц ФПА. Напряжение смещения, подаваемое на ТГц ФПА, составляло 100 В. Из рисунка 2 видно, что основная часть терагерцового излучения сосредоточена в достаточно узком спектральном диапазоне от 0 до 1 ТГц, причем график состоит из двух пиков. Для ТГц ФПА 8И, 8Д, 8Е пики наблюдаются при частотах 0.13 ТГц, вторые пики имеют максимальное значение 0.5 ТГц. В то время, как максимум спектра излучения кристалла ZnTe сдвинут в сторону больших частот и находится в области 1 ТГц. Сравнение интенсивности мощности терагерцо-

вого излучения ТГц ФПА с ZnTe показывает, что интенсивность терагерцового излучения от ТГц ФПА на LT-GaAs приблизительно на 2 порядка превосходит интенсивность терагерцового излучения от нелинейного кристалла ZnTe, использованного как эталонный образец для сравнения уровня интенсивности.

Образец 8И с просветляющим покрытием  $Si_3N_4$  продемонстрировал увеличение интенсивности терагерцового излучения в 1.25 раз во втором резонансном пике по сравнению с другими ТГц ФПА 8Д, 8Е, предположительно, за счет снижения отражения интенсивности возбуждающего лазерного излучения.



**Рис.2.** Интенсивность терагерцового отклика ТГц ФПА 8И, 8Д, 8Е и ZnTe в зависимости от частоты в интервале 0-4 ТГц. Сигнал обработан с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT), напряжение смещения 100 В, мощность луча накачки 300 мВт и мощность зондирующего пучка равна 150 мВт.

Спектр излучения ТГц ФПА на основе LT-GaAs с контактным зазором 200 мкм имеет максимум излучения на частоте примерно 0.1 ТГц и заметные амплитуды высокочастотных компонентов до 0.7 ТГц. Полуширина интенсивного пика (по уровню половинной мощности интенсивности) равна 0.056 ТГц, второго пика 0.73 ТГц. Следует отметить, что рассчитанные значения длительности импульсов терагерцового излучения ТГц ФПА (по полувысоте) примерно одинаковы и составляют порядка 0.6 пс, генерируемый спектр терагерцового излучения имеет узкий пик в районе 0.1 ТГц.

Мы можем рассчитать резонансную частоту для ТГц ФПА **Ошибка!** **Источник ссылки не найден.**, с помощью формулы

$$v_{рез} = \frac{c}{2 \cdot L_e \cdot n}, \quad (1)$$

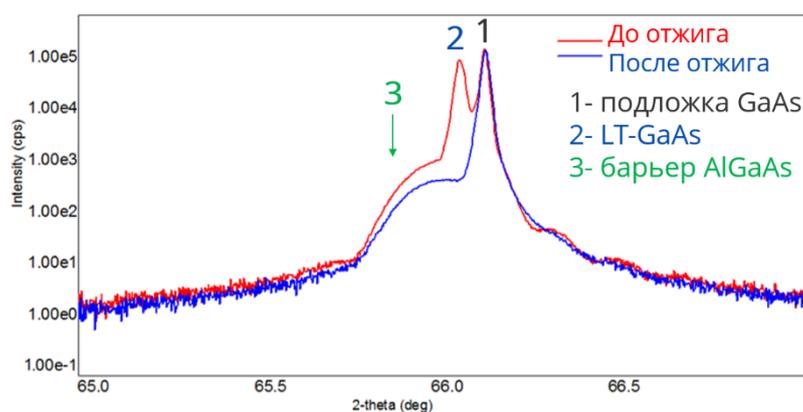
где  $c$  - скорость света,  $n$  - показатель преломления полупроводника на длине волны генерируемого излучения (для GaAs  $n \sim \sqrt{13}$ ),  $L_e$  - эффективная длина, в том числе и с шириной полосковой линии  $D$ ), она вычисляется как  $L_e = L + 2 \cdot D$ . Ширина ТГц ФПА от одной стороны анода до другой стороны катода -  $L$ . Оценка дает для использованной нами топологии ТГц ФПА ( $L = 200$  мкм и  $D = 100$  мкм) частоту 0.104 ТГц, что превосходно согласуется с полученным спектром. Время жизни неравновесных носителей заряда LT-GaAs, определяющих положение пика терагерцового излучения, как известно, меньше 1 пс, что значительно меньше времени релаксации для генерации пика при 0.1 ТГц, поэтому эта характеристика LT-GaAs не влияет на положение пика нашей ТГц ФПА. Пик спектра излучения исследуемой ТГц ФПА совпадает с точностью до сотых терагерц с резонансной частотой, оценка которой сделана выше. Такое совпадение экспериментальных данных с расчетной формулой (1) дает основание сделать вывод о том, что положение терагерцового пика определяется только геометрическими характеристиками контактов ТГц ФПА - диполем Герца (вibrator). Время жизни неравновесных носителей заряда LT-GaAs, определяющих положение пика терагерцового излучения, как известно, меньше 1 пс, что значительно меньше времени релаксации для генерации пика при 0.1 ТГц, поэтому эта характеристика LT-GaAs не влияет на положение пика нашей ТГц ФПА. Из рисунка 4 видно, что положение максимумов одинаково для образцов 8 И, Е, Д. Это обусловлено тем, что используемая большая эффективная длина ТГц ФПА не позволяет получить более высокие частоты и выявить возможное различие во временах релаксации носителей заряда в данных образцах.

Для получения спектра с пиком в области более высоких частот - 1-3 ТГц нужно уменьшить эффективную длину ТГц ФПА  $L$ . Тогда, используя в качестве основы LT-GaAs с низким временем жизни неравновесных носителей заряда можно добиться генерации высоких терагерцовых частот. Кроме того, на скорость изменения фототока оказывает влияние не только время жизни носителей заряда в материале, но и конфигурация ТГц ФПА. При высоких значениях подвижности в материале и коротких контактных зазорах, возможно, ожидать пролетного механизма протекания тока. По-видимому, при высоких значениях времени жизни неравновесных носителей заряда проявляются другие механизмы, обеспечивающие скорости изменения фототока, достаточные для генерации излучения в высокочастотном терагерцовом диапазоне.

Рассматриваются кривые дифракционного отражения (КДО) эпитаксиальных структур LT-GaAs, измеренные до и после высокотемпературного отжига (рис.3). На КДО, измеренной сразу после получения эпитаксиальной структуры, видны два пика. Основной пик соответствует отражению от плоскости (004) подложки GaAs (пик 1).

Второй, расположенный слева, пик отвечает низкотемпературному LT-GaAs (пик 2). Наличие этого пика говорит о монокристаллическом характере

слоя LT-GaAs и об отличии параметра решетки слоя LT-GaAs от подложки GaAs вследствие избыточного мышьяка в кристаллической решетке. Этот пик исчезает после отжига образца по причине выделения избыточного мышьяка в преципитаты [14], что связано с диффузией атомов избыточного мышьяка и их объединением в преципитаты. Структура преципитатов является аморфной и этим объясняется отсутствие пика от преципитатов мышьяка на дифрактограмме. По расстоянию между пиками LT-GaAs и GaAs на КДО (004) можно, используя методику из работы [15], оценить концентрацию избыточных атомов As в используемом LT-GaAs. Данная оценка дает значение  $9.0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .



**Рис. 3.** Кривая дифракционного отражения LT-GaAs до и после высокотемпературного отжига.

Концентрация избыточных нестехиометрических атомов мышьяка  $N_{As}$  в LT-GaAs существенно зависит от условий эпитаксиального роста – температуры роста  $T_p$  и соотношения давлений потоков молекул мышьяка  $As_4$  и атомов Ga. Температура отжига влияет на размер преципитатов и, следовательно, на глубину локальных уровней. В диапазоне  $200^\circ\text{C} < T_p < 300^\circ\text{C}$  наблюдается экспоненциальная зависимость  $N_{As}$  от температуры роста. Значительное продвижение в объяснении свойств дефектов в LT-GaAs было проведено в работе [16].

Авторы работы показали, что основными дефектами, образующимися при низкотемпературном МЛЭ росте GaAs, являются  $As_{Ga}$  и  $V_{Ga}$ . При этом концентрацией междоузельных атомов  $As_i$  в кристаллической решетке LT-GaAs можно пренебречь. Отсюда следует, что избыточные атомы мышьяка в решетке LT-GaAs присутствуют, в основном, в виде дефектов  $As_{Ga}$ . Дефекты  $As_{Ga}$  приводят к увеличению параметра решетки LT-GaAs, т. к. атомные связи As-As имеют больший ковалентный радиус, чем связи Ga-As.

На рисунке 3 приведена рентгеновская кривая качания для дифракции LT-GaAs, полученного при  $210^\circ\text{C}$ . Видны два пика дифракции, которые соответствуют подложке GaAs (справа) и эпитаксиальному слою LT-GaAs (слева). В результате большего параметра решетки слоя LT-GaAs на подложках GaAs испытывают тетрагональные искажения решетки в направлении пер-

пендикулярном подложке. По сдвигу максимума рентгеновского пика для LT-GaAs рассчитан параметр решетки этого слоя.

В четвертой главе приведены результаты моделирования и экспериментов с ТГц ФПА на основе пленок LT-GaAs с вплавленными, плазмонными и встречно-штыревыми контактами.

Модель состоит из двух связанных исследований – этапов. Сначала оптический отклик рассчитывается в частотной области с использованием уравнения электромагнитной волны (2):

$$\nabla \times \mu_r^{-1} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \cdot \left( \varepsilon_r - \frac{j \cdot \sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0} \right) \cdot \mathbf{E} = 0. \quad (2)$$

Лазерный источник моделируется как сфокусированный монохроматический гауссов пучок на длине волны 800 нм. Отсюда можно рассчитать вектор Пойнтинга и как таковой поток поглощения фотонов внутри подложки ТГц ФПА. Преимущество включения этого шага в модель заключается в том, что поток поглощения фотонов в подложке ТГц ФПА неоднороден. Хотя было показано, что приближения равномерного поглощения работают для традиционных ТГц ФПА. Хорошо известно, что плазмонные фотопроводящие устройства имеют чрезвычайно неоднородное распределение электрического поля, при этом большая часть электромагнитной энергии сильно сконцентрирована вблизи плазмонной структуры [17].

Второй этап исследования определяет динамику движения и релаксации носителей заряда с учетом приложенного напряжения  $V$  и оптической скорости генерации носителей заряда  $U_{n, p}$ . Пиковая генерация носителей берется из потока поглощения фотонов, рассчитанного в первом этапе – оптическом исследовании, и аппроксимируется гауссовой зависимостью от времени. Временная ширина импульса соответствует ширине фемтосекундного лазерного импульса (полная ширина на уровне половинной амплитуды  $\approx 100$  фс). Уравнения, управляющие динамикой этих носителей заряда в полупроводниковом слое, представляют собой уравнение Пуассона (3) и уравнения переноса носителей для электронов (4) и дырок (5):

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \cdot \nabla V) = q \cdot (n - p + N_A - N_D), \quad (3)$$

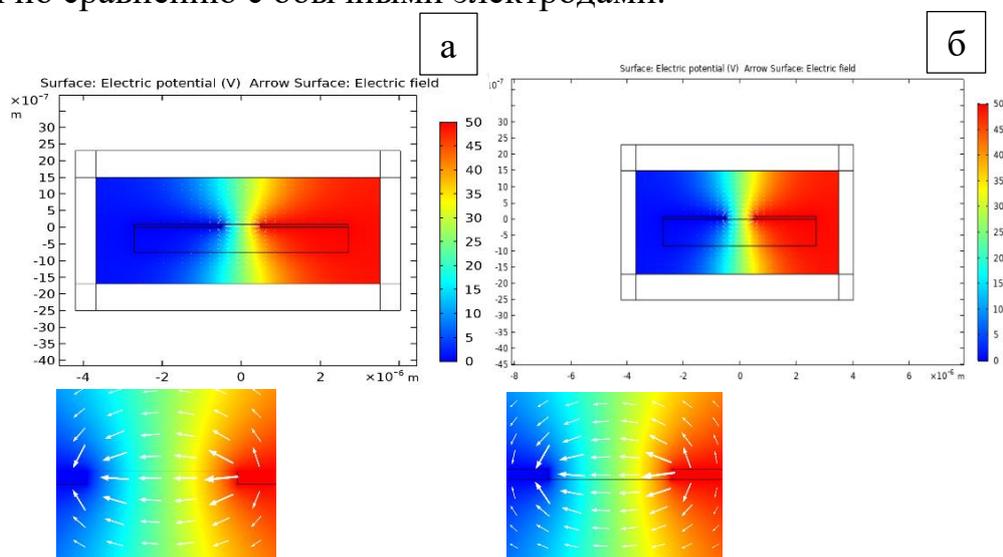
$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \cdot \nabla \mathbf{J}_n - U_n, \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \cdot \nabla \mathbf{J}_p - U_p. \quad (5)$$

Здесь  $n$  и  $p$  – концентрация электронов и дырок,  $N_A$  – концентрация акцепторов,  $N_D$  – доноров,  $U_n = R_n - G_n$ , где  $R_n$  – скорость рекомбинации электронов,  $G_n$  – скорость генерации электронов,  $U_p = R_p - G_p$ , где  $R_p$  – скорость рекомбинации дырок,  $G_p$  – скорость генерации дырок,  $\mathbf{J}_{n, p}$  – плотность тока электронов/дырок.

Плотность тока является функцией концентрации электронов/дырок, подвижности и приложенного напряжения  $V$ . Система уравнений (3-5) решалась методом конечных элементов.

Проведено моделирование статического электрического поля, создаваемого напряжением смещения и прикладываемого к электродам для двух ТГц ФПА с разными типами электродов. На рисунке 4 белыми линиями показаны силовые линии статического электрического поля. Толщина этих линий прямо пропорциональна напряженности электрического поля. На поверхности полупроводника LT-GaAs между электродами в ТГц ФПА с вплавленными контактами (рис. 4а), концентрация линий напряженности выше по сравнению с обычными электродами (рис. 4б). Таким образом, вплавленные электроды увеличивают область статического электрического поля на поверхности полупроводника между электродами в ТГц ФПА, создаваемого напряжением смещения по сравнению с обычными электродами.



**Рис. 4.** Силовые линии статического электрического поля и потенциала в ТГц ФПА LT-GaAs: а – с вплавленными электродами; б – с обычными электродами.

Более высокое поле постоянного тока в приповерхностном слое LT-GaAs приводит к большому улавливанию фотоносителей электродами, что увеличивает выходной фототок ФПА.

Очевидно, что утопленные электроды могут лучше собирать фотогенерированные носители, что приводит к существенно повышенной чувствительности. Проще говоря, в устройствах с утопленными электродами падающие фотоны поглощаются в большем объеме LT-GaAs, где относительно однородное высокое электрическое поле обеспечивает наиболее эффективный сбор носителей.

В отличие от микроволновых антенн, ТГц ФПА в миллиметровом диапазоне (диапазон длин волн 1 мм – 30 мкм) питается от двух разных источников, а именно от напряжения постоянного тока и оптической накачки. Метод конечных элементов, объединяющий волновое уравнение Максвелла с

уравнениями дрейфа-диффузии Пуассона, позволяет рассчитать распределение плотности фотогенерированных носителей, создаваемых лазером накачки. Характеристики лазерного излучения: длина волны лазера 800 нм, параксиальный гауссовый пучок с радиусом пучка 800 нм. Эти данные используются для расчета распределения электрического поля внутри фотопроводящего устройства, фототока с напряжением смещения.

### **Моделирование ТГц ФПА с вплавными контактами**

Проведено моделирование методом конечных элементов ТГц ФПА с вплавными наноразмерными контактами и с обычными, выступающими над рабочей поверхностью LT-GaAs.

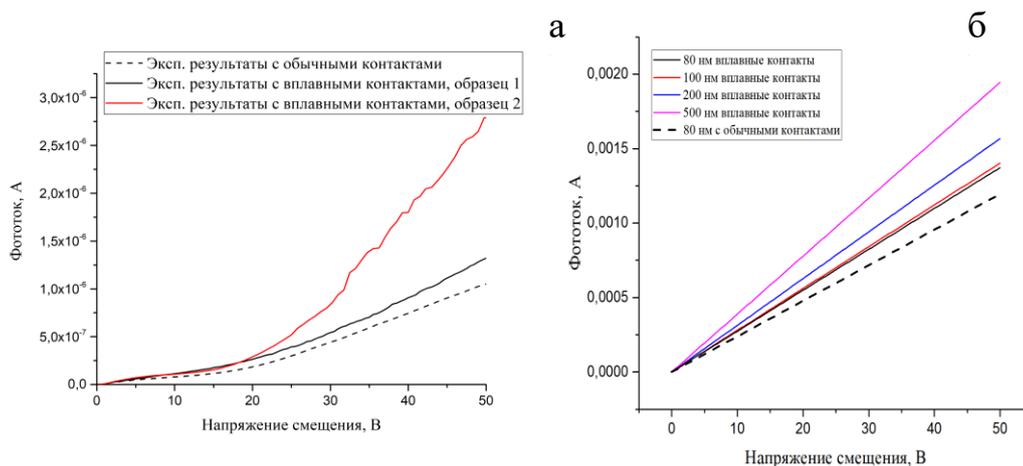
В используемом методе конечных элементов совместно решаются волновое уравнение Максвелла с уравнениями дрейфа-диффузии Пуассона, позволяющее их использовать для вычисления вольтамперных характеристик в полупроводнике LT-GaAs с заданными значениями подвижности носителей заряда, времени их жизни в зависимости от мощности излучения лазера, параметров гауссового пучка.

Предполагается, что наибольшая мощность терагерцового отклика ТГц ФПА с наноразмерными электродами может ожидаться в случае более высокой концентрации электрического поля вблизи края электродов вследствие плазмонных эффектов, вследствие более высокого поглощения лазерного излучения при облучении поверхности.

У ТГц ФПА с вплавными контактами пик напряженности электрического поля вблизи электродов  $5.5 \cdot 10^7$  о.е., что незначительно меньше  $5.8 \cdot 10^7$  о.е. по сравнению с обычными электродами. Это связано с тем, что произошло перераспределение электрического поля в сравнении с ТГц ФПА без вплавных контактов – большая часть лазерного излучения поглотилась в LT-GaAs.

Анализ экспериментальных данных и результатов моделирования показывает, что вплавные контакты увеличивают фототок ТГц ФПА (рис. 5).

На рисунке 5б приведены результаты моделирования, зависимости фототока от напряжения смещения для ТГц ФПА с вплавными контактами толщиной 80, 100, 200, 500 нм и сравнение с обычной ТГц ФПА без вплавных контактов.



**Рис. 5.** Зависимость фототока от напряжения смещения под оптическим лазерным облучением с длиной волны 800 нм; а – экспериментальные данные, разница между обычными и вплавленными контактами; б – результаты моделирования, проведено сравнение обычной ТГц ФПА с толщиной контактов 80 нм с ТГц ФПА с вплавленными контактами с разной толщиной контактов – 80, 100, 200, 500 нм.

Различие экспериментальных и теоретических значений обусловлено тем, что фототок, полученный экспериментально, измерен при облучении белым светом с интенсивностью намного меньше, чем у лазера накачки. Конструкция электродов с вплавленными контактами позволяет считать, что ожидаемая терагерцовая мощность предлагаемой ТГц ФПА также будет возрастать.

### Экспериментальные результаты ВАХ ТГц ФПА

Результаты измерения темнового тока и фототока ТГц ФПА сведены в таблицу 2 с целью сравнительного анализа. Фототок определялся без облучения лазером междуэлектродного промежутка. Над образцом №1 не проводилась процедура сплавления контактов.

Образцы отжигались в высоковакуумной камере при температуре ( $T_{отж}$ )  $580^{\circ}\text{C}$ . Время отжига составило 6 минут в вакууме  $10^{-7}$  Торр без стабилизации потоком мышьяка, при этом лицевая сторона структуры плотно закрывалась подложкой GaAs. Достаточно малое время отжига использовалось для того, чтобы предотвратить сильное снижение плотности кластеров мышьяка, а также сегрегацию мышьяка к поверхности структуры и последующее его испарение. Далее, сплавление контактов происходило в высоковакуумной камере при температуре  $410^{\circ}\text{C}$  в течение 2 минут в вакууме с давлением  $10^{-7}$  Торр.

**Таблица 2.** Условия роста, отжига и сплавления контактов для ТГц ФПА, темновой ток и фототок при комнатной температуре

№ образца	Темновой ток, нА		Фототок, мкА	
	U = -50 В	U = + 50 В	U = -50 В	U = +50 В
1	-30	16	-0.8	1.1
2	-50	38	-3.1	2.5
3	-40	25	-1	1.3
4	-45	40	-1.7	2

Как видно из данных таблицы 4.2, сплавление контактов привело к увеличению фототока в среднем в 2 раза. Разброс в значениях темного и фототока для образцов (2–4) изготовленных в одинаковых условиях, возможно, обусловлен дефектами литографии, проявляющейся в изменении расстояния между электродами. Вжигание оптимизирует распределение электрического поля внутри структуры ТГц ФПА. Основная причина увеличения темнового тока и фототока в наших структурах после отжига – увеличение электрического поля в межэлектродном зазоре из-за заглибления контактов. В обычных фотопроводящих устройствах самое высокое напряжение смещения, которое может быть приложено, будет определяться электрическим полем пробоя воздуха, которое составляет  $2 \cdot 10^6$  В/м. В предлагаемом устройстве наибольшее электрическое поле находится в подложке GaAs, которая имеет более высокое электрическое поле пробоя –  $4 \cdot 10^7$  В/м, поэтому при одинаковой ширине зазора электродов предлагаемое устройство будет выдерживать более высокое напряжение смещения, чем обычные. Это приведет к еще более высокой терагерцовой мощности излучения для предлагаемого устройства, поскольку очевидно, что излучаемая терагерцовая мощность будет увеличиваться с приложенным смещением.

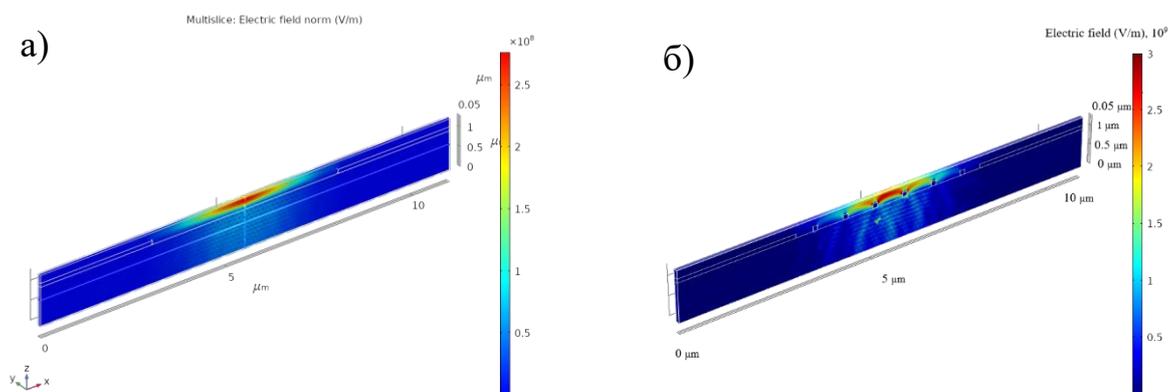
### **Моделирование ТГц ФПА с плазмонными металлическими наноструктурами и напряжением смещения под воздействием гауссова лазерного пучка**

ТГц ФПА была смоделирована для повышения ее энергоэффективности. Проведено моделирование методом конечных элементов на основе волнового уравнения Максвелла с учетом оптического облучения, уравнения дрейфа-диффузии. Данные уравнения были объединены для определения численного решения, это позволяет рассчитать распределение плотности фотогенерированных носителей, создаваемых лазером накачки, а также для вычисления ВАХ в полупроводнике LT-GaAs с заданными значениями подвижности носителей заряда, времени их жизни в зависимости от мощности излучения лазера, параметров гауссова пучка. С целью исследования эффективности анализируется скорость поглощения лазерного излучения в полупроводнике.

В данном разделе представлен результат компьютерного моделирования, изучающего поведение ТГц ФПА, где входные параметры выбранной модели соответствуют геометрии и материалу ТГц ФПА, показывая концентрацию электрического поля в межэлектродной зоне диполя и подложки полупроводника.

Имея теоретические основы, описывающие поведение ТГц ФПА в терагерцовом диапазоне, можно было настроить такие параметры, как геометрия ТГц ФПА, используемый лазер и конструкционные материалы, чтобы добиться генерации пика фототока в диапазоне от 0.1 до 1.2 ТГц [18, 19].

Представленное устройство схематично показано на рисунках 6а и 6б. ТГц ФПА состоит из двух металлических электродов поверх подложки LT-GaAs с зазором  $L = 5$  мкм. Между клеммами приложено напряжение смещения 30 В. LT-GaAs используется в качестве материала подложки. Как видно из рисунка 6б, Au наноструктуры высотой 120 нм и шагом 0.8 мкм помещаются в зазор между электродами.



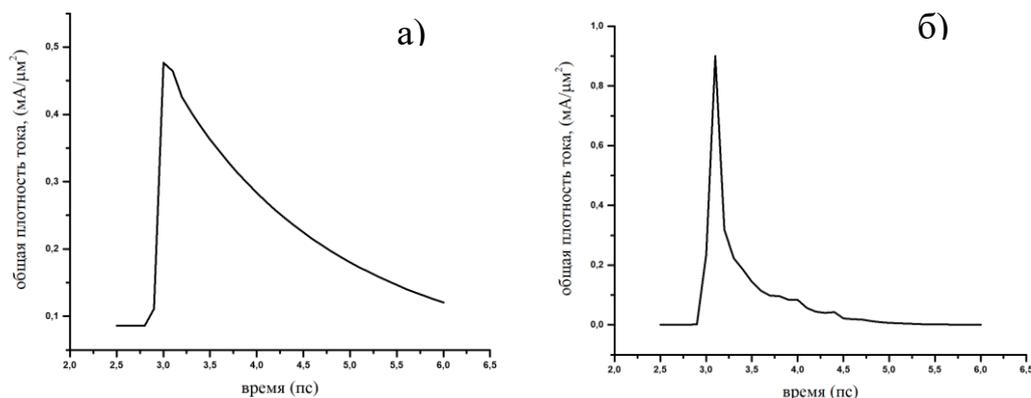
**Рис. 6.** Величина электрического поля в оптическом диапазоне при  $\lambda=780$  нм, внутри подложки GaAs для (а) ТГц ФПА без плазмонных металлических наноструктур и с (б) плазмонной металлической наноструктурой с высотой 120 нм.

Форма профиля распределения электрического поля сохраняет гауссову форму по всей структуре и хорошо видно распространение и поглощение света в подложке GaAs (рис.6а).

Величина электрического поля выше для рисунка 7б, чем для рисунка 7а вследствие наличия плазмонной металлической наноструктуры. Усиление амплитуды электрического поля еще более выражено на поверхности структуры вблизи металлической наноструктуры. Это очень выгодно, потому что носители заряда, генерируемые вблизи поверхности подложки, проходят более короткий путь дрейфа к контактам и приводит к меньшей рекомбинации. Поверхностные плазмонные поляритоны (ППП) представляют собой электромагнитные возбуждения, распространяющиеся на границе металл-

диэлектрик в перпендикулярном направлении. Поверхностная электромагнитная волна является результатом связи электромагнитного поля падающего света с колебаниями электронной плазмы металла. Возбуждение ППП усиливает локальное электрическое поле, что, в свою очередь, создает большее количество фотоносителей и усиливает терагерцовое излучение.

Результат зависимости расчетного фототока от времени - на рисунке 7.



**Рис. 7.** Зависимость расчетного фототока от времени для обычной ТГц ФПА (а) и с плазмонными наноструктурами (б).

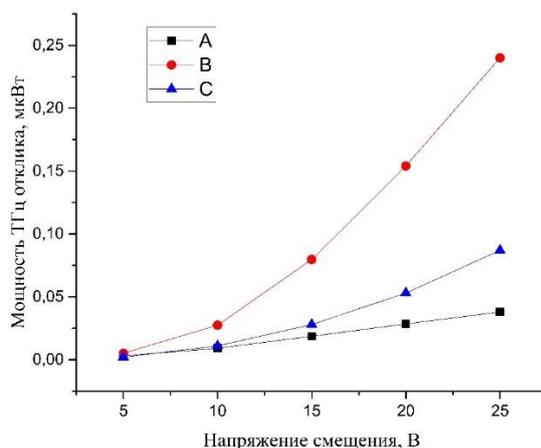
Из-за наличия статического электрического поля фотогенерированные носители ускоряются к электродам и генерируют фототок. Амплитуда этого фототока определяется эффективностью поглощения и силой конкурирующих процессов рекомбинации, а его длительность зависит от длительности лазерного импульса, с одной стороны, и скорости дрейфа носителей заряда, а также ширины промежутка – с другой. Фотогенерируемый ток в результате субпикосекундного лазерного импульса рассчитывается путем решения уравнений неразрывности носителей заряда вместе с уравнением Пуассона с помощью метода конечных элементов. Фототок достигает своего максимального значения через некоторое время - 3 пс, необходимого для переноса носителей на электроды. После этого ток медленно уменьшается из-за постепенного переноса захваченных носителей заряда на электроды. На графике видно, что использование массива плазмонных металлических наноструктур резко увеличило фототок; для высоты 120 нм и периода 0.4 мкм максимальный фототок показывает усиление более чем на 100%.

### **Генерация, регистрация интегральных и спектральных характеристик терагерцового излучения в ТГц ФПА с плазмонными металлическими наностержнями и прямоугольными наноантеннами**

На рисунке 8 представлен график зависимости мощности терагерцового отклика ТГц ФПА от напряжения смещения. В результате проведенных измерений ватт-амперных характеристик, выполненных для образцов без плазмонных наноструктур (А), с плазмонными наностержнями (В) и прямоугольными наноантеннами (С), был зарегистрирован максимальный терагер-

цовый сигнал от ТГц ФПА (В), измеренный по напряжению болометра 3.8 мВ, 8.7 мВ и 24 мВ соответственно, с мощностью луча накачки – 200 мВт. При учёте чувствительности ячейки Голея  $10^5$  В/Вт, мощность терагерцового отклика составила 0.038 мкВт, 0.087 мкВт и 0.24 мкВт соответственно.

ТГц ФПА с плазмонными наностержнями (В) продемонстрировала более высокую мощность, чем остальные ТГц ФПА. Увеличение мощности ТГц ФПА обусловлено по сравнению с обычной ТГц ФПА (А) плазмонными эффектами, приводящие к генерации носителей заряда на поверхности подложки GaAs. За счет поверхностного поглощения генерируемые носители заряда проходят гораздо более короткий путь дрейфа к электродам. Более высокая мощность ТГц ФПА(В) по сравнению с ТГц ФПА (С) обусловлена резонансным согласованием длин волн поверхностных плазмонов и лазера накачки, так как размер/период плазмонных наностержней равен 160 нм/660 нм, в отличие от ТГц ФПА с прямоугольными нанополосками (С) – 300 нм/440 нм.



**Рис. 8.** Мощность терагерцового отклика ТГц ФПА в зависимости от напряжения смещения. А – обычная ТГц ФПА, В – ТГц ФПА с плазмонными наностержнями, С – ТГц ФПА с прямоугольными нанополосками.

Важно отметить, что период плазмонной структуры, как следует из расчетов [20], должен быть близок к  $\lambda/4$ , то есть соответствовать длине волны импульса накачки 800 нм. Происходит возбуждение локализованных поверхностных плазмонов на границе раздела металл-полупроводник Au/LT-GaAs и приводит к усилению напряженности локализованного электрического поля, к увеличению количества фотоносителей вблизи наноструктуры.

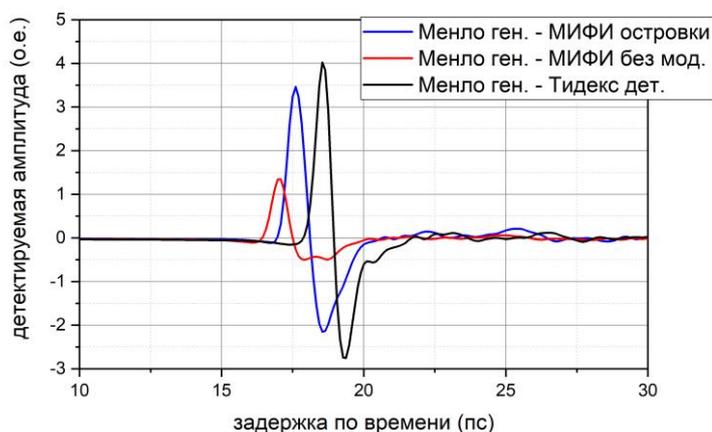
Плазмонные наноструктуры обеспечивают поглощение света и генерацию фотоносителей в основном на поверхности LT-GaAs, поэтому поверхностные носители заряда вследствие минимального расстояния до выводов ТГц ФПА имеют наименьшую вероятность рекомбинации.

Таким образом, эта часть работы демонстрирует увеличение мощности терагерцового излучения за счет использования наноструктур в электродном промежутке ТГц ФПА. Оптические нанополоски увеличивают концентрацию

света вблизи массивов золотых наностержней при локализованном поверхностном плазмонном резонансе и в фотопроводящей области. В результате более высокая генерация фотоносителей вносит существенный вклад в увеличение мощности терагерцового излучения.

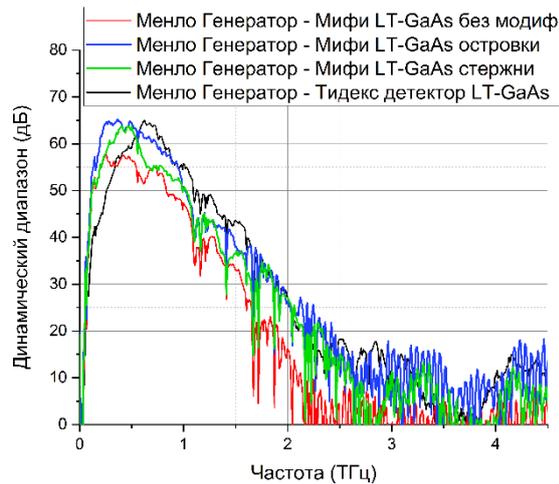
ТГц ФПА тестировались в составе стенда в ООО «Тидекс» по стандартным методикам и устанавливались в качестве детектора и источника излучения. Определялись динамический диапазон и волновая форма выходного ТГц импульса во временной области трех типов ТГц ФПА: флажкового типа, с прямоугольными наноантеннами и с наностержнями. Также происходило сравнение с ТГц ФПА, изготовленной в ООО «Тидекс», работающей на длине волны 780 нм.

На рисунке 9 представлена волновая форма терагерцового импульса во временной области: флажкового типа (МИФИ без мод.) и с плазмонными золотыми прямоугольными наноантеннами (МИФИ островки) и ФПА ООО «Тидекс».



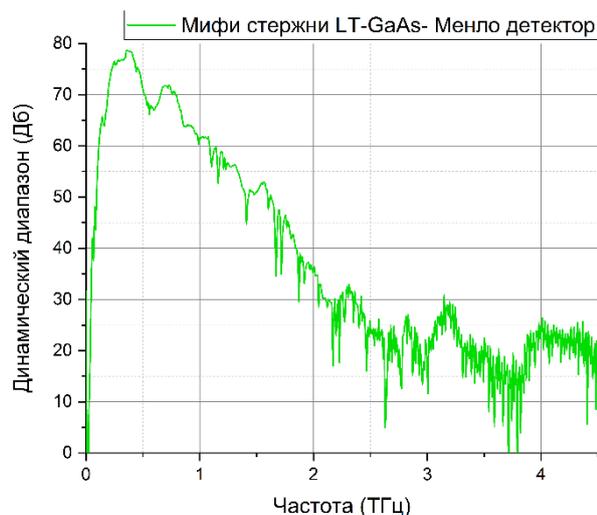
**Рис. 9.** Волновая форма терагерцового импульса во временной области ТГц ФПА флажкового типа, ТГц ФПА с плазмонными золотыми прямоугольными наноантеннами и ТГц ФПА ООО «Тидекс».

Из рисунка 10 видно, что основная часть терагерцового излучения сосредоточена в достаточно широком спектральном диапазоне от 0,06 ТГц до ~2.0 ТГц. Динамический диапазон у ТГц ФПА с металлическими плазмонными наноструктурами в целом не уступает ТГц ФПА ООО «Тидекс». Имеется небольшое уменьшение сигнала ТГц ФПА по сравнению с ТГц ФПА ООО «Тидекс» по мощности сигнала в спектральном диапазоне 0.5-1.7 ТГц на ~ 3 дБ. Также видно, что в области спектра до 0.5 ТГц ФПА с золотыми плазмонными наноструктурами сигнал выше на 5-6 дБ чем в ТГц ФПА без наноструктур.



**Рис. 10.** Частотная зависимость динамического диапазона, ТГц ФПА флажкового типа, ТГц ФПА с плазмонными золотыми прямоугольными наноструктурами, ТГц ФПА с плазмонными золотыми прямоугольными наностержнями и ТГц ФПА ООО «Тидекс». Уровень 0 дБ соответствует уровню шума, измеренного при установке непрозрачной преграды между генератором и детектором. Напряжение смещения 27.5 В, мощность лазера накачки на обоих ТГц ФПА по 11 мВт.

На рисунке 11 представлена частотная зависимость динамического диапазона для ТГц ФПА с металлическими плазмонными наностержнями, где ТГц ФПА выступает в роли источника терагерцового излучения. Из рисунка 11 видно, что основная часть терагерцового излучения сосредоточена в достаточно узком спектральном диапазоне от 0 до 1 ТГц, причем график состоит из двух пиков, пики наблюдаются при частотах 0.36 ТГц с динамическим диапазоном 79 Дб, второй пик имеет максимальное значение при 0.72 ТГц с динамическим диапазоном 72 Дб.



**Рис. 11.** Частотная зависимость динамического диапазона ТГц ФПА с плазмонными золотыми наностержнями. Уровень 0 дБ соответствует уровню

шума, измеренного при установке непрозрачной преграды между источником и детектором. Напряжение смещения 27.5 В, мощность лазера накачки на обоих ТГц ФПА по 11 мВт.

Таким образом, на основании сравнения с разработками ООО «Тидекс», созданные в диссертационном исследовании ТГц ФПА в целом не уступают по детектируемому сигналу ТГц ФПА ООО «Тидекс». Изготовленные ТГц ФПА представляют собой конкурентоспособный лабораторный прототип.

В работе изложены новые научно обоснованные технологические решения по созданию мощной ТГц ФПА, излучающей в терагерцовом диапазоне: применение высокотемпературного отжига LT-GaAs, вплавных омических контактов, встречно-штыревых контактов со встроенной распределенной металл-диэлектрик-металл емкостью, антиотражающего покрытия Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, новых подходов в электронно-лучевой литографии для изготовления плазмонных металлических наноструктур.

**В заключении** приведены основные выводы и результаты работы.

**В приложении** даны документы о внедрении и использовании результатов диссертационной работы.

### **Основные результаты работы**

В работе проведено комплексное исследование влияния конструктивно-технологических параметров при изготовлении широкополосных компактных источников терагерцового диапазона на основе фотопроводящих антенн с экспериментально полученными при низкой температуре гетероструктурами GaAs на их спектральные и мощностные свойства и получены следующие результаты:

1. Найдены оптимальные условия для режимов создания и обработки материала для ТГц ФПА с флажковой геометрией – структур на основе низкотемпературного GaAs. Измерения ВАХ ТГц ФПА с разными температурами роста в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии и послеростового отжига показали, что оптимальная температура отжига равна 670°C при температуре роста 230°C, отношении потоков мышьяка и галлия равном 1.5.

2. Изготовленная по оптимизированным режимам ТГц ФПА с флажковой геометрией контактов обладает характеристиками, превосходящими по генерируемой мощности (в 1.5 раза) и фототоковой эффективности (в 3 раза) коммерческие аналоги. Зависимость выходной мощности от напряжения смещения имеет квадратичную зависимость и достигается мощность терагерцового отклика ТГц ФПА равной 5 мкВт при повышенном напряжении смещения до 160 В.

3. Сравнение мощности терагерцового отклика и свойств поверхности показало монотонно убывающую сильную нелинейную зависимость: меньший размер зерна и более гладкая поверхность увеличивают терагерцовую мощность.

4. Численно исследовано влияние глубины погружения вплавных контактов на ВАХ и фототок ТГц ФПА. Показано, что в структурах с заглубленными до 500 нм по отношению к ТГц ФПА с поверхностными контактами достигается увеличение генерируемого антенной фототока до 100%. Проведенные эксперименты с созданной ТГц ФПА с вплавными контактами продемонстрировали увеличение фототока по сравнению с обычными электродами в 2 раза.

5. Разработана и создана уникальная конструкция ТГц ФПА с встречно-штыревыми контактами, образующая конденсатор со встроенной распределенной металл-диэлектрик-металл емкостью обеспечивающей увеличение удельной емкости до 300 раз в сравнении с традиционной структурой с одним уровнем металлизации, одновременно обеспечивающая увеличение полезной площади прибора при возбуждении лазерным излучением и увеличение фототока (в 40 раз), а также снижение рабочего напряжения смещения (с 50 В до 2 В) при сохранении высокой напряженности электрического поля.

6. Разработана конструкция и технология, изготовлена и измерена ТГц ФПА с плазмонными прямоугольными наноантеннами и наностержнями из золота в зазоре ТГц ФПА. Адаптированы элементы технологии электронной литографии с учетом коррекции эффекта близости. Компьютерным моделированием показано увеличение фототока при использовании массива плазмонных прямоугольных наноантенн высотой 120 нм и периодом 0.4 мкм более чем на 100% за счет усиления локального поля в приповерхностной области из-за возбуждения поверхностного плазмона.

Изготовленная ТГц ФПА на основе LT-GaAs с плазмонными металлическими прямоугольными наноантеннами обладает высокими характеристиками по мощности излучения: терагерцовый отклик мощностью 0.24 мкВт при напряжении смещения 25 В, что в 6.3 раза превосходит ТГц ФПА без плазмонных наноструктур. Разработаны ТГц ФПА с металлическими плазмонными наноструктурами в качестве приемников детектируют излучение до 3 ТГц с динамическим диапазоном 65 Дб.

### **Список использованной литературы**

1. Buryakov A. M., Ivanov M. S., Khusyainov D. I., Gorbatova A. V., Bilyk V. R., Klimov E. A., Mishina E. D. Effects of crystallographic orientation of GaAs substrate and the period of plasmon grid on THz antenna performance // *Annalen der Physik.* – 2021. – V. 533. – №. 8. – P. 2100041.

2. Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Toropov N., Vartanyan T. A., Belov P., Rafailov E. U. Boosting terahertz photoconductive antenna performance with optimised plasmonic nanostructures // *Scientific reports.* – 2018. – V. 8. – №. 1. – P. 6624.

3. Lavrukhin D. V., Yachmenev A. E., Glinskiy I. A., Khabibullin R. A., Goncharov Y. G., Ryzhii M., Ponomarev D. S. Terahertz photoconductive emitter with dielectric-embedded high-aspect-ratio plasmonic grating for operation with low-power optical pumps // *AIP Advances.* – 2019. – V. 9. – №. 1. – P. 015112.

4. Surdi H., Singh A., Prabhu S. S. Enhancement of Terahertz Emission using AuGe nano-patterns //Proc. COMSOL Conf. – 2013.
5. Fesharaki F., Jooshesh A., Bahrami-Yekta V., Mahtab M., Tiedje T., Darcie T. E., Gordon R. Plasmonic antireflection coating for photoconductive terahertz generation //ACS photonics. – 2017. – V. 4. – №. 6. – P. 1350-1354.
6. Khiabani N., Huang Y., Garcia-Muñoz L. E., Shen Y. C., Rivera-Lavado A. A novel sub-THz photomixer with nano-trapezoidal electrodes //IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – V. 4. – №. 4. – P. 501-508.
7. Park S. G., Jin K. H., Yi M., Ye J. C., Ahn J., Jeong K. H. Enhancement of terahertz pulse emission by optical nanoantenna //ACS nano. – 2012. – V. 6. – №. 3. – P. 2026-2031.
8. Heshmat B., Masnadi-Shirazi M., Lewis R. B., Zhang J., Tiedje T., Gordon R., Darcie T. E. Enhanced Terahertz Bandwidth and Power from GaAsBi-based Sources //Advanced Optical Materials. – 2013. – V. 1. – №. 10. – P. 714-719.
9. Berry C. W., Wang N., Hashemi M. R., Unlu M., Jarrahi M. Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes //Nature communications. – 2013. – V. 4. – №. 1. – P. 1622.
10. Yang S. H., Hashemi M. R., Berry C. W., Jarrahi M. 7.5% optical-to-terahertz conversion efficiency offered by photoconductive emitters with three-dimensional plasmonic contact electrodes //IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – V. 4. – №. 5. – P. 575-581.
11. Kim J. O., Lee S. J., Yee D. S., Noh S. K., Shin J. H., Park K. H., Kim, J. S. THz generation characteristics of low-temperature-grown InGaAs emitters //Journal of the Korean Physical Society. – 2011. – Vol. 58. – no. 51. – P. 1334-1338.
12. Kasai S., Watanabe M., Ouchi T. Improved terahertz wave intensity in photoconductive antennas formed of annealed low-temperature grown GaAs //Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46. – no. 7R. – P. 4163.
13. Yano R., Gotoh H., Hirayama Y., Miyashita S., Kadoya Y., Hattori T. Terahertz wave detection performance of photoconductive antennas: Role of antenna structure and gate pulse intensity // Journal of applied physics. – 2005. – Vol. 97. – no. 10. – P. 103103.
14. Ключков А. Н. и др. ТГц-излучение фотопроводящих антенн на основе структур сверхрешеток {LT-GaAs/GaAs: Si} // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128. – № 7. – С. 1010-1017.
15. Galiev G.B., Trunkin I.N., Vasiliev A.L. et al. New structure for photoconductive antennas Based on {LTG-GaAs/GaAs:Si} superlattice on GaAs(111)A substrate //Crystallogr. Rep. – 2019. – Vol. 64, – P. 205-211.
16. Liu X., Prasad A., Nishio J., Weber E.R., Liliental Weber Z., Walukiewicz W. Native point defects in low temperature grown GaAs // Appl. Phys. Lett. – 1995. – Vol. 67. – no. 2. – P. 279-281.
17. Sajak A. A. B. Numerical Simulations of THz Photoconductive Antenna //The University of Liverpool (United Kingdom). – 2019.

18. Jooshesh A. et al. Nanoplasmonics enhanced terahertz sources // Opt. Express. – 2014. – Vol. 22. – no. 23. – P. 27992.

19. Berry C.W. et al. High-power terahertz generation using 1550 nm plasmonic photomixers. Appl. Phys. Lett. – 2014. – Vol. 105. – no. 1. – P. 011121.

20. Anvari R., Soofi H. Enhancement of photocurrent in THz photoconductive antenna by a gold nanorod array // Optik. – 2020. – Vol. 207. – P. 163827.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1. **Номоев С. А.**, Васильевский И. С., Виниченко А. Н., Козловский К. И., Чистяков А. А., Мишина Е. Д., Хусяинов Д.И., Буряков А. М. Влияние режима отжига на свойства терагерцовой фотопроводящей антенны на основе LT-GaAs // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44. – №. 2. **Q3**

2. **Номоев С.А.** Фотопроводящие антенны для генерации ТГц излучения, принципы их работы и выбор оптимальных физических параметров // Аллея науки. – 2017. – Т. 3. – №. 13. – С. 499-515.

3. **Nomoev S.**, Vasilevskii I., Khartaeva E. Atomic force microscopy and EDX analysis for investigation photoconductive LT-GaAs terahertz antennas // Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications Ltd, 2018. – Vol. 271. – P. 92-97. **Q3**

4. Buryakov A.M., Ivanov M.S., **Nomoev S.A.**, Khusyainov D.I., Mishina E.D, Khomchenko V.A., Vasil'evskii I.S., Vinichenko A.N., Kozlovskii K.I., Chistyakov A.A., Paixão J.A. An advanced approach to control the electro-optical properties of LT-GaAs-based terahertz photoconductive antenna // Materials Research Bulletin. – 2020. – Vol. 122. – P. 110688. **Q1**

5. **Nomoev S.**, Vasilevskii I., Vinichenko A. The research for approaches to increase power of the compact THz emitters based on low-temperature gallium arsenide heterostructures // Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications Ltd. – 2020. – Vol. 310. – P. 101-108. **Q3**

6. **Nomoev S.**, Adam P. M., Bardakhanov S., Vasilevskii I., Movsesyan A., Khartaeva E. A visible light scattering study of silicon nanoparticles created in various ways // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC. – 2020. – Vol. 2288. – no. 1. – P. 030030.

7. **Nomoev S.**, Vasilevskii I., Klochkov A., Vinichenko A., Khartaeva E. Terahertz photoconductive antenna with embedded electrodes: simulation and experiment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2020. – Vol. 1000. – no. 1. – P. 012010.

8. **Nomoev S.**, Vasilevskii I., Khartaeva E. Computational modeling of THz photoconductive antenna with plasmonic gold nanorod // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2504. – P. 030041.

### **Материалы конференций**

1. **Номоев С.А.**, Васильевский И.С., Виниченко А.Н. и др. Электрофизические свойства терагерцового фотоприемника и фотопроводящей антенны на основе LT-GaAs // Мокеровские чтения: 8-я Международная научно-

практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. Москва, Россия – 2017. – С. 166-167.

2. **Nomoev S.**, Vasilevskii I., Vinichenko A., Kozlovskiy K. Generation of terahertz pulsed radiation with Photoconductive antennas based of low-temperature-grown gallium arsenide and its applications // Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine: The 2nd International Symposium. Москва, Россия – 2017. – P. 313-315.

3. **Nomoev S.** Photoconductive antennas based of low temperature grow gallium arsenide and its applications // Workshop LNIO X118. Troyes, France – 2017.

4. Васильевский И.С., Виниченко А.Н., Рыжук Р.В., Грехов М.М., **Номоев С.А.** и др. Разработка интегрального модулятора Маха-Цендера на платформу InP // 9-я Международная Научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ». Москва, Россия – 2018.

5. **Nomoev S.**, Movsesyan A., Adam P.-M., Vasilevskii I. Visible light scattering by silicon nanoparticles // The 15th international conference of Near-field Optics and Nanophotonics (NFO-15). Troyes, France – 2018.

6. **Номоев С.А.**, Васильевский И.С., Виниченко А.Н. The THz generation characteristics of low-temperature-grown GaAs emitters // The 7th International Conference on Material Science. Erenhot, China – 2018.

7. **Номоев С.А.**, Васильевский И.С., Виниченко А.Н. Simulation of photoconductive It-gaas antennas for terahertz radiation // Современные проблемы физики и технологий, 7 международная молодежная научная школа-конференция. Москва, Россия – 2018.

8. **Номоев С.А.**, Васильевский И.С., Виниченко А.Н. Моделирование, разработка и исследование электрофизических характеристик терагерцовых фотопроводящих антенн // 9-я международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ». Москва, Россия – 2018.

9. **Номоев С.А.**, Васильевский И.С., Виниченко А.Н. Study of ways to increase the power of compact THz emitters based on low-temperature heterostructures of gallium arsenide // III Международная конференция молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций. Улан-Удэ, Россия – 2019.

10. **Номоев С.А.**, Васильевский И.С., Виниченко А.Н. Разработка и изготовление фотопроводящей антенны с применением встречно-штыревой структуры // 10-я международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ». Москва, Россия – 2019.

11. **Номоев С.А.**, Бардаханов С.П., Адам П., Васильевский И.С., Хартаева Э.Ч. Видимое рассеяние света на кремниевых наночастицах полученных на релятивистском ускорителе электронов // XXVII Всероссийская конференция с международным участием «Высокоэнергетические процессы в ме-

ханике сплошной среды», посвященная 90-летию со дня рождения Р.И. Со-  
лоухина. Новосибирск, Россия – 2020.

12. **Nomoev S.**, Vasilevskii I., Vinichenko A. Terahertz photoconductive antenna with annealing ohmic contacts: modeling and experiment // 9th International Conference on Materials Science (ICMS2020). Ulaanbaatar, Mongolia – 2020.

13. **Номоев С.А**, Васильевский И.С., Виниченко А.Н. Усиление терагерцового излучения в дипольной фотопроводящей антенне на основе LT-GaAs // Пятый Российско-Белорусский семинар-конференция «Новые наноматериалы и их электромагнитные свойства»; Усиление терагерцового излучения в дипольной фотопроводящей антенне на основе LT-GaAs. Томск, Россия – 2021.

14. **Номоев С.А**, Васильевский И.С., Виниченко А.Н., Клочков А.Н. Рентгенодифракционный анализ структур LT- GaAs для генерации ТГц излучения в зависимости от температуры роста и отжига // 12-я международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ- электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ». Москва, Россия – 2021.

15. **Номоев С.А**, Васильевский И.С. Анализ, проектирование и мультифизическое моделирование терагерцовой фотопроводящей антенны с использованием метода конечных элементов // XXVIII Всероссийская конференция с международным участием «Высокоэнергетические процессы в механике сплошной среды», посвященная 100-летию со дня рождения Н.Н. Яненко. Новосибирск, Россия – 2021.

16. **Номоев С.А**, Васильевский И.С., Виниченко А.Н. Разработка и изготовление фотопроводящей антенны с плазмонными золотыми наноструктурами и наностержнями в ТГц области // 13-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ». Москва, Россия – 2022.

### **Патенты РФ на изобретение**

Васильевский, И.С., Виниченко А.Н., **Номоев С.А.**, Каргин Н.И. Способ формирования металлического Y-образного затвора сверхвысокочастотного транзистора // Патент РФ №2729510, опубликовано 07.08.2020.

## Приложение

Утверждаю

Зам. директора по научной работе

ИСВЧПЭ РАН

Д. С. Пономарев



### Акт о внедрении

результатов диссертационной работы Номоева С.А.

Комиссия ИСВЧПЭ РАН в составе:

**Председатель:** Хабибуллин Р.А. - ведущий научный сотрудник

**Члены комиссии:** Павлов А.Ю. - заведующий лаб. №106

Пушкарев С.С. - ведущий научный сотрудник

составила настоящий Акт о том, что ИСВЧПЭ РАН внедрил в технологический процесс изготовления ТГц источников - фотопроводящих антенн (ФПА) на основе низкотемпературного арсенида галлия разработанные в рамках диссертационной работы С.А. Номоевым элементы технологической операции электронно-лучевой нанолитографии и последующего взрывного формирования металлизации плазмонных массивов с топологической нормой до 160 нм. В частности, используется предложенное С.А. Номоевым математическое моделирование для учета и компенсации эффектов близости, оптимизированная доза экспонирования для создания плазмонных металлических элементов ФПА в зависимости от толщины слоя электронного резиста, обеспечивающего формирование однородного рисунка. Подробное описание процесса формирования металлических плазмонных наноструктур в ФПА представлено в диссертационной работе С.А. Номоева.

Председатель комиссии

Хабибуллин Р.А.

Члены комиссии

Павлов А.Ю.

Пушкарев С.С.

Утверждаю

Генеральный директор

ООО «СКОНТЕЛ»

Кудревский Д.А.



Акт о внедрении

результатов диссертационной работы Номоева С.А.

Комиссия ООО «СКОНТЕЛ» в составе: Председателя – заместителя генерального директора по научно-исследовательской работе, Морозова П.В. и членов комиссии:

Вахтомина Ю.Б., заместителя генерального директора,

Дивочева А.В., исполнительного директора,

составила настоящий Акт о том, что ООО «СКОНТЕЛ» внедрил в производство разработанные С.А. Номоевым элементы технологического процесса создания фотопроводящей антенны с наноструктурами на основе низкотемпературного арсенида галлия. Используются результаты математического моделирования по учету и компенсации эффектов близости (ЕС) в программе Veamer, результаты расчета дозы экспонирования для субмикронных топологий с переменной плотностью массива для обеспечения однородного рисунка в резисте. Элементы технологии используются при изготовлении однофотонных детекторов в части формирования чувствительного сверхпроводящего меандра.

Председатель комиссии

Члены комиссии



П.В. Морозов

Ю.Б. Вахтомин

А.В. Дивочий