

«УТВЕРЖДАЮ»

И. о. директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук



Д.В. Рощупкин

2023 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук на диссертационную работу Лаврухина Дениса Владимировича «Теоретические и экспериментальные исследования процессов генерации и детектирования терагерцового излучения фотопроводящими антеннами: физико-математическая модель и новые подходы к оптимизации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Свойства электромагнитных волн терагерцового (ТГц) диапазона частот уникальны для ряда практических применений. С одной стороны, это субмиллиметровое излучение эффективно проникает сквозь непрозрачные неметаллические покрытия, такие как одежда, бумага, сухое дерево. Поэтому, ТГц излучение перспективно для развития систем контроля качества покрытий и композитов, зондирования объемных диэлектрических сред, высокочувствительного распознавания состава химических соединений. С другой стороны, субмиллиметровые волны сильно поглощаются водой и сравнительно безвредны для живых организмов, что открыло широкие перспективы применения ТГц излучения для медицинской диагностики. Естественно, что для решения практических задач необходимо иметь эффективные источники и детекторы ТГц излучения. Именно задачам разработки эффективных источников и детекторов ТГц излучения и посвящена данная диссертационная работа, что и делает её **актуальной, востребованной и перспективной.**

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном научном учреждении Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН).

Диссертация состоит из введения, трех глав, общих выводов и списка литературы. Число страниц в диссертационной работе составляет 120, рисунков 29, таблиц 3, формул 40, ссылок в списке литературы 140, включающей и статьи последних лет.

Во *введении* представлена цель работы, обосновывается ее актуальность, научная и практическая значимость, формулируются цель и задачи исследования, отмечен личный вклад автора, сформулированы положения, выносимые на защиту, и представлен список апробации работы.

В *первой главе* проведен критический обзор основных подходов, физических принципов и схем экспериментов по генерации и детектированию импульсного ТГц излучения. Показано, что для генерации и детектирования широкополосного электромагнитного излучения наиболее перспективным практическим подходом является использование фотопроводящих антенн (ФПА) с металлическими электродами различной формы. Топология электродов, как то параллельные проводники, диполь, галстук-бабочка или логарифмическая спираль, позволяет задать поляризационные, спектральные и пространственные характеристики ТГц излучения. Каждая антенна характеризуется формой спектра излучения, интегральной мощностью излучения и отношением сигнал/шум. Кроме характеристик антенн для оптимизации ФПА существенны задачи повышения эффективности использования энергии лазерного возбуждения и управления спектром поглощения, транспортными характеристиками носителей заряда, удельным электрическим сопротивлением фотопроводящих материалов для работы с разной длиной волны лазерного возбуждения. Разобраны известные из литературы попытки улучшения одной или нескольких характеристик ФПА, осуществляемые выбором материала и/или конструкции антенны. Оказалось, что улучшение одной из характеристик ФПА влекло ухудшение другой. Проведенный анализ показал необходимость разработки комплексной модели процессов генерации и детектирования ТГц излучения, учитывающей особенности лазерного возбуждения, свойств фотопроводника и топологию ФПА. В связи с этим определены цели и задачи работы.

*Целью* настоящей диссертационной работы является разработка физико-математической модели генерации и детектирования ТГц-излучения в ФПА, возбуждаемых ультракороткими лазерными импульсами ближнего ИК-диапазона, а также экспериментальная верификация данной модели путем исследования оригинальных ФПА с разной конструкцией, отличающихся фотопроводящими материалами (детекторы) и топологией электродов (источники).

Во *второй главе* разрабатывается физико-математическая модель генерации и детектирования ТГц импульсов в фотопроводящих антеннах при фемтосекундном

лазерном возбуждении. Построены схемы моделирования ФПА при генерации и детектировании ТГц импульсов. Согласно этим схемам, импульсное лазерное возбуждение генерирует в зазоре между электродами, лежащими на полупроводнике, свободные носители заряда. При приложении к электродам постоянного электрического поля, носители заряда формируют импульс переходного тока. Вкладом дырок в переходный ток пренебрегается. Импульс тока является источником широкополосного электромагнитного излучения с частотами вплоть до ТГц диапазона.

В модели генерации ТГц-импульсов отдельно рассматриваются два этапа. Во-первых, возникновение переходного тока в фотопроводнике. Во-вторых, процесс генерации ТГц излучения с учетом взаимного влияния частотно-зависимого импеданса антенны и сопротивления фотопроводника. В модели детектора учитывается, что падающее электромагнитное поле наводит в зазоре приемной антенны электрическое поле; фотовозбужденные электроны ускоряются наведенным полем и формируют ток детектора. При вычислении напряженности наведенного электрического поля принимается во внимание, что лазерное возбуждение обуславливает возникновение проводимости в зазоре антенны. Модель адаптирована к использованному в эксперименте методу оптического стробирования для регистрации формы импульса, в котором измеряется ток, усреднённый на интервале задержки момента зондирования детектора относительно момента возбуждения.

Таким образом рассмотрена динамика фотовозбужденных носителей заряда в полупроводниках во внешнем электрическом поле. Получены выражения для сопротивления фотопроводника в случае однородного и неоднородного пространственного профиля лазерного возбуждения. Выполнен учет взаимного влияния частотно-зависимого импеданса антенны и сопротивления фотопроводника на форму ТГц спектра. Рассмотрены вопросы повышения мощности ТГц-излучения, управления формой и шириной спектра генерации ФПА-источника. Рассмотрена модель шума ФПА-детектора при малом, по сравнению с длиной зазора между электродами, размере фокального пятна лазерного зондирования. Рассмотрены возможности увеличения спектральной чувствительности и снижения мощности шума ФПА-детекторов.

С целью экспериментальной проверки модели и рассмотренных подходов на ее основе выбраны топологии электродов ФПА-источника и фотопроводящие материалы для ФПА-детектора в виде сверхрешеточных гетероструктур  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$  решеточно-согласованных (РСС) и с искусственно введенными в процессе роста упругими механическими напряжениями (УНС).

В *третьей главе* представлены результаты экспериментальных исследований генерации и детектирования ТГц излучения в ФПА на основе оригинальных топологий и конструкций фотопроводящих сверхрешеточных гетероструктур при фемтосекундном лазерном возбуждении. Глава начинается с описания лабораторного стенда ТГц импульсного спектрометра для проведения апробации ФПА и описания оптической системы с программным обеспечением для визуализации пучка оптического возбуждения в зазоре ФПА. Во втором подразделе главы приведено описание методов изготовления оригинальных образцов ФПА-источников и детекторов. В третьем подразделе приведены результаты исследований спектра ФПА – источника за счет вариации топологии электродов антенны. В последнем, четвертом, подразделе показано повышение эффективности детектирования в ФПА на основе упруго-напряженных сверхрешеточных гетероструктур  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ .

Результаты экспериментальных исследований подтвердили корректность разработанной физико-математической модели для описания спектров излучения ФПА-источников и отношения сигнал/шум ФПА-детекторов.

В *заключении* приведены общие выводы и сформулированы основные результаты. В представленной диссертационной работе приведены результаты многочисленных исследований, полученных впервые.

*Впервые*, на основе разработанной физико-математической модели, рассмотрены процессы генерации и детектирования импульсного ТГц-излучения с учетом частотной зависимости импеданса ФПА, параметров лазерного излучения, а также подвижности и времени жизни носителей заряда в фотопроводнике.

*Впервые* комплексно оценено влияние ряда факторов (длина зазора между электродами ФПА, размер фокального пятна лазерного излучения, транспортные характеристики фотопроводника) на мощность шума ФПА-детектора.

*Впервые* изготовлены образцы ФПА-детекторов на основе упруго-напряженных многопериодных гетероструктур  $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$  на подложках  $\text{GaAs}$ .

*Впервые* экспериментально исследованы зависимости спектральной плотности мощности ТГц-генерации и соотношения сигнал/шум для ФПА-детекторов на основе упруго-напряженных сверхрешеточных гетероструктур  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$  от мощности зондирующего лазерного излучения.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается использованием надежных физических моделей, правомерных приближений, а также соответствием теоретических результатов данным экспериментальных исследований.

На совместном научном семинаре «Материаловедение и Технология» и «Общезначительный» были высказаны и обсуждены следующие замечания: (1) можно ли дать более детальное описание параметров оптимизации (электрическое сопротивление, подвижность и время жизни носителей) сверхрешеточных гетероструктур для ФПА? (2) Почему использовались квантовые ямы, а не ограничились однородным материалом? (3) Достаточно ли полно описаны в модели упруго-напряженные многопериодные гетероструктуры с точки зрения материаловедения? На все *замечания* был *дан* исчерпывающий *ответ*. Таким образом, *замечаний* по существу к диссертационной работе *нет*. Стоит отметить, что сделанные замечания с учетом полученных ответов не снижают научной и практической значимости работы, не затрагивают ее основных выводов, не влияют на достоверность полученных результатов.

### Заключение

Диссертация Лаврухина Д.В. является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне. Работа актуальна, а её результаты отличаются новизной, научной и практической значимостью. Поставленные цель и задачи достигнуты и решены полностью. Материалы диссертации изложены логично и корректно. Все научные положения обоснованы в достаточной степени, их *достоверность* не вызывает сомнения. Результаты диссертационной работы представляют интерес для специалистов, работающих в области физики и техники терагерцового излучения, наноразмерной антенной техники, нанооптики, диэлектрической спектроскопии, лазерной техники. В завершении диссертационной работы сформулированы направления дальнейших исследований. Автореферат диссертации, статьи и тезисы докладов правильно и полно отражают содержание диссертационной работы.

В целом работа написана ясным, технически грамотным языком, хорошо структурирована, отличается логикой изложения и четкой взаимосвязью отдельных глав.

Результаты работы были доложены на 11 конференциях. Основные результаты опубликованы в открытой печати в Российских и зарубежных рецензируемых изданиях - 10 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК и рецензируемых в базах Scopus/WoS, а также отражены в двух патентах на изобретение.

Диссертация Лаврухина Д.В. «Теоретические и экспериментальные исследования процессов генерации и детектирования терагерцового излучения фотопроводящими антеннами: физико-математическая модель и новые подходы к оптимизации» представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по

специальности 1.3.19 – Лазерная физика отвечает требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (в редакции утвержденного постановления Правительства РФ от 20.03.2021 г. № 426), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Лаврухин Денис Владимирович **заслуживает** присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Диссертация Лаврухина Д.В. была рассмотрена и получила положительную оценку на совместном научном семинаре «Материаловедение и Технология» и «Общезначимый» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук 21 сентября 2023 года (протокол №\_3 от 21.09.2023 г.).

Я даю согласие на обработку персональных данных (приказ Минобрнауки от 01.07.2015 г. № 662).

Отзыв подготовил -

главный научный сотрудник лаборатории рентгеновской акустооптики ИПТМ РАН, доктор физико-математических наук [шифр специальности 05.27.01 - твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах]



Михаил Юрьевич Барабаненков

дата, подпись

19.10.2023 г.

Адрес: 3я Парковая улица, 61, Москва, 105425, тел. 8 963 690-86-95, e-mail: barab@iptm.ru

Подпись Барабаненкова Михаила Юрьевича заверяю  
Ученый секретарь ИПТМ РАН  
канд. физ.-мат. наук О.В. Феклисова

