

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук

Петрова Николая Владимировича 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

### **Актуальность темы диссертации.**

Фотопроводящие антенны (далее – ФПА) широко используются в современных ТГц импульсных спектрометрах для генерации и детектирования электромагнитных импульсов, благодаря своему малому размеру, а также простоте и надежности. В настоящее время выполняются многочисленные экспериментальные исследования с целью оптимизации их спектральных, энергетических и шумовых характеристик. Однако, большинство работ затрагивает либо оптимизацию только ФПА-источника, либо только ФПА-детектора. Более того, отсутствуют общепринятые физико-математические модели, в едином ключе описывающие процессы генерации и детектирования ТГц импульсов, которые бы одновременно учитывали параметры лазерного возбуждения, характеристики фотопроводника и влияние топологии электродов антенны. Эти пробелы и восполняет диссертационная работа Лаврухина Дениса Владимировича, посвященная решению актуальной и чрезвычайно востребованной для практики задачи – разработке и верификации комплексной модели ФПА.

### **Содержание диссертации.**

Диссертация содержит введение, три основные главы, общие выводы и заключение. Материал изложен на 120 страницах, содержит 29 рисунков и 3 таблицы, а также список литературы из 140 источников.

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели и решаемые задачи, описана научная новизна исследований и их практическая значимость, сформулированы выносимые на защиту положения, перечислены основные полученные результаты. Представлены

сведения об апробации работы, приведен список основных публикаций и докладов на профильных научных мероприятиях по тематике работы и личном вкладе автора.

**В первой главе** диссертационной работы Денисом Владимировичем приведен краткий литературный обзор, в котором рассматриваются результаты ранее опубликованных исследований и работ, связанных с тематикой диссертации. Описано современное состояние исследований в области физических принципов генерации и детектирования импульсного ТГц излучения. Диссертант обосновывает утверждение, что для практических приложений наиболее перспективным подходом является использование ФПА. Выполнен критический анализ методов физико-математического моделирования протекающих в ФПА процессов. Рассмотрены современные физико-технологические подходы к инженерии свойств фотопроводящих материалов, в том числе для создания на их основе перспективных ФПА, способных работать с лазерным возбуждением излучением волоконных лазеров.

На основе критического анализа современного состояния исследований ФПА Лаврухин Д.В. формулирует цель своей диссертации: создание и экспериментальную верификацию комплексной модели генерации и детектирования ТГц импульсов посредством антенн. При этом, разрабатываемая модель должна повысить эффективность оптико-ТГц конверсии, позволить управлять формой и шириной спектра генерации в ФПА-источнике, а также увеличить спектральную чувствительность и снизить мощность шума в ФПА-детекторе. Предполагается, что новая модель будет дополнять аналитическую модель Друде явным учетом частотно-зависимого характера согласования импеданса антенны и сопротивления фотопроводника, и при этом одновременно учитывать особенности лазерного возбуждения ФПА, свойства фотопроводника и топологию электродов.

**Во второй главе** детально описана разработанная соискателем физико-математическая модель процессов генерации и детектирования ТГц импульсов в ФПА, которая удовлетворяет сформулированным ранее требованиям: учитывает: спектр, пространственный и временной профили лазерного импульса, время жизни и подвижность неравновесных носителей заряда в фотопроводнике, частотную зависимость характеристического

импеданса электродов антенны. Аналитическими методами рассмотрена динамика фотовозбужденных носителей заряда в полупроводниках во внешнем электрическом поле.

Денисом Владимировичем 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. Теоретически рассмотрены вопросы повышения мощности ТГц излучения, управления формой и шириной спектра генерации ФПА-источника. Отдельно стоит отметить, что на основе физико-математической модели предложены подходы, направленные на повышение эффективности ФПА.

Рассмотрена модель шума ФПА-детектора при малом, по сравнению с длиной зазора между электродами, размере фокального пятна лазерного зондирования. Выполнены оценки вклада теплового и, связанного с диффузией носителей при пространственно-неоднородном профиле пучка лазерного зондирования, дробового шума детектора. Теоретически рассмотрены вопросы увеличения эффективности ФПА-детекторов, в частности увеличения их спектральной чувствительности и снижения мощности шума. Для последующей экспериментальной проверки модели и рассмотренных подходов на ее основе выбраны топологии электродов ФПА-источника и оригинальные фотопроводящие материалы для ФПА-детектора.

**Третья глава** посвящена экспериментальной верификации предложенной физико-математической модели. Соискателем подробно описан лабораторный стенд ТГц импульсного спектрометра и особенности его конструкции. Стенд позволяет быстро регистрировать форму ТГц импульсов, а также обеспечивает возможность контроля параметров фокального пятна лазерного излучения в зазоре исследуемых образцов ФПА. Приведены краткие сведения по эпитаксиальному росту оригинальных фотопроводящих материалов, описаны топологии электродов антенны и технология изготовления образцов ФПА.

Применительно к апробации предложенного метода управления спектром ТГц источников, Лаврухиным Д.В. были выполнены экспериментальные измерения спектров ФПА-источников двух топологий, проведено сравнение полученных результатов с результатами численного

моделирования. Таким образом, была показана возможность управления спектром ФПА-источников – перераспределения плотности мощности излучения в желаемый частотный диапазон за счет выбора топологии электродов антенны. В части детектирования ТГц излучения, также было выполнено экспериментальное сравнение ФПА-детекторов на основе решеточно-согласованных и упруго-напряженных фотопроводящих сверхрешеточных гетероструктур (путем рассогласования параметров кристаллических решеток в слоях InGaAs и InAlAs вследствие изменения мольной доли индия относительно решеточно-согласованного состояния). Совокупность полученных для образцов ФПА-детекторов экспериментальных данных подтвердила правильность закономерностей и численных оценок, получаемых в рамках применения предлагаемой модели к процессу детектирования ТГц импульсов посредством ФПА. Более того, использованные в сравнительных экспериментах ФПА-детекторы на основе напряженных гетероструктур продемонстрировали сверхнизкий шум, близкий к значениям собственного шума ТГц импульсного спектрометра, который слабо увеличивался с ростом мощности фемтосекундного лазерного зондирования.

**В общих выводах и заключении** диссертантом сформулированы основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

**Научная новизна работы** заключается в возможности с помощью разработанной физико-математической модели впервые в едином ключе рассмотреть 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. В работе выявлен и явно учтен факт влияния соотношения импеданса ФПА и сопротивления фотопроводника на регистрируемую форму ТГц-спектра. Предложен и экспериментально апробирован удобный и относительно простой подход для управления формой ТГц-спектра на стадии проектирования топологии ФПА

В частности, впервые предложен подход, позволяющий комплексно оценить влияние таких факторов, как длина зазора между электродами ФПА, размер фокального пятна лазерного излучения и транспортные характеристики фотопроводника, на мощность шума ФПА-детектора. В процессе экспериментальной верификации модели, впервые изготовлены и

исследованы при разной мощности зондирующего лазерного излучения образцы ФПА-детекторов на основе упруго-напряженных многопериодных сверхрешеточных гетероструктур.

**Практическая ценность работы** заключается в возможности использования разработанной физико-математической модели при выборе параметров фотопроводящих материалов (в том числе новых материалов с высокой подвижностью) и проектировании топологии электродов ФПА. В процессе выполнения работы, помимо лабораторного стенда ТГц импульсного спектрометра для апробации оригинальных ФПА, на основе разработанных ФПА-источников и ФПА-детекторов был собран спектрометр для задач прикладной диэлектрической спектроскопии, используемый для исследования биологических объектов. Опыт моделирования в сочетании с наработанным опытом практического применения ФПА может быть в дальнейшем использован при создании образцов перспективных компактных лабораторных систем спектроскопии и визуализации в ТГц-диапазоне частот.

**Достоверность основных результатов** диссертационной работы обоснована корректным описанием физических процессов в ФПА, использованием правомерных допущений, корректным применением методов и методик исследования, а также взаимным соответствием полученных экспериментальных данных и результатов моделирования. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 статьях в российских и зарубежных научных журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, а также отражены в 2 патентах РФ на изобретение. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на международных и всероссийских научных мероприятиях в качестве приглашенных и устных докладов.

В заключении, отдельно следует отметить предложенную и реализованную соискателем оригинальную по своей конструкции оптическую систему для визуализации фокального пятна лазерного излучения в зазоре между электродами антенны непосредственно в процессе работы ТГц импульсного спектрометра. Данное решение не подчеркивается в описании новизны или практической ценности работы, но при этом существенно обогащает ее содержание, как и проведенный в работе анализ механизмов возникновения шумов в ФПА-детекторе в случае острой фокусировки лазерного излучения в зазоре антенны.

По диссертационной работе имеется ряд **вопросов и замечаний**:

1) Во второй главе диссертационной работы динамика носителей заряда рассмотрена в рамках аналитической модели Друде с параметром кулоновского экранирования  $\xi = \omega_p \tau_s \ll 1$ , т.е. фактически, в отсутствие экранирования. Соискатель верно отмечает, что такой режим соответствует мощностям лазерного излучения, типичным для лабораторных ТГц импульсных спектрометров. В настоящее время наблюдается тенденция к повышению мощности источников ТГц излучения, для чего возбуждение ФПА-источника стараются производить мощными лазерными системами, например, на основе титан-сапфира. Может ли быть использована предложенная модель для описания работы антенны, в таком случае?

2) В первой главе выполнен критический анализ разных подходов к моделированию ФПА. Преимущества нового метода стали бы нагляднее и проще для восприятия, если бы соискатель проиллюстрировал ключевые особенности имеющихся подходов визуально, по аналогии с представленной на рис. 2.1 схемой нового общего подхода к моделированию. Это бы подчеркнуло оригинальный вклад данной работы;

3) Следует пояснить, какому фотопроводящему материалу соответствуют приведенные на рис. 2.9 зависимости теплового шума ФПА-детектора от диаметра фокального пятна лазерного зондирования;

4) В подписи под рис. 2.10 следует пояснить, что изображенные на нем, а также входящие в формулы (2.23) и (2.24) величины  $I_d$  и  $I_d'$ , представляют собой абсолютные величины силы тока, т.е. не являются отрицательными величинами;

5) В таблице 2.2 пропущено используемое в формулах (2.25) и (2.26) буквенное обозначение для дробового шума « $I_S$ »;

6) В работе присутствуют пунктуационные ошибки и опечатки. В частности:

6.1) Сравнение кривых на рис. 2.9 с числовыми данными, приведенными в таблице 2.2, указывает на опечатку при указании единиц измерения - в графе «Тепловой шум  $I_{JN}$ » должна быть указана размерность  $[\text{пА}/\sqrt{\text{Гц}}]$ ;

6.2) В разделе 3.2, при описании процесса изготовления ФПА-детекторов указывается, что упруго-напряженные сверхрешеточные (УНС)

гетероструктуры отличаются от решеточно-согласованных сверхрешеточных (РСС) гетероструктур меньшей мольной долей индия. Однако, в тексте также приводятся и другие толщины барьерных слоев арсенида индия-алюминия (12 нм для УНС против 4 нм для РСС). По-видимому, здесь имеется какая-то опечатка, если принимать во внимание тот факт, что в тексте также упоминается, что оба образца, как с УНС, так и с РСС содержали по 30 пар чередующихся фотопроводящих и барьерных слоев, с общей толщиной 0,48 мкм, а фотопроводящие слои не менялись. Либо общая толщина образцов была разная, либо толщины барьерных слоев – одинаковые.

Указанные замечания не затрагивают основного содержания диссертации и не снижают ее научно-практической значимости. Материалы диссертации полностью отражены в опубликованных научных работах по тематике исследования. Автореферат удовлетворяет предъявленным требованиям, и в полной мере отражает результаты и выводы диссертационной работы.

**Диссертационная работа** «Теоретические и экспериментальные исследования процессов генерации и детектирования терагерцового излучения фотопроводящими антеннами: физико-математическая модель и новые подходы к оптимизации» Лаврухина Дениса Владимировича является самостоятельной и завершенной научно-квалифицированной работой, обладающей научной новизной и научно-практической ценностью. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.19. Лазерная физика. Работа выполнена на высоком уровне и полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, согласно действующему «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденному постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Лаврухин Денис Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

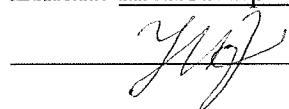
**Официальный оппонент:**

Петров Николай Владимирович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовых процессов и измерений, федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Университет ИТМО, специальность 01.04.05. – Оптика (физико-математические науки).

Почтовый адрес: Кадетская линия, 3, Санкт-Петербург, Россия, 199004

Телефон: +7 812 4800511

Email: [nickolai.petrov@gmail.com](mailto:nickolai.petrov@gmail.com)



Петров Николай Владимирович

Подпись Н.В. Петрова удостоверяю:

Дата

Подпись *Петрова С.А.*  
удостоверяю  
Директор ОПС  
Самусевич К.П. *Самусевич*

*18.10.2023*

