

## ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук, начальника лаборатории сверхсильных световых полей Курчатовского комплекса НБИКС-пт НИЦ «Курчатовский институт» Назарова Максима Михайловича, 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.** Терагерцовая (ТГц) импульсная спектроскопия активно развиваются последние 30 лет, и сейчас превращается в рутинный, общепризнанный метод, требующий надёжной и доступной приборной базы. Благодаря малому размеру и относительно высокой эффективности, для генерации и детектирования ТГц импульсов в современных спектрометрах, работающих во временном представлении, широко применяются фотопроводящие антенны (ФПА). Эффективность ФПА определяется такими характеристиками, как форма спектра излучения, интегральная мощность ТГц излучения в заданном частотном диапазоне и отношение сигнал/шум. По сей день предпринимаются многочисленные исследования с целью оптимизации одного или сразу нескольких перечисленных параметров. При этом оптимизация ФПА до сих пор не является комплексной. К сожалению, отсутствуют и 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. Данное обстоятельство делает задачу разработки комплексной модели ФПА актуальной и востребованной.

**Содержание работы.** Диссертация состоит из введения, всего трех глав, из которых две оригинальные, выводов к каждой главе, общих выводов и списка литературы. Материал изложен на 120 страницах, содержит 29 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 140 источников.

**В первой главе** диссертации рассматриваются подходы, физические принципы и схемы по лазерной генерации и детектированию импульсного ТГц излучения. Показано, что для практических приложений с лазерами малой мощности наиболее перспективным является использование пары антенн как источника и как приёмника. Проводится сравнительный анализ методов описания процессов генерации и детектирования ТГц излучения в ФПА. Описываются современные подходы к управлению свойствами фотопроводящих материалов, в том числе для создания перспективных ФПА с фемтосекундным возбуждением лазерами в ближнем ИК диапазоне.

Выполненный критический обзор литературы по моделированию ФПА показывает необходимость разработки комплексной модели, которая бы

детально описывала процесс генерации и детектирования ТГц излучения и учитывала бы особенности лазерного излучения, свойства фотопроводника и топологию ФПА. А именно: пространственный и временной профили лазерного импульса, время жизни и подвижность неравновесных носителей, частотную зависимость характеристического импеданса электродов антенны. Данная модель необходима для повышения эффективности оптико-ТГц конверсии, управления формой и шириной спектра генерации в ФПА-источнике, увеличения спектральной чувствительности и снижения мощности шума в ФПА-детекторе.

Во второй главе приведена разработанная модель процессов генерации и детектирования ТГц импульсов в ФПА, учитывающая длительность и поперечный размер лазерного импульса, оптические и электрические свойства полупроводника, геометрию электродов. Аналитическими методами рассмотрена динамика фотовозбужденных носителей заряда во внешнем электрическом поле.

Получены выражения для сопротивления фотопроводника в случае однородного и неоднородного пространственного профиля лазерного возбуждения. Учтено взаимное влияние частотно-зависимого импеданса антенны и сопротивления фотопроводника на форму ТГц спектра. Рассмотрены возможности повышения мощности ТГц излучения, управления формой и шириной спектра генерации ФПА-источника.

Рассмотрена модель шума ФПА-детектора при малом, относительно зазора между электродами, размере лазерной перетяжки. Выполнены оценки вклада теплового и, связанного с диффузией носителей при пространственно-неоднородном лазерном пучке, дробового шума детектора. Для последующей экспериментальной проверки модели и выводов из неё выбраны топологии электродов ФПА-источника и оригинальные материалы для ФПА-детектора.

В третьей главе с помощью лабораторного стенда ТГц импульсного спектрометра приводится экспериментальное подтверждение физико-математической модели для двух частных случаев.

1) По процессу генерации сравниваются две спиральные антенны с разными степенями закрутки и ширинами спирали. При прочих одинаковых условиях измеренные отличия в спектрах качественно согласуются с изменениями, следующими из модели. Продемонстрировано перераспределение плотности мощности в желаемый частотный диапазон, за счет выбора топологии электродов антенны.

2) По процессу детектирования сравниваются два состава фотовозбуждаемого слоя при одинаковой геометрии электродов, измеренная зависимость отношения сигнал-шум от мощности стробирующего излучения имеет разный показатель степени, что интерпретируется на основе модели. Также существенно разный уровень шума объясняется разным сопротивлением материала.

В общих выводах и заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

**Научная новизна диссертации.** Разработанная модель впервые в анализируемом виде позволяет рассмотреть процессы генерации и

детектирования в ТГц антенне с учетом частотной зависимости импеданса, а также подвижности и времени жизни носителей заряда в фотопроводнике.

Впервые предложен подход, позволяющий оценить влияние размера фокального пятна лазерного излучения и транспортных характеристик фотопроводника на мощность шума ФПА-детектора.

Впервые изготовлены и экспериментально охарактеризованы образцы ФПА-детекторов на основе упруго-напряженных многопериодных сверхрешеточных гетероструктур.

**Положения, выносимые на защиту.** Сформулированные соискателем основные положения вытекают из результатов проведенного научного исследования. Достоверность полученных данных основана на корректном рассмотрении исследуемых физических процессов, использовании правомерных допущений, корректном применении методов исследования, а также на взаимном соответствии результатов теоретических и экспериментальных исследований. Основные результаты диссертации отражены в публикациях в высокорейтинговых реферируемых научных журналах.

**Теоретическая и практическая значимость диссертации.** В предложенной модели процессов генерации и детектирования ТГц импульсов в ФПА выполнен явный учет взаимного влияния импеданса антенны и сопротивления фотопроводника на регистрируемую форму спектра, что дает возможность оптимизации антенны на конкретную полосу частот на стадии проектирования топологии электродов. Также возможно планировать спектральную чувствительность и соотношение сигнал/шум в ФПА-детекторе. Помимо самих антенн разработан лабораторный стенд ТГц импульсного спектрометра для апробации ФПА и для задач прикладной диэлектрической спектроскопии.

**Опубликование и представление результатов диссертации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 статьях в научных журналах (большинство из них – в журналах из первого и второго квартилей Web of Science, Scopus), 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, симпозиумах и семинарах в качестве приглашенных и устных докладов.

**Замечания.** К диссертации имеются замечания:

1. В пункте 1.1.2. введения основным механизмом генерации ТГц излучения в плазме «двухцветного» оптического пробоя называется четырёхволновое смешение, хотя на сегодня доказано, что наиболее эффективным механизмом в этой схеме является фототок.
2. Ценность разработанной модели и подтверждающих экспериментов была бы ещё больше, если кроме описания всего процесса в целом можно было бы разделить по отдельности спектр эффективности источника и спектр чувствительности детектора. Пока анализируется только «сумма» этих двух процессов и неочевидно, которая из антенн определяет или

ограничивает края спектрального диапазона, его оптимальную полосу. Вторая из антенн в паре источник-приёмник должна иметь однородный и широкий спектральный отклик либо точно известную спектральную форму. А если такого нет, то более информативные данные о конкретной топологии и материале антенны можно получить, исследуя две идентичные антенны, одну как источник, другую как приёмник в едином измерении.

Приведенные замечания не затрагивают основного содержания диссертации и не снижают ее научно-практической значимости.

**Заключение.** Диссертационная работа Лаврухина Дениса Владимировича «Теоретические и экспериментальные исследования процессов генерации и детектирования терагерцового излучения фотопроводящими антеннами: физико-математическая модель и новые подходы к оптимизации» является законченной научно-квалифицированной работой, которая выполнена на высоком научном и инженерном уровне и полностью соответствует требованиям новизны, научно-практической значимости и достоверности, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в соответствии с действующим «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г..

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.19. Лазерная физика. Считаю, что автор диссертации Лаврухин Денис Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук специальности 1.3.19. Лазерная физика.

**Официальный оппонент:**

Назаров Максим Михайлович,  
кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.21. – Лазерная физика, начальник лаборатории сверхсильных световых полей Курчатовского комплекса НБИКС-пт Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»).

Почтовый адрес: 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1  
Телефон: +7 (499) 196-95-39; Email: nrcki@nrcki.ru; <https://nrcki.ru/>

30.10.2023

Дата, подпись

Назаров Максим Михайлович

Подпись М. М. Назарова удостоверяю

Главный ученый секретарь  
НИЦ «Курчатовский Институт»

к.ф.-м.н.



Дата, подпись

К.Е. Борисов