

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.223.02, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ЦЕНТРА «ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ ИМ. А.М. ПРОХОРОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 21.11.2023 №267

О присуждении Лаврухину Денису Владимировичу, гражданину РФ,
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Теоретические и экспериментальные исследования процессов генерации и детектирования терагерцового излучения фотопроводящими антеннами: физико-математическая модель и новые подходы к оптимизации» по специальности 1.3.19. Лазерная физика принята к защите «25» августа 2023 г (протокол заседания № 261) диссертационным советом 24.1.223.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (119991 Москва, ул. Вавилова, 38, приказ о возобновлении деятельности совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д002.063.03 от 18.11.2020 г. № 683/нк).

Соискатель Лаврухин Денис Владимирович 1976 года рождения. В 1999 году соискатель окончил Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет) (МИФИ). В 2002 году окончил очную аспирантуру МИФИ по специальности 01.04.21–Лазерная физика. С 2011 года по настоящее время работает научным сотрудником в ФГАНУ «Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук» (ИСВЧПЭ РАН).

Диссертация выполнена в лаборатории фундаментальных исследований низко-размерных электронных систем в наногетероструктурах полупроводниковых соединений АЗВ5 Федерального государственного автономного научного учреждения Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» и отделе субмиллиметровой спектроскопии Федерального исследовательского центра «Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН) Министерства науки и высшего образования РФ.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент Пономарев Дмитрий Сергеевич, заместитель директора по научной работе Федерального государственного автономного научного учреждения Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук.

Научный консультант – кандидат технических наук Спектор Игорь Евсеевич, заведующий отделом субмиллиметровой спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук».

Официальные оппоненты:

Петров Николай Владимирович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовых процессов и измерений Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»,

Назаров Максим Михайлович, кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории сверхсильных световых полей Курчатовского комплекса НБИКС-пт НИЦ «Курчатовский институт»,
дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, г. Черноголовка, в своем положительном заключении, подписанном Барабаненковым Михаилом Юрьевичем, д-ром физико-математических наук, гл. н. с. лаборатории рентгеновской акустооптики, указала, что выполненная на высоком научном уровне диссертация Лаврухина Дениса Владимировича на тему «Теоретические и экспериментальные исследования процессов генерации и детектирования терагерцового излучения фотопроводящими антеннами: физико-математическая модель и новые подходы к оптимизации» полностью отвечает критериям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в соответствии с п.9 и п.13 Положения, утвержденного Правительством РФ «О присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Лаврухин Д.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Соискатель имеет более 80 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 10 статей в научных журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, а также 2 патента РФ на изобретение. Список наиболее значительных работ:

1. Enhanced THz generation from interdigitated quantum dot based photoconductive antenna operating in a quasi-ballistic regime / A. Gorodetsky, **D.V. Lavrukhin**, D.S. Ponomarev et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2023. Vol. 29, № 5, P. 8500505.
2. Boosting THz photoconductive antenna-emitter using optical light confinement behind a high refractive sapphire fiber-lens. D.S. Ponomarev, **D.V. Lavrukhin**, N.V. Zenchenko et al. // Opt. Lett. 2022. Vol. 47, № 7, P. 1899.
3. Strain-Induced InGaAs-Based Photoconductive Terahertz Antenna-Detector / **D.V. Lavrukhin**, A.E. Yachmenev, Yu.G. Goncharov et al. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2021. Vol. 11, № 4. P. 417-424.

4. Фотопроводящий ТГц детектор на основе новых функциональных слоев в многослойных гетероструктурах // А.Э. Ячменев, **Д.В. Лаврухин**, Р.А. Хабибуллин и др. // Оптика и спектроскопия. 2021. Т.129, №6, С. 741-746.

5. Shaping the spectrum of terahertz photoconductive antenna by frequency-dependent impedance modulation // **D.V. Lavrukhin**, A.E. Yachmenev, A.Y. Pavlov et al. // Semiconductor Science and Technology. 2019. Vol. 34, № 3. P. 034005.

На автореферат поступило 6 отзывов; все отзывы положительные, но есть замечания.

1. От Волкова В.С., Ph.D., директора Центра фотоники и двумерных материалов, заведующего лабораторией нанооптики и наноплазмоники ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»: Ряд известных научных групп в предметной области используют плазмонные электроды для усиления мощности генерации излучения (для источников) и увеличения электромагнитной связи падающего ТГц излучения с поверхностью приемника. Как показывают исследования, такой подход имеет хорошие перспективы. Хотелось бы получить комментарии автора диссертации, почему он не стал применять данный подход в своей работе.

2. От Бурякова А.М., канд. физ.-мат. наук, с. н. с. специализированной учебно-научной лаборатории фемтосекундной оптики для нанотехнологий кафедры наноэлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»: 1) Необходимо подчеркнуть, что большинство современных генераторов и детекторов ТГц излучения обычно функционируют в диапазоне частот от 0,1 до 4 ТГц. В представленном же автореферате отмечается спектр, ограниченный 1,5 ТГц без обоснования или пояснения причин такого рабочего диапазона. 2) Автореферат акцентирует внимание на совершенствовании параметров фотопроводящих антенн,

включая улучшение эффективности их генерации и детектирования. Однако, такие важные аспекты как оптико-терагерцовое преобразование и мощность ТГц излучения, остаются неосвещенными. Для более объективной оценки результатов исследования стоило бы дополнительно представить сравнение с уже существующими и доступными на рынке аналогами генераторов и детекторов ТГц излучения.

3. От Цыпкина А.Н., д-ра физ.-мат. наук, доцента, директора НОЦ фотоники и оптоинформатики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»: 1) При описании экспериментальной установки не указана частота следования импульсов лазерного излучения. 2) С чем связано расхождение данных на рис.4б между экспериментальными данными и квадратичной аппроксимацией для РСС? 3) Автор справедливо указывает в актуальности работы об использовании об использовании более длинноволнового излучения для накачки излучателей или лазерного зондирования детекторов, однако все измерения, в т.ч. сверхрешеточных гетероструктур на основе фотопроводящих слоев InGaAs, производились для длины волны 780 нм. 4) Автор использовал в качестве фотопроводящих слоев технологически развитые материалы типа LT GaAs, а также оригинальные сверхрешеточные гетероструктуры, в которых дополнительно создавались упругие напряжения для уменьшения времени релаксации носителей заряда. При этом напряжения создавались за счет уменьшения мольной доли индия в барьерах InAlAs. Рассматривал ли автор альтернативные подходы по управлению транспортными свойствами фотопроводников?

4. От Горшунова Б.П., д-ра физ.-мат. наук, заведующего лабораторией терагерцовой спектроскопии ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»: 1) Применительно к описанию работы антенны-источника (стр. 12) автор указывает, что с точки зрения повышения эффективности генерации терагерцового излучения предпочтительным является однородное по зазору

возбуждение, однако автором не указывается, по какой причине. 2) При проведении экспериментальных исследований образцов ФПА-детекторов автором была выбрана топология электродов антенны "галстук-бабочка". Почему автором не использовалась более распространенная дипольная топология?

5. От Ковалева М.С., канд. техн. наук, высококвалифицированного с. н. с. лаборатории лазерной нанопластики и биомедицины Отделения квантовой радиофизики Физического института им. П.Н. Лебедева РАН: 1) С целью экспериментальной проверки предложенной автором физико-математической модели детектирования ТГц-импульсов были выбраны образцы ФПА-детекторов на основе фотопроводящих материалов $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$. Будет ли работать модель в случае других материалов? Проверялось ли это автором?

6. От Кузнецова К.А., канд. физ.-мат. наук, с. н. с. кафедры квантовой электроники Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова: К недостаткам работы следует отнести присутствие в некоторых формулах нечитаемых символов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой степенью их компетентности в вопросах лазерной физики, физики фотопроводящих материалов, физики и спектроскопии ТГц-излучения, подтвержденной большим числом публикации в ведущих рецензируемых изданиях, что позволяет им оценить достоверность полученных результатов и научно-практическую значимость рассматриваемой в диссертации проблемы.

Диссертационный совет отмечает, что в ходе выполнения диссертационной работы разработана комплексная физико-математическая модель генерации и детектирования ТГц-излучения в фотопроводящих антенных (ФПА). Для экспериментальной верификации результатов моделирования изготовлены образцы ФПА на основе различных фотопроводящих материалов и с разной топологией электродов разработан

лабораторный импульсный ТГц-спектрометр. Сравнение экспериментально измеренных характеристик оригинальных ФПА — формы спектра ТГц-излучения (для разных источников) и отношения сигнал/шум (для разных детекторов) — с теоретическими предсказаниями по модели подтвердило ее корректность.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что предложена и верифицирована новая комплексная физико-математическая модель процессов генерации и детектирования излучения посредством ФПА в ТГц-импульсном спектрометре, учитывающая параметры лазерного излучения, параметры фотовозбужденных носителей заряда и частотную зависимость импеданса антенны. Выполнен явный учет взаимного влияния импеданса антенны и сопротивления фотопроводника на регистрируемую форму спектра. В части описания процесса детектирования модель описывает спектральную чувствительностью и отношение сигнал/шум для ФПА-детектора.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается следующим. Продемонстрирован метод управления формой ТГц-спектра на стадии проектирования топологии ФПА. Были предложены и реализованы оригинальные ФПА-детекторы на основе упруго-напряженных свехрешеточных гетероструктур, обладающие высокой эффективностью. На основе разработанных ФПА-источников и ФПА-детекторов собран спектрометр для решения задач прикладной диэлектрической спектроскопии биологических объектов и наработки опыта практического применения и оптимизации ФПА.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

Разработана физико-математическая модель, позволяющая впервые 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. 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 метод для управления формой ТГц-спектра на стадии проектирования топологии ФПА.

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.

Изготовлены образцы ФПА-детекторов на основе упруго-напряженных многопериодных сверхрешеточных гетероструктур InGaAs/InAlAs на подложках GaAs.

Экспериментально исследованы зависимости спектральной плотности мощности ТГц-генерации и соотношения сигнал/шум для ФПА-детекторов на основе упруго-напряженных сверхрешеточных гетероструктур (УНС) InGaAs/InAlAs от мощности зондирующего лазерного излучения.

Оценка достоверности результатов исследования показала, что в предложенной физико-математической модели генерации и детектирования ТГц излучения в ФПА рассмотрение всех процессов проведено корректно, а сделанные допущения правомерны. Выбранный для экспериментальной верификации метод обеспечил достаточную полноту информации, обнаружено взаимное соответствие результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Личный вклад соискателя состоит в выполнении математического моделирования характеристик и проведении экспериментов с образцами ФПА, обработке полученных данных, апробации результатов исследований. Автор принимал активное участие в создании лабораторного стенда ТГц импульсного спектрометра, проектировании топологии и изготовлении образцов, интерпретации полученных результатов, подготовке публикаций.

В ходе заседания соискатель Лаврухин Д.В. ответил на заданные ему вопросы и сделанные замечания, привел собственную аргументацию.

