ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.326.07 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МИРЭА – РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (РТУ МИРЭА) МИНОБРНАУКИ РОССИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 23.12.2024 №67

О присуждении Горбатовой Анастасии Владимировне, гражданину Российской Федерации, ученой степеникандидата физико-математических наук.

Диссертация «Спинтронные и фотопроводящие терагерцевые устройства: новые подходы к повышению эффективности генерации, детектирования и управления характеристиками терагерцевого излучения»в виде рукописи по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

Принята к защите 11 октября 2024 года (протокол заседания № 53) диссертационным советом 24.2.326.07, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Минобрнауки РФ, Москва, 119454, проспект Вернадского, 78. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 22 человек 26.01.2023 (Приказ № 86/нк).

Соискатель Горбатова Анастасия Владимировна, «29» июня 1997 года рождения, гражданин Российской Федерации. В 2020 году окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), ей была присвоена квалификация «магистр» по специальности 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» (диплом 107724 №4888866). В том же году поступила в очную аспирантуру РТУ МИРЭА по специальности 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи». По результатам освоения программы аспирантуры в 2024 году ей была присвоена квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь» (диплом 107732 №0048312). Научно-исследовательской деятельностью начала заниматься в 2018 году в должности стажёра-исследователя специализированной учебно-научной лаборатории фемтосекундной оптики для нанотехнологий кафедры наноэлектроники РТУ МИРЭА, где работает по настоящее время. Педагогическую деятельность начала в 2020 году в должности преподавателя на кафедре физики и технической механики РТУ МИРЭА, где работала до 2023 года. С 2023 года по настоящее время работает в должности старшего преподавателя на кафедре наноэлектроники РТУ МИРЭА.

**Научный руководитель** – Буряков Арсений Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры наноэлектроники, заведующий специализированной учебно-научной лабораторией сверхбыстрой динамики ферроиков кафедры наноэлектроники института перспективных технологий и индустриального программирования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

**Официальные оппоненты:**

1. Мурзина Татьяна Владимировна, доктор физико-математических наук, доцент кафедры квантовой электроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,

2. Калашникова Александра Михайловна, PhD (признаваемая в РФ как равная степени кандидата физ.-мат. наук), заведующий лабораторией физики ферроиков, ведущий научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

**дали положительные отзывы на диссертацию**.

**Ведущая организация** федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук» в своем положительном отзыве, подписанном Коледовым Виктором Викторовичем, доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником лаборатории магнитный явлений в микроэлектронике (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), и Каманцевым Александром Павловичем, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории магнитный явлений в микроэлектронике (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), и утвержденном Никитовым Сергеем Аполлоновичем, директором федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, указала, что диссертационная работа была рассмотрена на заседании совета федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук» (протокол заседания №1 от 24.10.2024). Диссертационная работа обладает внутренним единством и представляет собой законченную научно-квалификационную работу; изложение литературных данных и собственных результатов выполнено достаточно грамотно и полно; автореферат соответствует содержанию диссертации; диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п. 9 Постановления Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. «О порядке присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации, Горбатова Анастасия Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

В обсуждении диссертационной работы приняли участие профессора: Китаева Г.Х., Грановский А.Б., Елизаров А.А., Фетисов К.Ю., Сигов А.С.

Основные положения и выводы диссертационной работы прошли апробацию на 6 международных и российских научных конференциях и опубликованы в 7 научных изданиях, входящих в перечень научных журналов ВАК при Минобрнауки России, включая 6, индексируемых WoS и/или Scopus.

Научные работы по теме диссертации:

1. **Горбатова А.В.**, Хусяинов Д.И., Буряков А.М. Генерация терагерцевого излучения с поверхности монослойного WSe2 // Письма в журнал технической физики. 2019. Т. 45, № 24. С. 44 – 47. (Переводная версия: **Gorbatova A.V.**, Khusyainov D.I., Buryakov A.M. Terahertz Emission from a Monolayer Tungsten Diselenide Surface // Tech. Phys. Lett. 2019. Vol. 45, № 12. P. 1262–1265.
2. **Горбатова А.В.**, Хусяинов Д.И., Ячменев А.Э., Хабибуллин Р.А., Пономарев Д.С., Буряков А.М., Мишина Е.Д. Фотопроводящий THz-детектор на основе сверхрешеточной гетероструктуры с плазмонным усилением // Письма в журнал технической физики. 2020. Т. 46, № 22. С. 10 - 14. (Переводная версия: **Gorbatova A. V.**, Khusyainov D.I., Yachmenev A.E., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S., Buryakov A.M., Mishina E.D. A Photoconductive THz Detector Based on a Superlattice Heterostructure with Plasmonic Amplification // Tech. Phys. Lett. 2020. Vol. 46, № 11. P. 1111–1115.
3. Хусяинов Д.И., **Горбатова А.В.**, Буряков А.М. Генерация терагерцевого излучения с поверхности объемного слоистого и монослойного диселенида вольфрама // Российский технологический журнал. 2020. Т. 8, № 6. С. 121–129. (переводная версия Khusyainov D.I., **Gorbatova A. V.**, Buryakov A.M. Terahertz generation from surface of the bulk and monolayer tungsten diselenide // Russ. Technol. J. 2020. Vol. 8, № 6. P. 121–129).
4. Buryakov A.M., **Gorbatova A.V.**, Avdeev P.Y., Lebedeva E.D., Brekhov K.A., Ovchinnikov, A.V., Gusev N.S., Karashtin E.A., Sapozhnikov M.V., Mishina E.D., Tiercelin N., Preobrazhensky V.L. Efficient Co/Pt THz spintronic emitter with tunable polarization. Applied Physics Letters. 2023. Vol. 123, № 8. 2023.
5. **Горбатова А.В.**, Буряков А.М. Оптимизация оптического поглощения в спинтронных терагерцовых излучателях с использованием брэгговских отражателей. Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2023. Т. 16, № 1, С. 101-110. (Переводная версия: **Gorbatova A.V.**, Buryakov, A.M. Optimization of optical absorption in spintronic terahertz emitters using Bragg reflectors. Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii. 2024. Vol. 16, № 1, P. 101–110).
6. **Gorbatova A.V.**, Buryakov A.M., Avdeev A.Yu., Lebedeva E.D., Pashen’kin I.Yu., Karashtin E.A., Sapozhnikov M.V., Mishina E.D. Effect of Laser-Induced Heating of the Antiferromagnetic IrMn Layer on Generation of Terahertz Pulses in Co/WSe2-Based Spintronic Emitters // Physics of Wave Phenomena. 2024. Vol. 32, № 4, P. 273-279.
7. Khusyainov D.I., **Gorbatova A.V.**, Buryakov A.M., Mishina E.D. THz surface emission from bulk and monolayer WSe2. // AIP Conf. Proc. Vol.2359*,* 2021. P. 020016.

На автореферат поступило 5 отзывов:

1. От Колмычек И.А., доктора физико-математических наук, доцента кафедры общей физики физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова — отзыв положительный. В отзыве отмечены следующие недостатки:

а) В работе исследуются плазмонные решетки, однако в автореферате не приводится никакой информации о плазмонных свойствах структур, например, спектров пропускания поглощения, дисперсионных кривых, распределения электромагнитного поля на резонансной частоте и т.п.

б) В автореферате говорится, что формула (1) описывает азимутально-угловую зависимость, однако очевидно, что при интегрировании по азимутальному углу φ никакой зависимости от него в Etotal не останется. Остается непонятным, что автор имела в виду.

2. От Пушкарева С.С., кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории № 105 федерального государственного бюджетного научного учреждения Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук — отзыв положительный. В отзыве отмечены следующие недостатки:

а) Не вполне точная формулировка: «Возможность прецизионного поворота поляризации терагерцевого излучения на 360° намагничивающим полем» (стр. 6, 7, 10) - здесь имелся в виду прецизионный поворот на угол, лежащий в диапазоне от 0 до 360°.

б) Объёмный слой WSe2 не вполне удачно охарактеризован как «слоистые кристаллиты WSe2», «объёмные кристаллиты WSe2» (стр. 15). Такое описание кристаллической структуры обычно не используется, вместо этого следовало бы сразу назвать эту плёнку поликристаллической (как это и сделано далее на стр. 17), а также уточнить, есть ли выделенное направление кристаллитов (так называемая текстура) или они ориентированы хаотично?

3. От Чернова А.И., доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника – заведующего лабораторией федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) — отзыв положительный. В отзыве отмечены следующие недостатки:

а) Выполнялся ли эксперимент по повышению эффективности ТГц генерации в монослое WSe2 на подложке с толщиной SiO2 130 нм? На Рисунке 8 указана отдельная точка на теоретической кривой, как и для толщины 285 нм. Зависит ли эффект от длины волны накачки?

б) При обсуждении вольт-амперных характеристик ФПА (рис. 3. стр. 13) автор ограничивается в тексте констатацией факта снижения абсолютной величины темнового тока при переходе от обычной ФПА к ФПА с пассивацией. Вероятно, более детальное обсуждение опущено в автореферате в целях экономии места. Тем не менее, для разработчиков ФПА этот результат представляет практический интерес, и следовало бы уделить больше внимания обсуждению механизмов, влияющих на снижение темновых (и световых) токов в зависимости от структуры ФПА.

в) При определении значения поля анизотропии На автор использует петли магнитного гистерезиса ТГц сигнала, приведенные на рис. 11, но опускает методику определения, в то время как значение На далее используется для расчета параметров вращения намагниченности (формула (3)), и корректность определения этой величины может оказывать влияние на результат.

4. От Скороходова Е.В, кандидата физико-математических наук, научного сотрудника отдела магнитных наноструктур Института физики микроструктур Российской академии наук – отзыв положительный.

В отзыве отмечены следующие недостатки:

а) На стр.6 в разделе о научной новизне сказано о 300-кратном увеличении эффективности детектирования и увеличении отношения сигнал-шум на 50 %. Однако из формулировки непонятно, по сравнению с чем отмечается рост эффективности и отношения сигнал-шум. Аналогичное замечание можно сделать и об основных положениях на стр.7.

б) B спинтронных терагерцовых эмиттерах в качестве антиферромагнетика используется только IrMn. Чем определяется выбор данного антиферромагнетика? Как антиферромагнетик влияет на излучательные свойства ТГц устройств?

в) Какими физическими механизмами определяется латеральный масштаб ТГц эмиттеров на основе ФПА (спиральных электродов), а также толщины слоев в этих эмиттерах и эмиттерах на основе спинтронных структур?

5. От Новикова С.М., кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника, заведующего лабораторией контролируемых оптических наноструктур федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) — отзыв положительный.

В каждом из отзывов отмечается, что сделанные замечания не снижают высокой положительной оценки диссертационной работы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован их высокой профессиональной квалификацией, глубоким пониманием физических процессов, изучаемых в диссертации, а также наличием признанных достижений в научных областях, соответствующих тематике представленной работы.

**Диссертационный совет отмечает, что в результате выполнения соискателем исследований:**

**Разработан** и **исследован** высокочувствительный плазмонный терагерцевый детектор на основе сверхрешеточной структуры 30 x [LT-In0.53Ga0.47As (12 нм) / In0.52Al0.48As (4 нм)] с логарифмическими спиральными электродами, плазмонными решетками (период решетки – 200 нм, коэффициент заполнения – 0.5) в зазоре между электродами и слоем пассивации Si3N4 между металлизацией и сверхрешеткой; **показана** эффективность предложенного соискателем подхода, основанного на создании условий локального плазмонного резонанса и интеграции пассивирующего слоя, для повышения чувствительности детектора в 300 раз, увеличения отношения сигнал/шум на 50 % по сравнению с аналогичным детектором без плазмонных решеток; **доказано**, что монослойная пленка WSe2 на подложке SiO2(285 нм)/Si генерирует терагерцевое излучение благодаря эффекту оптического выпрямления второго порядка, превышая по эффективности генерации моноатомную пленку In0.53Ga0.47As в 2 раза; **разработан** высокоэффективный терагерцевый спинтронный эмиттер на основе двухслойной структуры Pt(3 нм)/Co(3 нм) с одноосной магнитной анизотропией в плоскости; **показано**, что одноосная магнитная анизотропия в спинтронном эмиттере Pt/Co демонстрирует оптико-терагерцевую конверсию ~ 0.007 % и позволяет вращать поляризацию терагерцевого излучения на 360° намагничивающим полем; **разработаны** обменно-связанные терагерцевые спинтронные эмиттеры IrMn/Co/WSe2; **показано**, что лазерно-индуцированный нагрев антиферромагнитного слоя IrMn в структуре спинтронного эмиттера IrMn/Co/WSe2 до температур выше температуры блокировки приводит к уменьшению обменного взаимодействия между слоями IrMn и Co, способствуя увеличению эффективности спиновой инжекции из слоя Co в слой IrMn и повышению эффективности генерации терагерцевого излучения.

**Теоретическая значимость** диссертационного исследования обусловлена следующим: **изложены** положения, способствующие развитию научных представлений о механизмах генерации, детектирования и управления параметрами терагерцевого (ТГц) излучения в полупроводниковых и спинтронных структурах; с помощью нелинейно-феноменологического анализа; **изучены** особенности анизотропной генерации ТГц сигнала в монослойном и объёмном WSe2; численным моделированием **выявлены** условия повышения эффективности генерации ТГц излучения двумерной пленкой WSe2 в 3 раза за счет использования явления многолучевой интерференции в слое SiO2 с оптимизированной толщиной 130 нм между двумерной пленкой и подложкой кремния; на основе результатов численной модели **изложен** метод повышения эффективности генерации ТГц излучения структурой Pt/Co в 9 раз за счет создания условий резонансного оптического поглощения в пленках эмиттера при использовании брэгговской сверхрешетки 10 х [SiO2(160 нм)/TiO2(96 нм)] между ними и подложкой из высокоомного кремния; с применением уравнения Ландау–Халатникова; **доказана** возможность управления поляризацией ТГц излучения в одноосном спинтронном эмиттере за счёт изменения ориентации магнитного момента ферромагнетика намагничивающим полем.

**Практическая значимость** полученных соискателем результатов исследований заключается в том, что: были **разработаны** и **обоснованы** (экспериментально и теоретически) методы улучшения рабочих характеристик (чувствительности, эффективности, и управляемости) фотопроводящих и спинтронных терагерцевых устройств; **определены перспективы** применения результатов проведенных исследований для улучшения эксплуатационных характеристик существующих, а также новых устройств терагерцевой оптоэлектроники и терагерцевой спинтроники.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

Экспериментальные результаты были **получены** на сертифицированном, современном и высокоточном оборудовании с помощью устоявшихся, широко-признанных экспериментальных методик. Для анализа экспериментальных данных **использованы** современные методики обработки информации; **показана** воспроизводимость результатов исследования; **установлено** согласие между разработанными аналитическими и численными моделями, и представленными в диссертационной работе экспериментальными результатами; **приведено** сравнение полученных соискателем результатов и результатов, представленных в литературных источниках по рассматриваемой тематике; **установлено,** что результаты диссертационной работы были апробированы на российских и международных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в рекомендованный список ВАК Министерства науки и высшего образования РФ и индексируемых в наукометрических базах данных Scopus и Web of Science.

**Личный вклад** соискателя заключается в создании экспериментальных установок терагерцевой спектроскопии с временным разрешением и экспериментальном исследовании параметров терагерцевого излучения в образцах терагерцевых генераторов и детекторов; численном моделировании взаимодействия оптических волн с кристаллитами WSe2, фотопроводящими антеннами и спинтронными эмиттерами с использованием платформы COMSOL Multiphysics; обработке, анализе и теоретическом обосновании полученных экспериментальных результатов. Вклад соискателя в публикации, выполненные в соавторстве, аналогичен вышеизложенному.

Анализ топологии изготовленных ТГц антенн их темновых и световых вольт-амперных характеристик проведен соискателем лично, либо при его непосредственном участии. Анализ структурных характеристик и оптических свойств кристаллических образцов WSe2 проведен при непосредственном участии автора. Анализ анизотропных зависимостей ТГц излучения, генерируемого в полупроводниках WSe2 вследствие нелинейно-оптических процессов, проведен автором лично.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы. В диссертации решены основные вопросы поставленной научной задачи, работа соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, непротиворечивостью методологической платформы и взаимосвязанностью выводов.

В ходе защиты соискатель Горбатова А.В. дала аргументированные ответы на заданные вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 23.12.2024 диссертационный совет принял решение присудить Горбатовой Анастасии Владимировне присудить ученую степенькандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 6 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета,
проголосовали: за присуждение учёной степени - 16, против присуждения учёной степени - 0, недействительных бюллетеней нет.

Председатель

диссертационного совета А.С. Сигов

Ученый секретарь

диссертационного совета Л.Ю. Фетисов

23.12.2024