

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.01
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки

Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
по диссертации
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 20.03.2025 № 4

О присуждении Бабунцу Роману Андреевичу
Гражданину Российской Федерации,
ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертация «Резонансная микроволново-оптическая спектроскопия широкозонных материалов и наноструктур и развитие приборной базы для этих исследований» по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния» принята к защите 9 декабря 2024 г., протокол № 6, диссертационным советом ФТИ 34.01.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 18 человек приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г., приказами Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе от № 5 от 19.01.2021, № 13 от 21.01.2022 и № 15 от 26.01.2024 об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.01 и приказом Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 160 от 21.12.2021 о внесении изменений в шифры специальностей диссертационных советов

Соискатель Бабунц Роман Андреевич, дата рождения – 26 декабря 1963 г., в 1986 году окончил Ленинградский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени государственный университет имени А.А. Жданова по специальности «физика», 18 июня 2009 г. Бабунцу Роману Андреевичу Решением диссертационного совета ФТИ им. А.Ф. Иоффе присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности «физика конденсированного состояния», решением высшей аттестационной комиссии Российской

Федерации 13 ноября 2009 г. выдан диплом. Бабунц Роман Андреевич работает в ФТИ им. А.Ф. Иоффе с марта 1986 г. в лаборатории микроволновой спектроскопии кристаллов. С мая 2024 он переведен на должность старшего научного сотрудника лаборатории спин-фотонных полупроводниковых систем для квантовых технологий ФТИ им. А.Ф. Иоффе. С января 2025 года занимает должность заведующего лабораторией микроволновой спектроскопии кристаллов.

Диссертация выполнена в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Научный консультант – Баранов Павел Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий (до декабря 2025) и главный научный сотрудник лаборатории микроволновой спектроскопии кристаллов ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Официальные оппоненты:

1. Вершовский Антон Константинович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории атомной радиоспектроскопии ФТИ им. А.Ф. Иоффе предоставил положительный отзыв, содержащий 5 замечаний.

2. Зубков Василий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники, руководитель Ресурсного Центра «Физика твердого тела» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) предоставил положительный отзыв, содержащий 7 замечаний.

3. Константинова Елизавета Александровна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики и наноэлектроники МГУ имени М.В. Ломоносова предоставила положительный отзыв, содержащий 7 замечаний.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

"Казанский (Приволжский) федеральный университет" предоставила положительный отзыв на диссертацию, содержащий 8 вопросов и замечаний. Отзыв составили доктор физико-математических наук, директор Института физики Казанского федерального университета Гафуров Марат Ревгерович и кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии Института физики Казанского федерального университета Юсупов Роман Валерьевич. Отзыв утверждён первым проректором - проректором по научной деятельности Казанского федерального университета, профессором, доктором физико-математических наук Таюрским Дмитрием Альбертовичем.

В отзыве отмечено, что автор внес существенный вклад в развитие современных экспериментальных методов электронного парамагнитного резонанса. Проведенные исследования демонстрируют высокую профессиональную квалификацию соискателя. Автореферат и опубликованные по материалу диссертации статьи достаточно полно отражают ее основное содержание. Результаты диссертационной работы Р.А. Бабунца могут быть рекомендованы к внедрению и использованию в организациях и учреждениях, занимающихся исследованиями в областях магнитного резонанса, квантовых технологий и физического материаловедения, таких как МГУ, МИСИС, МИФИ, НГУ им. Н.И. Лобачевского, УрФУ, КФУ, КФТИ, ИОФ РАН, СКФУ.

В заключении отзыва сказано, что диссертационная работа Бабунца Романа Андреевича «Резонансная микроволново-оптическая спектроскопия широкозонных материалов и наноструктур и развитие приборной базы для этих исследований» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «физика конденсированного состояния» согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном

учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Бабунц Роман Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что они имеют ученую степень доктора наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет" ведет активные экспериментальные и теоретические исследования в области электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), оптически-детектируемого магнитного резонанса (ОДМР), спектроскопии спиновых состояний. В университете проводится изучение физических явлений и процессов, которые могут быть использованы для создания новых приборов и методов экспериментальной физики, активно разрабатываются методы и приборы технологии и диагностики наноструктур. Кроме того, в ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет" действует диссертационный совет по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Основное содержание диссертации представлено в 24 работах, опубликованных в журналах, соответствующих требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном

государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, имеются 13 патентов. Список публикаций и патентов представлен в автореферате и диссертации.

На автореферат поступило 7 отзывов.

1. Отзыв доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН Шакурова Гильмана Султановича положительный, замечаний и вопросов не содержит.

2. Отзыв кандидата физико-математических наук, доцента кафедры квантовой электроники и радиоспектроскопии, Казанского (Приволжского) федерального университета, Мамина Георгия Владимировича положительный, замечаний и вопросов не содержит.

3. Отзыв кандидата физико-математических наук, доцента, заместителя заведующего кафедрой физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» по научной работе, Богачева Юрия Викторовича положительный, замечаний и вопросов не содержит.

4. Отзыв доктора физико-математических наук, профессора, директора Новосибирского института органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН Багрянской Елены Григорьевны положительный, содержит 1 замечание:

- Основным замечанием к автореферату является то, что все надписи на рисунках приведены на английском языке. Кроме того, часто информации на подписях к рисункам недостаточно для понимания их сути. Очевидно, что это связано с ограничениями и требованиями к автореферату.

5. Отзыв кандидата физико-математических наук, Власова Игоря Ивановича, заведующего лабораторией Углеродной нанофотоники ФГБУН ФИЦ Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, положительный, замечаний и вопросов не содержит.

6. Отзыв доктора физико-математических наук, научного директора и руководителя группы «Квантовые симуляторы и интегрированная фотоника» Российского квантового центра (ООО

«МЦКТ») Акимова Алексея Владимировича положительный, содержит 3 замечания:

- В автореферате тем не менее есть некоторые неточности, носящие скорее стилистический, чем фундаментальный характер. Например, автор обсуждает «оптически активные центры». Оптической активностью называется свойство вещества вращать поляризацию света, однако поляризационные изменения в автореферате не обсуждаются. В формуле (1) написание символов неполно, фактически в формуле стоят неопределенные буквы. Кроме того, в описании шестой главы автор вводит три обозначения нанопластинок, наноплателетов, NPLs для одного и того же объекта и затем их использует в случайном порядке. Это технически корректно, но вводит не нужную путаницу.

7. Отзыв заведующего Центром «Квантовая оптика и квантовая информатика» Института физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, доктора физико-математических наук, профессора академика НАНБ, иностранного члена РАН Килина Сергея Яковлевича положительный, содержит 1 замечание:

- В качестве замечания отмечу отсутствие в автореферате сравнения результатов, полученных на основе методов, предложенных автором, и других подходов. Вероятно, в тексте диссертации такое обсуждение имеется, однако, наличие такого обсуждения в автореферате значительно усилило бы материал автореферата.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по экспериментальному изучению явлений ЭПР, ОДМР, двойного электронно-ядерного резонанса, электронного спинового эха в некрамерсовых ионах, NV-центрах в алмазе, спиновых центрах в SiC и нанокристаллах AIBVI, играющих важную роль для фундаментальных исследований, и по разработке новых улучшенных ЭПР/ОДМР спектрометров для выполнения таких исследований, были получены следующие основные результаты:

1. Разработан и изготовлен приборный комплекс, состоящий из высокочастотного ЭПР/ОДМР спектрометра, который превосходит

промышленно выпускаемые аналоги по целому ряду параметров, и зондово-оптического спектрометра магнитного резонанса с высоким пространственным разрешением.

2. Обнаружены и исследованы методом высокочастотного ЭПР процессы перезарядки между состояниями некрамерсовых ионов Fe^{2+} и ионов Fe^{3+} в кристаллах $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ n-типа, перспективных для сильноточной и высоковольтной электроники. Процессы перезарядки наблюдались при облучении кристалла электронами высокой энергии, которое индуцирует понижение уровня Ферми, и при воздействии лазерного излучения с энергией фотонов ниже ширины запрещенной зоны.

3. Предложен неразрушающий метод диагностики локальной концентрации азота и локальных напряжений в алмазе.

4. В кристаллах 6H-SiC обнаружено изменение схемы оптического выстраивания спиновых состояний электронов и ядер вакансионных центров V1/V3, которое приводит к перевороту фазы сигнала ОДМР при температуре ~ 30 К. Оптическим методом без использования микроволнового облучения определены сверхтонкие взаимодействия с ядрами изотопа ^{13}C . Установлено, что времена спин-спиновой и спин-решеточной релаксации в кристаллах, обогащенных изотопом ^{13}C , близки к соответствующим временам таких центров в 6H-SiC с природным содержанием изотопов.

5. Обнаружено с использованием высокочастотного ЭПР в непрерывном и импульсном режимах, что в нанопластинах $\text{CdSe}/(\text{CdMn})\text{S}$ ионы Mn^{2+} находятся как внутри оболочки CdS, так и на ее поверхности. Оценены расстояния между поверхностными ионами Mn^{2+} и ядрами водорода олеиновой кислоты, пассивирующей поверхность нанопластин.

Существенный вклад соискателя в физику конденсированного состояния состоит в развитии экспериментальной базы для

фундаментальных магнитно-резонансных исследований. Благодаря этой базе соискатель провёл фундаментальные исследования ряда полупроводниковых систем, важных перспективных для электроники, квантовых технологий и квантовой сенсорики.

Все научные результаты являются новыми и имеют фундаментальную и практическую значимость. Фундаментальная значимость заключается в предложенных и апробированных соискателем простых неразрушающих методах диагностики локальных напряжений и определения локальной концентрации азота в алмазе, влияющего на время когерентности, основанных на ОДМР NV-центров при комнатной температуре в нулевом магнитном поле. Кроме того, предложена и развита новая методика регистрации магнитного резонанса, основанной на температурной зависимости параметров спинового гамильтониана исследуемой парамагнитной системы, позволяющая выделить чувствительные к температуре компоненты спектра магнитного резонанса. Практическая значимость работы заключается в разработке двух типов спектрометров ЭПР/ОДМР, позволивших получить представленные в работе фундаментальные результаты.

Высокая степень достоверности результатов обеспечивается согласием полученных результатов с теоретическими моделями и их воспроизводимостью. Обоснованность сделанных выводов и сформулированных положений подтверждается согласием с современными представлениями и теориями в физике конденсированного состояния.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Предложены новые методики и решения для регистрации сигналов ЭПР и ОДМР, такие как конфокальный сканирующий спектрометр с субмикронным пространственным разрешением, современные высокостабильные СВЧ мосты, аппаратно-программное увеличение динамического диапазона, на основе которых разработан и изготовлен уникальный лабораторно-исследовательский комплекс. Продemonстрировано его применение на твердотельных системах, перспективных для электроники, включая квантовые технологии.
2. Обнаружено изменение зарядового состояния ионов железа Fe^{2+} и Fe^{3+} в широкозонном полупроводнике $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ под действием света и при облучении электронами высокой энергии, индуцирующими понижение уровня Ферми.
3. Локальная концентрация азота в алмазе может быть определена из отношения интенсивностей центральных линий NV-центров в спектре ОДМР и сателлитных линий, обусловленных диполь-дипольным взаимодействием между NV-центром и обменно-связанной парой азота.
4. В кристаллах 6H-SiC при температуре $\sim 30\text{ K}$ происходит изменение знака сигнала ОДМР, которое связано с изменением механизма оптического выстраивания уровней центров окраски V1/V3 со спином $S=3/2$.
5. В кристаллах 6H-SiC , обогащенных изотопом ^{13}C с ядерным магнитным моментом, установлены большие времена когерентности центров окраски, что показывает их применимость для квантовой информатики и сенсорики.
6. В нанопластинках $\text{CdSe}/(\text{CdMn})\text{S}$ типа ядро/оболочка ионы Mn^{2+} , находящиеся внутри оболочки CdS и на ее поверхности, различаются сверхтонкими взаимодействиями и временами релаксации, что установлено при исследовании методами высокочастотного ЭПР и ДЭЯР.

Личный вклад соискателя состоит в определении направления исследований, разработке, изготовлении, введении в эксплуатацию и тестировании оригинальной аппаратуры, разработке программного обеспечения, регистрации подавляющего большинства представленных в работе спектров ЭПР, ЭСЭ, ОДМР и ДЭЯР, анализе и интерпретации полученных данных, оформлении полученных результатов в виде научных работ, представлении их на научных мероприятиях.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 11 докторов по специальности 1.3.8 - «физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 12, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

На заседании 20 марта 2025 года диссертационный совет принял решение присудить Бабунцу Роману Андреевичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния».

Председатель

диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

Ю.Г. Кусраев

Ученый секретарь

диссертационного совета

PhD

А.М. Калашникова

20 марта 2025 г.