

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.340.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 03.06.2026 № 8

О присуждении Ивановой Марии Михайловне, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Фотоэлектрические свойства и радиационная стойкость фотодиодов на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001)» по специальности 1.3.11. Физика полупроводников – принята к защите 31 марта 2026 г. (протокол заседания № 4) диссертационным советом 24.2.340.01, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, приказ от 11.04.2012 г. №105/нк о создании диссертационного совета.

Соискатель Иванова Мария Михайловна, 15 мая 1981 года рождения. В 2004 году соискатель ученой степени окончила Московский энергетический институт (технический университет) по специальности «Оптико-электронные приборы и системы», в 2017 году закончила заочную аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», работает в должности ведущего инженера-исследователя в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им Ю.Е.

Седакова».

Диссертация выполнена в отделе твердотельной электроники и оптоэлектроники Научно-исследовательского физико-технического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Шенгуров Владимир Геннадьевич, ведущий научный сотрудник отдела твердотельной электроники и оптоэлектроники Научно-исследовательского физико-технического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Официальные оппоненты:

1. Середин Павел Владимирович, доктор физико-математических наук, Воронежский государственный университет, кафедра физики твердого тела и наноструктур физического факультета, заведующий кафедрой,
2. Карасев Платон Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая инженерно-физическая школа, профессор,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань), в своем положительном отзыве, составленном и подписанном кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником, руководителем лаборатории интенсивных радиационных воздействий Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН) Баталовым Рафаэлем Ильясовичем, подписанном кандидатом физико-математических наук, руководителем КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН Хантимеровым Сергеем Мансуровичем

и утвержденном доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН по отделению нанотехнологий и информационных технологий, профессором РАН по отделению физических наук, директором ФИЦ КазНЦ РАН Калачевым Алексеем Алексеевичем, указала, что «диссертация Ивановой М.М. представляет собой законченное и логически стройное исследование, имеющее высокую научную и прикладную значимость в области радиационной физики полупроводников и кремниевой оптоэлектроники», а «результаты работы вносят вклад в развитие физики радиационных эффектов в низкоразмерных полупроводниковых системах, в частности – в понимание роли пространственной локализации носителей заряда как механизма повышения радиационной стойкости». В отзыве ведущей организации делается вывод, что диссертация полностью отвечает требованиям, предъявляемым ВАК Российской Федерации к кандидатским диссертациям, а её автор, Иванова Мария Михайловна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Соискатель имеет 20 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 20 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации – публикации в научных журналах, входящих в Перечень ВАК, и (или) индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus:

1). Фотодиоды на базе массивов самоформирующихся nanoостровков GeSi/Si(001), выращенных методом комбинированной сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии Si и газофазной эпитаксии Ge / Д.О. Филатов, А.П. Горшков, Н.С. Волкова, Д.В. Гусейнов, Н.А. Алябина, **М.М. Иванова**, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов, В.Г. Шенгуров // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49, № 3. – С. 399–405.

Вклад соискателя: 1) обеспечение концептуальной и методологической основы исследований, 2) разработка теоретической модели эффективности эмиссии фотовозбуждённых дырок из nanoостровков, 3) обработка и интерпретация экспериментальных данных, 4) написание текста статьи.

2). Фотодетекторы на базе гетероструктур Ge/Si(001), выращенных методом горячей проволоки / В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов, Н.А. Алябина, Д.В. Гусейнов, В.Н. Трушин, А.П. Горшков, Н.С. Волкова, **М.М. Иванова**, А.В. Круглов, Д.О. Филатов // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49, № 10. – С. 1411–1414.

Вклад соискателя: 1) участие в планировании эксперимента по выращиванию эпитаксиальных диодных структур методом HWCVD, 2) участие в измерении вольтамперных и вольтфарадных характеристик меза-фотодиодов; 3) анализ электрофизических параметров слоёв германия (концентрация носителей заряда), 4) обработка данных и подготовка рукописи.

3). Светоизлучающие и фотоприемные структуры на основе Ge/Si для оптоэлектронных пар / **М.М. Иванова**, Ю.А. Кабальнов // Успехи прикладной физики. – 2025. – Т. 13, № 2. – С. 124–131.

Вклад соискателя: 1) разработка архитектуры оптоэлектронных пар на базе структур с наноструктурами GeSi и эпитаксиальными слоями германия; 2) организация измерений характеристик оптопар в импульсном режиме; 3) оценка коэффициента передачи по току; 4) формулирование выводов о работоспособности оптопар; 5) написание текста статьи.

4). Влияние импульсного гамма-нейтронного облучения на морфологию самоформирующихся наноструктур GeSi/Si(001) / **М.М. Иванова**, Д.О. Филатов, А.В. Нежданов, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов, В.Г. Шенгуров // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 2. – С. 55–62.

Вклад соискателя: 1) планирование эксперимента по облучению гетероструктур на моделирующих установках; 2) статистическая обработка параметров наноструктур (плотность, высота, латеральные размеры); 3) интерпретация механизмов изменения морфологии под воздействием радиационных дефектов; 4) подготовка рукописи.

5). Влияние импульсного гамма-нейтронного облучения на фоточувствительность фотодиодов на базе Si с наноструктурами GeSi и эпитаксиальными слоями Ge / **М.М. Иванова**, А.Н. Качемцев, А.Н. Михайлов, Д.О. Филатов, А.П. Горшков, Н.С. Волкова, В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров //

Вклад соискателя: 1) концептуальное планирование радиационных испытаний фотодиодов; 2) проведение измерений спектров фоточувствительности до и после импульсного гамма-нейтронного облучения; 3) анализ механизмов деградации фоточувствительности в различных спектральных диапазонах; 4) оценка вероятности образования дефектов в наноструктурах и её влияния на фотоотклик; 5) интерпретация роли пространственной локализации фотогенерации в обеспечении радиационной стойкости; 6) подготовка текста статьи.

б). Радиационная стойкость светоизлучающих и фотоприемных структур для оптоэлектронных пар на базе гетероэпитаксиальных слоев Ge/Si / **М.М. Иванова**, Ю.А. Кабальнов, А.Н. Качемцев, А.В. Скупов // Успехи прикладной физики. – 2025. – Т. 13, № 3. – С. 201–208. – DOI 10.51368/2307-4469-2025-13-3-201-208.

Вклад соискателя: 1) разработка методики испытаний оптоэлектронных пар при импульсном гамма-нейтронном облучении; 2) организация измерений характеристик оптопар до и после воздействия; 3) анализ деградации параметров излучателей и фотоприемников; 4) оценка работоспособности оптопар после облучения с флюенсом нейтронов до 10^{14} н/см², 5) формулирование выводов о радиационной стойкости оптоэлектронных пар, 6) написание текста статьи.

Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим. Соискатель принимал непосредственное участие в обсуждении, анализе полученных результатов и подготовке работ к печати. Сведения о приведённых в диссертации опубликованных работах достоверны.

На автореферат диссертации поступило 4 отзыва:

1. Шварц Максим Зиновьевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией фотоэлектрических преобразователей Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург), отмечает в своем отзыве, что «диссертационная работа направлена на решение важной научно-технологической задачи – разработке GeSi/Si(001) гетероструктур и приборов на их основе для радиационно-стойкой

оптоэлектронной элементной базы». Подчеркивается, что «основные научные результаты, представленные в автореферате, имеют четко выраженную новизну», а «достоверность экспериментальных результатов подтверждается использованием современных взаимодополняющих друг друга структурных и приборных исследовательских инструментов и диагностических комплексов». Также указывается, что «автореферат в полной мере отражает масштаб и комплексность проведенного исследования. Работа является законченным научным трудом, в котором изложены новые обоснованные решения и разработки, имеющие существенное значение для решения теоретических, физико-технологических и методических задач», и что «содержание положений, выносимых на защиту, соответствует паспорту специальности 1.3.11 – "Физика полупроводников"».

Отзыв содержит шесть замечаний и комментариев:

– «Формулировка цели работы "Комплексное изучение фотоэлектрических свойств и стойкости к импульсному гамма-нейтронному облучению фотодиодов на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001), выращенных низкотемпературными эпитаксиальными методами", предполагает, что будут представлены и обсуждены результаты для нескольких низкотемпературных технологических методов. Однако порядок изложения материала в автореферате не отвечает этим ожиданиям... Так как схемы создаваемых структур не представлены, то читателю крайне сложно определить на каких ростовых этапах применялся тот или иной технологический метод и какие из них следует считать низкотемпературными в контексте решаемых в работе задач. Заключение также не вносит ясности в температурные границы применимости методов»;

– «На странице 12 указано, что эпитаксиальные слои Ge/Si выращивались методом газофазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити "использовалась полоска Ta, нагреваемая до $T_s = (1200...1300) \text{ }^\circ\text{C}$ ". Метод представляется довольно "грязным" (тантал или вольфрам с нити могут попасть в слой), поэтому возникают следующие вопросы:

а) Как по мнению автора эти примеси влияют на темновой ток фотодиодов?

б) Автор связывает низкую фоточувствительность (квантовую эффективность) с фоновым легированием... и не обсуждает потенциальную диффузию металлов нити (Ta/W) в структуру?

в) Проводили ли анализ, который позволил бы точно определить примеси?»;

– «На рисунке 2а (стр. 16) нормированная фоточувствительность в области низких температур превосходит расчетные оценки внешней квантовой эффективности. Чем автор может объяснить это расхождение? Также из графиков на рисунке 2 не видно, в каких диапазонах температур и напряжений доминирует термоактивационный, а в каких – туннельный механизм эмиссии, какова зависимость те одновременно от T и U_b »;

– «Невысокие значения внешней квантовой эффективности (стр.17-18) связываются автором с высокими значениями концентрации акцепторов N_a в слоях Ge/Si(001), выращенных при низких температурах, и, как следствие, недостаточной диффузионной длиной электронов в p-Ge L_n . Необходимо отметить, что уровень легирования акцепторами в $(0,9...1,5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ нельзя признать высоким для эпитаксиальных слоев германия. Более вероятно получение недостаточной диффузионной длины электронов вследствие возникновения глубоких рекомбинационных центров, либо недостаточного качества гетерограницы Ge/Si. Хотелось бы получить комментарий от автора: производился ли анализ этих механизмов потерь, в частности, оценивалась ли скорость поверхностной рекомбинации на гетерогранице»;

– «Вторым положением на защиту выносятся следующее "Низкая плотность прорастающих дислокаций толстых эпитаксиальных слоев Ge/Si(001), выращенных методом газофазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити при низкой температуре подложки (350 °C), обусловлена образованием переходного слоя германия с высокой плотностью дислокаций несоответствия". Не возражая против правильности утверждения, сам тезис выглядит незавершенным – в положении хотелось бы увидеть, как такой переходный слой блокирует возникновение дислокаций»;

– «Технические замечания:

а) Не совсем понятно, используются два разных технологических метода или нет, так как присутствуют следующие названия: "низкотемпературный метод

горячей проволоки без дополнительного высокотемпературного циклического отжига"; "методом газофазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити";

б) отсутствует расшифровка сокращения HWCVD».

Отзыв положительный.

2. Ткачев Олег Валерьевич, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отделения экспериментальной физики ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина» (г. Снежинск), отмечает в своем отзыве, что «диссертационная работа Ивановой М.М. имеет существенное прикладное значение и посвящена актуальной проблеме развития физики полупроводников. Полученные в работе результаты являются оригинальными и обладают научной новизной»

Отзыв содержит пять замечаний:

– «При аппроксимации экспериментальной зависимости фоточувствительности от температуры выражениями (1) (рисунок 2а) на стр. 16 предполагается, что рекомбинационное время жизни носителей заряда не зависит от температуры. Известно, что рекомбинационное время жизни возрастает при уменьшении температуры, поэтому данное предположение справедливо в относительно небольшом диапазоне температур. Наблюдаемое отклонение экспериментальных данных от теоретической кривой ниже 200 К может быть вызвано увеличением рекомбинационного времени жизни»;

– «Многократно упоминается импульсный характер гамма-нейтронного воздействия, однако параметры импульса не приводятся (плотность гамма-нейтронного импульса, поток нейтронов и гамма-квантов). Кроме того не ясно, является ли импульсный характер воздействия существенным для проводимых исследований, поскольку все измерения проводятся в пассивном режиме»;

– «Наблюдается противоречие между предложением "Статистическая обработка результатов исследований морфологии поверхности показала значительное снижение средних латеральных размеров островков..." на стр. 21 и последним предложением в пятом пункте заключения: "Полученные данные подтверждены морфологическими исследованиями (АСМ), показавшими высокую структурную устойчивость самоформирующихся островков при

облучении". Кроме того в тексте автореферата отмечена высокая радиационная стойкость исследованных структур в области межзонных оптических переходов nanoостровков за счет низкой вероятности образования радиационных дефектов в островках (3 %), но в то же время показано существенное влияние облучения на морфологию и возможность управлять морфологией при помощи облучения»;

– «На рисунках 8а и 8б приведены спектры фоточувствительности, при этом для фотодиодов с однослойными массивами nanoостровков приведены графики при последовательном воздействии двух импульсов излучения, а для фотодиодов с 5-слойными массивами только при воздействии одного импульса суммарного уровня. В данном случае напрашивается сравнение откликов двух структур, а также обсуждение наличия или отсутствия влияния набора флюенса за один или два импульса (т.е. проявление эффектов восстановления характеристик)»;

– «Так же в тексте автореферата присутствуют опiski и неточности».

Отзыв положительный.

3. Бутина Анастасия Валентиновна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ВНИИА, г. Москва), отмечает в своем отзыве, что «диссертационная работа Ивановой М.М. посвящена вопросам применения наноразмерных полупроводниковых структур, в частности, гетероструктур с самоформирующимися nanoостровками, для повышения эксплуатационных характеристик, включая радиационную стойкость, оптоэлектронных приборов, применяемых в устройствах военной, авиационной и космической техники». В отзыве подчеркивается, что «традиционные A^3B^5 -фотоприемники не обеспечивают монолитную интеграцию в кремниевые оптоэлектронные микросхемы, а существующие решения по созданию Ge/Si-структур требуют высокотемпературных режимов роста (порядка 1000 °C), которые плохо совместимы с процессами КМОП-технологий. Предложенный автором низкотемпературный подход позволяет получить низкоразмерные Ge(Si)/Si-структуры, характеристики которых сопоставимы с мировым уровнем». Также указывается, что «экспериментально подтверждена повышенная радиационная стойкость Ge(Si)/Si-структур с nanoостровками: деградация фоточувствительности фотодиодов на таких структурах в области поглощения

островков (<1,05 эВ) не превышает 5% при флюенсе нейтронов 10^{14} см⁻², тогда как в матрице кремния она достигает 30–50%. Эффект объясняется пространственной локализацией фотогенерации в объеме, малом для образования радиационных дефектов (вероятность попадания дефекта в наноостровок составляет ~3%)». Автор отзыва заключает, что «полученные экспериментальные данные подтверждают, что предложенные технические решения могут быть использованы в современных разработках по созданию систем гальванических развязок и оптических интерфейсов с повышенными требованиями по радиационной стойкости».

Отзыв содержит три замечания:

– «Цель диссертационной работы, на мой взгляд, сформулирована недостаточно корректно, поскольку не отражает в полной мере полученные автором научные результаты в виде установленных зависимостей и выявленных закономерностей в ходе изучения фотоэлектрических свойств и радиационной стойкости фотодиодов на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001), выращенных низкотемпературными эпитаксиальными методами»;

– «В тексте автореферата описано влияние гамма-нейтронного излучения на электрофизические свойства гетероструктур, но не приведены особенности воздействия отдельно гамма- и отдельно нейтронного излучения на параметры морфологии наноостровков»;

– «При проведении статистической обработки результатов исследования влияния флюенса нейтронов на параметры морфологии наноостровков отсутствует оценка погрешности полученных результатов».

Отзыв положительный.

4. Скрипачев Игорь Владимирович, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых Российской академии наук (ИХВВ РАН), в своем отзыве отмечает, что «диссертационное исследование является оригинальным, соответствует современным тенденциям развитию полупроводниковой техники и оптоэлектроники, соответствует поставленным целям и вносит существенный вклад в развитие радиационного материаловедения».

Отзыв содержит одно замечание: «в диссертационной работе подробно изучена кристаллическая структура слоев Ge, выращенных на подложках кремния, но отсутствует информация о том, что представляет собой структура островков Ge(Si)». Отзыв положительный.

Все отзывы на автореферат диссертации положительные, в них отмечается актуальность темы исследования, новизна результатов, их научная и практическая значимость, а также делается вывод, что рассматриваемая диссертация соответствует требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а соискатель М.М. Иванова заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью в научном сообществе среди специалистов в области физики полупроводников, наличием значительного числа публикаций, посвящённых получению и исследованию полупроводниковых гетероструктур, а также тематической близостью их научных интересов и диссертационной работы соискателя, связанной с исследованием фотоэлектрических свойств и радиационной стойкости гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001), полученных низкотемпературными методами эпитаксии.

Ведущая организация – ФИЦ КазНЦ РАН в лице КФТИ – является одним из ведущих научных центров России в области радиационной физики полупроводников, физики низкоразмерных систем и экспериментальных методов исследования материалов. Её научная деятельность связана с изучением влияния ионизирующих излучений на электрофизические и оптические свойства полупроводниковых структур, разработкой методов радиационного тестирования элементной базы специального назначения, а также с исследованиями в области эпитаксиального роста и характеристики гетероструктур на основе кремния и германия. Профильная лаборатория интенсивных радиационных воздействий КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, руководимая к.ф.-м.н. Р.И. Баталовым, обладает уникальным опытом проведения радиационных испытаний и интерпретации механизмов радиационной деградации полупроводниковых приборов, что обеспечивает высокую квалификацию организации для экспертной оценки результатов диссертационного исследования.

Первый официальный оппонент – доктор физико-математических наук Середин Павел Владимирович является признанным специалистом в области физики полупроводниковых гетероструктур, эпитаксиального роста нитридных и кремний-германиевых систем, а также высокоточной диагностики наноматериалов с использованием синхротронных методов. Его публикации в журналах «Физика и техника полупроводников», «Applied Surface Science» и других рецензируемых изданиях посвящены исследованию структурных, оптических и электрофизических свойств низкоразмерных полупроводниковых систем, что напрямую соотносится с тематикой диссертации. Дополнительная квалификация в области радиационной безопасности и радиационного контроля (2023) подтверждает компетенцию оппонента в оценке радиационно-стойких решений.

Научные интересы второго официального оппонента – доктора физико-математических наук Карасева Платона Александровича – сосредоточены в области радиационно-индуцированных эффектов в полупроводниках, ионно-лучевой модификации материалов, физики дефектов и экспериментальных методов исследования полупроводниковых структур. Его публикации в журналах «Applied Physics Letters», «Физика и техника полупроводников», «Radiation Effects & Defects in Solids» и других изданиях за последние пять лет (2021–2026) посвящены моделированию каскадов столкновений, накоплению структурных нарушений при облучении, ионно-стимулированному формированию наноструктур – что обеспечивает глубокое понимание механизмов радиационной деградации, исследуемых в диссертации. Высокий индекс цитирования подтверждает международное признание его вклада в физику полупроводников.

Таким образом, выбор ведущей организации и оппонентов обусловлен их прямым соответствием профилю специальности 1.3.11 «Физика полупроводников», наличием релевантного опыта в исследовании гетероструктур Ge(Si)/Si(001), низкотемпературных методов эпитаксии и радиационных испытаний, а также способностью дать квалифицированную оценку научной новизне, достоверности и практической значимости результатов диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **впервые получены** лабораторные макеты фотодетекторов на базе толстых (~ 1 мкм) монокристаллических эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001), выращенных методом HWCVD при температуре подложки 350 °C без дополнительного высокотемпературного циклического отжига, с плотностью прорастающих дислокаций $\sim 10^5$ см⁻² и шероховатостью поверхности $\sim 0,4$ нм;

- **впервые разработана** теоретическая модель, связывающая квантовую эффективность фотодиодов на базе кремниевых p-n структур с самоформирующимися наноструктурами GeSi с составом материала островков, напряжением смещения и рабочей температурой;

- **установлено**, что низкая плотность прорастающих дислокаций в эпитаксиальных слоях Ge/Si(001) при низкотемпературном росте обусловлена образованием переходного слоя германия с высокой плотностью дислокаций несоответствия, выполняющего роль виртуальной подложки для последующего релаксированного роста;

- **экспериментально подтверждена** радиационная стойкость кремниевых p-n фотодиодов с наноструктурами GeSi к импульсному гамма-нейтронному облучению: в спектральной области межзонного поглощения островков ($< 1,05$ эВ) деградация фоточувствительности не превышает 5% при флюенсе нейтронов $\sim 10^{14}$ см⁻², тогда как собственная фоточувствительность кремния снижается на 30–50 %;

- **показано**, что механизм радиационной стойкости обусловлен пространственной локализацией процесса фотогенерации носителей заряда в наноструктурах, расположенных в области пространственного заряда p-n перехода, и малым временем пролёта носителей через ОПЗ ($\sim 10^{-11}$ с), существенно меньшим рекомбинационного времени жизни даже при высокой концентрации радиационных дефектов в матрице;

- **продемонстрирована** принципиальная возможность использования исследованных фотодиодов на базе структур с наноструктурами GeSi и эпитаксиальными слоями Ge/Si(001) в качестве приёмников оптического излучения в радиационно-стойких оптоэлектронных парах, функционирующих в

ближнем ИК-диапазоне (1,3–1,55 мкм), с коэффициентом передачи по току до $\sim 10^{-5}$.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- **раскрыты** физические механизмы, определяющие зависимость фоточувствительности кремниевых p–n фотодиодов с наноструктурами GeSi от температуры и напряжения смещения: установлено, что баланс между скоростью термоактивационной и туннельной эмиссии дырок из островков и скоростью их рекомбинации в островках определяет эффективность сбора фотовозбуждённых носителей;

- **обоснована** роль пространственной локализации фотогенерации в наноструктурах как фактора, обеспечивающего повышенную радиационную стойкость: показано, что время пролёта носителей через ОПЗ ($\sim 10^{-11}$ с) существенно меньше времени их рекомбинации на радиационных дефектах, что объясняет сохранение фоточувствительности в области межзонного поглощения островков даже при высоких уровнях облучения;

- **разработана** модель эффективности эмиссии носителей из наноструктур, учитывающая влияние состава материала островков, упругой деформации и эксплуатационных параметров (температуры, напряжения смещения), что позволяет прогнозировать квантовую эффективность фотодиодов в широком диапазоне условий применения;

- **установлена взаимосвязь** между параметрами роста эпитаксиальных слоёв Ge методом HWCVD и их структурным совершенством: показано, что формирование переходного слоя с высокой плотностью дислокаций несоответствия обеспечивает релаксированный рост последующих слоёв с низкой плотностью прорастающих дислокаций ($\sim 10^5$ см⁻²).

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что они могут быть использованы:

- при разработке технологии изготовления радиационно-стойких фотодиодов на основе кремния с расширенным ИК-диапазоном (1,3–1,55 мкм), совместимых с пост-обработкой КМОП-схем за счёт низкотемпературных режимов роста (350 °С для HWCVD, 450–600 °С для СМЛЭ-ГФЭ);

- для оптимизации режимов эксплуатации фотодиодов с наноструктурами

GeSi: показано, что реализация 100% эмиссии дырок из островков требует достаточно больших напряжений смещения $U_b > 2$ В (особенно при низких температурах), что позволяет повысить квантовую эффективность приборов в реальных условиях;

- при проектировании радиационно-стойких оптоэлектронных пар для систем гальванической развязки и оптических интерфейсов специального назначения: продемонстрирована работоспособность пар на базе структур с nanoостровками GeSi и эпитаксиальными слоями Ge после импульсного гамма-нейтронного облучения с флюенсом нейтронов до 10^{15} н/см²;

- в научно-образовательной деятельности при подготовке специалистов по направлениям «Физика полупроводников», «Наноэлектроника», «Радиационная физика» – результаты могут быть использованы в лекционных курсах и лабораторных практикумах по физике низкоразмерных структур и радиационным эффектам в полупроводниках (п. 18 паспорта научной специальности 1.3.11. Физика полупроводников – разработка физических принципов работы приборов).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- для **экспериментальных работ** – результаты получены с применением современного научного оборудования и методов исследования, соответствующих мировому уровню: атомно-силовой микроскопии (АСМ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), двухкристальной рентгеновской дифрактометрии, синхронного детектирования. Достоверность обусловлена использованием совокупности взаимодополняющих методов, корректных теоретических представлений при анализе и интерпретации экспериментальных данных;

- **идея базируется** на обобщении множества экспериментальных фактов, полученных как соискателем, так и опубликованных в независимых источниках;

- **использованы** современные экспериментальные методы исследования и обработки результатов, хорошо себя зарекомендовавшие при изучении полупроводниковых гетероструктур: синхронное детектирование сигналов фототока, статистическая обработка параметров морфологии (≥ 15 образцов на серию), метрологическая аттестация установок радиационных испытаний;

- **установлена** корреляция результатов исследований, полученных в

диссертации, с данными, представленными в независимых источниках по данной тематике: параметры выращенных структур (плотность дислокаций $\sim 10^5 \text{ см}^{-2}$, шероховатость $\sim 0,4 \text{ нм}$, квантовая эффективность $\eta \sim 3 \cdot 10^{-3}$ при $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$) сопоставимы с мировыми аналогами, полученными высокотемпературными методами.

Личный вклад соискателя: основные результаты, представленные в диссертационной работе М.М. Ивановой, были получены соискателем лично либо при её непосредственном участии. Соискателем лично выполнен анализ литературных данных по теме исследования, проведены измерения спектров фоточувствительности в зависимости от температуры и напряжения смещения, анализ электрофизических параметров диодных структур, морфологии поверхностей методом АСМ. Также соискателем лично выполнена обработка всех экспериментальных данных. Постановка цели и задач диссертационного исследования, интерпретация результатов и формулировка выводов выполнены соискателем совместно с научным руководителем.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования в различных научно-образовательных и научно-исследовательских организациях, среди которых можно выделить:

- «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (НИФТИ, физический факультет);
- ФИЦ «Казанский научный центр РАН» (КФТИ, лаборатория интенсивных радиационных воздействий);
- ФТИ им. А.Ф. Иоффе (лаборатория фотоэлектрических преобразователей);
- организации Росатома и Роскосмоса, занимающиеся разработкой радиационно-стойкой элементной базы специального назначения.

В ходе защиты диссертации критические замечания высказаны не были. Соискатель М.М. Иванова ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы, приведя собственную аргументацию.

На заседании 03 июня 2026 г. диссертационный совет принял решение:
за решение научной задачи по исследованию взаимосвязи механизмов низкотемпературного эпитаксиального роста гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001) и их фотоэлектрических свойств, а также по выявлению физического механизма

повышенной радиационной стойкости фотодиодов на базе таких структур к импульсному гамма-нейтронному облучению, которое вносит вклад в физику полупроводников, а также имеет практическую значимость для разработки радиационно-стойких ИК-фотоприёмников, совместимых с кремниевой технологией, присудить Ивановой Марии Михайловне ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.11 – Физика полупроводников), участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 (нет) человек, проголосовали: за 14, против 0 (нет), недействительных бюллетеней 0 (нет).

Председатель

диссертационного совета



Чупрунов Евгений Владимирович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Марычев Михаил Олегович

Дата оформления Заключения 03.06.2026 г.