

на правах рукописи

Иванова Мария Михайловна

**Фотоэлектрические свойства и радиационная стойкость фотодиодов
на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001)**

Специальность 1.3.11 – Физика полупроводников

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ им. Н.И. Лобачевского)

Научный руководитель:

Шенгуров Владимир Геннадьевич,
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского физико-технического института ННГУ им. Н. И. Лобачевского

Официальные оппоненты:

Середин Павел Владимирович,
доктор физико-математических наук, Воронежский государственный университет, кафедра физики твердого тела и наноструктур физического факультета, заведующий кафедрой

Карасев Платон Александрович,
доктор физико-математических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая инженерно-физическая школа, профессор

Ведущая организация:
Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань

Защита диссертации состоится «03» июня 2026 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.340.01 в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3, ауд. 227 (Конференц-зал)

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/1618>

Автореферат разослан «__» апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.340.01,
кандидат физико-математических наук

Марычев Михаил Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Интеграция оптоэлектронных компонентов в состав современных радиоэлектронных систем является одним из ключевых направлений повышения их эксплуатационных характеристик, таких как помехозащищённость, быстродействие, энергоэффективность и функциональная плотность [1, 2, 3]. При этом в условиях применения этих устройств в специальных и критических областях — в том числе в военной, авиационной и космической технике — особое значение приобретает вопрос обеспечения высокой радиационной стойкости элементной базы. Современные оптоэлектронные приборы не всегда соответствуют предъявляемым требованиям по стойкости к воздействию ионизирующих излучений, что ограничивает их применение в специальных условиях [4, 5, 6].

Одним из перспективных путей решения указанной проблемы является использование наноразмерных полупроводниковых структур, в частности, гетероструктур с самоформирующимися наноструктурами. Такие структуры обладают рядом уникальных физических свойств, которые позволяют повысить стойкость оптоэлектронных приборов к радиационным воздействиям. Экспериментальные исследования различных материалов, включая системы InGaAs/GaAs [7, 8], InAs/AlGaAs [9] и Ge/Si [10, 11, 12, 13], показали, что наноразмерные структуры демонстрируют более высокую радиационную стойкость по сравнению со своими объёмными аналогами. Это связано с пространственной локализацией носителей заряда в наноразмерных объектах, что снижает вероятность рекомбинации на дефектах, индуцированных ионизирующим излучением.

Особый интерес для создания радиационно-стойкой оптоэлектроники представляют собой гетероструктуры GeSi/Si(001) [14]. Они сочетают в себе возможность работы в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн (1,3 – 1,55 мкм), что делает их конкурентоспособными альтернативами традиционным A^{III}-B^V материалам, а также дает потенциал для интеграции с кремниевой электроникой [15]. Последнее особенно важно для развития интегральной оптоэлектроники, поскольку позволяет совмещать фотонные и электронные компоненты в одном кристалле, обеспечивая миниатюризацию, повышение производительности и относительное снижение себестоимости изделий.

Однако реализация указанных преимуществ требует использования технологий низкотемпературной эпитаксии, поскольку стандартные методы, такие как молекулярно-лучевая (МЛЭ) или газофазная эпитаксия (ГФЭ), характеризуются высокими температурами роста (~1000 °С) и,

соответственно, несовместимы с процессами изготовления кремниевых микросхем. В этой связи перспективным подходом представляется применение комбинированного метода сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии кремния и газофазной эпитаксии германия при низком давлении (СМЛЭ-ГФЭ) [16], разработанного в НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Этот метод позволяет выращивать слои кремния и германия с высоким кристаллическим качеством при гораздо более низких температурах подложки (450 °С – 600 °С), что открывает возможности для их интеграции в технологии КМОП-совместимых схем.

К моменту начала диссертационного исследования в НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского было проведено большое количество исследований электрофизических и излучательных свойств гетероструктур GeSi/Si(001), полученных данным методом [17, 18, 19]. Однако фотоэлектрические характеристики фотодиодов на основе этих структур, а также их радиационная стойкость оставались недостаточно изученными.

Еще одной актуальной задачей в области кремниевой оптоэлектроники является создание фотодиодов на основе относительно толстых (до ~1 мкм) эпитаксиальных слоёв германия на подложке Si(001) [20]. При этом основной проблемой остаётся формирование дислокаций несоответствия на границе Ge/Si вследствие существенной разницы в параметрах решётки германия и кремния (более 4 %). Для уменьшения плотности данных дефектов обычно применяются высокотемпературные режимы роста (600 °С – 700 °С) с последующим циклическим отжигом [21], однако такие условия несовместимы с технологиями монолитной интеграции.

Для решения этой задачи в НИФТИ ННГУ был использован метод газофазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити (HWCVD), позволяющий выращивать толстые монокристаллические слои германия при температуре около 350 °С. Полученные этим методом образцы [22] демонстрировали аномально низкую плотность прорастающих дислокаций (~ 10⁵ см⁻²). Однако механизмы роста, обеспечивающие такое высокое качество кристаллической решётки, а также радиационная стойкость фотодиодов на их основе, к началу диссертационного исследования также оставались недостаточно изученными.

Что касается радиационных испытаний, то в доступной литературе доминируют исследования влияния протонного и электронного облучения на излучательные и электрофизические свойства гетероструктур [7, 9, 10, 11]. Существенно меньше работ посвящено воздействию гамма-нейтронного излучения [8, 12, 13], и практически отсутствуют данные о его влиянии на фотоэлектрические характеристики фотодиодов на основе наноразмерных гетероструктур [6], особенно выращенных низкотемпературными методами.

Таким образом, к началу диссертационного исследования оставались неизученными ключевые аспекты, связанные с фотоэлектрическими

свойствами и радиационной стойкостью фотодиодов на основе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001), полученных с использованием перспективных низкотемпературных методов эпитаксии. Это обусловило выбор целей и задач настоящего исследования.

Цель 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.

Задачи работы:

1. Установление зависимости спектров fotocувствительности фотодиодов на базе кремниевых p—n структур с наноструктурами GeSi, выращенных комбинированным методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии кремния и газовой эпитаксии германия при низком давлении, от параметров структур (включая морфологию и состав материала островков GeSi) и условий их эксплуатации (температура, напряжение смещения на диоде).

2. Исследование структурных и электрофизических свойств толстых эпитаксиальных слоев Ge/Si(001), выращенных методом газовой эпитаксии с разложением моногермания на горячей нити, и фотоэлектрических свойств фотодиодов на базе указанных эпитаксиальных слоев.

3. Исследование влияния импульсного гамма-нейтронного облучения на морфологию самоформирующихся наноструктур GeSi и спектры fotocувствительности фотодиодов на базе кремниевых p—n структур с наноструктурами GeSi и толстыми эпитаксиальными слоями Ge/Si(001), в том числе в составе оптоэлектронных пар.

Научная новизна работы

1. Впервые разработана теоретическая модель, связывающая квантовую эффективность фотодиодов на базе кремниевых p—n структур с самоформирующимися наноструктурами GeSi с составом материала островков, напряжением смещения на фотодиоде и его рабочей температурой.

2. Впервые получены лабораторные макеты фотодетекторов на базе толстых (~1 мкм) эпитаксиальных слоев Ge/Si(001), выращенных низкотемпературным методом горячей проволоки без дополнительного высокотемпературного циклического отжига.

3. Впервые экспериментально подтверждена стойкость фотодиодов на базе кремниевых p—n структур с самоформирующимися наноструктурами GeSi к импульсному гамма-нейтронному излучению.

Практическая значимость работы

1. Исходя из установленных физических закономерностей эмиссии фотовозбужденных носителей заряда из наноструктур GeSi в матрице кремния, показана необходимость эксплуатации кремниевых p—n фотодиодов с самоформирующимися наноструктурами GeSi в условиях достаточно больших напряжений смещения для реализации 100 % эмиссии дырок из островков.

2. На основе исследований зависимости структуры эпитаксиальных слоев Ge/Si(001), выращенных методом газофазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити, от условий роста установлены режимы, обеспечивающие получение монокристаллических эпитаксиальных слоев Ge/Si(001) толщиной ~1 мкм с низкой плотностью прорастающих дислокаций (плотность ямок травления ~ 10^5 см⁻²) и гладкой поверхностью (~ 0,4 нм), что соответствует мировому уровню достижений.

3. Экспериментально установлена радиационная стойкость кремниевых p—n фотодиодов с наноструктурами GeSi в спектральной области межзонного оптического поглощения островков GeSi к импульсному гамма-нейтронному облучению. Данный результат может быть использован при разработке технологии изготовления радиационно-стойких фотодиодов на основе кремния с рабочим спектральным диапазоном, расширенным в ближнюю инфракрасную область.

4. Показана принципиальная возможность использования фотодиодов на базе Si p—n структур с островками GeSi и эпитаксиальными слоями Ge/Si(001) в радиационно-стойких оптоэлектронных парах в качестве приемников оптического излучения.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Зависимость фоточувствительности кремниевых p—n ФД с самоформирующимися наноструктурами GeSi в спектральной области межзонного оптического поглощения в островках от температуры и напряжения смещения определяется соотношением скорости эмиссии фотовозбужденных дырок из наноструктур и скорости рекомбинации фотовозбужденных носителей в островках.

2. 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 °С), обусловлена образованием переходного слоя германия с высокой плотностью дислокаций несоответствия.

3. Стойкость кремниевого р—п ФД с самоформирующимися наноструктурами GeSi в спектральной области межзонного оптического поглощения в островках GeSi к импульсному гамма-нейтронному облучению обусловлена пространственной локализацией процесса фотогенерации носителей заряда в наноструктурах GeSi, расположенных в области пространственного заряда р—п перехода.

Достоверность результатов

Достоверность результатов в экспериментальной части работы обеспечена использованием взаимодополняющих методов анализа, воспроизводимостью характеристик исследуемых объектов, многократной экспериментальной проверкой результатов измерений, использованием метрологически аттестованного измерительного оборудования и поверенных средств измерения.

Методы атомно-силовой микроскопии, двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии, просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, подсчета ямок травления, измерения удельного сопротивления и эффекта Холла, измерения вольтамперных и вольтфарядных характеристик, спектроскопии фотоЭДС и фототока позволяют проводить исследования морфологии, кристаллической структуры и дефектности, электрофизических, фотоэлектрических и оптоэлектронных свойств объектов на высоком уровне. Исследуемые образцы подвергались импульсному гамма-нейтронному облучению в пассивном режиме (без электрической нагрузки) на аттестованных моделирующих установках до уровней, на которых ранее наблюдалась заметная деградация оптических и электрических параметров кремниевых структур с наноструктурами GeSi/Si(001) и светодиодов на их основе.

Экспериментальные результаты исследования характеристик исследуемых образцов сопоставлялись с результатами, полученными в других лабораториях (Институте физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск), ИФМ РАН (г. Нижний Новгород), зарубежных лабораториях: Massachusetts Institute of Technology (Boston, USA), AT&T Bell Laboratories (Murray Hill USA), CEA-GRE (Grenoble, France), University of Rome (Italy) и др.)). Достоверность полученных данных подтверждается рядом публикаций основных результатов в известных российских научных изданиях.

Соответствие диссертации паспорту специальности ВАК

Диссертационное исследование по поставленным целям, решенным задачам и полученным результатам соответствует п.п. 2, 4, 7, 11, 13 паспорта специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на Всероссийских и международных научных конференциях, в том числе: Российской конференции по физике полупроводников (С.-Петербург, 2013); Международной конференции и школе молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на их основе «Кремний-2012» (С.-Петербург, 2012); Межотраслевых конференциях по радиационной стойкости «Стойкость» (Москва, 2015, 2025; Саров, 2021); научно-технических конференциях «Молодежь в науке» (Саров, 2013, 2014); научно-технической конференции молодых специалистов Росатома «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе» (Н.Новгород, 2014), XVI Всероссийской конференции и IX Школы молодых ученых, посвященные 100-летию академика Г.Г. Девярых (Н.Новгород, 2018); IV Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2018» (Москва, 2018), XXII Международном симпозиуме «Нанозифика и нанозлектроника» (Н.Новгород, 2018), а также на семинарах в Научно-исследовательском физико-техническом институте Нижегородского государственного университета им.Н.И. Лобачевского (Н.Новгород).

По теме диссертационной работы опубликовано 20 научных работ, из них 6 статей в ведущих научных изданиях, входящих в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» ВАК РФ и 14 публикаций в материалах Российских и международных научных конференций.

Все три положения о научной новизне и все четыре пункта практической значимости полностью и достоверно отражены в этих публикациях, что подтверждает полноту изложения основных результатов диссертации в опубликованных работах.

Личный вклад автора в получение результатов

Диссертантом совместно с научным руководителем были поставлены цель и задачи исследований.

Анализ литературных данных, планирование экспериментов, проектирование образцов для экспериментальных исследований, интерпретация полученных результатов различными методами проводились

автором самостоятельно. Выводы по полученным результатам формулировались самостоятельно и обсуждались с научным руководителем.

Выращивание гетероэпитаксиальных структур проводились инженером НИФТИ ННГУ В. Ю. Чалковым и инженером. НИФТИ ННГУ к.ф.-м.н. С. А. Денисовым при участии руководителя и автора работы.

Исследования структур методом двухкristальной рентгеновской дифрактометрии выполнено в.н.с. НИФТИ ННГУ д.ф.-м.н. В.Н. Трушиным, методом просвечивающей электронной микроскопии - заведующим научно-исследовательской лабораторией радиофотоники НИФТИ ННГУ к.ф.-м.н. А. И. Бобровым под руководством д. ф.-м. н., проф., заведующим Кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники Физического факультета ННГУ Д. А. Павлова., методом ямок травления – инженером. НИФТИ ННГУ к.ф.-м.н. С. А. Денисовым, на атомно-силовом микроскопе – к.ф.-м.н., доц., с. н. с. НИФТИ ННГУ А. В. Неждановым.

Измерение электрических параметров структур проводилось д.ф.-м.н., проф. А. В. Кудриным (Кафедра физики полупроводников, электроники и наноэлектроники Физического факультета ННГУ) и к.ф.-м.н. с.н.с. Лаборатории мемристорной наноэлектроники НОЦ «Физика твердотельных структур» ННГУ А. И. Беловым, ведущим инженером НИФТИ ННГУ Н.А. Алябиной.

Исследование спектров фоточувствительности фотодиодов – к.ф.-м.н., доц. Кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники Физического факультета ННГУ Н. С. Волковой под руководством к.ф.-м.н., доц. Кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники Физического факультета ННГУ А. П. Горшкова, а их обсуждение автором - совместно с д.ф.-м.н. в.н.с НИФТИ ННГУ, проф. Д.О. Филатовым.

Измерение характеристик оптоэлектронных пар выполнено ведущим инженером. НИФТИ ННГУ А.Н. Шушуновым и зав. лаборатории НИФТИ ННГУ А.В. Корнауховым

Облучение исследуемых образцов проводилось на моделирующих установках ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» под руководством сотрудника ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ИЯРФ Л.Е. Довыша.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 150 страниц, включая 47 рисунков, 6 таблиц, список цитируемой литературы, который содержит 135 наименований, и список публикаций автора по теме диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, поставлены цель и задачи диссертационной работы, представлена научная новизна и практическая значимость проводимых исследований, указаны методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены степень достоверности и апробация результатов, а также отмечен личный вклад автора.

В **Главе 1** представлены результаты, опубликованные в литературе к моменту начала диссертационного исследования, посвященные как технологии изготовления гетероструктур с наноструктурами GeSi и эпитаксиальными слоями германия на подложках Si(001), так и исследованию свойств изделий на основе таких материалов, в том числе их стойкость к радиационному воздействию.

Рассмотрены технологические особенности наиболее распространенных методов выращивания гетероструктур с самоформирующимися островками GeSi на подложках Si(001): молекулярно-лучевой эпитаксии, газофазной эпитаксии и молекулярно-лучевой эпитаксии из газофазных источников. Отмечены сдерживающие факторы применения вышеуказанных методов в интересах интегральной оптоэлектроники: высокотемпературность (температуры роста гетероструктур данными методами составляют не менее 1000 °С), низкая производительность (например, типичные скорости роста в МЛЭ составляют ~ 1 МС/с) и, соответственно, связанная с этим высокая стоимость выращенных структур. Как альтернатива, приведены возможности разработанного в НИФИ ННГУ комбинированного метода СМЛЭ-ГФЭ при низком давлении, который позволяет осаждать эпитаксиальные слои кремния высокого кристаллического качества с различным типом и уровнем легирования при относительно низкой температуре роста подложки (до 600 °С) с приемлемыми скоростями роста. Ранее [23] таким методом были выращены p-i-n структуры с самоформирующимися островками GeSi, на их основе были сформированы меза-диоды, изучены спектры их электролюминесценции (ЭЛ) и фоточувствительности (ФЧ). В [17] было показано, что основные закономерности зависимости морфологии и оптических свойств гетероструктур, выращенных СМЛЭ-ГФЭ, от условий роста в основном сходны с установленными ранее для традиционной МЛЭ. Однако несмотря на то, что зарождение наноструктур германия происходит, как и в случае роста методом МЛЭ, по механизму Странски-Крастанова, на дальнейший их рост значительное влияние оказывают процессы переконденсации или оствальдовского созревания, которые определяют динамику изменения размеров и плотности островков в ходе роста. Показана необходимость проведения расширенных исследований зависимости

спектров фоточувствительности структур с наноструктурами GeSi, выращенных методом СМЛЭ-ГФЭ, от их морфологии и состава материала островков.

Отмечено также, что эмиссия фотовозбужденных носителей из наноструктур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ является важным механизмом фотоэлектрических явлений в р—п ФД с наноструктурами $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ (в отличие от ФД на базе однородных кремния и германия) и существенно зависит от эксплуатационных условий, таких как температура и внешнее напряжение, приложенное к диоду. При этом к моменту начала диссертационного исследования, для ФД с наноструктурами $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ комплексных исследований фоточувствительности от условий измерения спектров не проводилось.

Показана так же перспективность (кроме фотодиодов на базе кремниевых структур с наноструктурами GeSi) использования в качестве фотоприемников ближнего инфракрасного диапазона для расширения возможностей интегральной кремниевой оптоэлектроники фотодиодов на основе гетероструктур Ge/Si(001) со сплошными достаточно толстыми (~1 мкм) эпитаксиальными слоями германия. Однако значительное рассогласование параметров кристаллических решеток кремния и германия, как и в случае с наноструктурами GeSi, приводит к образованию дислокаций несоответствия на границе раздела Ge/Si(001). Накопление таких дефектов снижает кристаллическое совершенство материала, увеличивает темновой ток и уменьшает квантовую эффективность фотодиодов на подобных структурах. Показано, что минимизация плотности прорастающих дислокаций (~ 10^5 см^{-2}) достигается при выращивании таких структур методом ГФЭ при низком давлении при T_g от 600 °C до 700 °C, либо альтернативным способом – с использованием низкотемпературного буферного слоя ($T_g = (300...400) \text{ °C}$), с последующим осаждением основного более толстого слоя германия при повышенной температуре ($T_g = (650...700) \text{ °C}$). Очевидно, что такие температуры роста несовместимы с интегральной оптоэлектроникой. В этом контексте особый интерес представляет метод газовой фазы осаждения с разложением моногермания на горячей нити (HWCVD) [24], примененный в работе [22] для выращивания толстых (толщиной $\approx 0,5 \text{ мкм}$) эпитаксиальных слоев (ЭС) Ge/Si(001) при низкой температуре ($T_g \approx 350 \text{ °C}$). Данный метод позволил получить монокристаллические слои Ge/Si(001) с низкой плотностью прорастающих дислокаций (~ 10^5 см^{-2}). Однако, физико-химические механизмы роста ЭС Ge/Si(001) методом HWCVD, обеспечивающие столь высокое кристаллическое совершенство ЭС Ge/Si(001), а также аномально низкую плотность прорастающих дислокаций в них, к началу настоящей диссертационной работы оставались недостаточно изученными.

Анализ литературных данных по влиянию ионизирующих излучений на оптоэлектронные устройства на базе различных квантоворазмерных структур показал перспективность их использования для повышения

радиационной стойкости. При этом, исследованию влияния импульсного гамма-нейтронного облучения на морфологию самоформирующихся наностроек GeSi и спектры fotocувствительности фотодиодов на базе кремниевых $p-n$ структур с наностройками GeSi и толстыми эпитаксиальными слоями Ge/Si(001), в том числе в составе оптоэлектронных пар, уделено недостаточно внимания.

В Главе 2 приведено описание методик формирования исследуемых гетероструктур и экспериментальных образцов фотодиодов и оптоэлектронных пар на их основе, а также методик исследований структурных и электрофизических свойств гетероструктур, оптических свойств экспериментальных образцов на базе таких структур.

Исследуемые гетероструктуры были выращены в НИФТИ ННГУ на оригинальной МЛЭ установке [25]. Si $p-n$ структуры с наностройками GeSi/Si(001) выращивались комбинированным методом СМЛЭ–ГФЭ. В ходе осаждения Ge температура подложки T_g составляла (500...800) °С. В многослойных массивах слои островков GeSi разделялись слоями Si толщиной ≈ 100 нм. В качестве контрольных образцов были использованы $p-n$ структуры с теми же параметрами слоев Si, но без осаждения Ge.

Для анализа морфологии островков GeSi/Si(001) были выращены гетероструктуры с поверхностными островками GeSi, сформированными в тех же условиях, что и островки в диодных структурах.

Эпитаксиальные слои Ge/Si(001) толщиной $\approx 0,5$ мкм выращивались методом газофазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити (использовалась полоска Ta, нагреваемая до $T_s = (1200...1300)$ °С) пропусканием через неё электрического тока) при $T_g = 350$ °С и давлении $\text{GeH}_4 p_g \approx 4 \cdot 10^{-4}$ Торр.

Морфология поверхностных наностроек GeSi/Si(001) и эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001) исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) при помощи атомных силовых микроскопов «Интегра» и «Солвер Про» производства ЗАО «НТ МДТ» (Зеленоград, Россия). Кристаллическая структура эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001) исследовалась методами двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии при помощи дифрактометра Bruker D8 Discoverer и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на поперечных срезах при помощи просвечивающего электронного микроскопа Jeol JEM 2100F. Плотность прорастающих дислокаций определялась методом подсчёта ямок травления. Электрофизические параметры эпитаксиальных слоёв Ge определялись путём измерения удельного сопротивления и эффекта Холла методом ван-дер-Пау на образцах, выращенных на подложках «кремний-на-изоляторе» (КНИ) с тонким слоем слаболегированного n -Si.

На базе Si $p-n$ структур с наностройками GeSi и эпитаксиальными слоями Ge/Si(001) методом фотолитографии были изготовлены меза-фотодиоды. Подконтактные слои p^+ -Ge формировались имплантацией

ионов V^+ . Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и $C-V$ характеристики диодов на базе эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001) измерялись при помощи измерителя параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Спектры фоточувствительности фотодиодов измерялись в режиме фототока короткого замыкания с модулированным фотовозбуждением (частота модуляции ≈ 128 Гц) и синхронным детектированием при помощи монохроматора МДР-2 (ЛОМО) и синхронного детектора Stanford Research SR-530.

Оптоэлектронные пары формировались на основе меза-структур светодиодов с массивом GeSi наноструктур и фотодиодов с эпитаксиальными слоями Ge на Si. Также были рассмотрены альтернативные варианты исполнения, когда в качестве светоизлучающей использовались структуры с эпитаксиальными слоями Si:Er.

При измерениях параметров оптопар использовался импульсный режим работы. На светодиод подавались прямоугольные импульсы напряжения (меандр) с амплитудой 5 В с генератора сигналов Tabor Electronics WW2571, с частотой повторения импульсов 80 Гц. Уровень тока накачки составлял ~ 300 мА. Для регистрации фототока с фотоприемного устройства использовался малощумящий усилитель тока Stanford Research Systems SR570 и цифровой осциллограф LeCroy 7100.

Импульсное гамма-нейтронное облучение исследуемых образцов проводилось в пассивном режиме (без электрической нагрузки). Средняя эффективная энергия сплошного спектра гамма-квантов и нейтронов составляла соответственно $\approx 1,5$ МэВ и $\approx 0,8$ МэВ с верхней границей ≈ 18 МэВ. Интегральный поток нейтронов составил $\approx 1,0 \cdot 10^{14}$ см⁻², экспозиционная доза ≈ 4 кГр. Для Si $p-n$ фотодиодов с однослойным массивом островков GeSi и фотодиодов на базе эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001), этот уровень достигался за два последовательных гамма-нейтронных импульса меньшей интенсивности. До и после облучения измерялись спектры фоточувствительности фотодиодов по методике, описанной выше, а также проверялось наличие оптической связи между элементами оптоэлектронной пары.

В **Главе 3** представлены результаты исследований фотоэлектрических свойств фотодиодов на базе Si $p-n$ структур с островками GeSi и эпитаксиальными слоями Ge/Si(001), а также показана принципиальная возможность использования таких фотодиодов в оптоэлектронных парах. Основные научные результаты, изложенные в настоящей главе, опубликованы в работах [A1, A2, A3].

В **разделе 3.1** изложены результаты исследований $p-n$ фотодиодов с наноструктурами GeSi.

В п. 3.1.1 приводятся результаты исследования зависимости спектров фоточувствительности фотодиодов от параметров наноструктур GeSi. Было установлено, что красная граница спектра фоточувствительности фотодиодов

$E_{0ФЧ}$ (указана на рисунке 1 стрелками) определяется значением атомной доли Ge в материале островков Ge_xSi_{1-x} x (которая, в свою очередь, зависит от значения T_g , см. рисунок 1 и таблица 1). Энергия E_0 закономерно смещается в область меньших значений с уменьшением T_g (и соответственно увеличением атомной доли Ge в материале островков x).

Таблица 1 - Состав материала и энергетические параметры (при 300 К) островков GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ-ГФЭ при различных значениях T_g

№	$T_g, ^\circ\text{C}$	$\langle x \rangle$ [19]	$\langle \epsilon_{rel} \rangle$	$E_{0p}, \text{эВ}$	$E_{0ФЧ}, \text{эВ}$	$\hbar\Omega_{ФЧ}, \text{мэВ}$	$\Delta E_{vh}, \text{эВ}$	$\Delta E_{vl}, \text{эВ}$
1	-/-	$0,56 \pm 0,05$	-/-	0,67	0,69	57	0,41	0,31
2	800	$0,24 \pm 0,05$	0,67	0,94	0,93	63	0,17	0,15
3	700	$0,32 \pm 0,05$	0,94	0,85	0,87	65	0,25	0,19
4	600	$0,54 \pm 0,05$	0,96	0,71	0,73	60	0,40	0,30

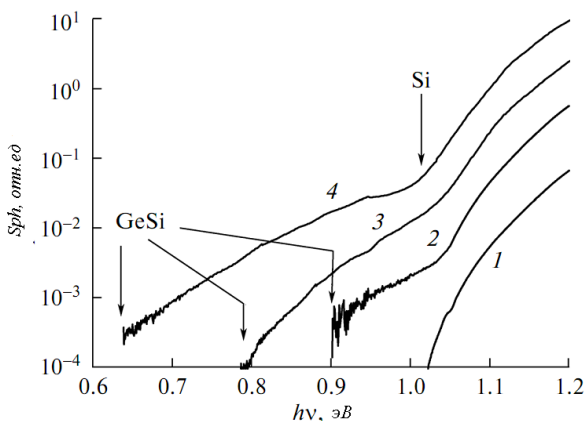


Рисунок 1 - Спектры ФЧ (300 К) фотодиодов на основе p—n структур с однослойными массивами наностроек GeSi в ОПЗ (2 — 4) и без островков (1). $T_g, ^\circ\text{C}$: 2 — 800, 3 — 700, 4 — 600 [A1]

Значения x в материале островков Ge_xSi_{1-x} , выращенных в аналогичных условиях, были определены в [19] методом конфокальной рамановской микроскопии. Наличие Si в материале островков связано с его диффузией из подложки в объём островков в процессе роста, что понижает упругую

энергию островков [26]. В таблице 1 приведены расчётные значения энергии межзонных оптических переходов в островках GeSi E_{op} (300 K), определенные по модели [27] с учётом степени релаксации упругой деформации материала островков. Расчёт показал, что при высоте островков GeSi $H > 10$ нм (что, по данным АСМ, справедливо для всех исследованных гетероструктур) размерное квантование не оказывает существенного влияния на энергетический спектр дырок в островках (энергия размерного квантования основного состояния тяжёлых дырок < 10 мэВ), и значение E_0 определяется значениями x , а также упругой деформацией в материале островков ε_{rel} . Как видно из таблицы 1, имеет место удовлетворительное согласие между расчётными E_{op} и измеренными $E_{0фч}$ значениями для различных значений x .

Отмеченное согласие свидетельствует о применимости методики анализа спектров ФЧ гетероструктур с наноструктурами GeSi/Si(001), использованной в [27] для анализа спектров фотоЭДС на барьере полупроводник/электролит, к спектрам ФЧ $p-n$ фотодиодов с наноструктурами GeSi в ОПЗ.

В п. 3.1.2 приводятся результаты исследований зависимости спектров фоточувствительности фотодиодов от температуры T и напряжения смещения на фотодиоде U_b .

Для данных исследований были выбраны образцы, выращенные при температуре подложки $T_g = 600$ °С, обладающие оптимальными с точки зрения оптоэлектронных приложений характеристиками. Было установлено, что зависимости фоточувствительности таких диодов в спектральной области межзонного оптического поглощения в островках GeSi S_{ph} от T и U_b определяются соотношением скоростей эмиссии фотовозбуждённых дырок из островков и рекомбинации носителей заряда в островках. На рисунке 2 приведены расчётные зависимости эффективности эмиссии фотовозбуждённых дырок η_Q из островков Ge_{0,54}Si_{0,46}/Si(001) от T и U_b , рассчитанные по [28]:

$$\eta_Q = \frac{\tau_e^{-1}}{\tau_e^{-1} + \tau_r^{-1}}, \quad (1)$$

где τ_r и τ_e — времена жизни дырок в островках относительно рекомбинации и эмиссии, соответственно. Последнее рассчитывалось по [29] с учётом туннельного и термоактивационного механизмов эмиссии дырок из островков. В соответствии с (1), с повышением T и U_b $\eta_Q \rightarrow 1$ (рисунок 2). При $U_b = 0$ и $T \rightarrow 0$, ввиду достаточно больших значений разрыва зон на границе GeSi/Si(001) ΔE_v (см. таблицу 1), термоактивационный механизм эмиссии становится неэффективным, $\tau_r \ll \tau_e$ и $\eta_Q \rightarrow 0$. С ростом U_b скорость туннельной эмиссии дырок растёт, и при $\tau_e \ll \tau_r$ $\eta_Q \rightarrow 1$. Аналогичный вид имеют зависимости $S_{ph}(T, U_b)$ на рисунке 2.

Данный результат показывает необходимость эксплуатации фотодиодов при достаточно высоких значениях U_b , чтобы обеспечить 100% эмиссию дырок из островков (в особенности, при эксплуатации фотодиодов в условиях низких температур).

Методом аппроксимации экспериментальных зависимостей $S_{ph}(T, U_b)$ были сделаны оценки τ_r в островках GeSi. Наилучшее согласие между расчётными зависимостями $\eta_Q(T, U_b)$ и соответствующими зависимостями $S_{ph}(T, U_b)$ на рисунке 2 получено для $\tau_r = 10^{-6}$ с, что согласуется с литературными данными [30].

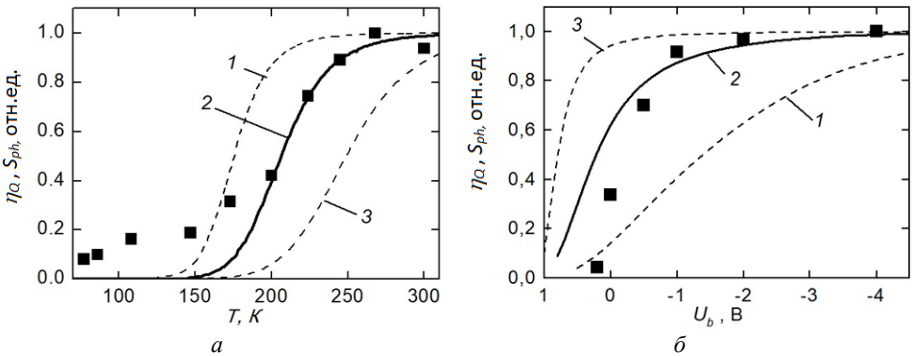


Рисунок 2 - Зависимости эффективности эмиссии фотовозбуждённых дырок из островков $\text{Ge}_{0,54}\text{Si}_{0,46}/\text{Si}(001)$, η_Q (линии, расчёт) и нормированной фоточувствительности в спектральной области межзонного оптического поглощения в островках S_{ph} (символы, эксперимент) от T (при $U_b = 4$ В) (а) и U_b (при $T = 300$ К) (б) для фотодиода с 5 слоями островков GeSi. τ_r , с: 1 – 10^{-5} , 2 – 10^{-6} , 3 – 10^{-7} [A1]

В разделе 3.2 приведены результаты исследований структурных и электрофизических свойств эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001), выращенных методом горячей проволоки при низких температурах, и спектров фоточувствительности фотодиодов на их основе.

По данным АСМ, шероховатость поверхности эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001), выращенных при $T_g = 350$ °С, была меньше 0,37 нм, что удовлетворяет требованиям современной технологии. Поверхность эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001) имела блочно-террасчатую структуру, что указывает на слоевой механизм роста. Рентгенодифракционные и ПЭМ исследования показали, что эпитаксиальные слои Ge/Si(001) имели монокристаллическую структуру. Ширина кривых качания вблизи рефлекса Ge (004) составляла $\approx 7,2'$, что примерно в 4 раза меньше наименьших значений, приводимые в литературе [31].

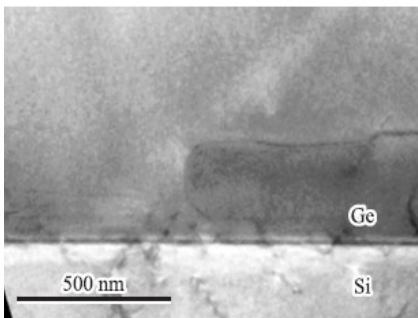


Рисунок 3 – ПЭМ изображение поперечного среза эпитаксиального слоя Ge/Si(001) [A2]

По данным ПЭМ (рисунок 3), дислокации несоответствия были сосредоточены в тонком слое вблизи границы Ge/Si, который играет роль виртуальной подложки для роста релаксированных эпитаксиальных слоёв Ge (остаточная деформация $\approx 2,5 \cdot 10^{-3}$) с низкой плотностью дислокаций ($\sim 10^5 \text{ см}^{-2}$). По данным холловских измерений, слои Ge имели *p*-тип проводимости с концентрацией дырок $(1 \dots 2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $(400 \dots 500) \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (300 К).

Фотодиоды на базе эпитаксиальных слоёв *p*-Ge/*n*⁺-Si(001) имели асимметричные ВАХ и плотность темнового обратного тока $j_s \sim 10^{-2} \text{ А/см}^2$ при $U_b = 1 \text{ В}$ (300 К), типичные для фотодиодов на базе эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001), что связано с влиянием дислокаций несоответствия в ОПЗ контакта *p*-Ge/*n*⁺-Si. Концентрация акцепторов в слое *p*-Ge, определённая из *C*—*V* характеристик диодов, $N_a = (0,9 \dots 1,5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что согласуется с данными холловских измерений.

На рисунке 4 представлены спектры внешней квантовой эффективности $\eta(\lambda)$ (300 К) фотодиода на базе гетероструктуры *p*-Ge/*n*⁺-Si(001) при различных значениях U_b .

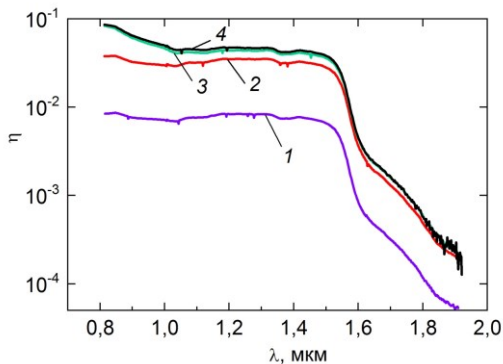


Рисунок 4 – Спектры квантовой эффективности ФД на базе ГС *p*-Ge/*n*⁺-Si(001) (300К) при $U_b, \text{ В}$: 1 — 0; 2 — 0,1; 3 — 0,2; 4 — 0,5 [A2]

Фоточувствительность в диапазоне $\lambda = (1,1 \dots 1,5)$ мкм, обусловленная прямыми межзонными переходами в слое Ge, увеличивается с ростом U_b . Это свидетельствует, что при $U_b = 0$ слой p -Ge не полностью обеднён носителями заряда (дырками). При $\lambda = 1,45$ мкм $\eta \approx 0,05$, что в ≈ 4 раза меньше рекордного значения ($\approx 0,22$ [32]). Это может быть связано с достаточно высокими значениями N_a в эпитаксиальных слоях Ge/Si(001), выращенных при низких температурах, и, как следствие, недостаточной диффузионной длиной электронов в p -Ge L_n . Повышение значений η возможно за счет оптимизации режимов роста слоёв Ge/Si(001) с целью снижения фоновой концентрации акцепторов в слое p -Ge N_a . Это позволит увеличить толщину слоя германия, а также подвижность неосновных носителей (электронов) слоя p -Ge, что, в свою очередь, приведет к увеличению диффузионной длины неосновных носителей в слое p -Ge и, следовательно, к повышению квантовой эффективности фотодиодов. Среди других способов увеличения квантового выхода ФД, может быть рекомендовано дальнейшее совершенствование технологии изготовления подконтактных слоев p^+ -Ge, на которые наносятся омические контакты, применение просветляющего покрытия входного окна фотодиода, химическое пассивирование боковых поверхностей мез для снижения обратных темновых токов.

В разделе 3.3 показана принципиальная возможность использования в оптоэлектронных парах в качестве приемников оптического излучения исследуемых в данной работе фотодиодов на базе Si p - n структур с островками GeSi и эпитаксиальными слоями Ge/Si(001). Оптимизированные по характеристикам светоизлучающие диодные структуры с наноструктурами обычно отличаются от фотоприемных структур составом, размерами, поверхностной плотностью, числом слоев в массиве GeSi наноструктур. Однако на одних и тех же структурах с наноструктурами в данной диссертационной работе был зарегистрирован как устойчивый эффект излучательной рекомбинации, так и эффект межзонного оптического поглощения. Сигнал ЭЛ диодных структур уверенно регистрировался с использованием многомодового кварцевого оптоволоконного диаметром 50 мкм с помощью охлаждаемого Ge детектора. ФЧ диодных структур показала величину 25 мА/Вт на длине волны $\sim 1,3$ мкм. На рисунке 5 показаны в относительных единицах спектры ЭЛ и ФЧ структур с наноструктурами GeSi, а также ФЧ объемного Ge и эпитаксиальных структур Ge на Si.

Видно, что для сформированных по единой технологии структур с наноструктурами GeSi пики интенсивности (S) в спектрах ЭЛ и ФЧ отличаются по длине волны (λ). В спектре ФЧ фотодиодов с наноструктурами GeSi наблюдается полоса собственной ФЧ Si в диапазоне длин волн от 0,9 до 1,1 мкм ($h\nu \sim 1,05$ -1,30 эВ). В диапазоне длин волн от 1,1 до 1,6 мкм в ($h\nu \sim$

0,70 - 1,05 эВ) наблюдается полоса ФЧ, обусловленная межзонным оптическим поглощением в наноструктурах GeSi. В спектре ЭЛ структур с наноструктурами GeSi наблюдается пик в диапазоне длин волн от 1,4 до 1,8 мкм с энергией максимума в области границы фоточувствительности ~ 0,75 эВ.

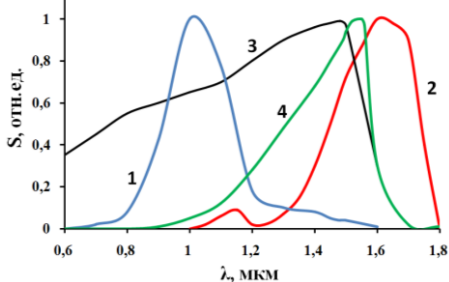


Рисунок 5 - Спектры ФЧ (1) и ЭЛ (2) структур с GeSi наноструктурами и ФЧ объемного Ge (3) и структур с эпитаксиальными слоями Ge/Si(001) (4) [A3]

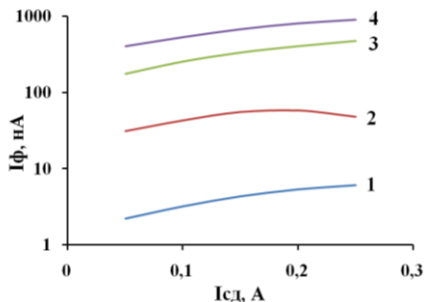


Рисунок 6 - Зависимость фототока (I_{ϕ}) от величины тока накачки (I_{cd}) при различных частотах модуляции сигнала (1 – 64,5 Гц, 2 – 647 Гц, 3 – 6,5 кГц, 4 – 72 кГц) [A3]

К пику интенсивности ЭЛ структур с наноструктурами GeSi ближе пик ФЧ структур с эпитаксиальными слоями Ge на Si, поэтому были проведены исследования характеристик оптоэлектронных пар со светоизлучающими структурами с наноструктурами GeSi и фоточувствительными структурами с эпитаксиальными слоями Ge/Si(001). При подаче сигнала на источник излучения на фотоприемнике был зафиксирован сигнал по форме и продолжительности совпадающий с входным сигналом. При этом ток, измеренный на фотоприемном устройстве до усиления, был равен 4 нА.

Зарегистрировать уверенный оптопарный эффект с использованием в качестве фоточувствительных структур с наноструктурами GeSi получилось, применив светоизлучающие структуры с эпитаксиальными слоями кремния, легированными Er, и увеличив до 25 количество слоев в массивах самоформирующихся наноструктур GeSi встроенных в i- область фоточувствительной структуры. К достоинствам структур Si:Er можно отнести возможность создания оптически активных сред, характеризующихся узкой и температурно-независимой спектральной линией в одном из окон прозрачности волоконно-оптических линий связи на длине волны ~ 1,54 мкм.

В качестве основной характеристики оптронов измерялась зависимость фототока от входного тока светодиода. При измерениях использовался импульсный режим работы с контролем фотоотклика по

методике синхронного детектирования на частоте опорного сигнала. С ростом силы тока на входе оптрона ($I_{сд}$) отмечался рост фотоотклика с выходом на насыщение при $I_{сд} \sim 250$ мА. Отмечена зависимость величины фототока от частоты входного сигнала (рисунок 6). Максимальные уровни фототока ~ 1 мкА наблюдались на частотах более 70 кГц. Оценка коэффициента передачи оптоэлектронной пары по току (К) показала значение $\sim 3,6 \cdot 10^{-6}$, которое близко к уровню максимально возможных значений коэффициента передачи для оптронов, если в качестве активных слоев свето- и фотодиодов для них использовать структуры Si:Er и Ge(Si). По результатам исследований для уверенной регистрации оптопарного эффекта минимальные уровни внешней квантовой эффективности излучательной рекомбинации светодиодов и фоточувствительности фотодиодов должны составлять значения $\sim 10^{-5}$ и $\sim 10^{-4}$ соответственно в коммуникационном диапазоне длин волн 1,3 – 1,55 мкм. Замена в оптопарах фоточувствительных структур с наноструктурами Ge(Si) на фоточувствительные структуры, выполненные на основе эпитаксиальных слоев Ge/Si, позволяет увеличить максимальные значения К до $\sim 10^{-5}$.

В **Главе 4** изложены результаты исследований влияния импульсного гамма-нейтронного излучения на фотоэлектрические свойства фотодиодов на базе Si *p-n* структур с наноструктурами GeSi/Si(001) и эпитаксиальными слоями Ge/Si(001). Основные результаты, изложенные в настоящей главе, опубликованы в работах [A4, A5, A6].

В **разделе 4.1** проведены экспериментальные исследования влияния импульсного гамма-нейтронного облучения на морфологию поверхности гетероструктур GeSi/Si(001) с самоформирующимися наноструктурами GeSi, полученных при разных температурах подложки в процессе роста T_g (от 500 °С до 800 °С). Такие исследования являются значимыми с практической и научной точки зрения, учитывая зависимость оптических и фотоэлектрических свойств фотодиодов на базе таких гетероструктур от их поверхностной морфологии (наряду с составом и упругой деформацией материала островков).

Наиболее стабильное поведение параметров морфологии наноструктур GeSi/Si(001) при облучении было отмечено для структур с островками, выращенных при $T_g = 600$ °С, которые как было отмечено в предыдущих разделах диссертационного исследования обладают оптимальными с точки зрения оптоэлектронных приложений характеристиками. На рисунке 7 представлены АСМ изображения поверхности структур таких структур с одним слоем GeSi островков без покровного слоя кремния (температура подложки в процессе роста 600 °С). АСМ изображения приведены до (0) и после гамма-нейтронного облучения (1, 2).

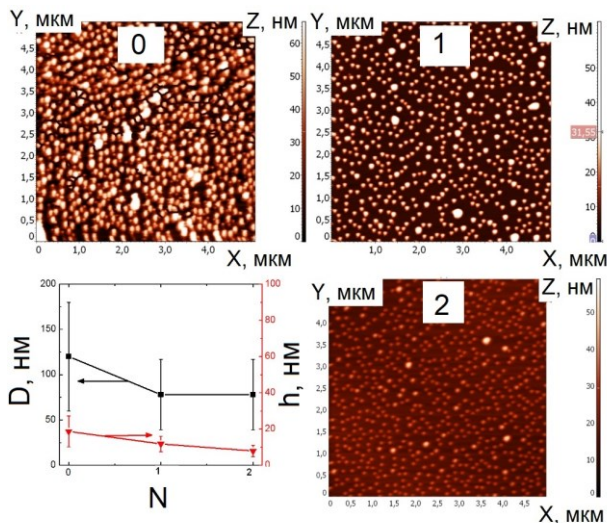


Рисунок 7 - График изменения параметров nanoостровков от флюенса нейтронов (N – номер эксперимента) и АСМ изображение поверхности структур с одним слоем Ge(Si) nanoостровков до (0) и после гамма-нейтронного облучения (1, 2)

Облучение проводилось в два этапа с флюенсом нейтронов 10^{15} н/см² на каждом этапе. Структуры после воздействия не отжигались. Исследовалась зависимость параметров морфологии nanoостровков от флюенса нейтронов: поверхностная плотность островков N_s , средняя высота h , средние латеральные размеры D по уровню 0,1h от поверхности смачивающего слоя Ge. Статистическая обработка результатов исследований морфологии поверхности показала значительное снижение средних латеральных размеров островков с ~ 125 нм до ~ 75 нм после первого этапа облучения. Снижается также и средняя высота h островков с ~ 20 нм до ~ 10 нм. Второй этап облучения приводит к стабилизации латеральных размеров с небольшим снижением высоты. Незначительно снижается и поверхностная плотность островков с $1,3 \cdot 10^9$ до $1,0 \cdot 10^9$.

Столь значительное уменьшение объема островков, без каких-либо температурных воздействий, можно объяснить диффузией подвижных первичных радиационных дефектов: вакансий и междоузельных атомов. При этом стабилизация латеральных размеров D после второго этапа облучения обусловлена формированием в матрице устойчивых кластеров, служащих стоком дефектов.

Полученные закономерности свидетельствуют о возможности целенаправленного управления параметрами морфологии самоформирующихся наностроек GeSi/Si(001), а, следовательно, их свойствами и, в свою очередь, параметрами оптоэлектронных приборов на их основе. Однако, для разработки подобных методов необходимы дальнейшие комплексные исследования влияния ионизирующего излучения на морфологию, состав и степень упругой релаксации материала островков.

В разделе 4.2 приводятся результаты исследования влияния импульсного гамма-нейтронного облучения на спектры fotocувствительности Si $p-n$ фотодиода с наностройками GeSi. Было установлено, что при радиационном воздействии отсутствует деградация ФЧ, обусловленная межзонным оптическим поглощением в наностройках GeSi, при этом происходит монотонное уменьшение ФЧ в области собственного поглощения кремния (рисунок 8).

Эффект связан с различием в механизмах фотоэффекта в различных спектральных диапазонах. Собственная fotocувствительность Si связана с диффузией неосновных носителей заряда из глубины структуры, где они генерируются (ввиду малости коэффициента собственного поглощения Si $\alpha \approx 2,5 \text{ см}^{-1}$ при $h\nu \approx 1,1 \text{ эВ}$), к ОПЗ $p-n$ перехода [33].

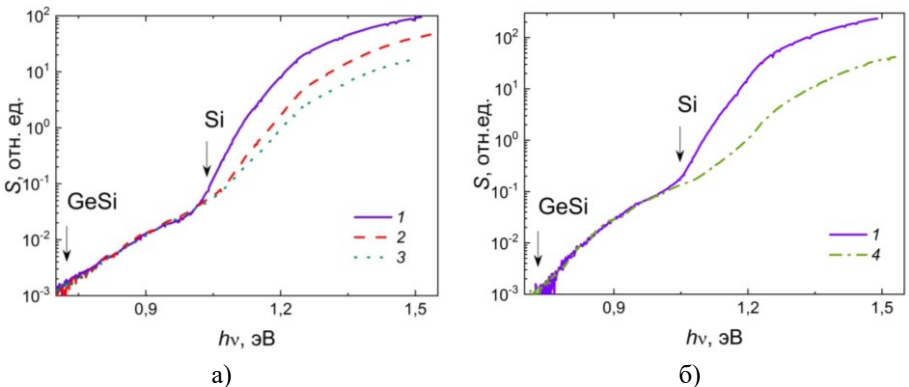


Рисунок 8 - Спектры fotocувствительности (300 К) фотодиодов с одно- (а) и 5-слойным (б) массивами наностроек GeSi до облучения (1), после облучения одним (2), двумя (3) гамма-нейтронными импульсами, и импульсом, по уровню равным двум (4) [A5]

При облучении в кремнии образуются радиационные дефекты, что приводит к уменьшению времени жизни $\tau_{(np)}$ и длины диффузии неосновных носителей $L_{(np)}$. Это приводит к уменьшению доли носителей, достигших границы ОПЗ, что, в свою очередь, приводит к уменьшению собственной fotocувствительности Si в соответствии с формулой [34]

$$S_{ph}(h\nu) \sim \frac{\alpha(h\nu)L_{n(p)}}{1 + \alpha(h\nu)L_{n(p)}}. \quad (2)$$

В длинноволновой спектральной области фоточувствительность обусловлена межзонным поглощением в островках GeSi, расположенных в электрическом поле p — n перехода $F > 10^4$ В/см, в котором носители движутся со скоростью, близкой к скорости насыщения $v_s \sim 10^7$ см/с. Пролётное время носителей через ОПЗ p — n перехода толщиной $W \sim 1$ мкм может быть оценено как $\tau_d \sim W/v_s \sim 10^{-11}$ с. Данное значение существенно меньше, чем рекомбинационное время жизни носителей в кремнии вплоть до весьма значительной концентрации радиационных дефектов. Поэтому гамма-нейтронное облучение может оказать влияние на ФЧ диодов в спектральной области межзонного оптического поглощения в островках GeSi только в том случае, если дефекты генерируются непосредственно в объёме или вблизи поверхности островков. Образование радиационного дефекта в отдельном островке приводит к повышению вероятности рекомбинации фотовозбуждённых носителей внутри данного островка по сравнению с вероятностью их эмиссии из островка и, следовательно, к уменьшению относительного вклада данного островка в ФЧ диода. Оценка по порядку величины времени эмиссии дырок τ_e из наностроек GeSi, сделанная в данной диссертационной работе (раздел 3.1), для островков GeSi в p — n структуре, выращенной комбинированным методом СМЛЭ-ГФЭ, составляет $\tau_e \sim 10^{-7}$ с для $T = 300$ К и атомной доле германия в материале островков GeSi $x \approx 0,5$. В то же время, вклад других островков в суммарный фототок не уменьшается. Вероятность образования дефекта внутри островка весьма мала по сравнению с вероятностью генерации дефектов в кремнии ввиду незначительного объёма островков по сравнению с объёмом материала, затронутого радиационным воздействием. Полученная в настоящей диссертационной работе оценка вероятности образования радиационного дефекта в островках GeSi (около 3%) по порядку величины согласуется с результатами численного моделирования, проведённого в [35].

Отсутствие различий во влиянии импульсного гамма-нейтронного облучения на ФЧ диодов с однослойными и 5-слойными массивами островков GeSi в спектральной области межзонного поглощения в островках объясняется тем, что границы напряжённых гетерослоёв в полупроводниковых ГС являются геттерами для точечных радиационных дефектов. При этом, в структурах с несколькими слоями островков GeSi, можно ожидать, что крайние слои островков будут препятствовать диффузии радиационных дефектов из буферного и покровного слоёв к внутренним слоям островков GeSi в многослойном массиве, что можно отметить, как важное потенциальное преимущество ФД на базе многослойных массивов

наноостровков GeSi в матрице кремния. Данный результат показывает возможность увеличения числа слоёв наноостровков GeSi в активной области ФД с целью повышения абсолютных значений ФЧ в указанном спектральном диапазоне без ущерба для радиационной стойкости приборов.

В разделе 4.3 приведены результаты исследований влияния гамма-нейтронного облучения на спектры fotocувствительности фотодиодов на базе эпитаксиальных слоёв $p\text{-Ge}/n^+\text{-Si}(001)$. Было обнаружено уменьшение fotocувствительности в спектральной области собственного поглощения Ge (рисунок 9), обусловленное генерацией радиационных дефектов в эпитаксиальных слоях Ge. Уменьшение ФЧ во всем спектральном диапазоне при облучении, так же как и в случае собственной ФЧ кремния в диодах с наноостровками GeSi, можно связать с увеличением скорости рекомбинации неосновных фотовозбуждённых носителей (электронов) в слое $p\text{-Ge}$, вследствие накопления радиационных дефектов в ходе облучения. Как было показано в разделе 3.2, слой $p\text{-Ge}$ в исследуемых ФД не был полностью обеднён при нулевом внешнем напряжении на контактах. С другой стороны, оценка диффузионной длины неосновных носителей (электронов) L_n в слоях $p\text{-Ge}$ в фотодиодах, исследованных в настоящей работе, составляет $\sim 0,1$ мкм.

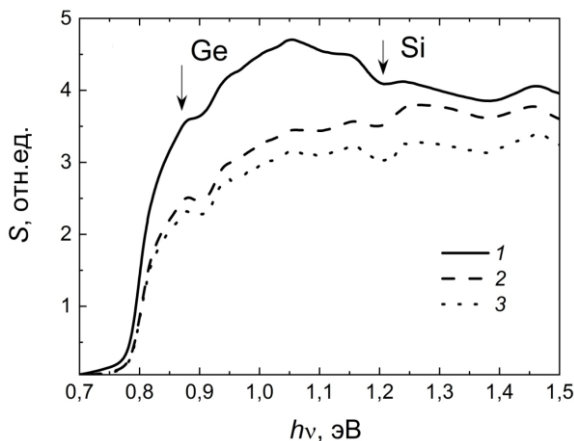


Рисунок 9 – Спектры ФЧ (300 К) ФД на базе ГС $p\text{-Ge}/n^+\text{-Si}(001)$ до и после облучений: 1 — до облучения, 2 — после облучения одним гамма-нейтронным импульсом; 3 — после облучения двумя последовательными гамма-нейтронными импульсами [A5]

Поскольку в исследованных фотодиодах слой $p\text{-Ge}$ был не полностью обеднён носителями заряда при $U_b = 0$, механизм собственной fotocувствительности в эпитаксиальных слоях $p\text{-Ge}$ связан с диффузией

неосновных носителей заряда (электронов) к ОПЗ анизотипного гетероперехода $p\text{-Ge}/n^+\text{-Si}$. Образование радиационных дефектов в эпитаксиальных слоях $p\text{-Ge}$ приводит к уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда τ_n и, соответственно, L_n , что, в свою очередь, приводит к уменьшению фоточувствительности фотодиода в соответствии с (2). Для повышения радиационной стойкости фотодетекторов необходимо дальнейшее совершенствование технологии осаждения эпитаксиальных слоёв $\text{Ge}/\text{Si}(001)$ с целью уменьшения концентрации фоновых акцепторов N_a и, соответственно, увеличения толщины ОПЗ контакта $p\text{-Ge}/n^+\text{-Si}(001)$.

В разделе 4.4 показано, что выполнение условия совместимости параметров светоизлучающих и фотоприемных структур позволяет обеспечить работоспособность оптоэлектронных пар при высоких уровнях воздействий гамма-нейтронного облучения [А6]. Так, при использовании в качестве излучателей в оптоэлектронной паре меза-структур с 25 слоями массивов GeSi наностроек, а в качестве фотодиодов меза-структур с эпитаксиальными слоями Ge на Si , удалось после воздействия гамма-нейтронного облучения с флюенсом нейтронов 10^{15} н/см² зарегистрировать оптопарный эффект. Как было показано в данной диссертационной работе (раздел 4.3), воздействие гамма-нейтронного облучения такого уровня приводит к деградации фоточувствительности меза-структур с эпитаксиальными слоями Ge на Si во всем спектральном диапазоне. Однако при зафиксированном снижении не более чем на 30 % электролюминесценции меза-структур светоизлучающих диодов, используемых в рассмотренном варианте оптоэлектронной пары, даже незначительное смещение спектра в более коротковолновую область позволяет уверенно регистрировать оптопарный эффект после воздействия гамма-нейтронного облучения с флюенсом нейтронов до 10^{15} н/см².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведено комплексное исследование фотоэлектрических свойств и радиационной стойкости фотодиодов на основе гетеро(нано)структур $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$, выращенных низкотемпературными эпитаксиальными методами.

Сочетание развития низкотемпературных методов роста структур и установленная повышенная радиационная стойкость кремниевых p — n фотодиодов с наностройками GeSi к импульсному гамма-нейтронному облучению по сравнению с объемными материалами представляет практический интерес для разработки технологии изготовления радиационно-стойких фотодиодов на основе кремния с рабочим спектральным диапазоном, расширенным в ИК-область, применимых в интегральной кремниевой оптоэлектронике специального назначения.

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1. Комбинированным низкотемпературным методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии кремния и газофазной эпитаксии германия при низком давлении выращены кремниевые р—п структуры с наноструктурами GeSi и получены лабораторные образцы фотодиодов на базе таких структур со значением внешнего квантового выхода, сопоставимого с лучшими аналогами, полученными широко распространенными методами молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии. Это подтверждает технологическую конкурентоспособность предложенного подхода и его совместимость с постпроцессной интеграцией в кремниевые интегральные схемы.

2. Установлено, что зависимости спектров фоточувствительности фотодиодов на базе структур с наноструктурами GeSi от их параметров (включая морфологию и состав материала островков GeSi) и условий измерения спектров (температура, напряжение смещения на диоде) определяются соотношением скорости эмиссии фотовозбуждённых дырок из островков и скорости рекомбинации избыточных носителей заряда в островках. Показана необходимость эксплуатации кремниевых р—п фотодиодов с самоформирующимися наноструктурами GeSi в условиях достаточно больших напряжений смещения для реализации 100 % эмиссии дырок из островков.

3. Методом газофазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити (HWCVD) при низкой температуре подложки (350 °С) выращены толстые (толщиной ~1 мкм и более) монокристаллические эпитаксиальные слои Ge/Si(001) с низкой плотностью прорастающих дислокаций (плотность ямок травления $\sim 10^5 \text{ см}^{-2}$) и гладкой поверхностью (~ 0,4 нм). Установлены режимы роста, обеспечивающие получение структур на базе таких слоев с параметрами, сопоставимыми с лучшими аналогами, выращенными высокотемпературными методами и дополнительным отжигом.

4. Получены лабораторные образцы фотодиодов на базе толстых эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001), предназначенные для использования в инфракрасном диапазоне длин волн. Электрические и фотоэлектрические параметры полученных образцов сопоставимы с параметрами фотодиодов, опубликованными в литературе.

5. Установлено, что фоточувствительность кремниевых р—п фотодиодов с наноструктурами GeSi в ОПЗ р—п перехода в спектральной области межзонного оптического поглощения в наноструктурах изменяется слабее после гамма-нейтронного облучения, чем собственная фоточувствительность кремния, а также фоточувствительность фотодиодов на базе эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001) в области собственной фоточувствительности германия (в диапазон длин волн излучения от 1,7 до 1 мкм). Эффект объясняется пространственной локализацией области

фотогенерации электронно-дырочных пар в островках GeSi. Полученные данные подтверждены морфологическими исследованиями (АСМ), показавшими высокую структурную устойчивость самоформирующихся островков при облучении.

6. Показана принципиальная возможность использования в радиационно-стойких оптоэлектронных парах в качестве приемников оптического излучения фотодиодов на базе кремниевых p—n структур с островками GeSi и эпитаксиальными слоями Ge/Si(001).

Таким образом, поставленная цель достигнута, а все сформулированные задачи решены в полном объеме. Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие кремниевой оптоэлектроники и создают научно-техническую основу для разработки нового поколения Si-совместимых ИК-фотоприёмников с повышенной радиационной стойкостью.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации, в журналах, рекомендованных ВАК:

A1. Фотодиоды на базе массивов самоформирующихся наноструктур GeSi/Si(001), выращенных методом комбинированной сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии Si и газофазной эпитаксии Ge / М.М. Иванова, А. П. Горшков, Н. С. Волкова [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49, № 3. – С. 399-405. – EDN UJMABR.

A2. Фотодетекторы на базе гетероструктур Ge/Si(001), выращенных методом горячей проволоки / М.М. Иванова, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49, № 10. – С. 1411-1414. – EDN UJMCUV.

A3. Иванова, М. М. 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. – DOI 10.51368/2307-4469-2025-13-2-124-131. – EDN FRJJJU.

A4. Влияние импульсного гамма-нейтронного облучения на морфологию самоформирующихся наноструктур GeSi/Si(001) / М. М. Иванова, Д. О. Филатов, А. В. Нежданов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 2. – С. 55-62. – DOI 10.31857/S1028096020020090. – EDN SMNCNG.

A5. 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 [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52, № 6. – С. 651-655. – DOI 10.21883/FTP.2018.06.45931.8670. – EDN YYQRMD.

A6. Иванова, М. М. 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. – EDN UMSQLS.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Kasap, S. O. Optoelectronics and photonics: principles and practices / Safa. O. Kasap. - 2nd ed. - Pearson, 2012. - 544 p.
- 2 Белкин, Е. М. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии / Е. М. Белкин, С. А. Кудж, А. С. Сигов // Российский технологический журнал. - 2016. - № 1 (10). - С. 4-20.
- 3 Ананьев, Р. О. Планирование следующего поколения кремниевой фотоники / Р. О. Ананьев // Научное обозрение. Технические науки. - 2024. - № 6. - С. 10-13. - DOI 10.17513/srts.1487. - EDN BEWUNW.
- 4 Ionizing Radiation Effects in Electronics: From Memories to Imagers (Devices, Circuits, and Systems) / Eds. M. Bagatin, S. Gerardin. - CRC Press, 2015. - 412 p.
- 5 Кравчук, С. Ионизирующие излучения и их воздействие на полупроводниковые материалы (по данным литературных источников). Часть 2 / С. Кравчук, В. Соколов, М. Марченко, О. Вовк // Современная электроника. - 2022. - № 6. - С. 54-61.
- 6 Radiation-induced degradation in optoelectronic devices for satellite applications: a review/ N.N. Sulaiman, N. F. Hasbullah, N. Saidin [et al.] // Discover Materials. - 2025. - P. 1-22. <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00185-y>.
- 7 Changes in luminescence emission induced by proton irradiation: InGaAs/GaAs quantum wells and quantum dots / R. Leon, G. M. Swift, B. Magness [et al.] // Applied Physics Letters. - 2000. - Vol. 76, No. 15. - P. 2074-2076.
- 8 Особенности излучательных характеристик гетероструктур InGaAs/GaAs с квантовыми ямами и точками, облученных нейтронами/ Н. В. Байдусь, О. В. Вихрова, Б. Н. Звонков [и др.] // Физика и техника полупроводников. - 2015. - Т. 49, № 3. - С. 370-375.
- 9 Huang, M. B. Enhanced radiation hardness of photoluminescence from InAs quantum dots embedded in an AlAs/GaAs superlattice structure / M. B. Huang, J. Zhu, S. Oktyabrsky // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. - 2003. - Vol. 211, No. 4. - P. 505-511.
- 10 Influence of defects on the optical and structural properties of Ge dots embedded in an Si/Ge superlattice / A. Fonseca, N.A. Sobolev, J.P. Leitão [et al.] // Journal of Luminescence. - 2006. - Vol. 121, No. 2. - P. 417-420.
- 11 Radiation hardness of GeSi heterostructures with thin Ge layers / J. P. Leitão, N. M. Santos, N. A. Sobolev [et al.] // Materials Science and Engineering: B. - 2008. - Vol. 147, No. 2-3. - P. 191-194.
- 12 Влияние радиационного воздействия на люминесцентные свойства низкоразмерных гетероструктур SiGe/Si(001) / А. В. Новиков, А. Н. Яблонский, В. В. Платонов [и др.] // Физика и техника полупроводников. - 2010. - Т. 44, № 3. - С. 346-351.

13 Сравнительный анализ радиационного воздействия на электролюминесценцию кремния и SiGe/Si(001)-гетероструктур с самоформирующимися наноструктурами / З. Ф. Красильник, К. Е. Кудрявцев, А. Н. Качемцев [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, № 2. – С. 230-234.

14 Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства Обзор / О. П. Пчеляков, Ю. Б. Болховитянов, А. В. Двуреченский [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34, № 11. – С. 1281-1299.

15 Pavesi, L. Will silicon be the photonic material of the third millenium? * / L. Pavesi // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2003. – Vol. 15, No. 26. – P. R1169-R1196.

16 Photoluminescence of the self assembled GeSi/Si(001) nanoislands grown by sublimation molecular beam epitaxy in GeH₄ ambient / D. O. Filatov, M. A. Isakov, V. G. Shengurov [et al.] // Photoluminescence: Applications, Types and Efficacy. – 2012. – P. 1-53.

17 Морфология и фотолюминесценция самоформирующихся нанокластеров GeSi/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде германа / Д. О. Филатов, М. В. Круглова, М. А. Исаков [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2008. – Т. 72, № 2. – С. 268-271.

18 Фотолюминесценция нанокластеров GeSi/Si, формирующихся в процессе сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде германа / Д. О. Филатов, М. В. Круглова, М. А. Исаков [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42, № 9. – С. 1116-1121.

19 Конфокальная рамановская микроскопия самоформирующихся островков GeSi/Si(001) / А. И. Машин, А. В. Нежданов, Д. О. Филатов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 11. – С. 1552-1558.

20 Wang, J.; Ge-Photodetectors for Si-Based Optoelectronic Integration / J. Wang, S. Lee // Sensors. – 2011, Vol. 11. – P. 696-718.

21 High performance germanium-on-silicon detectors for optical communications / S. Fama, L. Colace, G. Masini [et al.] // Applied Physics Letters. – 2002. – Vol. 81, No.4. – P. 586-588.

22 Low temperature growth of the epitaxial Ge layers on Si(100) by Hot Wire Chemical Vapor Deposition / S. A. Matveev, S. A. Denisov, D. V. Guseinov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 541, No. 1. – P. 012026.

23 Фотоэлектрические свойства и электролюминесценция p-i-n-диодов на основе гетероструктур с самоорганизованными нанокластерами GeSi/Si / Г. А. Максимов, З. Ф. Красильник, Д. О. Филатов [и др.] // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, № 1. – С. 26-28.

24 Mukherjee, C. Growth of epitaxial germanium films on silicon using hot-wire chemical vapor deposition / C. Mukherjee, H. Seitz, B. Schroder // *Applied Physics Letters*. – 2001. – Vol. 78, No. 22. – P. 3457-3459.

25 Установка и вакуумный метод эпитаксиального выращивания многослойных структур, содержащих слои Si, Ge и SiGe / В. Г. Шенгуров, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов [и др.] // *Вакуумная техника и технология*. – 2011. – Т. 21, № 1. – С. 45-48.

26 Strain relaxation by alloying effects in Ge islands grown on Si(001) / X. Z. Liao, J. Zou, D. J. H. Cockayne [et al.] // *Physical Review B*. – 1999. – Vol. 60, No. 23. – P. 15605-15608.

27 Исследование фотоэлектрических свойств гетероструктур GeSi/Si с самоформирующимися нанокластерами методом спектроскопии фотоэда на барьере полупроводник/электролит / Д. О. Филатов, М. В. Круглова, М. А. Исаков [и др.] // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2006. – № 2. – С. 40-47.

28. Steady-state carrier escape from single quantum wells / J. Nelson, M. Paxon, K. W. J. Barnham [et al.] // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1993. – Vol. 29, No. 6. – P. 1460-1468.

29 Фотоэлектрические свойства гетероструктур с самоформирующимися нанокластерами GeSi/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде GeH₄ / Д. О. Филатов, М. В. Круглова, М. А. Исаков [и др.] // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2009. – № 9. – С. 58-67 Д. О. Филатов и др. *Поверхность*, 2009, №9, С. 58.

30 Luminescence decay dynamics of self-assembled germanium islands in silicon / B. Julsgaard, P. Balling, J. Lundsgaard Hansen [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol. 98. – P. 093101.

31 Reduced pressure-chemical vapor deposition of Ge thick layers on Si(001) for 1.3-1.55- μ m photodetection / J. M. Hartmann, A. Abbadie, A. M. Papon [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2004. – Vol. 95, No. 10. – P. 5905-5913.

32 Near infrared image sensor with integrated germanium photodiodes / R. Kaufmann, G. Isella, A. Sanchez-Amores [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – Vol. 110, No. 2. – P. 023107-1171.

33 Moss, T. S. Photovoltaic and photoconductive theory applied to InSb / T. S. Moss // *International Journal of Electronics*. – 1955. – 126-133.

34 Goodman, A. M. A method for the measurement of short minority carrier diffusion lengths in semiconductors / A. M. Goodman // *Journal of Applied Physics*. – 1961. – Vol. 32, No. 12. – P. 2550-2552.

35 Скупов, А. В. Моделирование процессов образования радиационных дефектов в гетероструктурах с самоформирующимися nanoостровками Ge(Si)/Si(001) при облучении нейтронами / А. В. Скупов // *Физика и техника полупроводников*. – 2015. – Т. 49, № 5. – С. 634-637.