

**Байдакова Наталия Алексеевна**

**Процессы поглощения и излучения света  
в структурах с Ge(Si) самоформирующимися  
наноостровками, выращенными на различных  
подложках**

*Специальность* 05.27.01 — твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты, микро и наноэлектроника, приборы  
на квантовых эффектах

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород 2019

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Научный руководитель **Новиков Алексей Витальевич**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией молекулярно-пучковой эпитаксии полупроводниковых гетероструктур, заместитель директора по научно-технологическому развитию ИФМ РАН.

Официальные оппоненты **Бурдов Владимир Анатольевич**, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой теоретической физики Физического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

**Шамирзаев Тимур Сезгирович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярно-лучевой эпитаксии соединений АЗВ5 Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН.

Ведущая организация Физический институт имени П.Н.Лебедева Российской академии наук

Защита состоится 28 ноября 2019 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.03 при ФИЦ ИПФ РАН по адресу: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ РАН и на сайте [http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/2019\\_Baidakova/theses\\_Baidakova.pdf](http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/2019_Baidakova/theses_Baidakova.pdf)

Автореферат разослан \_\_ октября 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.069.03

д. ф.-м.н., профессор РАН

\_\_\_\_\_ Д.Ю. Водолазов

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

В последние годы физика низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур - одно из самых быстро развивающихся направлений физики. Интерес к данным объектам связан как с изучением фундаментальных физических явлений, проявляющихся в низкоразмерных системах, так и с возможностью применения гетероструктур в полупроводниковых приборах. Среди широкого класса полупроводниковых гетероструктур низкоразмерные SiGe гетероструктуры привлекают к себе повышенное внимание. Это обусловлено несколькими взаимосвязанными факторами. С одной стороны, из-за хорошо развитой технологии формирования SiGe гетероструктур и их относительной простоты по сравнению с гетероструктурами на основе материалов АЗВ5, эта гетеропара исторически является модельной для рассмотрения различных физических процессов в гетероструктурах. Это в полной мере относится к исследованию роста и свойств самоформирующихся nanoостровков и квантовых точек в SiGe гетеросистеме [1]. В частности, структуры с Ge(Si) островками являются модельными системами при изучении излучательных процессов в непрямозонных низкоразмерных гетероструктурах. С другой стороны, кремниевая технология является основной технологией современной наноэлектроники, в которой SiGe структуры находят все большее применение. Так, в последние годы с использованием SiGe гетероструктур связываются надежды на прогресс в развитии кремниевой оптоэлектроники, переход к которой позволяет существенно увеличить быстродействие интегральных схем. К настоящему времени прогресс в развитии технологий в этой области позволил реализовать большинство элементов для оптоэлектронных интегральных схем на основе кремния и его сплава с Ge: модуляторов, детекторов, систем оптической связи чипа с оптоволоконном и волноводов с низкими потерями [2,3]. Однако задача создания одного из ключевых оптоэлектронных элементов – эффективного источника излучения ближнего ИК диапазона на основе кремния – остается по-прежнему нерешенной. В настоящее время в этой роли используются лазеры на основе прямозонных материалов АЗВ5, которые интегрируются в кремниевые чипы с использованием технологии сращивания (bonding) [4]. Данный подход требует существенно больших технологических и финансовых затрат по сравнению с формированием светоизлучающих SiGe структур на кремниевых подложках. При этом в структурах с Ge(Si) nanoостровками наблюдается сигнал фото- и электролюминесценции в области длин волн 1,3 - 1,55 мкм [5-7] при комнатной

температуре, что позволяет рассматривать данный тип структур в качестве кандидата на создание источника излучения для оптоэлектронных схем.

В последние годы широкую популярность обрела идея увеличения эффективности излучательной рекомбинации в полупроводниковых структурах, за счет взаимодействия света с веществом в микрорезонаторах. И в этой области светоизлучающие структуры с Ge(Si) островками могут выступать в качестве модельной системы, так как наличие коммерчески доступных подложек «кремний на изоляторе», хорошо развитая технология постростовой обработки и трехмерная пространственная локализация носителей заряда в островках позволяют относительно легко формировать на их основе различные микрорезонаторы [8,9]. В тоже время структуры с Ge(Si) островками, встроенными в микрорезонаторы, представляют и практический интерес, так как сообщалось о наблюдении лазерной генерации при низких температурах [8] и многократном (до 150 раз) увеличении интенсивности сигнала фотолюминесценции островков при комнатной температуре [9] для подобных структур.

Таким образом, структуры с Ge(Si) самоформирующимися островками представляют интерес как с точки зрения фундаментальных исследований, в частности – изучения процессов поглощения света и излучательной рекомбинации носителей заряда в низкоразмерных гетероструктурах с гетерограницей II типа, так и с точки зрения приборных приложений. Настоящая диссертация посвящена исследованию процессов возбуждения фотолюминесценции и излучения света в структурах с Ge(Si) самоформирующимися островками, сформированными на подложках Si(001), «кремний-на-изоляторе», «напряженный кремний на изоляторе» и релаксированных SiGe/Si(001) буферах.

### **Степень разработанности темы исследования**

К моменту начала работы над диссертацией в литературе существовало множество работ, посвященных исследованию роста самоформирующихся Ge(Si) островков на подложках Si(001) [1]. Кроме того, к этому времени достаточно хорошо были исследованы излучательные свойства структур с Ge(Si)/Si(001) островками и изучено влияние условий формирования Ge(Si) островков и их параметров (размеров, состава, поверхностной плотности) на их люминесценцию [10,11]. При этом исследованию кинетических характеристик фотолюминесценции (ФЛ) Ge(Si) островков, которые дают информацию о процессах возбуждения ФЛ и излучения островков, было посвящено ограниченное число работ [12,13]. Кроме кинетических исследований

эффективным инструментом для изучения процессов возбуждения ФЛ островков, а так же исследования энергетических уровней, вовлеченных в процессы поглощения и излучения света, является спектроскопия возбуждения ФЛ. Тем не менее, автору настоящей диссертации известна лишь одна работа, посвященная исследованию структур с Ge(Si) островками методом спектроскопии возбуждения ФЛ [14]. Отметим также, что особенности оптических свойств структур с Ge(Si) островками, сформированными на подложках «кремний-на-изоляторе», которые используются для создания кремниевых оптоэлектронных схем, оставались неизученными.

Одним из препятствий на пути эффективной излучательной рекомбинации в структурах с Ge(Si) островками является слабая пространственная локализация электронов вблизи островков. Ранее для решения данной проблемы было предложено использовать встраивание Ge(Si) островков в напряженный Si слой, сформированный на релаксированном  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$  буфере [15]. К моменту начала работ над диссертацией были подробно изучены особенности роста Ge(Si) островков на релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоях с напряженными (растянутыми) слоями Si [16,17] и выполнены предварительные исследования оптических свойств таких структур [15,18]. Однако для данного типа структур не были установлены процессы, определяющие ширину линии ФЛ, отсутствовали исследования температурного гашения их ФЛ. Также не были получены диодные структуры с Ge(Si) островками на SiGe/Si(001) буферах и не были исследованы их электролюминесцентные (ЭЛ) свойства. Кроме того, автору диссертации неизвестно о попытках создания структур с Ge(Si) островками, заключенными между напряженными слоями кремния, на другом типе новых подложек на основе кремния, перспективных для применений в интегральной технологии, - подложек на основе структур «напряженный кремний-на-изоляторе».

### **Цели и задачи**

Целью данной диссертации является установление основных механизмов возбуждения и девозбуждения сигналов люминесценции в светоизлучающих структурах с самоформирующимися Ge(Si) островками, определение влияния условий формирования структур на эффективность данных механизмов и выявления возможностей управления их сигналами люминесценции с помощью изменения параметров структур. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Адаптация методики спектроскопии возбуждения ФЛ для исследования излучательных свойств структур с Ge(Si) самоформирующимися островками,

обладающих широким спектром ФЛ, форма которого существенно зависит от мощности и длины волны возбуждающего излучения.

2. Выявление и характеристика основных механизмов возбуждения ФЛ и излучательных процессов, вносящих вклад в ФЛ Ge(Si) островков, за счет изучения динамики фотовозбужденных носителей заряда в структурах с Ge(Si) островками в зависимости от условий измерений и типа подложки.

3. Использование встраивания Ge(Si) островков между напряженными слоями Si, сформированными на релаксированном SiGe буфере, с целью управления формой сигнала ФЛ островков.

4. Развитие технологических подходов для формирования светоизлучающих SiGe структур на подложках «напряженный кремний-на-изоляторе».

### **Научная новизна работы**

1. Впервые выполненные детальные исследования спектральных и временных характеристик ФЛ структур с Ge(Si) островками при различных температурах и длинах волн возбуждающего излучения позволили выделить и исследовать сигналы, связанные с пространственно прямой и пространственно непрямой излучательной рекомбинацией носителей заряда в островках. Рассмотрен вклад, вносимый каждым из этих сигналов, в общий сигнал ФЛ Ge(Si) островков в зависимости от условий измерения и параметров структур. Продемонстрировано, что при межзонной оптической накачке основной вклад в возбуждение ФЛ Ge(Si) островков вносят механизмы поглощения и диффузии носителей заряда в кремниевой матрице.

2. С использованием модифицированной методики спектроскопии возбуждения ФЛ впервые для структур с Ge(Si)/Si(001) островками получен спектр возбуждения ФЛ, учитывающий изменение сигнала ФЛ островков при изменении длины волны возбуждения. Показано, что в условиях подзонной для кремния оптической накачки поглощение излучения непосредственно в Ge(Si) островках становится основным механизмом возбуждения ФЛ.

3. Продемонстрирована возможность уменьшения ширины линии ФЛ структур с Ge(Si) островками, заключенными между напряженными слоями кремния, за счет компенсации диффузионного размытия верхнего слоя. Получены структуры с рекордно узкой для структур с массивом пространственно неупорядоченных Ge(Si) самоформирующихся островков линией ФЛ (20-30 мэВ при температуре 20 К).

4. Впервые на подложках “напряженный кремний на изоляторе” с тонким напряженным слоем Si и тонким захороненным слоем SiO<sub>2</sub> получены эпитаксиальные светоизлучающие SiGe структуры.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в получении новых знаний об оптических свойствах структур с Ge(Si) самоформирующимися островками. Для данного типа структур наглядно продемонстрировано, что основным каналом возбуждения ФЛ островков является возбуждение через кремниевую матрицу, однако непосредственное поглощение на пространственно прямых переходах в островках также возможно и становится доминирующим при возбуждении излучением с энергией кванта меньшей ширины запрещенной зоны кремния. Кроме того, показано, что, несмотря на гетеропереход II рода, в Ge(Si) самоформирующихся островках возможно наблюдение пространственно прямых излучательных переходов. Полученные результаты могут быть качественно обобщены для случая других структур с гетеропереходом II рода.

К практической значимости работы можно отнести разработку методики спектроскопии возбуждения фотолуминесценции, подходящей для исследования свойств структур с Ge(Si) самоформирующимися островками, обладающих широким спектром ФЛ, форма которого существенно зависит от мощности и длины волны возбуждающего излучения. К практической значимости работы также относится отработка методики предростовой химической и термической подготовки подложек “напряженный кремний на изоляторе” с тонким напряженным слоем Si и тонким захороненным слоем SiO<sub>2</sub>, которая позволила использовать данный тип подложек для формирования эпитаксиальных светоизлучающих SiGe гетероструктур.

### **Методология и методы исследования**

Основные результаты были получены при помощи экспериментальных методик стационарной спектроскопии фото- и электролюминесценции, спектроскопии фотолуминесценции с наносекундным временным разрешением с использованием перестраиваемого источника импульсного излучения, а также методики спектроскопии возбуждения фотолуминесценции, модифицированной для задачи исследования структур с Ge(Si) островками. Для получения и характеристики исследуемых структур использовались молекулярно-пучковая эпитаксия SiGe структур, просвечивающая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, рентгено-дифракционный анализ.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Для структур с Ge(Si) самоформирующимися наноструктурами, выращенными на подложках Si(001) и «кремний на изоляторе», в условиях межзонного для кремния оптического возбуждения и низких температур ( $< 10$  K) сигнал ФЛ островков преимущественно связан с рекомбинацией носителей заряда, фотоиндуцированных в эпитаксиальном слое в окрестности островков. При более высоких температурах существенный вклад в возбуждение ФЛ Ge(Si) островков, выращенных на Si(001) подложках, вносит диффузия носителей заряда из Si подложки.

2. В условиях подзонной для кремния оптической накачки основной вклад в возбуждение ФЛ Ge(Si) островков дает поглощение излучения накачки на пространственно прямых оптических переходах непосредственно в Ge(Si) островках.

3. Использование модифицированной методики спектроскопии возбуждения ФЛ, состоящей в регистрации спектро-кинетических зависимостей ФЛ исследуемых структур при различных длинах волн возбуждающего излучения, позволяет учитывать изменение формы спектра Ge(Si) островков при изменении условий их оптической накачки. Это дает возможность получать спектры возбуждения ФЛ для различных компонент, соответствующих различным излучательным процессам в структурах с Ge(Si) островками.

4. Ширина линии ФЛ Ge(Si) самоформирующихся наноструктур, выращенных на релаксированных SiGe/Si(001) буферах и встроенных между напряженными (растянутыми) Si слоями зависит от соотношения толщин этих слоев над и под островками. Компенсация диффузионного размытия слоя напряженного Si над островками за счет увеличения его толщины по сравнению с Si под островками позволяет уменьшить ширину линии ФЛ Ge(Si) островков до значений 25-30 мэВ, сравнимых с шириной линии ФЛ массива неупорядоченных квантовых точек в прямозонных полупроводниках на основе InAs/GaAs.

5. Использование подложек «напряженный кремний на изоляторе» с тонким напряженным слоем Si и тонким (25 нм) захороненным слоем SiO<sub>2</sub> для эпитаксиального роста SiGe структур возможно при учете более низкой температурной стабильности этих подложек по сравнению с подложками «напряженный кремний на изоляторе» с толстым ( $>100$  нм) захороненным слоем SiO<sub>2</sub>.



## **Личный вклад автора**

Все результаты настоящей диссертации получены автором лично или при его непосредственном участии. Вклад автора является определяющим в исследовании фото- и электролюминесценции структур с Ge(Si) островками, заключенными между напряженными слоями Si, сформированными на релаксированных SiGe буферах и подложках «напряженный кремний-на-изоляторе», анализе температурных зависимостей ФЛ данных структур, а также в анализе спектров возбуждения ФЛ структур с Ge(Si)/Si(001) островками. Автором работы внесен равноценный вклад (совместно с А.Н. Яблонским) в разработку модифицированной методики спектроскопии возбуждения фотолуминесценции, исследование структур с Ge(Si)/Si(001) и Ge(Si)/SOI островками методами спектроскопии ФЛ с временным разрешением и спектроскопии возбуждения ФЛ, интерпретацию кинетических зависимостей ФЛ Ge(Si) островков, а также в интерпретацию спектров ФЛ структур с Ge(Si) островками, заключенными между напряженными слоями Si, сформированными на релаксированных SiGe буферах (совместно с М.В. Шалеевым и А.В. Новиковым). Автор настоящей работы принимал участие (совместно с Д.В. Юрасовым, М.В. Шалеевым и А.В. Новиковым) в отработке технологии формирования эпитаксиальных SiGe гетероструктур на подложках «напряженный кремний на изоляторе» с тонкими слоями напряженного Si и захороненного слоя окисла.

## **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертации опубликованы в статьях в реферируемых журналах [A1-A7], а также докладывались на следующих конференциях: XIII - XXI Международные симпозиумы "Нанофизика и наноэлектроника" (Нижний Новгород 2009-2017); VII - XI Конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний» (Нижний Новгород 2010, Санкт-Петербург 2012, Иркутск 2014, Новосибирск 2016); Международная конференция Европейского материаловедческого сообщества E-MRS (Ницца 2011, Лилль 2014); Международная конференция "Quantum Dot 2010" (Ноттингем 2010); Международная конференция 11th International Conference on Group IV Photonics (Париж 2014); XI Российской конференции по физике полупроводников (Санкт-Петербург 2013); XVIII Уральская международная школа по физике полупроводников (Екатеринбург 2010); XII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург 2011); Всероссийская конференция

«Импульсная сильноточная и полупроводниковая электроника -2015» (Москва 2015).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликована 31 печатная работа, в том числе 7 статей в реферируемых журналах и 24 публикации в сборниках тезисов и трудов конференций и симпозиумов.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из **Введения, основной части** (4 Главы) и **Заключения**. Объем диссертации составляет 178 страниц, включая 67 рисунков и 6 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 201 наименование, список работ автора по теме диссертации –31 наименование.

### **Содержание работы.**

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, показана ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели работы, представлены сведения о структуре и содержании работы, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** проведен обзор работ, посвященных исследованию роста и оптических свойств структур с Ge(Si) самоформирующимися островками, выращенными на подложках Si(001) и релаксированных SiGe буферных слоях.

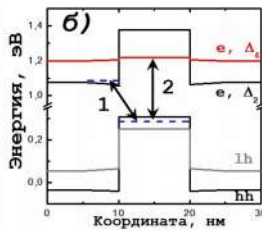
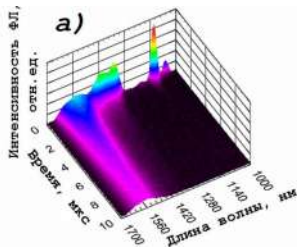
Как известно, одной из особенностей гетеропары Ge/Si является рассогласование постоянных кристаллических решеток кремния и германия на 4,2%. Это приводит к накоплению упругих напряжений в данных гетероструктурах при увеличении толщины осажденных SiGe слоев и накладывает ограничение на толщину их псевдоморфного роста. При определенных условиях роста и составе осаждаемых SiGe слоев накопленные упругие напряжения могут приводить к образованию трехмерных самоформирующихся объектов – Ge(Si) наностроек и квантовых точек. В Главе 1 приводится подробный обзор работ, исследующих рост самоформирующихся Ge(Si) островков на подложках Si(001) и влияние различных условий роста структур и параметров Ge(Si) островков (размеров, состава, плотности) на их люминесценцию, а также рассматриваются немногие существующие работы, посвященные кинетическим исследованиям ФЛ структур с Ge(Si) островками. Как правило, сигнал ФЛ Ge(Si) островков связывается с пространственно непрямой излучательной рекомбинацией дырок, локализованных в островках, и электронов, находящихся в Si на гетерогранице

островка в потенциальной яме, образованной полями упругих напряжений и кулоновским потенциалом. Также согласно отдельным работам в данном типе структур возможно наблюдение пространственно прямой излучательной рекомбинации электронов и дырок, находящихся в островке. Согласно литературным данным сигнал ФЛ, связанный с рекомбинацией пространственно разделенных носителей заряда, наблюдается на временах до десятков миллисекунд, в то время как пространственно прямые переходы в островках характеризуются временами спада  $\sim$  единиц микросекунд.

Также в Главе 1 отдельно рассмотрены результаты по использованию встраивания Ge(Si) островков в напряженные (растянутые) слои Si (sSi слои) (Ge(Si)/sSi островки), сформированные на релаксированных SiGe буферах, для улучшения пространственной локализации электронов вблизи островков. Данный тип структур характеризуется большей ( $\sim 10$  раз) интенсивностью ФЛ островков при температуре 77 К и меньшей шириной линии ФЛ по сравнению со структурами с Ge(Si) островками, сформированными на подложках Si(001).

**Глава 2** настоящей диссертации посвящена описанию методики формирования структур с Ge(Si) островками и методов их характеристики. В разделах 2.1 и 2.2 приводится описание методики и условий эпитаксиального роста исследованных в диссертации структур с самоформирующимися Ge(Si) островками на подложках Si(001), кремний-на-изоляторе и релаксированных SiGe буферных слоях. Описаны основные параметры и характеристики исследуемых в работе структур. В разделе 2.3 подробно описаны методы измерения ФЛ структур с Ge(Si) островками, сформированными на различных подложках, в условиях непрерывного и импульсного оптического возбуждения. Параграфы 2.3.4 и 2.3.5 представляют собой оригинальную часть работы и содержат описание методики спектроскопии возбуждения ФЛ, модифицированной для исследования излучательных свойств структур с Ge(Si) островками. Суть модифицированной методики спектроскопии возбуждения ФЛ состоит в регистрации спектро-кинетических зависимостей ФЛ исследуемых структур при различных длинах волн возбуждающего излучения. Использование данной методики позволяет учесть изменение формы спектра ФЛ Ge(Si) островков при изменении длины волны возбуждения. Данный подход дает возможность получать спектры возбуждения для различных компонент сигнала ФЛ исследуемых структур, соответствующих различным излучательным процессам в островках, и также выделить и исключить из последующего анализа компоненты в спектре ФЛ исследованных структур, не связанные с излучательной рекомбинацией носителей заряда в Ge(Si) островках. В разделе 2.4 приведено краткое описание метода расчета зонных диаграмм SiGe гетероструктур.

**Глава 3** посвящена исследованию излучательных свойств структур с Ge(Si) островками, выращенными на подложках Si(001) и «кремний на изоляторе» (SOI), методами спектроскопии ФЛ с наносекундным временным разрешением и спектроскопии возбуждения ФЛ. Была исследована серия многослойных (20



**Рис. 1.** а) Спектро-кинетическая зависимость ФЛ структуры с Ge(Si)/Si(001) островками.  $T_p = 650^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{изм.}} = 20\text{ K}$ ,  $\lambda_{\text{ex}} = 650\text{ нм}$ . б) Рассчитанная зонная диаграмма и уровни энергии размерного квантования электронов и дырок в Ge(Si) островке для многослойной структуры, сформированной при  $650^\circ\text{C}$ .

слоев) структур с Ge(Si) островками, сформированными при температурах  $600\text{--}700^\circ\text{C}$ . В спектро-кинетических зависимостях ФЛ исследованных структур наблюдаются несколько типов сигналов (рис. 1а), связанных с различными излучательными процессами: межзонная ФЛ

Si (сигнал вблизи  $1130\text{ нм}$ ), ФЛ смачивающего слоя (не показан на рисунке), ФЛ, связанная с пространственно непрямой (сигнал с максимумом на  $1580\text{ нм}$ ) и пространственно прямой (сигнал с максимумом на  $1370\text{ нм}$ ) излучательной рекомбинацией в островках. Сигнал ФЛ, связанный с пространственно непрямой излучательной рекомбинацией в островках (переход 1 на рис. 1б) наблюдается на временах до десятков миллисекунд. При этом при высоких мощностях возбуждения для пространственно непрямой излучательной рекомбинации характерно также наличие «быстрого» канала рекомбинации (времена спада интенсивности ФЛ до  $50\text{ мкс}$ ) через гетерограницу островка, связанного с улучшением перекрытия волновых функций пространственно разделенных носителей заряда в результате кулоновского искривления зон. В то же время, пространственно прямые излучательные переходы в островках (переход 2 на рис. 1б) характеризуются временами спада  $0.1\text{--}1\text{ мкс}$ . Для исследуемых структур проведен расчет зонной диаграммы (рис. 1б), подтверждающий связь наблюдаемых сигналов ФЛ с излучательными переходами в островках. Поскольку увеличение температуры формирования структур с Ge(Si) островками из-за роста доли Si в островках приводит к уменьшению разницы энергий пространственно прямых и пространственно не прямых излучательных переходов в островках, в структурах, выращенных при температурах выше  $650^\circ\text{C}$ , наблюдается перекрытие спектральных областей, соответствующих различным процессам излучательной рекомбинации в островках. При непрерывном оптическом возбуждении основной

вклад в сигнал ФЛ островков, сформированных при температурах ниже  $650^{\circ}\text{C}$ , вносят пространственно не прямые излучательные переходы, тогда как в островках, сформированных при температурах выше  $650^{\circ}\text{C}$ , интенсивность и положение сигнала ФЛ определяется преимущественно вкладом пространственно прямых переходов.

В разделе 3.3 представлены результаты изучения кинетических кривых ФЛ Ge(Si) островков при различных условиях возбуждения (температура, длина волны возбуждения), направленного на исследование динамики фотовозбужденных носителей заряда в структурах с Ge(Si) островками и определение основных механизмов возбуждения ФЛ Ge(Si) островков. Обнаружено, что при низких температурах ( $< 10\text{ K}$ ) сигнал ФЛ островков преимущественно связан с рекомбинацией носителей заряда, сгенерированных в эпитаксиальном слое в окрестности островков. При более высоких температурах существенный вклад в возбуждение ФЛ Ge(Si)/Si(001) островков вносит диффузия носителей заряда из Si подложки. Это сопровождается возрастанием интенсивности ФЛ островков при увеличении температуры от 4 до 70 K. При этом роль диффузии носителей заряда из подложки в возбуждении ФЛ Ge(Si) островков увеличивается при возрастании длины волны возбуждающего излучения вблизи края межзонного поглощения в кремнии. В то же время, в структурах, сформированных на подложках SOI, из-за наличия скрытого слоя  $\text{SiO}_2$ , препятствующего диффузии носителей заряда из Si подложки, возрастания интенсивности ФЛ с ростом температуры не наблюдается.

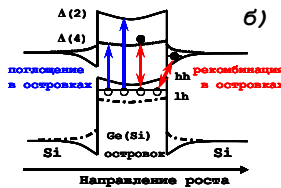
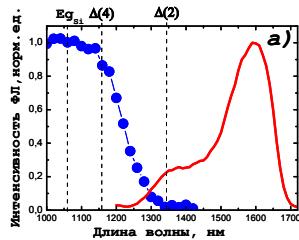


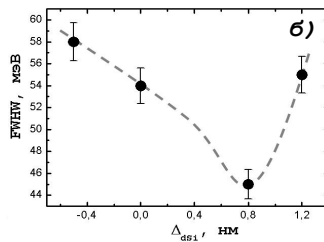
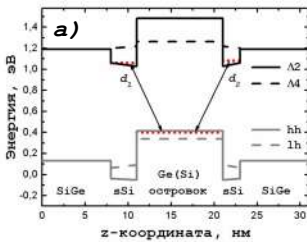
Рис. 2. а) Спектр возбуждения ФЛ (-●-), соответствующей пространственно не прямой излучательной рекомбинации в Ge(Si) островках, полученных при  $T_p = 650^{\circ}\text{C}$ , и спектр их ФЛ при непрерывном оптическом возбуждении (-). б) Схематическое изображение процессов поглощения излучения и излучательной рекомбинации в Ge(Si) островке.

Раздел 3.4 посвящен исследованию спектров возбуждения ФЛ Ge(Si) островков и обсуждению механизмов возбуждения ФЛ Ge(Si) островков в условиях подзонной для Si оптической накачки. Продемонстрировано, что сигнал ФЛ, связанный с пространственно не прямой рекомбинацией в островках,

наблюдается и в области энергий меньших ширины запрещенной зоны Si (рис. 2а). Сравнительное исследование сигналов ФЛ Ge(Si) островков и экситонной ФЛ в кремнии при подзонном и межзонном для Si возбуждении подтвердило, что

возбуждение сигнала ФЛ островков при длинах волн накачки  $\lambda_{ex} > 1060$  нм связано с поглощением в островках. Сравнение спектров возбуждения ФЛ островков, спектров ФЛ островков, полученных при непрерывной накачке, и рассчитанных зонных диаграмм показало (рис. 2), что при поглощении в островках задействованы переходы электронов как в  $2\Delta$ -, так и в  $4\Delta$ - долины, в то время как сигнал ФЛ, связанный с пространственно прямыми переходами, вызван рекомбинацией электронов, находящихся в  $4\Delta$ - долинах. Край поглощения в островках определяется положением дна  $2\Delta$ - и  $4\Delta$ - долин в островках (вертикальные линии на рис. 2а).

**Глава 4** посвящена исследованию структур с Ge(Si) островками, заключенными между напряженными слоями Si (Ge(Si)/sSi островки). В разделе 4.2 рассматриваются оптические свойства структур с Ge(Si)/sSi островками, сформированными на релаксированном SiGe буфере. Поскольку сигнал ФЛ Ge(Si)/sSi островков складывается из рекомбинации носителей заряда на нижней и верхней гетерогранице островка, разные толщины слоев напряженного Si под ( $d_1$ ) и над ( $d_2$ ) островками приводят к уширению линии ФЛ островков за счет разной глубины потенциальных ям для электронов на разных гетерограницах (рис. 3а). При этом из-за более сильного диффузионного размытия верхнего слоя sSi при зарастивании островков увеличение ширины линии ФЛ возможно и для структур с номинально одинаковыми толщинами sSi слоев под и над островками. Компенсация различного диффузионного размытия слоев возможна за счет формирования более толстого верхнего sSi слоя. Была исследована серия структур с различной разницей толщин слоев sSi ( $\Delta_{sSi} = d_2 - d_1$ ), и показано, что для



**Рис. 3.** а) Рассчитанная зонная диаграмма и положение уровней различного квантования в структуре с Ge(Si) самоформирующимися островками, заключенными между sSi слоями с толщинами  $d_1 = 3$  нм и  $d_2 = 2$  нм. Содержание Ge в буферном слое  $x_{buff} = 24$  %. б) Зависимость ширины линии ФЛ Ge(Si)/sSi островков на ее полувысоте от разницы между номинальными толщинами sSi слоев над и под островками ( $\Delta_{sSi}$ ) для структур с  $d_1 = 1.5$  нм.  $T_{изм} = 77$  К.

структур с  $d_1 = 1.5$  нм наиболее узкая линия (FWHM = 45 мэВ) наблюдается при  $\Delta_{sSi} = 0.8$  нм (рис. 3б). При низкой (20 К) температуре ширина линии ФЛ данной структуры составляет 20-30 мэВ, что является рекордным значением для

структур с Ge(Si) островками, сформированными на неструктурированных подложках, и сравнимо с шириной линии ФЛ от квантовых точек InAs/GaAs.

Исследование температурных зависимостей ФЛ структур с Ge(Si)/sSi островками показало, что сильное температурное гашение сигнала ФЛ в области температур  $>100$  К связано с термическим выбросом дырок из Ge(Si)/sSi островков и электронов из sSi слоев и их последующей безызлучательной рекомбинацией на дефектах окружающей SiGe матрицы. Было сделано предположение, что избавление от дефектного релаксированного SiGe буфера поможет улучшить температурную стабильность ФЛ Ge(Si)/sSi островков. Для проверки данной гипотезы была исследована возможность формирования SiGe гетероструктур на подложках «напряженный кремний на изоляторе» с тонким напряженным слоем Si и тонким захороненным слоем SiO<sub>2</sub> (далее - sSOI подложки). Для данного типа подложек была отработана методика предростовой химической и термической очистки, позволяющая сохранить упругие напряжения в sSi слое и очистить поверхность от основных загрязняющих примесей. На подложках sSOI были сформированы структуры с Ge(Si)/sSi островками, интенсивность ФЛ которых близка к интенсивности ФЛ Ge(Si)/sSi островков, сформированных на SiGe релаксированном буфере. При этом в спектре ФЛ структур на sSOI подложках не наблюдается сигнала, связанного с дислокациями SiGe буфера. Однако исследование температурных зависимостей ФЛ показало, что для структур на подложках sSOI и SiGe буферных слоях наблюдается близкое температурное гашение. На основании этого сделан вывод, что температурное гашение сигнала ФЛ Ge(Si)/sSi островков связано с безызлучательной рекомбинацией на прорастающих дислокациях, присутствующих в обоих типах структур.

В разделе 4.4 приводятся результаты впервые выполненных исследований спектров электролюминесценции (ЭЛ) структур с Ge(Si)/sSi наноструктурами, сформированными на релаксированных SiGe буферных слоях. Сигнал ЭЛ Ge(Si)/sSi островков наблюдается в диапазоне длин волн 1.6-2.0 мкм и регистрируется при комнатной температуре, что позволяет рассматривать данный тип структур в качестве кандидатов для создания на кремнии источников излучения в диапазоне длин волн  $> 1.55$  мкм.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе.

#### **Основные результаты:**

1. Для исследования процессов поглощения и излучения света в структурах с Ge(Si) наноструктурами была модифицирована методика спектроскопии возбуждения ФЛ, позволяющая учитывать изменение формы сигнала ФЛ Ge(Si)

островков в зависимости от длины волны возбуждения и получать спектры возбуждения ФЛ для различных излучательных процессов в островках.

2. Впервые в спектро-кинетических зависимостях ФЛ структур с Ge(Si) наноструктурами выделены сигналы ФЛ, соответствующие процессам пространственно не прямой и пространственно прямой излучательной рекомбинации носителей заряда в островках. Сигнал ФЛ, связанный с пространственно не прямой излучательной рекомбинацией, наблюдается на временах до десятков миллисекунд после возбуждающего импульса, в то время как пространственно прямые излучательные переходы в островках характеризуются более короткими временами спада (0.1-1 мкс). При высоких мощностях возбуждения для пространственно не прямой излучательной рекомбинации характерно также наличие «быстрого» канала (времена спада интенсивности ФЛ до 50 мкс), существование которого обусловлено увеличением перекрытия волновых функций пространственно разделенных носителей заряда при увеличении уровня оптической накачки.

3. Из полученных спектров возбуждения ФЛ Ge(Si) островков и зависимостей кинетики их ФЛ от условий измерения (температура, длина волны и мощность возбуждения) определены основные механизмы возбуждения ФЛ островков. Показано, что при межзонной для Si оптической накачке основной вклад в возбуждение ФЛ островков вносит захват носителей заряда из кремниевой матрицы. При этом при низких температурах ( $< 10$  К) основной вклад в возбуждение ФЛ вносят носители заряда, фотоиндуцированные в эпитаксиальном слое в окрестности островков, в то время как при более высоких температурах существенную роль играет диффузия носителей заряда из Si подложки. Продолжительная диффузия неравновесных носителей заряда из кремниевой матрицы в область Ge(Si) островков также приводит к существенному различию спектров возбуждения сигналов ФЛ, связанных с пространственно не прямой излучательной рекомбинацией носителей заряда в островках, но характеризующихся различными временами спада. В условиях подзонной для кремния оптической накачки основной вклад в возбуждение сигнала ФЛ островков дает поглощение возбуждающего излучения на пространственно прямых переходах в Ge(Si) островках.

4. Для структур с Ge(Si) самоформирующимися наноструктурами, выращенными на релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоях, впервые продемонстрирована возможность уменьшения ширины линии ФЛ за счет компенсации различного диффузионного размытия слоев напряженного Si под и над островками.



Получены структуры с рекордно узкой для структур с пространственно неупорядоченными SiGe самоформирующимися островками линией ФЛ (ширина на полувысоте 20-30 мэВ при температуре 20 К), ширина которой сравнима с шириной линии ФЛ от квантовых точек InAs/GaAs.

5. Отработана методика предростовой химической и термической очистки подложек “напряженный кремний на изоляторе” с тонким напряженным слоем Si и тонким захороненным слоем SiO<sub>2</sub>, позволяющая сохранить упругие напряжения в sSi слое и очистить поверхность от основных загрязняющих примесей. На данном типе SOI подложек впервые получены эпитаксиальные SiGe структуры с самоформирующимися наноструктурами, демонстрирующие сигнал ФЛ, интенсивность которого сравнима с интенсивностью сигнала ФЛ от структур с Ge(Si)/sSi островками, выращенными на SiGe/Si(001) релаксированных буферных слоях.

6. Впервые выполнены исследования спектров электролюминесценции структур с Ge(Si)/sSi наноструктурами, сформированных на релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоях. Сигнал ЭЛ Ge(Si)/sSi островков наблюдается в диапазоне длин волн 1.6-2.0 мкм вплоть до комнатной температуры, что позволяет рассматривать данный тип структур в качестве кандидатов для создания на кремнии источников излучения для диапазона длин волн > 1.55 мкм.

#### **Список цитируемой литературы:**

- [1] K. Brunner. Si/Ge nanostructures/ K. Brunner// Repots on Progress in Physics. – 2002. V. 65. – P. 27.
- [2] Xia Chen, Chao Li and Hon K. Tsang, Device engineering for silicon photonics, // NPG Asia Materials, V. 3(1), p. 34 (2011).
- [3] Z. Fang, C.Z. Zhao, Recent Progress in Silicon Photonics: A Review, ISRN Optics, V. 2012, Article ID 428690 (2012).
- [4] R.W. Kelsall, Rubber stamp for silicon photonics / R.W. Kelsall // Nature Photonics. – 2012. – V. 6. – P. 577.
- [5] R. Apertz. Photoluminescence and electroluminescence of SiGe dots fabricated by island growth / R. Apertz, L. Vescan, A. Hartmann, C. Dieker, H. Luth// Applied Physics Letters – 1995. V. 66. – P. 445 – 447.
- [6] W.-H. Chang. Room-temperature electroluminescence at 1.3 and 1.5 μm from Ge/Si self-assembled quantum dots/ W.-H. Chang, A.T.Chou, W.Y.Chen, H.S.Chang, T.M.Hsu, Z.Pei,P.S.Chen, S.W.Lee, L.S.Lai, S.C.Lu, M.-J.Tsai// Applied Physics Letters – 2003. V. 83- P. 2958.

- [7] Yu.N. Drozdov. Comparative analysis of photo- and electroluminescence of multilayer structures with Ge(Si)/Si(001) self-assembled islands/ Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasilnik, K.E. Kudryavtsev, D.N. Lobanov, A.V. Novikov, M.V. Shaleev, D.V. Shengurov, V.B. Shmagin, A.N. Yablonskiy // *Thin Solid Films* – 2008 - V. 517 – P. 398-400.
- [8] M. Grydlik. Lasing from Glassy Ge Quantum Dots in Crystalline Si /M. Grydlik, F. Hackl, H. Groiss, M. Glaser, A. Halilovic, T. Fromherz, W. Jantsch, F. Schäffler, and M. Brehm // *ACS Photonics*. – 2016. – V. 3. – P. 298–303.
- [9] X. Xu. Enhancement of light emission from Ge quantum dots by photonic crystal nanocavities at room-temperature / X. X, N. Usami, T. Maruizumi, Y. Shiraki // *Journal of Crystal Growth*. – 2013. – V. 378. – P. 636-639.
- [10] O.G. Schmidt. Multiple layers of self-assembled Ge/Si islands: Photoluminescence, strain fields, material interdiffusion, and island formation/ O.G. Schmidt and K. Eberl// *Physical.Review B* – 2000. V. 61(20) – P. 13721-13729.
- [11] L. Tsybeskov. Silicon–germanium nanostructures for on-chip optical interconnects/ L. Tsybeskov, E.-K. Lee, H.-Y. Chang, D. J. Lockwood, J.-M. Baribeau, X. Wu, T. I. Kamins// *Applied Physics A* – 2009.V. 95 –P. 1015-1027.
- [12] B.V. Kamenev . Coexistence of fast and slow luminescence in three-dimensional SiSi<sub>1-x</sub>Gex nanostructures. B. V. Kamenev, L. Tsybeskov, J.-M. Baribeau, and D. J. Lockwood// *Physical Review B*. – 2005. V. 72 – P. 193306.
- [13] B. Julsgaard. Luminescence decay dynamics of self-assembled germanium islands in silicon/ B. Julsgaard, P. Balling, J. Lundsgaard Hansen, A. Svane, and A. Nylandsted Larsen// *Applied Physics Letters* – 2011. V. 98 – P. 093101.
- [14] B. Adnane. Spatially direct and indirect transitions of self-assembled GeSi/Si quantum dots studied by photoluminescence excitation spectroscopy/ B. Adnane, K.F. Karlsson, G.V. Hansson, P.O. Holtz and W.-X. Ni// *Applied Physics Letters* – 2010. V. 96 – P. 181107.
- [15] A.V. Novikov. Intense photoluminescence from Ge(Si) self-assembled islands embedded in a tensile-strained Si layer/ A.V. Novikov, M.V. Shaleev, A.N. Yablonskiy, O.A. Kuznetsov, Yu.N. Drozdov, D.N. Lobanov and Z.F. Krasilnik// *Semiconductor Science and Technology* – 2007. V. 22 – S29 – S32.
- [16] M. V. Shaleev. Ge self-assembled islands grown on SiGe/Si(001) relaxed buffer layers / M. V. Shaleev, A. V. Novikov, O. A. Kuznetsov, A. N. Yablonsky, N. V. Vostokov, Yu. N. Drozdov, D. N. Lobanov, Z. F. Krasilnik // *Materials Science and Engineering B*. – 2005. – V. 124–125C. – P. 466–469.

[17] M. V. Shaleev. Transition from planar to island growth mode in SiGe structures fabricated on SiGe/Si(001) strain-relaxed buffers / M. V. Shaleev, A. V. Novikov, D. V. Yurasov, J. M. Hartmann, O. A. Kuznetsov, D. N. Lobanov, and Z. F. Krasilnik// Applied Physics Letters. – 2012. – V. 101. – P. 151601.

[18] M. V. Shaleev. Photoluminescence of dome and hut shaped Ge(Si) self-assembled islands embedded in a tensile-strained Si layer/ M. V. Shaleev, A. V. Novikov, A. N. Yablonskiy, Y. N. Drozdov, D. N. Lobanov, Z. F. Krasilnik, and O. A. Kuznetsov// Applied Physics Letters. – 2007. – V. 91. – P. 021916.

#### **Список основных публикаций автора по теме диссертации:**

[A1]. Н.А. Байдакова, А.В. Новиков, Д.Н. Лобанов, А.Н. Яблонский «Метод спектроскопии возбуждения фотолюминесценции, модифицированный для исследования структур с самоформирующимися Ge(Si)/Si(001) nanoостровками»// Письма в журнал технической физики, **38**(18), с. 7 – 15 (2012)

[A2]. А.Н. Яблонский, Н.А. Байдакова, А.В. Новиков, Д.Н. Лобанов «Кинетика фотолюминесценции самоформирующихся Ge(Si) островков в многослойных структурах SiGe/Si и SiGe/SOI»// ФТП, **47**(11), с. 1509 – 1512 (2013)

[A3] А.Н. Яблонский, Н.А. Байдакова, А.В. Новиков, Д.Н. Лобанов, М.В. Шалеев, «Спектры возбуждения и кинетика фотолюминесценции в структурах с самоформирующимися Ge(Si) nanoостровками», ФТП 49(11), 1458-1462 (2015).

[A4] М.В. Шалеев, А.В. Новиков, Н.А. Байдакова, А.Н. Яблонский, О.А. Кузнецов, Д.Н. Лобанов, З.Ф. Красильник “Ширина линии фотолюминесценции от самоформирующихся островков Ge(Si), заключенных между напряженными Si-слоями”//Физика и техника полупроводников т.45, вып. 2, pp. 202-206 (2011)

[A5] M. Shaleev, A. Novikov, N. Baydakova, A. Yablonskiy, O. Kuznetsov, Yu. Drozdov, D. Lobanov, and Z. Krasilnik “Narrow photoluminescence peak from Ge(Si) islands embedded between tensile-strained Si layers”// Phys. Status Solidi V. **8**, No. 3, pp. 1055–1059 (2011)

[A6] Н.А. Байдакова, А.И. Бобров, М.Н. Дроздов, А.В. Новиков, Д.А. Павлов, М.В. Шалеев, П.А. Юнин, Д.В. Юрасов, «Рост светоизлучающих SiGe гетероструктур на подложках «напряженный кремний на изоляторе» с тонким слоем окисла», ФТП 49(8), 1129-1135 (2015)

[A7] Н.А. Байдакова, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, М.В. Юрасов, Е.Е. Морозова, Д.В. Шенгуров, З.Ф. Красильник, «Электролюминесценция структур с самоформирующимися Ge(Si) nanoостровками, заключенными между напряженными слоями кремния», ФТП, 50(12), 1685-1689 (2016).

Байдакова Наталия Алексеевна

**Процессы поглощения и излучения света в структурах с  
Ge(Si) самоформирующимися наноструктурами, выращенными  
на различных подложках**

Автореферат

Подписано к печати 27.09.2019г. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН –  
филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
Российской академии наук»

603950, Нижний Новгород, ГСП-105