

На правах рукописи

**КУЗЬМИН РОМАН ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ  
КРЕМНИЕВЫХ p-n ПЕРЕХОДОВ**

специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук  
**Баграев Николай Таймуразович**  
Учреждение Российской академии наук  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук  
**Пермогоров Сергей Александрович**  
Учреждение Российской академии наук  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Доктор физико-математических наук, профессор  
**Яфясов Адиль Маликович**  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Санкт-  
Петербургский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Санкт-  
Петербургский государственный политехнический  
университет»

Защита состоится «16» февраля 2012 г. в 16.30 на заседании  
диссертационного совета Д 002.205.01 ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021,  
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Автореферат разослан «11» января 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н.



Петров А.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Интерес к исследованию оптического излучения из структур на основе кремния возник достаточно давно и связан, прежде всего, с огромными перспективами, открывающимися с развитием кремниевой оптоэлектроники и созданием оптической системы передачи данных [1]. Согласно закону Мура, количество транзисторов в чипах процессоров удваивается приблизительно каждые полтора года. При этом медные соединения, обеспечивающие связь между компонентами чипа и отдельными платами, уже сейчас не способны обеспечить необходимую скорость обмена информацией. Переход к оптической системе передачи данных позволил бы решить эту проблему и открыл бы пути для дальнейшего развития. По этой причине в настоящее время ведётся интенсивная работа, направленная на создание эффективного кремниевого источника излучения. Причём разрабатываются несколько подходов, в рамках которых исследуются системы на основе пористого кремния [2], нанокристаллов кремния [3], кремния, легированного эрбием [4], пластически деформированного кремния [5]. В последнее десятилетие также появилось большое число работ, посвящённых обнаружению относительно интенсивной ближкрасовой люминесценции из монокристаллического кремния, имплантированного бором [6-8]. Этот совершенно неожиданный результат первоначально объяснялся пространственной локализацией носителей посредством дислокационных петель, возникающих в процессе имплантации. Однако обнаружение похожего эффекта при введении бора методом диффузии [9], а также учёт влияния примесей, захваченных на дислокации, поставили под сомнение правомерность такого объяснения [10]. Основываясь на этом, ответ следует искать в другой области, и внимание привлекает, прежде всего, тот факт, что независимо от метода легирования, концентрация бора в структурах с большой интенсивностью излучения была высокой и достигала предела растворимости. Причём было показано [11], что интенсивность излучения возрастает с увеличением степени легирования, достигая максимума при концентрации бора  $N(B) \approx 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Дальнейшее увеличение концентрации приводит к гашению люминесценции, связанному с образованием кластеров бора, что является неизбежным процессом в рамках различных технологий легирования. Данное ограничение, однако, может быть преодолено в связи с развитием газотранспортных методов легирования. Так, например, кратковременная диффузия бора из газовой фазы, выполненная после предварительного окисления и последующего травления поверхности кремния n-типа в рамках планарной технологии, приводит при определённых условиях к формированию сверхмелких

диффузионных профилей бора с концентрацией  $5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Особенностью формирующихся при этом сверхмелких p-n переходов является то, что область p-типа проводимости представляет собой наноструктурированный слой кремния толщиной 8 нм с характерными размерами структурных элементов около 2 нм. Вместе с этим данная нанотехнология позволяет путем использования процессов самоорганизации наноструктур, встроенных в плоскость слоя, формировать систему фрактальных микрорезонаторов, настроенных на различные длины волн ИК-излучения, что делает возможным усиление его интенсивности. Кроме того, столь высокая концентрация бора приводит к образованию упорядоченной системы тригональных дипольных центров  $V^+ - V^-$ , которые формируются вследствие реконструкции мелких акцепторов бора,  $2B_0 \rightarrow V^+ + V^-$ , как центров с отрицательной корреляционной энергией. Возникновение такой упорядоченной системы выражается в появлении корреляционной щели в плотности состояний дырочного газа, а также является основой высокотемпературной сверхпроводимости, наблюдаемой в данных наноструктурах. Наличие наноструктурированного слоя, встроенных самоорганизованных микрорезонаторов, а также упорядоченной системы тригональных дипольных центров бора, способной кроме всего прочего приводить к эффективной релаксации квазиимпульса, делает описанную выше систему чрезвычайно перспективной с точки зрения реализации эффективных источников излучения на основе кремниевой планарной технологии.

Вышесказанное определяет актуальность темы настоящей работы, которая посвящена исследованию оптического излучения из квантоворазмерных кремниевых p-n переходов, представляющих собой наноструктурированный слой кремния p-типа проводимости, сильно легированный бором до концентрации  $5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , на поверхности n-Si (100). Основное внимание в ходе проведения экспериментов уделялось обнаружению и исследованию взаимосвязанности оптических, электрических и температурных характеристик сильнокоррелированной системы дипольных центров бора, а также механизмам формирования люминесценции в различных пространственных областях анализируемой планарной структуры.

Цель работы заключалась в исследовании оптического излучения в видимом, ближнем, среднем и дальнем инфракрасных спектральных диапазонах из квантоворазмерных кремниевых p-n переходов, сильно легированных бором.

В задачи работы входило изучение следующих вопросов:

1. Исследование и анализ спектров электро- и фотолюминесценции из квантоворазмерных кремниевых p-n переходов, а также спектров

- пропускания в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн, определение степени линейной поляризации излучения.
2. Изучение температурной зависимости интенсивности электролюминесценции в ближнем инфракрасном диапазоне и сопоставление её с температурными зависимостями удельного сопротивления, термо-эдс, скачка теплоёмкости и статической магнитной восприимчивости, полученными на исследуемых структурах.
  3. Исследование угловых зависимостей степени линейной поляризации люминесценции в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн и их сравнение с данными угловых зависимостей спектров ЭПР анализируемой квантоворазмерной системы.
  4. Исследование возможности управления степенью линейной поляризации электролюминесценции в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн посредством приложения дополнительного латерального электрического поля в плоскости планарных квантоворазмерных кремниевых р-п переходов.
  5. Изучение и анализ спектров электро- и фотолюминесценции, кинетики затухания люминесценции и спектров отражения в ближнем ультрафиолетом и видимом диапазонах длин волн, а также сравнение результатов исследования квантоворазмерных р-п переходов, полученных на поверхности монокристаллического кремния с различной кристаллографической ориентацией.
  6. Изучение и анализ спектров электролюминесценции из квантоворазмерных кремниевых р-п переходов в среднем и дальнем инфракрасных диапазонах длин волн и сравнение полученных результатов с имеющимися данными, зарегистрированными с помощью других методик.

#### **Научная новизна работы.**

1. Обнаружено, что квантоворазмерные кремниевые р-п переходы, сильно легированные бором, обладают широким спектром излучения в диапазонах от видимого до дальнего инфракрасного, которое регистрируется в рамках изучения электро- и фотолюминесценции.
2. Обнаружено, что излучение с длиной волны 1126 нм ( $T = 77$  К), возникающее вблизи границы наноструктурированного слоя р-типа и кремния п-типа, обладает относительно высокой интенсивностью и высокой степенью линейной поляризации.
3. Обнаружено, что степень линейной поляризации данного излучения демонстрирует угловую зависимость, совпадающую с кристаллографической ориентацией дипольных центров внутри наноструктурированного слоя р-типа проводимости, которая определялась на основании угловых зависимостей спектров ЭПР.

4. Показано, что величина поляризации и интенсивности данного излучения может быть управляема путём приложения латерального электрического поля в плоскости планарной структуры квантоворазмерных р-п переходов, что, по-видимому, связано с электростатическим разупорядочением системы диполей бора.
5. Обнаружено, что температурная зависимость интенсивности линии электролюминесценции на длине волны 1126 нм ( $T = 77$  К) демонстрирует максимум вблизи температуры сверхпроводящего перехода наноструктурированного слоя, сильно легированного бором.
6. Обнаружено, что излучение в видимом диапазоне длин волн из квантоворазмерных кремниевых р-п переходов связано с прямыми межзонными переходами в низкоразмерных объектах с характерными размерами 2 нм, что коррелирует с данными сканирующей туннельной микроскопии и теоретическими расчётами.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается сравнительным анализом экспериментальных данных, полученных с помощью различных методик, а также их соответствием с имеющимися на сегодняшний день экспериментальными и теоретическими результатами изучения оптических свойств кремниевых наноструктур, в том числе сильно легированных бором.

**Научная и практическая значимость** диссертационного исследования определяются возможностью создания эффективных источников излучения для различных диапазонов длин волн на основе кремниевой планарной технологии, обладающих относительно большой интенсивностью и высокой степенью линейной поляризации, которые можно контролировать с помощью дополнительного латерального электрического поля. Важным является также наличие в изучаемой системе гетероперехода на границе наноструктурированной области р-типа проводимости и n-Si, способного создавать пространственное ограничение для носителей заряда и возникающего излучения. Данное обстоятельство вместе с возможностью реализации различного рода микрорезонаторов делает исследовавшиеся квантоворазмерные кремниевые р-п переходы чрезвычайно перспективными для создания кремниевого источника когерентного излучения. Кроме того, научная значимость работы связана с обнаружением и исследованием взаимосвязанности оптических, электрических и температурных характеристик сильнокоррелированной системы дипольных центров бора, а также с изучением особенностей её перехода в единое когерентное состояние.

**Защищаемые положения:**

1. Планарные квантоворазмерные кремниевые р-п переходы, сильно легированные бором, являются источником оптического излучения в

видимом, ближнем, среднем и дальнем инфракрасных диапазонах длин волн, которое проявляется при регистрации спектров электро- и фотолюминесценции.

2. Интенсивное оптическое излучение с максимумом на длине волны 1126 нм (при  $T = 77$  К) обладает высокой степенью линейной поляризации, которая проявляет угловую зависимость, согласующуюся с кристаллографической ориентацией дипольных центров бора, составляющих основу сильно легированного бором наноструктурированного слоя кремния p-типа.
3. Дипольные центры бора, составляющие основу квантоворазмерных кремниевых p-n переходов, сильно легированных бором, играют определяющую роль в формировании их оптического излучения.
4. Латеральное электрическое поле в плоскости планарных квантоворазмерных кремниевых p-n переходов управляет интенсивностью и степенью линейной поляризации их оптического излучения.
5. Оптическое излучение видимого диапазона со спектральной характеристикой близкой к белому свету возникает из кремниевых p-n переходов с характерными размерами 2 нм вследствие прямых межзонных переходов.
6. Излучение ближнего инфракрасного диапазона усиливается при наличии микрорезонаторов, встроенных в плоскость планарных квантоворазмерных кремниевых p-n переходов, сильно легированных бором.

**Апробация результатов работы.** Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: X International Conference on Nanostructured Materials (NANO2010) September 13 – 17 2010, Italy, Roma; 11th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, April 4 – 8 2011, Germany, Berlin; VIII Международной конференции и VII Школы ученых и молодых специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе («КРЕМНИЙ 2011»), 05 – 08 июля 2011, Москва; X Российской конференции по физике полупроводников, 19 – 23 сентября 2011, Нижний Новгород; Конференции для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика и астрономия», 26 – 27 октября 2011, Санкт-Петербург.

**Публикации:** по результатам исследований, изложенных в диссертации, имеется 5 публикаций в ведущих отечественных и международных журналах. Список публикаций приведен в конце диссертации.

**Структура диссертации:** Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** определяется актуальность темы диссертационной работы, перечислены основные новые результаты, обосновывается их научная и практическая значимость, представлена структура диссертации и приведены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, посвященной исследованию оптического излучения из кремния и различных систем на его основе, таких как нанокристаллы кремния, кремний, легированный эрбием, пластически деформированный кремний, пористый кремний. Рассматриваются полученные в этой области результаты, а также пока ещё нерешённые проблемы.

В первом параграфе кратко обсуждается современное положение дел в кремниевой оптоэлектронике [1]. Обосновывается важность и необходимость развития оптических систем передачи данных на базе кремниевой планарной технологии, которое сдерживается в настоящее время только отсутствием эффективного кремниевого источника излучения.

Во втором параграфе рассматриваются существующие на данный момент подходы к решению проблемы кремниевого источника излучения. Анализируются системы на основе нанокристаллов кремния в матрице  $\text{SiO}_2$ , пластически деформированного кремния, кремния, легированного эрбием, каскадных схем. Особое внимание уделяется пористому кремнию [2]. Рассматриваются его основные оптические свойства, причём упор делается на работы, посвящённые выяснению их связи с внутренней структурой пористого кремния.

В третьем параграфе приводятся результаты исследований оптического излучения из монокристаллического кремния. При этом большое внимание уделяется кремнию, сильно легированному бором и фосфором, изучение которого продолжается уже довольно долгое время [12,13]. Основной результат, который был получен, заключается в том, что уже при концентрациях примеси  $\geq 10^{18} \text{ см}^{-3}$  в спектре люминесценции доминирует излучение, связанное с наличием примесной зоны. При этом выделяются два основных канала рекомбинации [12]. Первый представляет собой непосредственно донорно-акцепторную рекомбинацию дырок (электронов) примесной зоны с носителями, локализованными на дискретных донорных (акцепторных) состояниях фоновой примеси (так называемая LL линия). Второй – это рекомбинация дырок (электронов) примесной зоны со свободными носителями одной из зон (HL линия) [12]. В последнем случае возможен также процесс, в котором и начальное и конечное состояния локализованы на примесных уровнях, выродившихся в зону [14]. Соотношение HL и LL линий излучения определяется температурой, мощностью возбуждения и отношением концентраций



донорной и акцепторной примесей, а сами линии обладают рядом интересных особенностей. Так, например, наряду с излучением, сопровождающимся испусканием фононов, в спектре наблюдается и бесфононная линия люминесценции [13,14]. Помимо этого, форма HL линии не зависит от типа легирующей примеси и одинакова для кремния, сильно легированного фосфором, и кремния, сильно легированного бором [12]. Причём спектральное положение обеих линий HL и LL сдвигается в сторону меньших энергий при увеличении степени легирования [14]. Некоторыми авторами [12,15] было также отмечено, что, несмотря на низкую квантовую эффективность кремния, как непрямозонного полупроводника, сильно легированный кремний обладает достаточно высокой интенсивностью излучения.

В конце главы формулируется цель и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена описанию объекта исследования, а также методики эксперимента.

В первом параграфе рассматривается технология получения квантоворазмерных кремниевых p-n переходов, в основе которой лежат процессы локального самоупорядочения, возникающие вследствие анизотропии диффузии собственных атомов решётки, а также примесных атомов при их внедрении в полупроводниковую матрицу. Как известно [16], генерация избыточных потоков собственных дефектов происходит в результате формирования слоев окисла на поверхности монокристаллического кремния. При этом встречные потоки собственных междоузельных атомов и вакансий имеют выделенное кристаллографическое направление соответственно вдоль осей  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  [16]. В результате чего на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> образуется наноструктурированный слой, состоящий из микродефектов в форме пирамид, причём их распределение, по-видимому, представляет собой модификацию фрактала типа салфетки Серпинского со встроенными продольными сверхузкими кремниевыми квантовыми ямами. После предварительного окисления, а также процессов фотолитографии и травления в рамках кремниевой планарной технологии имеется возможность реализовать режим ускоренной диффузии легирующей примеси из газовой фазы, стимулируя обменное взаимодействие примесного атома с собственным междоузельным атомом или вакансией с помощью дополнительной подпитки кислородом [16]. Особый интерес представляет реализация режима резкого торможения примесной диффузии в случае полной аннигиляции собственных дефектов. Именно в режиме паритета kick-out и вакансионного механизмов образуются сверхмелкие

диффузионные профили бора, являющиеся основой квантоворазмерных кремниевых p-n переходов, исследуемых в настоящей работе.

Второй параграф посвящён описанию структуры таких сверхмелких сильно легированных диффузионных профилей бора, для выяснения которой использовались данные большого числа методик, в том числе циклотронного резонанса, электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), локальной туннельной спектроскопии. Идентификация самоупорядоченной сверхузкой кремниевой квантовой ямы (СККЯ), локализованной между сильно легированными  $\delta$ -барьерами внутри сверхмелкого диффузионного профиля, осуществлялась по данным угловых зависимостей циклотронного резонанса электронов и дырок при вращении магнитного поля в плоскости (110), перпендикулярной плоскости диффузионного профиля на поверхности Si (100). Данная СККЯ, как было показано, содержит двумерный дырочный газ, характеризующийся большими временами свободного пробега для тяжёлых и лёгких дырок [17]. Этот результат является достаточно неожиданным, принимая во внимание высокий уровень легирования бором  $\delta$ -барьеров, между которыми сформирована квантовая яма. Однако по данным температурных зависимостей проводимости и коэффициента Зеебека, а также локальным туннельным вольтамперным характеристикам (ВАХ) [16,18] было обнаружено, что зарядовые корреляции, начинающие доминировать при наличии столь большой концентрации бора, приводят к образованию корреляционной щели в плотности состояний дырочного газа. В рамках предложенной модели основную роль в формировании данной корреляционной щели играет реконструкция мелких акцепторов бора как центров с отрицательной корреляционной энергией [19], приводящая к образованию примесных диполей  $C_{3v}$ -симметрии:  $2B_o \rightarrow V^+ + V^-$ .

Дальнейшее подтверждение данная модель получила при изучении угловых зависимостей спектров ЭПР, которые позволили напрямую идентифицировать наличие тригональных дипольных центров бора  $V^+ - V^-$ , ориентированных вдоль кристаллографических осей  $\langle 111 \rangle$ . Величина корреляционной щели, оказавшейся равной 0.044 эВ, определялась на основании измерений туннельных ВАХ, а также по данным локальной туннельной спектроскопии.

В третьем параграфе описываются характеристики экспериментальных структур с квантоворазмерными кремниевыми p-n переходами, а также экспериментальные методики, использованные в работе.

В третьей главе представлены результаты исследования оптического излучения в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн из

квантоворазмерных кремниевых р-п переходов, сильно легированных бором.

В первом параграфе рассматриваются спектры электро- и фотолюминесценции, в которых доминирует линия излучения с максимумом на длине волны 1126 нм ( $T = 77\text{K}$ ). Далее анализируется зависимость её интенсивности от величины прямого тока, на основании которой делается вывод о возникновении данного излучения именно в сильно легированной области, а также обращается внимание на высокие значения излучаемой мощности. Так, например, при комнатной температуре и прямом токе 50 мА данная величина, приходящаяся только на спектральный диапазон анализируемой линии, достигает значения 0.03 мВт, что является достаточно высоким показателем, учитывая малую площадь излучающей поверхности ( $0.235\text{ мм}^2$ ). Следует отметить, что по причине наличия у изучаемых квантоворазмерных кремниевых р-п переходов оптического излучения во многих спектральных областях, расчёт величины внешней квантовой эффективности для линии, рассматриваемой в данной главе, не представляется возможным, поскольку не известно, какая часть из протекающего через структуру прямого тока участвует в её возникновении.

Во втором параграфе анализируется форма спектральной кривой данной линии излучения, а также её фонного повторения, на основании чего делается предположение о донорно-акцепторном механизме рекомбинации, отвечающем за возникновение рассматриваемой люминесценции и протекающем на границе сильнолегированного наноструктурированного слоя р-типа проводимости и кремния п-типа. При этом в качестве начальных состояний выступают, по-видимому, состояния мелких доноров фосфора, а в качестве конечных – состояния, связанные с системой диполей бора.

В третьем параграфе последнее находит подтверждение при исследовании зависимости интенсивности электролюминесценции от температуры, которая демонстрирует максимум в районе 150 К, что согласуется со значением критической температуры сверхпроводящего перехода в квантоворазмерной сильно легированной бором р-области, определённым с помощью исследований температурных и полевых зависимостей удельного сопротивления, термо-эдс, теплоемкости и магнитной восприимчивости. Данный переход, учитывая очень высокую концентрацию диполей бора  $\sim 2.5 \cdot 10^{21}\text{ см}^{-3}$ , по всей видимости, определяется не достижением критических условий конденсации, а связан с нарушениями самокомпенсации дипольных центров бора вследствие изменений низкосимметричных искажений решётки, что и нашло отражение в температурной зависимости интенсивности электролюминесценции.

В четвёртом параграфе представлены дальнейшие подтверждения участия примесных диполей в формировании линии излучения в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Было обнаружено, что данное излучение обладает высокой степенью линейной поляризации (более 30%), наличие которой, по-видимому, является непосредственным следствием упорядочения системы тригональных дипольных центров  $V^+$  -  $V^-$ . Причём  $C_{3v}$ -симметрия, имеющаяся у таких центров, обнаруженная по угловым зависимостям спектров ЭПР, проявляется и в аналогичных зависимостях степени линейной поляризации электролюминесценции. При этом данная линейная поляризация может быть подавлена путём приложения латерального электрического поля в плоскости структуры, приводящего к разупорядочению системы диполей бора.

В пятом параграфе формулируется модель возникновения излучения в ближней инфракрасной области спектра, учитывающая все наблюдаемые экспериментальные факты. Модель построена в рамках двухэлектронных (дырочных) адиабатических потенциалов и основана на донорно-акцепторной рекомбинации, протекающей через состояния, связанные с упорядоченной системой тригональных дипольных центров бора в сильнолегированном наноструктурированном слое р-типа и ионов фосфора в n-Si.

**Четвёртая глава** описывает исследование оптического излучения из квантоворазмерных кремниевых р-n переходов в видимом диапазоне длин волн.

В первом параграфе анализируются спектры отражения в ближней ультрафиолетовой области от сильнолегированных диффузионных профилей бора, являющихся основой данных переходов. Для всех исследованных образцов характерно снижение значений коэффициента отражения по сравнению с несильнолегированным монокристаллическим кремнием, а также размытие пиков на длинах волн 354 нм и 275 нм, обусловленных переходами между долинами  $\Gamma$ , L и X зоны Бриллюэна, первый из которых связан с прямыми переходами  $\Gamma'_{25}-\Gamma_{15}$ ;  $L'_3-L_1$ ;  $\Gamma'_{25}-\Gamma_2$ , а второй –  $X_4-X_1$  и  $\Sigma_4-\Sigma_1$ . Подобное поведение спектров отражения свидетельствует о перестройке энергетического спектра наноструктурированного слоя кремния, связанного, по всей видимости, с образованием системы квантоворазмерных объектов. Ближайшей аналогией подобной системы является, по-видимому, пористый кремний, в качестве модели которого в настоящее время используется совокупность квантовых точек или сеть квантовых проволок. Анализу данной модели посвящено в литературе достаточно большое число работ.

Основные результаты этих работ, представленные во втором параграфе, сводятся к прямой связи положения максимума люминесценции

пористого кремния и размеров квантоворазмерных элементов, его образующих. Причём, чем меньше данные размеры, тем в более коротковолновую область сдвигается максимум. Кроме того, в формировании зонной структуры квантоворазмерных элементов существенную роль играет их кристаллографическая ориентация. При этом возникновение прямой энергетической зоны, приводящей к существенному увеличению эффективности люминесценции, возможно только для структур с ориентацией вдоль осей  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$  и им эквивалентных.

В третьем параграфе анализируются спектры электро- и фотолюминесценции, зарегистрированные в видимом диапазоне длин волн, в которых доминирует широкая энергетическая полоса, дающая свечение по своему спектральному составу близкое к белому свету. Спектральное положение данной полосы люминесценции, малое время её затухания, а также сравнение результатов, полученных при исследовании структур, созданных на поверхности монокристаллического кремния с различной кристаллографической ориентацией, позволили утверждать, что излучение из квантоворазмерных кремниевых p-n переходов в видимой области спектра возникает вследствие прямых межзонных переходов в структурных элементах с характерными размерами около 2 нм. Данное заключение подтверждается, кроме того, данными сканирующей туннельной микроскопии, позволившей непосредственно определить размеры структурных элементов квантоворазмерных кремниевых p-n переходов.

**Пятая глава** посвящена изучению спектров электролюминесценции в среднем и дальнем инфракрасных диапазонах длин волн, а также исследованию характеристик микрорезонаторов, встроенных в плоскость квантоворазмерных кремниевых p-n переходов, и перспективной возможности их использования для создания кремниевых источников когерентного излучения.

В первом параграфе приводятся спектры электролюминесценции из квантоворазмерных кремниевых p-n переходов, зарегистрированные при комнатной температуре в спектральном интервале от 3 мкм до 25 мкм. Излучение в данном диапазоне характеризуется высокой интенсивностью и многообразием спектральных особенностей. Сравнение полученных результатов с имеющимися данными, найденными с помощью других методик, позволило предположить, что данное излучение связано с внутризонными переходами в наноструктурированном слое, а также с распадом зарядовых корреляций в системе диполей бора.

Во втором параграфе анализируются фрактальные микрорезонаторы, образующиеся в результате процессов самоорганизации микродефектов в процессе получения квантоворазмерных кремниевых p-n переходов. Эти микрорезонаторы непосредственно обнаруживаются по данным

сканирующей туннельной микроскопии, а также проявляют себя в спектрах пропускания в ближнем и среднем инфракрасных диапазонах длин волн.

В третьем параграфе анализируется перспективность использования кремниевых квантовых ям, встроенных в систему оптических и микроволновых микрорезонаторов, для создания кремниевого источника когерентного излучения. Для реализации этой задачи предлагается использовать бозе-эйнштейновскую конденсацию экситонных поляритонов в такой системе.

В **Заключении** приводятся основные результаты работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Исследовавшиеся квантоворазмерные кремниевые р-п переходы, сильно легированные бором, обладают широким спектром излучения в диапазонах от видимого до дальнего инфракрасного. Данное излучение регистрируется в рамках изучения фото- и электролюминесценции, что определяет квантоворазмерные кремниевые р-п переходы как перспективные с точки зрения применения в кремниевой оптоэлектронике.
2. В рамках этого особый интерес представляет излучение в ближнем инфракрасном диапазоне, которое возникает на границе между наноструктурированным слоем р-типа проводимости и кремнием п-типа. Рождающаяся в области данной гетерограницы линия люминесценции с максимумом при температуре 77 К на длине волны 1126 нм, как было обнаружено, обладает высокой интенсивностью и достаточно большой степенью линейной поляризации, которая может быть контролируема посредством приложения внешнего электрического поля, параллельного плоскости планарной структуры.
3. Спектральные характеристики и особенности поведения электро- и фотолюминесценции согласуются с данными, полученными ранее с помощью различных экспериментальных методик, которые демонстрируют тригональные дипольные центры  $V^+ - V^-$  в качестве основы сильнолегированных диффузионных профилей бора. Образование таких центров происходит в результате реконструкции мелких акцепторов бора вдоль кристаллографической оси  $\langle 111 \rangle$ , что было обнаружено по угловым зависимостям спектров ЭПР и нашло подтверждение в аналогичных зависимостях степени поляризации электро- и фотолюминесценции.
4. Обнаружено, что температурная зависимость интенсивности электролюминесценции из квантоворазмерных кремниевых р-п

переходов демонстрирует максимум в районе 150 К, что согласуется со значением критической температуры сверхпроводящего перехода в квантоворазмерной р-области, определённой с помощью исследований температурных и полевых зависимостей удельного сопротивления, термо-эдс, теплоемкости и магнитной восприимчивости.

5. Результаты выполненных исследований позволили сформулировать модель возникновения излучения с максимумом при температуре 77 К на длине волны 1126 нм, учитывающую все наблюдаемые экспериментальные факты. Модель построена в рамках двухэлектронных (дырочных) адиабатических потенциалов и основана на донорно-акцепторной рекомбинации, протекающей через состояния, связанные с упорядоченной системой тригональных дипольных центров бора в сильнолегированном наноструктурированном слое р-типа и ионов фосфора в n-Si.
6. В излучении из квантоворазмерных кремниевых р-n переходов в видимой области спектра доминирует широкая энергетическая полоса, близкая по своему спектральному составу к белому свету. Возникновение данной полосы связано с прямыми межзонными переходами в низкоразмерных объектах с характерными размерами около 2 нм, что было обнаружено на основании изучения спектров электро- и фотолюминесценции, их сравнения с результатами теоретических расчётов и учёта данных сканирующей туннельной микроскопии.
7. В средней и дальней инфракрасных областях спектра мощное оптическое излучение связано, по всей видимости, с внутризонными переходами в наноструктурированном слое р-типа, а также с распадом зарядовых корреляций в системе диполей бора.
8. В рамках создания источников когерентного излучения на базе кремниевой планарной технологии важным является присутствие в системе фрактальных микрорезонаторов, встроенных в плоскость квантоворазмерных р-n переходов, которые были идентифицированы по данным сканирующей туннельной микроскопии и спектрам пропускания. Дополнительным преимуществом является также наличие гетероперехода, образованного наноструктурированным сильнолегированным слоем р-типа проводимости и n-Si, который может способствовать пространственному ограничению носителей тока и возникающего излучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. L. Pavesi, Will silicon be the photonic material of the third millenium?, *J. Phys.: Condens. Matter.*, vol. **15**, p. R1169 (2003).
2. O. Bisi, Stefano Ossicini, L. Pavesi, Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics, *Surface Science Reports*, vol. **38**, p. 1 (2000).
3. L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni, G. Franzò, and F. Priolo, Optical gain in silicon nanocrystals, *Nature*, vol. **408**, p. 440 (2000).
4. В. П. Кузнецов, М. В. Кузнецов, З. Ф. Красильник, Диодные структуры Si:Er/Si для наблюдения электролюминесценции на длине волны 1.5 мкм при 300 К, *ФТП*, т. **44**, стр. 402 (2010).
5. V. Kveder, M. Badylevich, E. Steinman, A. Izotov, M. Seibt, and W. Schröter, Room-temperature silicon light-emitting diodes based on dislocation luminescence, *Appl. Phys. Lett.*, vol. **84**, p. 2106 (2004).
6. Wai Lek Ng, M. A. Lourenco, R. M. Gwilliam, S. Ledain, G. Shao and K. P. Homewood, An efficient room-temperature silicon-based light-emitting diode, *Nature*, vol. **410**, p. 1036 (2001).
7. M. A. Green, J. Zhao, A. Wang, P. J. Reece, and M. Gal, Efficient silicon light-emitting diodes, *Nature*, vol. **412**, p. 805 (2001).
8. А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, Кремниевые светодиоды с большой мощностью излучения краевой люминесценции, *ФТП*, т. **42**, стр. 336 (2008).
9. Pavel Altukhov and Evgenii Kuzminov, Direct evidence of the self-compression of injected electron-hole plasma in silicon, *Phys. Status Solidi (b)*, vol. **245**, p. 1181 (2008).
10. K. Fraser, D. Stowe, S. Galloway, S. Senkader, R. Falster, and P. Wilshaw, The role of dislocations in producing efficient near-bandgap luminescence from silicon, *Phys. Status Solidi (c)*, vol. **4**, p. 2977 (2007).
11. J. Sun, T. Dekorsy, W. Skorupa, B. Schmidt, A. Mücklich, and M. Helm, Below-band-gap electroluminescence related to doping spikes in boron-implanted silicon pn diodes, *Phys. Rev. B*, vol. **70**, p. 155316 (2004).
12. R. R. Parsons, On the origin of photoluminescence in heavily-doped silicon, *Solid State Commun.*, vol. **29**, p. 763 (1979).
13. J. Wagner, Photoluminescence and excitation spectroscopy in heavily doped n- and p-type silicon, *Phys. Rev. B*, vol. **29**, p. 2002 (1984).
14. Miguel Levy, P. Y. Yu, Youzhu Zhang, and M. P. Sarachik, Photoluminescence of heavily doped, compensated Si:P,B, *Phys. Rev. B*, vol. **49**, p. 1679 (1994).
15. R.E. Halliwell and R.R. Parsons, Electron-Hole Droplets in Semiconducting and Metallic Silicon, *Can. J. Phys.*, vol. **52**, p. 1336 (1974).



16. N.T. Bagraev, E.I. Chaikina, L.E. Klyachkin, I.I. Markov, W. Gehlhoff, Infrared induced emission from silicon quantum wires, *Superlat. Microstruct.*, vol. **28**, p. 337 (1998).
17. W. Gehlhoff, N.T. Bagraev, and L.E. Klyachkin, Shallow and Deep Centers in Heavily Doped Silicon Quantum Wells, *Materials Science Forum*, vol. **196-201**, p. 467 (1995).
18. Н.Т. Баграев, Е.В. Владимировская, В.Э. Гасумянц, В.И. Кайданов, В.В. Кведер, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, Е.И. Чайкина, А.И. Шалынин, Переход металл-диэлектрик в сильнолегированных р<sup>+</sup>-квантовых ямах на поверхности кремния n-типа, *ФТП*, т. **29**, стр. 2133 (1995).
19. N.T. Bagraev, V.A. Mashkov, A mechanism for two-electron capture at deep level defects in semiconductors, *Solid State Commun.*, vol. **65**, p. 1111 (1988).

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. N.T. Bagraev, V.A. Mashkov, E.Yu. Danilovsky, W. Gehlhoff, D.S. Gets, L.E. Klyachkin, A.A. Kudryavtsev, R.V. Kuzmin, A.M. Malyarenko, V.V. Romanov, EDESR and ODMR of Impurity Centers in Nanostructures Inserted in Silicon Microcavities, *Applied Magnetic Resonance*, vol. **39**, p. 113 (2010).
2. N.T. Bagraev, E.Yu. Danilovsky, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.A. Kudryavtsev, R.V. Kuzmin, A.M. Malyarenko, V.V. Romanov, Quantum Supercurrent Transistors in Silicon Quantum Wells Confined by Superconductor Barriers, *Journal of Modern Physics*, vol. **2**, p. 256 (2011).
3. N.T. Bagraev, V.A. Mashkov, E.Yu. Danilovsky, W. Gehlhoff, D.S. Gets, L.E. Klyachkin, A.A. Kudryavtsev, R.V. Kuzmin, A.M. Malyarenko, and V.V. Romanov, EDESR and ODMR of Impurity Centers in Nanostructures Inserted in Silicon Microcavities, *Journal of Modern Physics*, vol. **2**, p. 544 (2011).
4. Ю.В. Тубольцев, М.М. Мездрогина, Е.М. Хилькевич, Ю.В. Чичагов, Н.К. Полетаев, Р.В. Кузьмин, Установка для измерения спектров излучения широкозонных полупроводниковых материалов, *ЖТФ*, т. **81**, вып. 9, стр. 77 (2011).
5. Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, Р.В. Кузьмин, А.М. Маляренко, В.А. Машков, Инфракрасное излучение из кремниевых наноструктур, сильно легированных бором, *ФТП*, т. **46**, вып. 3, стр. 289 (2012).