

На правах рукописи

Демидова Наталия Евгениевна

**ТРАНСПОРТ ТОКА, ЭПР И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В
ПОРИСТОМ КРЕМНИИ**

Специальность 01.04.10 – Физика полупроводников

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

Нижний Новгород – 2010

Работа выполнена в Нижегородском государственном университете им. Н.И.Лобачевского

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, доцент Карзанов В. В.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Ефремов Г.Ф.

доктор физико-математических наук, в.н.с. Орлов Л.К.

Ведущая организация - Ярославский филиал института Учреждение Российской академии наук Физико-технологический институт РАН

Защита состоится «___» _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.01 при Нижегородском государственном университете им. Н.И.Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д.23, корп.3.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского.

Автореферат разослан «___» _____ 2010 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.166.01
доктор физико-математических наук, профессор

А.И. Машин

Актуальность темы

Актуальность работы обусловлена интенсивным развитием в настоящее время нанотехнологий в электронике, необходимостью дальнейшего исследования и совершенствования уникальных свойств пористого кремния как представителя наноразмерной гетероструктуры, перспективами применения пористого кремния в оптоэлектронике, совместимой с наиболее распространённой кремниевой технологией. Поиск новых и усовершенствования уже известных способов формирования наноразмерных светоизлучающих структур на основе пористого кремния активно ведется как в нашей стране, так и за ее пределами [1-4]. Данная работа вносит вклад в понимание процессов, происходящих в пористом кремнии в результате термических отжига, дальнейшее прояснение природы парамагнитных центров безызлучательной рекомбинации в зависимости от содержания примесей, в понимание процессов токопереноса в пористых слоях, которые важны при разработке электролюминесцентных структур на основе пористого кремния. Такие структуры с приемлемой для практического применения квантовой эффективностью являются главной целью в ряде прикладных аспектов использования пористого кремния. Вместе с тем пористый кремний является удобным модельным объектом для изучения явления дискретного туннелирования, что важно для развития нового направления твердотельной электроники – одноэлектроники.

Цель и основные задачи работы

К началу выполнения настоящей работы изучению свойств ПК было посвящено множество исследований, но многое оставалось не прояснённым, в частности:

- не было единого мнения о природе люминесцентных свойств ПК, связана ли она с излучательной электронно-дырочной рекомбинацией или с локальными центрами и химическими агрегатами Si-H, Si-O-H на границе кремния в порах;
- противоречивыми были данные об электронных состояниях в ПК, получаемых методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), в частности о центрах безызлучательной рекомбинации, которые подавляют люминесценцию пористых слоёв кремния, в обзорных работах не было проведено детальное сопоставление данных ЭПР гетероструктурной границы кремний – оксид кремния, ЭПР и фотолюминесценции ПК;
- слабо было изучено влияние примесей на электрофизические свойства ПК, считалось, что мелкие в объёмном кремнии примеси элементов III и V групп периодической таблицы Менделеева практически не влияют на электропроводность ПК;
- слабо изучен транспорт тока в ПК, практически не рассматривался механизм переноса тока в пористых слоях путём дискретного туннелирования электронов или дырок или, так называемая, кулоновская блокада туннелирования.

Поэтому целью работы являлось изготовление и исследование диодных структур с прослойкой ПК на основе монокристаллического кремния (МК), с разными типами и уровнями легирования, и особое внимание уделить низкоомным образцам, что раньше, согласно литературным данным, не делалось.

В связи с выше изложенным, в настоящей работе были поставлены следующие задачи.

1. Детально проанализировать литературные экспериментальные данные с сопоставлением результатов исследований ЭПР и ФЛ гетероструктур Si-SiO₂ для прояснения природы Р_б-центров безызлучательной рекомбинации.

2. С применением техники ЭПР исследовать влияние примесей элементов III и V групп периодической таблицы Менделеева на Р_б-центры безызлучательной рекомбинации.

3. Экспериментально исследовать поперечный транспорт тока в диодных структурах с прослойкой ПК для выяснения вкладов в электропроводность различных механизмов переноса тока, в частности, дискретного туннелирования.

4. Изучить возможность теоретического описания кулоновской блокады туннелирования в приближении гранулированной среды. Применить результаты для анализа транспорта тока в ПК.

Научная новизна работы

1. Впервые показано, что природа P_b -центров безызлучательной рекомбинации в наноразмерных гетероструктурах Si-SiO₂ связана с более крупными дефектами, вероятно, дислокациями в кремнии вблизи границы кремний-оксид кремния.

2. Впервые установлено, что мелкие в объёмном кремнии примеси в согласии с известной высокой плотностью состояний на границе Si-SiO₂ влияют на ЭПР P_b -центров безызлучательной рекомбинации при достаточно высокой концентрации этих примесей свыше 10^{18} см⁻³, акцепторная примесь бора подавляет ЭПР P_b -центров.

3. Впервые экспериментально обнаружены проявления дискретного туннелирования в поперечном транспорте тока в ПК в экспоненциальном полевом росте тока и пиках избыточных шумов диодных структур с прослойками ПК, оксида кремния, нитрида кремния.

4. Впервые теоретически получен характерный для дискретного туннелирования линейный и экспоненциальный полевой рост тока в гранулированной среде, который позволяет объяснить экспериментальные вольтамперные характеристики диодных структур с прослойками пористого кремния, оксида кремния, нитрида кремния.

Практическая значимость работы

1. Установленное влияние мелких примесей на центры безызлучательной рекомбинации будет полезно учитывать при разработке светоизлучающих гетероструктур не только на основе ПК, но и на других структурах с наночастицами кремния.

2. Обнаруженные проявления в ПК дискретного туннелирования необходимо учитывать при разработке электронных, в том числе электролюминесцентных приборов на основе пористых слоёв кремния и других аналогичных наноразмерных структурах с близко расположенными наночастицами полупроводника в диэлектрической матрице.

3. Результаты теоретического анализа дискретного туннелирования в гранулированных средах практически полезны и уже применяются для определения параметров такой среды по данным электрополевой зависимости транспорта тока.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Природа P_b -центров безызлучательной рекомбинации в наноразмерных гетероструктурах Si-SiO₂ связана с дислокациями в кремнии вблизи границы кремний-оксид кремния.

2. Примеси элементов III и V групп периодической таблицы Менделеева влияют на ЭПР P_b -центров безызлучательной рекомбинации при их концентрации свыше 10^{18} см⁻³.

3. Экспериментально обнаруженные проявления дискретного туннелирования в поперечном транспорте тока в ПК, оксиде и нитриде кремния, в экспоненциальном полевом росте тока и пиках избыточных шумов диодных структур с прослойками этих материалов.

4. Теоретически полученный характерный для дискретного туннелирования экспоненциальный полевой рост тока в гранулированной среде, позволивший объяснить экспериментальные ВАХ диодных структур с прослойками гранулированных сред.

Личный вклад автора

Основные эксперименты были спланированы автором совместно с научным руководителем доцентом В.В. Карзановым и профессором Е.С. Демидовым. Самостоятельно выполнялись: подготовка образцов, исследование ЭПР, измерение вольтамперных и шумовых характеристик, а также анализ результатов. Совместно с профессором Е.С. Демидовым теоретически получен закон полевой зависимости тока в гранулированной среде, теория самостоятельно применялась для анализа данных эксперимента.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 21-й конференции: Международной конференции «Оптика полупроводников» (Ульяновск, 2000 г., 2001 г., 2008 г.); конференции «XIX научные чтения им. Н.В.Белова» (Нижний Новгород, 14-15 декабря 2000 г.); Совещании «Нанофотоника» (Н.Новгород, 2002 г., 2003 г., 2-6 мая 2004 г.); IV Всероссийском семинаре «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Н.Новгород, 2002); Межрегиональной научной школе для аспирантов и студентов «Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение» (Саранск, 2003 г., 6-8 октября 2004 г., 5 - 7 октября 2005 г.); Международной конференции «Оптика, оптоэлектроника и технологии» (Ульяновск, 2003); Десятой ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, Электроника и Энергетика» (Москва, 2-3 марта 2004 г.); IX Нижегородской сессии молодых ученых «Голубая Ока» (Н.Новгород 25-30 апреля 2004 г.); IV Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург, 5-7 июля 2004 г.); VII Всероссийском семинаре «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Н.Новгород, 26-29 октября 2004 г.); Симпозиуме «Нанопизика и наноэлектроника» (Н.Новгород, 25-29 марта 2005 г., 10-14 марта 2008 г., 16-20 марта 2009г.); Третьей международной научной конференции «Фундаментальные проблемы физики» (г. Казань, 13-18 июня 2005 г.); IV Украинской научной конференции по физике полупроводников (Запорожье, 15-19 сентября 2009 г.)

Диссертационная работа выполнялась при поддержке следующих грантов и целевых программ:

Федеральной целевой программы "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997-2000 гг.", Учебно-научный центр "Физика и химия твердого тела" (проект № 0541), тема НИЧ ННГУ Н-231.

Гранта Минобразования РФ Конкурсного центра по исследованиям в области ядерной физики и физики пучков ионизирующих излучений, тема НИЧ ННГУ НГ-172, 1998-2000 гг. (грант № 97-12-9.2-4).

Программы Минобразования РФ "Научные исследования высшей школы в области производственных технологий", раздел "Радиационные технологии создания и исследования объектов в машиностроении и приборостроении", тема НИЧ ННГУ Н-223, 2000 г. (проект № 01.12.01.15).

Гранта INTAS № 000 0064.

Программы Федерального агентства по образованию "Развитие потенциала высшей научной школы" 2005 г., пункт 3.3, проект № 4619.

Программы Рособразования, проект РНП 2.1.1 4022.

Гранта РФФИ проект р-Повольжье 08-02-97044а.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 32 научные работы, включая 8 статей и 24 публикации в материалах конференций. Список публикаций приведён в конце автореферата.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 112 наименований. Общий объём диссертации составляет 143 страницы, включая 70 рисунков и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснован выбор темы диссертации, её актуальность, показано, в чём заключается научная новизна исследований, практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава – аналитический литературный обзор. По этой части опубликованы несколько обзорных работ, посвящённых анализу свойств пористого кремния (ПК) [1-4]. Однако в них основное внимание уделялось люминесцентным свойствам ПК и его применению в нанопотонике или детальному изучению структурных свойств в зависимости от режимов приготовления. Не проводилось детального сопоставления люминесцентных свойств и данных электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), что представляется важным для выяснения природы светоизлучающих свойств ПК. Поэтому первая его часть представляемого обзора посвящена исследованию природы P_b -центров безызлучательной рекомбинации на гетерогранице Si-SiO₂. С ними связывают подавление красной фотолюминисценции (ФЛ) в ПК. Методом ЭПР в гетероструктурах на основе Si-SiO₂ обнаружены около сорока непримесных дефектов. Нас интересовали P_b -центры. Всем дефектам приписывалась молекулярная модель. По молекулярной модели P_b -центры – оборванные связи кремния на гетерогранице Si-SiO₂. На окисленных образцах кремния были обнаружены линейная корреляция числа P_b -центров и плотности электронных состояний на гетерогранице, немонотонный характер зависимости концентрации P_b -центров и плотности электронных состояний от толщины оксида SiO₂, наблюдалась антикорреляция интенсивностей ФЛ и ЭПР P_b -центров в ПК после различных времён отжига, в фосфорно-силикатных стёклах с наночастицами Si в зависимости от концентрации фосфора. Сопоставляя экспериментальные данные, можно назвать ряд противоречий молекулярной модели P_b -центров:

1. в связи с естественной поверхностной плотностью атомов кремния, по молекулярной модели поверхностная плотность P_b -центров на границе кремний-оксид кремния должна быть $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Но на практике эта величина на 3-4 порядка меньше;
2. с точки зрения молекулярной модели не понятно почему P_b -центры не наблюдаются в условиях вакуума на свежесколотой поверхности кремния;
3. с точки зрения молекулярной модели не понятно почему P_b -центры «ощущают» изменение толщины SiO₂ и пропадают при толщине оксида меньше $\sim 5 \text{ нм}$;
4. ширина линий ЭПР P_b -центров $\sim 4-5 \text{ Гс}$ характерна дефектам в кремнии, где она обусловлена более сильными, чем в SiO₂ спин-решётчным и сверхтонким взаимодействием с ядрами изотопа Si²⁹.

Но если предположить, что P_b -центры принадлежат более крупным дефектам, например, дислокациям в кремнии вблизи гетерограницы, то можно дать более последовательное толкование непонятым в рамках молекулярной модели явлениям и дать объяснение другим наблюдениям.

1. Поверхностная плотность P_b -центров $10^{11}-10^{12} \text{ см}^{-2}$ определяется поверхностной плотностью дислокаций, расстояние между которыми зависит от величины механических напряжений на гетерогранице, определяемых толщиной оксида кремния.

2. Возникновение, рост и дальнейший немонотонный характер изменения числа P_b -центров и плотности электронных состояний в зависимости от толщины оксида объяснимы возникновением дислокаций при толщине оксида $\sim 5 \text{ нм}$. Число дислокаций

растёт по мере увеличения механических напряжений на границе кремний-оксид кремния по мере роста толщины SiO_2 . При толщине оксида ~ 20 нм дислокации начинают аннигилировать, затем возникают новые при толщине SiO_2 около 100 нм.

3. Для дислокационной модели не важно, является ли атомарно гладкой поверхность кремния на гетерогранице, малый набор парамагнитных центров определяется энергетически наиболее выгодными типами дислокаций.

4. По мере окислительного высокотемпературного отжига оксида кремния с наноразмерными гранулами кремния, содержащими дислокации, гранулы становились бездислокационными, при этом спадал ЭПР сигнал и росла интенсивность ФЛ P_b -центров. То есть антикорреляция интенсивностей ЭПР и ФЛ P_b -центров безызлучательной рекомбинации объясняется исчезновением дислокаций.

5. Кроме того, близки g -факторы и угловые зависимости линий ЭПР ПЦ пластически деформированного кремния и P_b -центров в ПК.

По литературным и нашим данным ВАХ ПК – нелинейные, поэтому во второй части литературного обзора рассмотрены известные нелинейности в средах сходных с ПК. В некристаллических полупроводниках и диэлектриках – два вида нелинейностей при поперечном транспорте тока – токовые и полевые. К токовым относятся инжекционные токи ограниченные объёмным зарядом (ТООЗ) в диэлектриках. Полевые нелинейности проявляются при насыщении дрейфовой скорости носителей тока в сильных полях. Так же при их полевом высвобождении с мелких ловушечных энергетических уровней в некристаллических полупроводниках. Эти и другие возможные механизмы токопереноса в ПК представлены в виде таблицы в настоящей диссертационной работе, но все они основаны на одноэлектронном приближении. В то время как ПК – многочастичная система, в которой нужно учитывать корреляционные эффекты явно. Здесь возможна кулоновская блокада туннелирования электронов (КБТ).

Руководствуясь этими соображениями, нами была решена, в приближении слабых и средних полей, задача дискретного туннелирования (ДТ) сквозь цепочку из сколь угодно большого числа наноразмерных металлических или полупроводниковых гранул в диэлектрической среде. Получен закон экспоненциального полевого роста тока. Решение задачи есть в четвёртой главе настоящей работы.

Следует отметить, что в литературе транспорту тока в ПК посвящено сравнительно мало работ. В них не предпринимались попытки выйти за рамки одноэлектронного приближения, применить идею ДТ. Для приготовления пористых слоёв использовался слабо легированный кремний. Не исследовались электрические характеристики ПК в динамическом режиме.

Вторая глава – методическая, здесь изложена технология приготовления и методы исследования структур с ПК. Особенность настоящей работы – исследование ПК, приготовленного на сильно легированном мелкими примесями кремнии (10^{18} – 10^{19} см^{-3}). Это позволило свести к минимуму вклад области пространственного заряда (ОПЗ) подложки в ВАХ диодных структур (ДС) с пористым слоем. А так же достичь заметного влияния примеси на электрофизические свойства кремния, что согласуется с оценкой высокой плотности электрически активных состояний на границе Si-SiO_2 , приведённой в первой главе.

Пористые слои готовились стандартным способом анодного травления в электролите, содержащем равные количества этанола и плавиковой кислоты. Время травления варировалось от 1 до 10 мин., плотность тока – от 5 до 50 mA/cm^2 . Часть образцов подвергалась окислительному отжигу на воздухе в температурном интервале 300-900°C.

На рисунке 1 схема измерений ВАХ диодных структур с прослойками ПК, оксида кремния, нитрида кремния. В последнее время для подобных измерений используется автоматизированный мультиметр фирмы Agilent B1500A.

На рисунке 2 схема измерений осцилляций напряжения. РИН задавал ток через диодную структуру, ГСС ВЧ калибровался по напряжению ИУ ВЧ. Осцилляции напряжения и импеданс регистрировались супергетеродинным приёмником в приборе Л2-7.

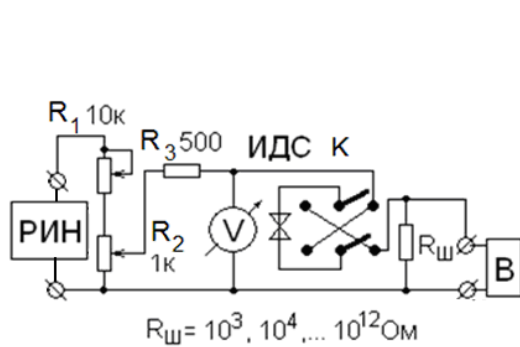


Рис.1. Схема измерений ВАХ диодных структур (ДС) с прослойками ПК, SiO₂, Si_xN_y: РИН – регулируемый источник напряжения; ИДС – исследуемая диодная структура; В – электрометрический вольтметр ВК2-16.

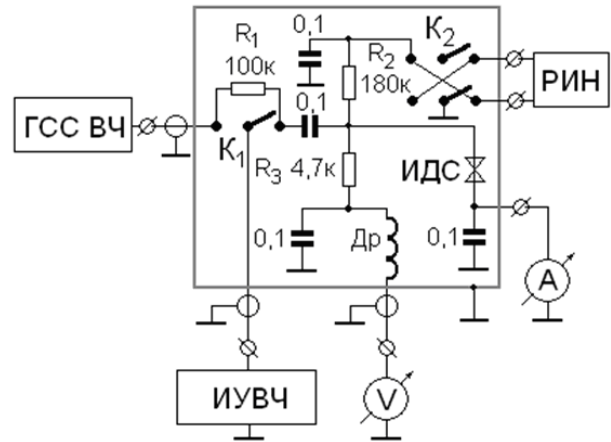


Рис.2. Схема измерений шумовых характеристик ДС с прослойками ПК: ГСС ВЧ – ВЧ генератор Г4-158; ИУ ВЧ – избирательный усилитель ВЧ; РИН – регулируемый источник напряжения.

Спектры ЭПР записывались на трёхсантиметровых спектрометрах – модернизированном отечественном приборе ЭПА-2М или спектрометре EMX фирмы Брукер.

В **третьей главе** представлены результаты исследований структуры, ЭПР, поперечного транспорта тока, ФЛ ПК.

Пористый кремний на сильно легированном мелкими примесями кремнии, согласно опубликованным и нашим данным электронной микроскопии (рис.3), имеет волокнистую структуру с размерами волокон ~10 нм.

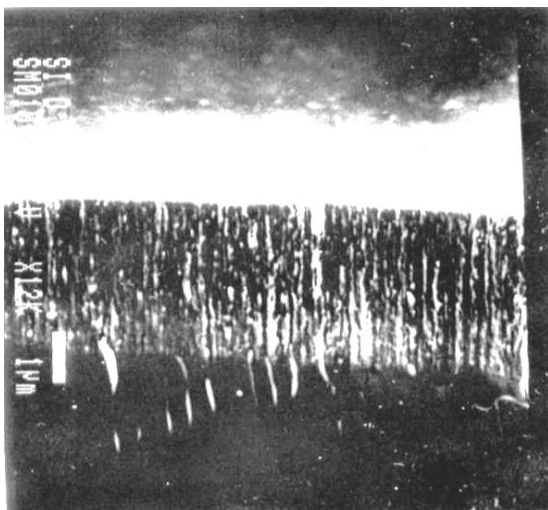


Рис. 3. Вид бокового скола монокристалла КДБ (111) 0.005, полученного с помощью растрового электронного микроскопа.

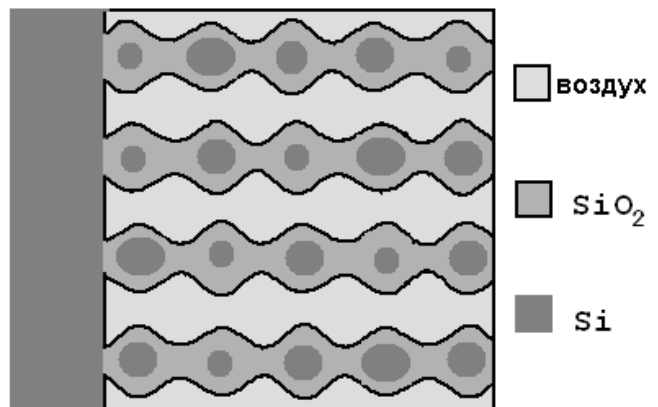


Рис. 4. Схематическое изображение структуры ПК.

Учитывая естественное окисление кремния, ПК можно схематически представить гирляндами наноразмерных гранул кремния в диэлектрике из воздуха и оксида кремния (рис.4).

По нашим данным ЭПР нами впервые установлено влияние уровня и типа легирования мелкими примесями на P_b -центры в ПК. При этом уровень легирования должен быть выше 10^{18} см^{-3} , что согласуется с оценкой поверхностной плотности P_b -центров и электронных состояний на границе Si-SiO₂, приведённой в главе 1. Методом ЭПР нами впервые обнаружены P_b -центры в пористом кремнии на кристаллах с электронным типом проводимости. Принадлежность этих линий ЭПР P_b -центрам подтверждается сходством их угловых зависимостей с аналогичными литературными данными (рис.5).

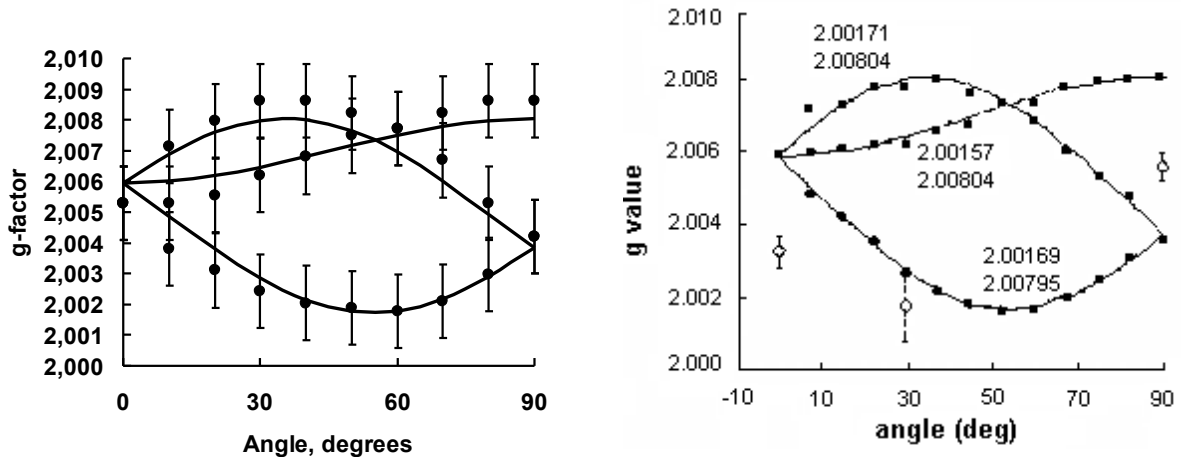


Рис. 5. Угловые зависимости линий ЭПР ПК, сформированного на КЭС 0.01(слева), аналогичные литературные данные для P_b -центров в ПК (справа).

Одинаковый ход отдельных составляющих температурных зависимостей этих линий свидетельствует об их принадлежности одним и тем же парамагнитным центрам, то есть P_b -центрам (рис.6).

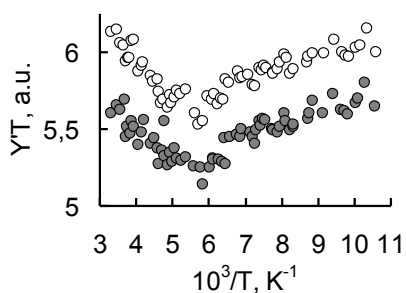


Рис.6. Температурные зависимости интенсивностей линий ЭПР ПК на КЭМ 0.005 без дополнительной обработки. Магнитное поле параллельно плоскости (110).

Уже первые измерения показали, что ВАХ ПК существенно нелинейные. По мере хранения и в результате отжига пористые слои становились всё более высокоомными вследствие окисления кремния в ПК.

Наши первые измерения в районе 1 мА показали, что ВАХ диодных структур с ПК могут быть описаны степенным квадратичным законом теории инжекционных токов. Однако дальнейшее расширение диапазона измерений на 10-13 порядков в область меньших токов дало более крутые степенные участки с показателем ~8-9 (см. рис.7 в двойном логарифмическом масштабе), которые уже трудно было объяснить инжекционными токами.

Все особенности поперечного транспорта тока в ПК хорошо описываются, полученными нами в четвёртой главе, линейным и экспоненциальным законами ДТ:

$$j_{ch} = \frac{Ve^2}{(N+1)RCkT} \exp\left(-\frac{e^2}{CkT}\right), \quad (1)$$

$$j_{ch} = \frac{e}{RC} \exp\left(-\frac{e^2}{CkT}\right) \exp\left(\frac{Ve}{(N+1)kT}\right). \quad (2)$$

На рисунке 7 слева внизу приведены в различных масштабах две из множества подобных наших экспериментальных ВАХ диодных структур с толщиной пористого слоя, отличающейся в два раза. На графике в линейном масштабе видно, что напряжение выхода из кулоновской блокады туннелирования пропорционально толщине образца: $U_{КБТ} \sim L$, следовательно ВАХ определяется объёмными процессами, а

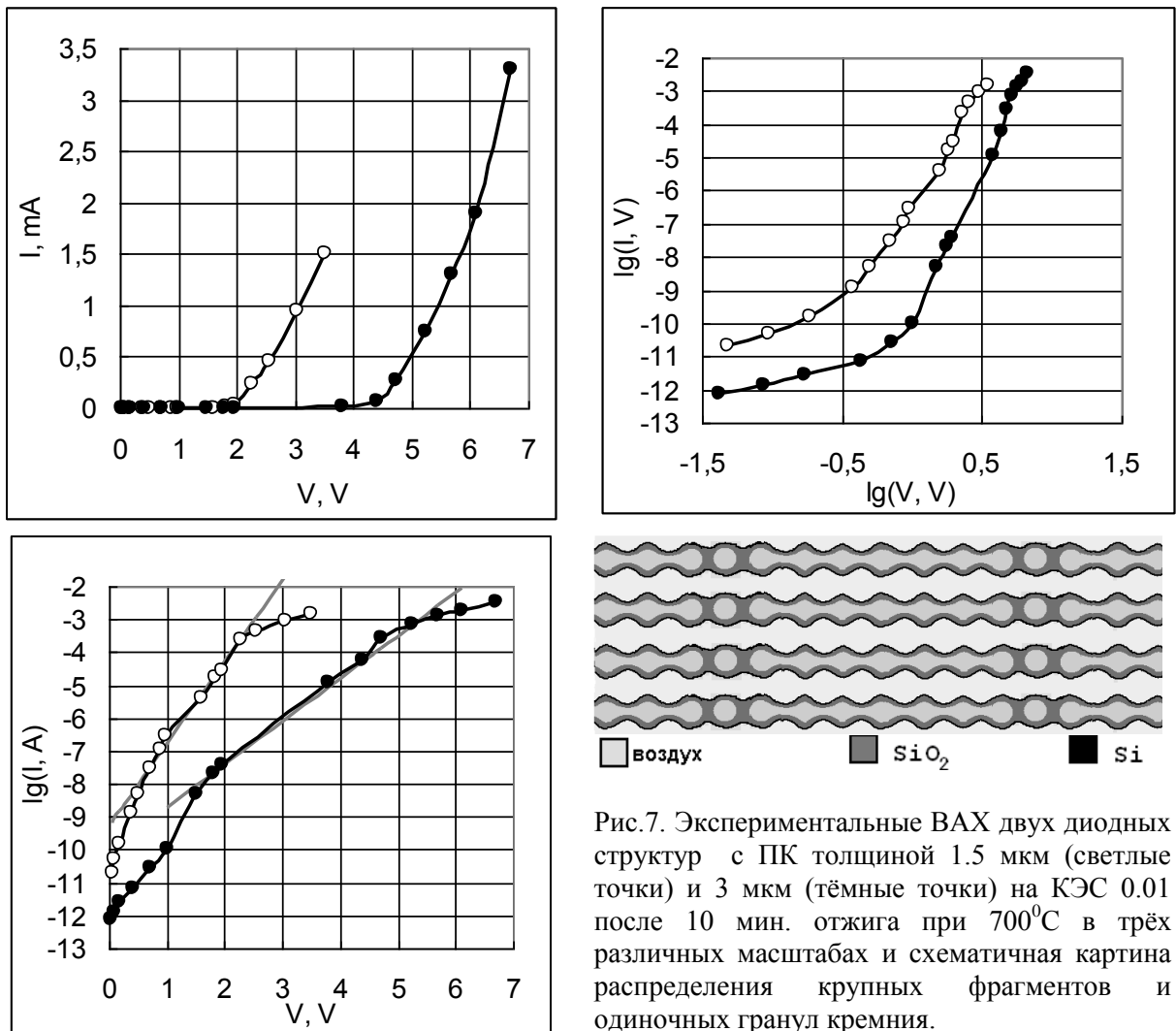


Рис.7. Экспериментальные ВАХ двух диодных структур с ПК толщиной 1.5 мкм (светлые точки) и 3 мкм (тёмные точки) на КЭС 0.01 после 10 мин. отжига при 700°C в трёх различных масштабах и схематичная картина распределения крупных фрагментов и одиночных гранул кремния.

не контактными явлениями. По наклону экспоненциального участка ВАХ в полулогарифмическом масштабе согласно (2) можно оценить число гранул N вдоль линии тока ($N_{1.5\text{мкм}} \sim 7$ и $N_{3\text{мкм}} \sim 13$ для структур на рисунке 7). Напряжение перехода от линейного к нелинейному участкам ВАХ по механизму ДТ пропорционально числу гранул вдоль линии тока, а значит и толщине пористого слоя: $U_{tr} \sim N \sim L$, эта пропорциональность характерна для наших образцов. В то время как по теории инжекционных токов $U_{tr} \sim L^2$, что противоречит эксперименту.

Дополнительный отжиг, как и следовало ожидать, уменьшил проводимость пористого слоя (рис.8). Согласно наклону экспоненциально участка в полулогрифмическом масштабе число гранул вдоль линии тока возросло до 300. Это объяснимо тем, что в ПК более крупные фрагменты кремния распались на отдельные наноразмерные частицы Si, как на рис.4, вследствие окисления ПК. Напряжение выхода из кулоновской блокады туннелирования увеличилось более чем на порядок.

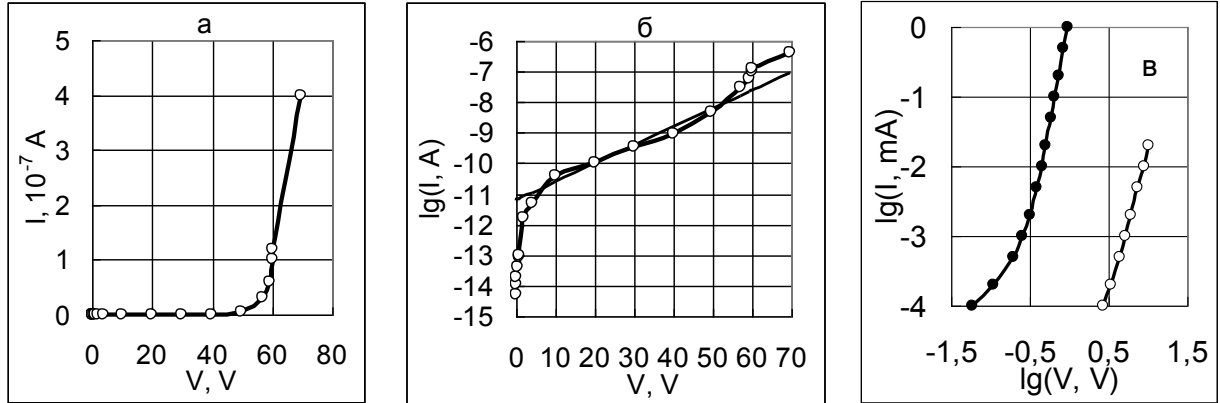


Рис. 8. Экспериментальная ВАХ (а, б) диодной структуры с прослойкой ПК толщиной 3 мкм на КЭС 0.01 после 10 мин отжигов при 700⁰С и 900⁰С.

Рис. 9. ВАХ (в) диодной структуры с прослойкой ПК толщиной 1 мкм на КДБ (110) 0.001 при 293К и 77К.

Подобные ВАХ были получены для диодных структур со слоями ПК на кремнии p^+ -типа, оксида и нитрида кремния, которые также представляются как гранулированные среды.

ВАХ при различных температурах на рисунке 9 позволяют оценить ёмкость гранул кремния в ПК

$$C = e \left(\left(\frac{V}{N} \right) - \frac{kT_1 T_2}{e(T_1 - T_2)} \ln \frac{I_{T_2}}{I_{T_1}} \right)^{-1} \approx 1.2 \cdot 10^{-18} \Phi, \quad (3)$$

$\sim 10^{-18}$ Ф, соответствующую диаметру гранул ~ 5 нм, что согласуется с вышеприведёнными данными высокоразрешающей электронной микроскопии.

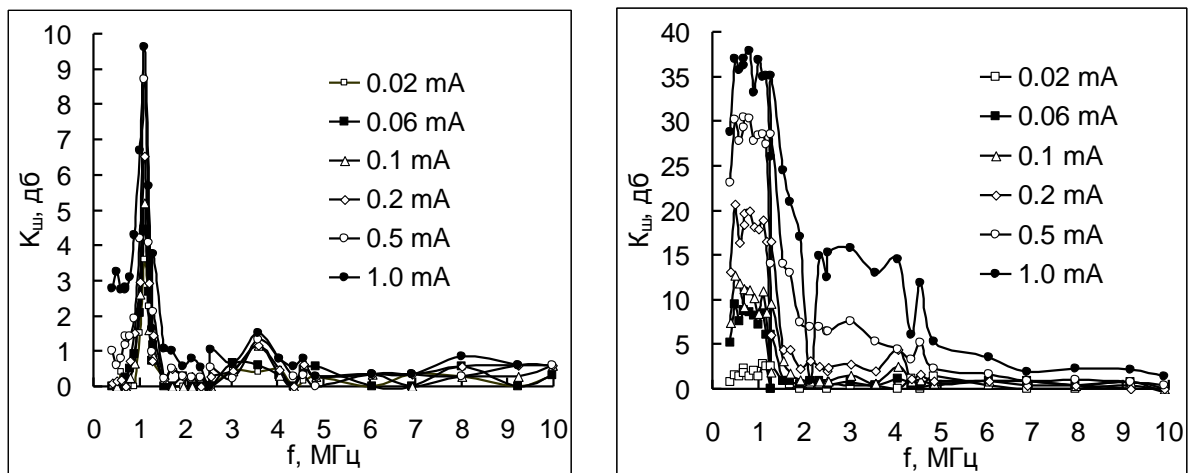


Рис.10. Частотная зависимость коэффициента шума $K_{ш}$ диодной структуры с прослойкой ПК на КДБ 0.001 в прямом сверху и обратном снизу полярностей включения при различных токах.

Величина ёмкости гранул $\sim 10^{-18}$ Ф позволяет ожидать при комнатной температуре одноэлектронные осцилляции с частотой $f=I/e$ согласно теории дискретного туннелирования для одиночного туннельного перехода. Для наших диодных структур с прослойкой ПК, площадью около 0.25 м^2 и расстоянием между гирляндами гранул в ~ 10 нм такие осцилляции должны быть на частоте около 1 МГц при токе 1 нА. Эти осцилляции действительно наблюдались (рис.10), и именно на частотах в районе 1 МГц. Однако не было простого линейного смещения пика в сторону больших частот с увеличением силы тока, согласно простой формуле $f=I/e$. Тем не менее, по крайней мере при обратном направлении тока, имело место высокочастотное расширение спектра. Вероятно для трёхмерной системы гранул ПК спектр шумов сложнее, чем для ДТ сквозь один туннельный переход.

В последнем разделе главы 3 представлены данные ФЛ ПК. В соответствии с выводами главы 1 для подавления влияния P_b -центров безызлучательной рекомбинации и повышения квантового выхода ФЛ ПК необходимы:

- оптимальный уровень легирования кремния мелкими примесями – акцепторами;
- окислительный отжиг структур с ПК, сводящий к минимуму механические напряжения на гетерогранице кремний-оксид кремния, которые приводят к образованию дислокаций и, следовательно, P_b -центров.

Наши эксперименты с термическим и химическим окислением ПК подтвердили эти выводы. Было установлено, что наиболее интенсивные спектры ФЛ наблюдались в ПК на КДБ 0.3 (рис. 11). Холодное окисление в азотной кислоте увеличило

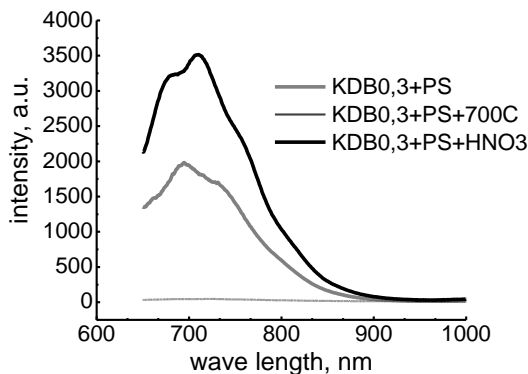


Рис.11. Спектры ФЛ ПК на КДБ 0.3.

Средний спектр для исходного образца со слоем ПК. Верхний и нижний – спектры образцов после «холодного» окисления ПК в азотной кислоте и после высокотемпературного окислительного отжига в течение 10 минут при 700°C на воздухе, соответственно.

интенсивность в 2 раза, что может быть связано с возрастанием числа мелких гранул кремния вследствие распада крупных фрагментов Si. В то время как высокотемпературный отжиг при 700°C подавлял свечение на несколько порядков. Это объяснимо тем, что более чем девятикратная разница в температурных коэффициентах расширения кремния и его оксида при 700°C способствует росту механических напряжений на гетерогранице и стимулирует образование дислокаций и P_b -центров безызлучательной рекомбинации.

В четвёртой главе настоящей работы в приближении слабых и средних полей аналитически решена задача ДТ сквозь цепочку из сколь угодно большого числа наноразмерных металлических гранул в диэлектрике. Получена линейная и экспоненциальная зависимость полевого роста тока.

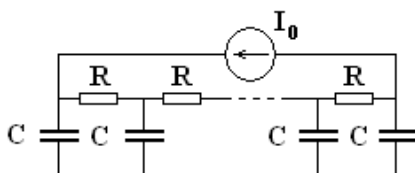


Рис.12. Эквивалентная схема цепочки гранул с туннельным сопротивлением R между ними. Роль общего электрода – «земли» выполняет бесконечно большое и бесконечно удалённое тело.

Цепочку наноразмерных гранул можно представить эквивалентной схемой из ёмкостей C , туннельных сопротивлений R_T и генератора тока I_0 . Роль земли выполняет бесконечно большое и бесконечно удалённое тело.

Состояние интересующей нас системы описывается гамильтонианом:

$$\hat{H} = \hat{H}_{0F} + \hat{H}_{CF} + \hat{H}_V + \hat{H}_T, \quad (4)$$

где $\hat{H}_{0F} = \sum_i \varepsilon_i \hat{n}_i$ – гамильтониан всей совокупности не взаимодействующих тел,

ε_i – энергия электронов на i -й грануле, \hat{n}_i – оператор числа электронов на i -й грануле;

$\hat{H}_{CF} = \sum_i \frac{U_i \hat{n}_i (\hat{n}_i - 1)}{2} = \sum_i \frac{e^2 \hat{n}_i (\hat{n}_i - 1)}{C_i}$ – корреляционный вклад кулоновского взаимодействия;

$\hat{H}_V = \sum_i eV_i \hat{n}_i$ – слагаемое, появляющееся при включении электрического поля и определяемое разностью потенциалов между соседними гранулами;

$H_T = \sum_{i=1}^{N+1} T_{i,i-1} \sum_{\alpha_{i-1}, \alpha_i} (a_{\alpha_{i-1}}^+ a_{\alpha_i} + a_{\alpha_i}^+ a_{\alpha_{i-1}})$ – туннельный член зависит амплитуды туннелирования между соседними гранулами $T_{i,i-1}$, операторов рождения и уничтожения электронов a_i^+ , a_i .

В стационарном состоянии считаем гранулы независимыми:

$$H_{0F} + H_{CF} = \sum_i (H_0 + H_C)_i. \quad (5)$$

В этом состоянии собственные функции гамильтониана связаны с матрицей плотности состояний ρ и большой статистической суммой $W\{n_i\}$

$$Sp\{\hat{\rho}\}_{\{\alpha_{ni}\}} = \sum_{\{\alpha_{ni}\}} \langle n_i \alpha_{ni} | \rho | n_i \alpha_{ni} \rangle = W\{n_i\} \equiv W(n_0, n_1, \dots, n_{N+1}). \quad (6)$$

Далее решалось уравнение Лиувилля с включенным туннелированием, которое рассматривалось как возмущение

$$\partial \hat{\rho}' / \partial t = -i[H', \hat{\rho}'], \quad \hat{\rho}'_{t \rightarrow -\infty} = \hat{\rho}. \quad (7)$$

Получена система уравнений для скорости изменения возмущённой функции распределения электронов на гранулах W' , которая отображает всевозможные одноэлектронные переходы между соседними гранулами с рождением и уничтожением экситонов на них

$$\begin{aligned} \partial W'\{n_i\} / \partial t = & - \left(\sum_{j=1}^{N+1} ((P(n_j, n_{j-1}) + P(n_{j-1}, n_j)) + \sum_{j=0}^N ((P(n_j, n_{j+1}) + P(n_{j+1}, n_j))) \right) W\{n_i\} + \\ & + \sum_{j=1}^{N+1} (P(n_j - 1, n_{j-1} + 1) W\{n_i, n_j - 1, n_{j-1} + 1\} + P(n_j + 1, n_{j-1} - 1) W\{n_i, n_j + 1, n_{j-1} - 1\}) + \\ & + \sum_{j=0}^N (P(n_j - 1, n_{j+1} + 1) W\{n_i, n_j - 1, n_{j+1} + 1\} + P(n_j + 1, n_{j+1} - 1) W\{n_i, n_j + 1, n_{j+1} - 1\}), \end{aligned} \quad (8)$$

где P – вероятности или частоты переходов, определяемые выражениями вида

$$P(n_j, n_{j-1}) = 4T_{j,j-1}^2 \operatorname{Re} \sum_{\alpha_j, \alpha_{j-1} = -\infty}^0 \int d(t-t') \langle a_{\alpha_{j-1}}^+(t) a_{\alpha_{j-1}}(t') \rangle_{n_j, n_{j-1}} \langle a_{\alpha_j}^+(t) a_{\alpha_j}(t') \rangle_{n_j, n_{j-1}}.$$

После перехода от суммирования по импульсам к интегрированию по энергиям получаем все восемь частот переходов в виде

$$\begin{aligned}
P(n_j, n_{j-1}) &= \lambda_{j,j-1} f(E_{n_j, n_{j-1}} - E_{n_{j-1}+1, n_{j-1}} + eV_{j,j-1}), \\
P(n_j, n_{j+1}) &= \lambda_{j+1,j} f(E_{n_j, n_{j-1}} - E_{n_{j+1}+1, n_{j+1}} - eV_{j+1,j}), \\
P(n_{j-1}, n_j) &= \lambda_{j,j-1} f(E_{n_{j-1}, n_{j-1}-1} - E_{n_j+1, n_j} - eV_{j,j-1}), \\
P(n_{j+1}, n_j) &= \lambda_{j+1,j} f(E_{n_{j+1}, n_{j+1}-1} - E_{n_j+1, n_j} + eV_{j+1,j}), \\
P(n_{j-1}+1, n_j-1) &= \lambda_{j,j-1} f(E_{n_{j-1}+1, n_{j-1}} - E_{n_j, n_{j-1}} - eV_{j,j-1}), \\
P(n_{j+1}+1, n_j-1) &= \lambda_{j+1,j} f(E_{n_{j+1}+1, n_{j+1}} - E_{n_j, n_{j-1}} + eV_{j+1,j}), \\
P(n_j+1, n_{j-1}-1) &= \lambda_{j,j-1} f(E_{n_j+1, n_j} - E_{n_{j-1}, n_{j-1}-1} + eV_{j,j-1}), \\
P(n_j+1, n_{j+1}-1) &= \lambda_{j+1,j} f(E_{n_j+1, n_j} - E_{n_{j+1}, n_{j+1}-1} - eV_{j+1,j}),
\end{aligned} \tag{9}$$

где λ – параметры туннелирования, связанные с плотностью электронных состояний на уровне Ферми, функция f определяется изменением энергии системы двух гранул при одноэлектронных переходах; $eV_{j,j-1} = \mu_i - \mu_{i-1}$ – разность потенциалов между соседними гранулами зависит от смещения их уровней Ферми в электрическом поле.

Из условия $\partial W'(n_i) / \partial t = 0$ получаем уравнение стационарности

$$\begin{aligned}
W\{n_i\} &= \left(\sum_{j=1}^{N+1} (P(n_{j-1}+1, n_j-1)W\{n_i, n_j-1, n_{j-1}+1\} + P(n_j+1, n_{j-1}-1)W\{n_i, n_j+1, n_{j-1}-1\}) + \right. \\
&+ \left. \sum_{j=0}^N (P(n_{j+1}+1, n_j-1)W\{n_i, n_j-1, n_{j+1}+1\} + P(n_j+1, n_{j+1}-1)W\{n_i, n_j+1, n_{j+1}-1\}) \right) \times \\
&\left(\sum_{j=1}^{N+1} ((P(n_j, n_{j-1}) + P(n_{j-1}, n_j)) + \sum_{j=0}^N ((P(n_j, n_{j+1}) + P(n_{j+1}, n_j))) \right)^{-1}.
\end{aligned} \tag{10}$$

Поскольку предметом нашего интереса является режим малых токов до начала выхода из режима кулоновской блокады туннелирования, используем приближение достаточно слабых полей

$$E_{n_{j-1}+1, n_{j-1}} - E_{n_j, n_{j-1}} \gg eV_{j,j-1} \tag{11}$$

и достаточно низких температур

$$\exp(E_{n_{j-1}+1, n_{j-1}} - E_{n_j, n_{j-1}}) / kT \gg 1. \tag{12}$$

Для случая, когда все гранулы являются одинаковыми

$$E_{n_j, n_{j-1}} - E_{n_{j-1}+1, n_{j-1}} = -U_{j,j-1} = E_{n_j, n_{j-1}} - E_{n_{j+1}, n_j} \equiv -U_j, \tag{13}$$

где взаимная корреляционная энергия (ВКЭ) соседних гранул и корреляционная энергия не зависят от номера гранулы ($U_{j,j-1} = U_j = U$). При этих условиях и одинаковых параметрах туннелирования влево и вправо $\lambda_{j,j-1} = \lambda_{j,j+1} = \lambda$ выражение (10) сводится к формуле:

$$\begin{aligned}
W\{n_i\} &\approx \frac{1}{2(N+1)} \left(\sum_{j=1}^{N+1} (W\{n_i, n_j-1, n_{j-1}+1\} + W\{n_i, n_j+1, n_{j-1}-1\}) + \right. \\
&\left. \sum_{j=0}^N (W\{n_i, n_j-1, n_{j+1}+1\} + W\{n_i, n_j+1, n_{j+1}-1\}) \right) \exp(U/kT),
\end{aligned} \tag{14}$$

из которой видно, что каждая из неравновесных величин $W\{n_i, n_j \pm 1, n_{j-1} \mp 1\}$ или $W\{n_i, n_j \pm 1, n_{j+1} \mp 1\}$ удовлетворяет условию малости

$$W\{n_i, n_j \pm 1, n_{j-1} \mp 1\} \approx W\{n_i, n_j \pm 1, n_{j+1} \mp 1\} \approx W\{n_i\} \exp(-U/kT) \ll W\{n_i\}, \tag{15}$$

Поэтому при вычислении тока сквозь цепочку гранул с малой погрешностью можно использовать равновесную статистическую сумму. Средний ток цепочки гранул равен току между любой парой соседних гранул, который определяется суммой вкладов в процесс туннелирования по полю и против него со всевозможными весовыми значениями

$$\begin{aligned}
 I_{ch} &= e \sum_{n_0=n_{or}-1}^{n_{or}+1} \sum_{n_1=n_{or}-1}^{n_{or}+1} \dots \sum_{n_{N+1}=n_{or}-1}^{n_{or}+1} W\{n_i\} (P(n_j, n_{j-1}) - P(n_{j-1}, n_j)) \approx \\
 &\approx e (P(n_j, n_{j-1}) - P(n_{j-1}, n_j)) \approx \frac{U}{eR} \exp\left(-\frac{U}{kT}\right) \text{sh}\left(\frac{eV_{j,j-1}}{kT}\right) = \\
 &= \frac{e}{RC} \exp\left(-\frac{e^2}{CkT}\right) \text{sh}\left(\frac{eV_{j,j-1}}{kT}\right).
 \end{aligned} \tag{16}$$

После преобразований с использованием условия нормировки, явного вида частот переходов, выражений для ёмкости и туннельного сопротивления, с учётом того, что напряжение цепочки равно сумме падений напряжения между соседними гранулами, получаем закон изменения тока с напряжением цепочки наноразмерных металлических гранул в диэлектрической среде

$$I_{ch} = \frac{e}{RC} \exp\left(-\frac{e^2}{CkT}\right) \text{sh}\left(\frac{eV}{(N+1)kT}\right), \tag{17}$$

который переходит в линейный в приближении слабых полей ($eV_{j,j-1} \ll kT$)

$$I_{ch} = \frac{e^2 V}{(N+1)RCkT} \exp\left(-\frac{e^2}{CkT}\right) = \frac{e^2 V}{(N+1)RCkT} \exp\left(-\frac{U}{kT}\right),$$

и в экспоненциальный – в приближении средних полей ($U \gg eV_{j,j-1} \gg kT$)

$$I_{ch} = \frac{e}{RC} \exp\left(-\frac{e^2}{CkT}\right) \exp\left(\frac{Ve}{(N+1)kT}\right) = \frac{e}{RC} \exp\left(\frac{e}{kT}\left(\frac{V}{N+1} - \frac{e}{C}\right)\right),$$

где под N имеется ввиду число гранул между металлическими берегами.

Выводы

1. Анализ опубликованных экспериментальные данные ЭПР, ФЛ и других методов исследования наноразмерных гетероструктур Si-SiO₂, показал, что природа P_b – центров безизлучательной рекомбинации связана, вероятно, с дислокациями в кремнии вблизи границы кремний-оксид кремния.

2. Мелкие в объёмном кремнии примеси элементов III и V групп периодической таблицы Менделеева в согласии с известной высокой плотностью состояний на границе Si-SiO₂ влияют на ЭПР P_b-центров безизлучательной рекомбинации при концентрации выше 10¹⁸ см⁻³. Акцепторная примесь бора подавляет ЭПР P_b-центров.

3. Поперечный транспорт тока в ПК, сформированном на сильно легированном мелкими примесями кремнии может быть объяснён на основе теории инжекционных токов в диэлектриках и дискретным туннелированием электронов или дырок между наноразмерными частицами кремния.

4. Шумовые характеристики диодных структур с прослойкой ПК, сформированном на кремнии как p⁺- так и n⁺-типов, показывают немонотонный спектр колебаний напряжения, с пиками избыточных шумов в районе частот, соответствующих одноэлектронным осцилляциям при дискретном туннелировании электронов или дырок.

5. Для получения высокого квантового выхода ФЛ ПК на красной границе видимого диапазона длин волн необходимы оптимальный уровень легирования исходного кремния мелкими акцепторами и оптимизация режима окислительной пассивации ПК, при котором механические напряжения на границе кремний-оксид кремния сводятся к минимуму.

6. Теоретически выведен характерный для дискретного туннелирования экспоненциальный полевой рост тока в гранулированной среде, позволяющий объяснить ВАХ диодных структур с прослойкой ПК и ему подобных систем.

Список цитированной литературы

1. Thieß, W. Optical properties of porous silicon / W. Thieß // Surf. Sci. Rep. – 1997. - Vol.29, Nos3/4. - P.91-192.
2. Bisi, S. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics / O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi // Surf. Sci. Rep. – 2000. - Vol.38, Nos1/3. - P.1-126.
3. П.К. Кашкаров, Необычные свойства пористого кремния, Соросовский Образовательный Журнал, том 7, №1, 2001, с.102-107.
4. С.П. Зимин, Пористый кремний – материал с новыми свойствами, Соросовский Образовательный Журнал, том 8, №1, 2004, с.101-107.

Публикации по теме диссертации

- 1А. Демидова, Н.Е. Электронный парамагнитный резонанс в пористом кремнии / Е.С. Демидов, В.Г. Шенгуров, Н.Е. Демидова, В.Н. Шабанов // ФТП. - 1994. - Т. 28, Вып.4. - С. 701-705; Вып.8. - С.1503.
- 2А. Демидова, Н.Е. Дискретное туннелирование дырок в пористом кремнии/ Е.С. Демидов, Н.Е. Овчаренко (Демидова), В.В. Карзанов, Д.А. Жестин // Оптика полупроводников: сб. тр. Междунар. науч. конф. / Ул. гос. ун-т. - Ульяновск, 2000. - С.112
- 3А. Демидова, Н.Е. ЭПР и электрические свойства пористого кремния / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов // XIX научные чтения им. Н.В.Белова: сб. тр. Междунар. науч. конф. / Нижегород. гос. ун-т. - Н.Новгород, 2000. - С.121.
- 4А. Демидова, Н.Е. Дискретное туннелирование электронов или дырок и инжекционные токи в пористом кремнии с примесями d-, f-переходных элементов / Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, Д.И. Жестин, Н.Е. Демидова, А.С. Калмыкова // Оптика, оптоэлектроника и технологии: сб. тр. Междунар. науч. конф. / Ул. гос. ун-т. - Ульяновск, 2001. - С.112.
- 5А. Демидова, Н.Е. Пики избыточных шумов диодных структур на пористом кремнии/ Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, В.Н. Шабанов// Нанофотоника: сб. тр. совещ. / ИФМ РАН. - Н.Новгород, 2002. - С.157-160.
- 6А. Демидова, Н.Е. ЭПР в термических и ионно-имплантированных структурах/ Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, Н.Е. Демидова // Физические и физико-химические основы ионной имплантации: сб. тр. IV Всероссийского семинара / Нижегород. гос. ун-т. - Н.Новгород, 2002. - С.35-37.
- 7А. Демидова, Н.Е. Избыточные шумы в структурах на основе плёнок SiO₂, облученных ионами кремния / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, Д.И. Тетельбаум, В.Н. Шабанов // Физические и физико-химические основы ионной имплантации: сб. тр. IV Всероссийского семинара / Нижегород. гос. ун-т. - Н.Новгород, 2002. - С.81-82.
- 8А. Демидова, Н.Е. Пики избыточных шумов диодных структур на пористом кремнии / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, В.Н. Шабанов // Письма в ЖЭТФ. - 2002. - Т.75. - Вып.11. - С.673-675.

- 9А. Демидова, Н.Е. ЭПР и люминесценция в наноразмерных гетероструктурах Si-SiO₂ / Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, Н.Е. Демидова // Нанофотоника: сб. тр. совещ. / ИФМ РАН. - Н.Новгород, 2003. - С.48-51.
- 10А. Демидова, Н.Е. Электронный парамагнитный резонанс, вольтамперные характеристики и шумовые свойства слоёв пористого кремния / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов // Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение: сб.тр. 2-й межрегион. научн. шк. для асп. и студ. / Саранск, 2003. - С.98.
- 11А. Демидова, Н.Е. Перенос тока в пористом кремнии, сформированном на сильно легированных мелкими примесями монокристаллах кремния / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, Д.А. Жестин // Оптика, оптоэлектроника и технологии: сб. тр. Междунар. научн. конф. / Ул. гос. ун-т. - Ульяновск, 2003. - С.199.
- 12А. Демидова, Н.Е. Избыточные шумы в структурах на основе плёнок SiO₂, облученных ионами кремния/ Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, В.Н. Шабанов // Вестник Нижегородского государственного университета, серия Физика твёрдого тела. - 2003. - Вып.1(б). - С.66-69.
- 13А. Демидова, Н.Е. ЭПР и электрические свойства пористого кремния / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, И.С. Белорунова // Радиоэлектроника, Электроника и Энергетика: сб. тр. X Междунар. научн.-техн. конф. студ. и аспирантов. / Москва, 2004. - С.231-232.
- 14А. Демидова, Н.Е. ЭПР и электрические свойства пористого кремния / И.С. Белорунова, Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов // Голубая Ока: сб. тр. IX Нижегород. сессии молодых ученых / Н.Новгород, 2004. - С. 65.
- 15А. Демидова, Н.Е. Свойства силиката магния с примесью хрома в пористом кремнии / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, И.С. Белорунова, О.Н. Горшков, М.В. Степихова, А.М. Шаронов // Нанофотоника: сб. тр. совещ. / ИФМ РАН. - Н.Новгород, 2004. - С.267-270.
- 16А. Демидова, Н.Е. ЭПР и перенос тока в пористом кремнии, сформированном на сильно легированных мелкими примесями монокристаллах кремния / И.С. Белорунова, Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, Д.А. Жестин // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. IV Междунар. конф. / Санкт-Петербург, 2004. - С. 129.
- 17А. Демидова, Н.Е. Электронный парамагнитный резонанс и перенос тока в пористом кремнии / И.С. Белорунова, Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов // Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение: сб. тр. Межрегион. научн. шк. для студ. и аспирантов. / Саранск, 2004. - С.77.
- 18А. Демидова, Н.Е. Свойства силиката магния с примесью хрома в пористом кремнии. / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, И.С. Белорунова, О.Н. Горшков, М.В. Степихова, А.М. Шаронов // ФТТ. - 2005. - Т.47. - Вып.1. - С.136-138.
- 19А. Демидова, Н.Е. ЭПР и перенос тока в пористом кремнии. / И.С. Белорунова, Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов // Физические и физико-химические основы ионной имплантации: сб. тр. VII Всерос. сем. / Н.Новгород, 2004. - С.112.
- 20А. Демидова, Н.Е. Перенос тока в Нитриде кремния, синтезированном ионной имплантацией азота в кремний / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, К.А. Марков // Физические и физико-химические основы ионной имплантации: сб. тр. VII Всерос. сем. / Н.Новгород, 2004. - С.33.
- 21А. Демидова, Н.Е., Демидова Н.Е., Экспоненциальный полевой рост проводимости в гранулированных средах, обусловленный кулоновской блокадой туннелирования / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова // Нанополупроводники и наноэлектроника: сб. тр. симпозиум. / ИФМ РАН. - Н.Новгород, 2005. - С.194-195.

- 22А. Демидова, Н.Е. Карзанов В.В., Демидова Н.Е., Белорунова И.С., Горшков О.Н., Марычев М.О. Свойства силиката эрбия с примесью хрома в пористом кремнии. / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, И.С. Белорунова, О.Н. Горшков, М.О. Марычев // Нанозифика и нанозлектроника: сб. тр. симпоз. / ИФМ РАН. - Н.Новгород, 2005. - С.346-347.
- 23А. Демидова, Н.Е. Свойства силикатов магния и эрбия с примесью хрома в пористом кремнии / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, И.С. Белорунова, О.Н. Горшков, М.О. Марычев, М.В. Степихова, А.В. Шаронов // Фундаментальные проблемы физики: сб. тр. III Междунар. научн. конф. / Казань, 2005. - С.140.
- 24А. Демидова, Н.Е. Формирование оптически активных оксидных фаз переходных и тяжёлых элементов в пористом кремнии. / И.С. Белорунова, Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов // Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение: сб. тр. IV Межрегион. молодежн. научн. шк. / Саранск, 2005. - С.141.
- 25А. Демидова, Н.Е. ЭПР и люминесценция в наноразмерных гетероструктурах Si-SiO₂ / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова // Вестник Нижегородского госуниверситета, серия Физика твёрдого тела. - 2005. - Вып. 1(8). - С. 22-46.
- 26А. Демидова, Н.Е. Свойства силиката эрбия с примесью хрома в пористом кремнии/ Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, Н.Е. Демидова, И.С. Рассолова, О.Н. Горшков, М.О. Марычев, М.В. Степихова, А.М. Шаронов // ФТТ. - 2007. - Т.49. - Вып.3. - С.508-511.
- 27А. Демидова, Н.Е. Экспоненциальный полевой рост проводимости в гранулированных средах, обусловленный кулоновской блокадой туннелирования/ Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова // Вестник Нижегородского госуниверситета, серия Физика твёрдого тела. - 2007. - Вып.4. - С.39-46.
- 28А. Демидова, Н.Е. Дискретное туннелирование в электронных транспортных свойствах наногранулированного пористого кремния и подобных гетерофазных системах / Е.С.Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, К. А. Марков, В. В. Сдобняков, С. А. Филиппов // Нанозифика и нанозлектроника: сб. тр. симпоз. / ИФМ РАН. - Н.Новгород, 2008. - С.305-306.
- 29А. Демидова, Н.Е. Увеличение эффективности фотолюминесценции эрбия в теллуридном стекле путём передачи энергии через нанокристаллы кремния / Е.С. Демидов, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, Н. Е. Демидова Ю.И. Чигиринский, Ю.А. Дудин, А.Н. Шушунов, Д.И. Тетельбаум, С. А. Филиппов // Оптика, оптоэлектроника и технологии: сб. тр. Междунар. научн. конф. / Ул. гос. ун-т. - Ульяновск, 2008. - С.37.
- 30А. Демидова, Н.Е. Фотолюминесценция пористого кремния, пропитанного теллуридным стеклом с примесями эрбия и иттербия / Е.С. Демидов, А.Н. Михайлов, А.Н. Белов, Н.Е. Демидова, Ю.И. Чигиринский, А.Н. Шушунов, Д.И. Тетельбаум, О.Н. Горшков, С.А. Филиппов // Нанозифика и нанозлектроника: сб. тр. симпоз. / ИФМ РАН. - Н.Новгород, 2009. - С.326-327.
- 31А. Демидова, Н.Е. Люминесцентные и транспортные свойства пористого кремния, пропитанного вольфрам-теллуридным стеклом с примесями иттербия и эрбия / Е.С. Демидов, Н. Е. Демидова, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, Ю.И. Чигиринский, Ю.А. Дудин, А.Н. Шушунов, Д.И. Тетельбаум // Физика полупроводников - УНКФП-4: сб. тр. IV Укр. научн. конф. / Запорожье, 2009. - С.125.
- 32А. Демидова, Н.Е. Дискретное туннелирование в электронных транспортных свойствах наногранулированного пористого кремния и подобных гетерофазных системах / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, К.А. Марков, В.В. Сдобняков // ФТТ. - 2009. - Т.51. - Вып.10. - С.1894-1899.