На правах рукописи

A

ТУРИЩЕВ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ

ЭЛЕКТРОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ И ЕГО СОЕДИНЕНИЙ

Специальность 01.04.10 - физика полупроводников

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Воронеж - 2014

Работа универс	выполнена итет"	В	ФГБОУ	ВПО	"Воронежский	государственный			
Научнь	ій консульта	HT:	ך ו	октор фі ірофессо	изико-математиче р Терехов Влади	еских наук, имир Андреевич			
Официа	альные оппо	нент	т ы: С Д І У И	Солдатов октор фирофессор ниверсит спектроо	Александр Влад изико-математиче р, Южный федера ет, кафедра физин скопии, заведующ	имирович еских наук, льный ки наносистем ий			
			н 7 1 1 У 7	Казанский Андрей Георгиевич доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет, кафедра физики полупроводников, главный научный сотрудник					
			ן נ ע ז	Косилов юктор фі профессо техничесь иатериал- аведуюц	Александр Тим изико-математиче р, Воронежский г кий университет, оведения и физив ций	офеевич еских наук, осударственный кафедра ки металлов,			
Ведуща	я организаці	ия:	Ф Г и	рГБОУ В осударст м. Н.И. Ј	ПО "Нижегородс венный универси Іобачевского" г. Н	ский тет Чижний Новгород			

Защита состоится <u>26</u> июня 2014 г. в 15:20 на заседании диссертационного совета Д 212.038.10 при Воронежском государственном университете по адресу: 394006, г. Воронеж, Университетская площадь 1, физический факультет, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета и на сайте www.science.vsu.ru.

Автореферат разослан <u>10</u> апреля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Mapurante

Маршаков В.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Материалы, содержащие наноразмерные структуры, привлекают серьёзное внимание в силу своих уникальных физических свойств. Такие объекты должны характеризоваться квазиатомной энергетической структурой электронных состояний С вытекающими из этого особыми оптическими и электрофизическими свойствами, высокой адсорбционной способностью химической И активностью. Поэтому основные закономерности изменения электронного спектра и обусловленные ими физические свойства при переходе к наноразмерным объектам остаются в центре внимания физики наноструктур и являются особенно актуальными. К тому же, специфические особенности взаимодействия между частицами нанометровых размеров и материалом окружающей их матрицы, которая используется для пассивации и стабилизации их свойств, до сих пор мало изучены.

Исследования полупроводниковых систем на основе кремния и его соединений являются особенно перспективными по целому ряду причин. Во-первых, кремний – это основной материал микроэлектроники как в настоящее время, так и в обозримом будущем. Во-вторых, уменьшение размеров элементов полупроводниковых приборов является основной тенденцией в микроэлектронике, что неизбежно привело современные технологии в мир наноэлектроники. Наконец, способность наноматериалов на основе кремния достаточно интенсивно излучать видимый свет при комнатной температуре, в отличие от объемного кристаллического кремния, должна привести К созданию элементов микросхем С возможностью совместной оптической И электрической обработки информации.

В перспективе, интеграция электронных и оптических функций в рамках кремниевой технологии позволит осуществить качественный и заметный количественный скачок в развитии современной электронной техники. Кроме того, поскольку по своим электронным свойствам нанокристаллы приближаются к отдельным атомам и молекулам, использование устройств на их основе перспективно и в классической электронике. Для процессов переключения или запоминания информации в таких приборах требуется минимальное количество заряда, что повышает быстродействие таких схем, их экономичность, и соответственно, понижает рассеиваемую мощность, большие значения которой у существующих приборов требуют применения специального охлаждения.

Новые и уникальные оптические и электрофизические свойства, проявляемые наноструктурами на основе кремния и его соединений, определяются особенностями их атомного и электронно-энергетического строения. Поэтому вопросы о контроле вариаций локальной атомной и электронной структуры, возникающие при создании изученных В диссертации объектов, чрезвычайно важны. В связи с этим особый интерес представляют экспериментальные методы, позволяющие получать данные о взаимосвязи локальной атомной структуры и энергетического спектра электронов. Для этого в работе используются методы рентгеновской спектроскопии: ультрамягкая рентгеновская эмиссионная спектроскопия и спектроскопия ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения с использованием синхротронного излучения (спектроскопия квантового фотоэффекта). выхода рентгеновского Эти методы обладают всеми необходимыми преимуществами. Являясь неразрушающими, они обладают высокой чувствительностью к локальному окружению атомов данного сорта, в нашем случае кремния, и позволяют получить информацию о распределении локальной парциальной плотности электронных состояний в поверхностных нанослоях исследуемого объекта. Еще одним несомненным преимуществом комплекса используемых методов является тот факт, что длины волн синхротронного излучения в рентгеновском диапазоне могут быть сопоставимы с размерами наночастиц в исследуемых структурах. Поэтому взаимодействие соразмерных объектов должно приводить к возникновению новых эффектов в нанометровом диапазоне длин волн

шкалы электромагнитных колебаний. И, наконец, применение в работе современных синхротронных источников излучения позволило экспериментально изучить энергетический спектр электронов кремниевых наноструктур с предельно возможным энергетическим разрешением и достаточно высокой интенсивностью.

Методы исследований.

Для изучения закономерностей и особенностей формирования электронноэнергетического спектра валентной зоны и зоны проводимости наноразмерных структур на основе кремния и его соединений, установления связи между электронно-энергетическим строением этих объектов и проявляемыми ими свойствами, использовались следующие основные методы исследований:

Метод ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии УМРЭС;

- Метод спектроскопии квантового выхода КВ (ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения).

В качестве дополнительных методов использовались следующие: растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, фотолюминесценция, рентгеновская дифракция, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света.

<u>Объекты исследований.</u>

Объектом исследований являлся широкий ряд наноразмерных структур на основе кремния и его соединений с различной стехиометрией, фазовым составом, размерным фактором:

- Нанопористый кремний, содержащий кремний в нанокристаллическом состоянии, сформированный при использовании электрохимического травления и состаренный в естественных условиях в течение различного времени.

- Системы, содержащие нанокластеры/нанокристаллы кремния в матрице оксидов кремния, полученные как ионной имплантацией, так и термическим распадом метастабильной фазы SiO.

- Многослойные нанопериодические структуры (МНС), состоящие из чередующихся слоев (оксид кремния/оксид алюминия)_n, содержащие кластеры Si.

- Нанопорошки кремния, полученные распылением кремниевой мишени мощным электронным пучком.

- Структуры с нанослоями твердых растворов (ТР) кремний-германий, в том числе содержащие квантовые точки.

- Нанослои растянутого кремния в структурах "кремний на изоляторе" (КНИ).

<u>Цель работы.</u> Установление закономерностей формирования электронно-энергетического спектра систем с наноразмерными неоднородностями из кремния и его соединений, определение особенностей их локальной атомной структуры и фазового состава, а также их взаимосвязь с проявляемыми свойствами.

Задачи исследования:

1. Получение данных об особенностях строения валентной зоны и зоны проводимости в полупроводниковых наноразмерных структурах на основе кремния и его соединений методами ультрамягкой рентгеновской спектроскопии (эмиссия и поглощение), в том числе с использованием синхротронного излучения.

2. Определение влияния условий формирования и естественного старения на структуру энергетических зон пористого кремния (ПК), фазового состава его поверхностных слоев. Построение обобщенной модели фотолюминесцентных свойств ПК.

3. Анализ особенностей электронного строения нанослоев аморфного кремния, формируемого обработкой пластин с-Si в низкоэнергетической плазме водорода, гелия и аргона.

4. Определение влияния технологических условий формирования светоизлучающих массивов наночастиц кремния на их электронноэнергетический спектр и локальную атомную структуру при ионной имплантации Si⁺ в матрицу оксида кремния и при термических отжигах тонких слоев субоксида кремния, включая MHC. 5. Определение фазового состава и исследование электронноэнергетического строения нанопорошков кремния, полученных распылением кремниевой мишени мощным электронным пучком.

6. Установление особенностей энергетического спектра в нанослоях твердых растворов кремний-германий на подложках кремния и в напряженных структурах типа "кремний на изоляторе" (КНИ).

Научная новизна полученных результатов:

- Впервые получены экспериментальные данные о характере энергетического распределения электронных состояний в валентной зоне и зоне проводимости для всех исследованных наноразмерных структур на основе кремния и его соединений методами ультрамягкой рентгеновской спектроскопии, в том числе с использованием синхротронного излучения.

- Установлено, что увеличение пористости в ПК приводит к сдвигу дна зоны проводимости и увеличивает ширину запрещённой зоны. Поверхность наноразмерных столбиков ПК покрыта аморфным слоем и субоксидом кремния.

- Показано, что при естественном старении пористого кремния деградация фотолюминесцентных свойств сопровождается окислением слоя аморфного кремния, покрывающего развитую поверхность пористого слоя. Толщина аморфного слоя и скорость его естественного окисления зависят от параметров исходных пластин с-Si, используемых для формирования пористого кремния.

- При низкоэнергетической плазменной обработке пластин кристаллического кремния образуется диоксид кремния, по толщине значительно превосходящий толщину естественного оксида кремния.

- Установлено, что циклический набор дозы имплантации является более эффективным способом формирования массивов нанокристаллов кремния в поверхностных слоях матрицы SiO₂, чем однократный набор той же общей дозы.

- Обнаружено ориентирующее действие монокристаллической подложки на рост нанокристаллов кремния в матрице оксидной пленки.

- Обнаружены аномальные эффекты взаимодействия синхротронного излучения нанометровых длин волн с системами, содержащими

нанокристаллы кремния в диэлектрической матрице или между нанослоями диэлектрика, проявляющиеся в обращении интенсивности вблизи L_{2,3} края поглощения кремния.

- Изучено формирование наночастиц кремния в МНС оксид кремния/оксид алюминия при их высокотемпературных отжигах.

- Обнаружено влияние растягивающих напряжений в КНИ структуре на энергетический спектр валентной зоны и зоны проводимости.

- Впервые экспериментально обнаружено явление интерференции синхротронного излучения нанометровых длин волн в структурах "кремний на изоляторе" в предкраевой области Si L_{2.3} спектра квантового выхода.

Практическая значимость.

Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации технологий формирования наноструктур на кремнии с высоким квантовым выходом фотолюминесценции, а также при разработке технологических направлений по созданию квантово - размерных структур. Обнаружение интерференции синхротронного излучения в структурах КНИ в результате образования стоячих волн электромагнитного излучения открывает элементов перспективы создания новых оптических рентгеновского диапазона. Результаты используются в учебно-научном процессе при изучении фундаментальных вопросов электронного строения и физических свойств кремниевых наноструктур в процессе подготовки кадров высшей квалификации – специалистов в области физики полупроводников, физики конденсированного состояния, физического материаловедения.

Научные положения, выносимые на защиту.

- Влияние пористости на энергетическое положение дна зоны проводимости в пористом кремнии.

- Модель трансформации фотолюминесценции пористого кремния при его естественном старении.

- Ориентированный рост нанокристаллов кремния в матрице оксида кремния структур SiO_x/Si(111).

 Инверсия интенсивности спектра квантового выхода рентгеновского фотоэффекта в области главного края поглощения элементарного кремния в результате взаимодействия с наночастицами Si электромагнитного излучения синхротронного источника в области длин волн, сопоставимых с размерами нанокристаллов кремния.

- Формирование более толстого, по сравнению с естественным, оксидного слоя на нанокристаллах порошкообразного кремния, полученного распылением кремниевой мишени мощным электронным пучком.

 Формирование кластеров кремния в поверхностных слоях многослойных нанопериодических структур (Al₂O₃/SiO_x)_n/Si(100) при высокотемпературных отжигах.

- Образование провалов интенсивности в спектрах поглощения кремния Si L_{2,3} в результате эффективного Брэгговского отражения синхротронного излучения в многослойных нанопериодических структурах (Al₂O₃/SiO_x)_n/Si(100).

- Появление хвостов плотности состояний вблизи краев валентной зоны и зоны проводимости нанослоев растянутого кремния и уменьшение энергетического расстояния между двумя главными максимумами плотности s-состояний в валентной зоне.

- Явление интерференции синхротронного излучения перед главным L_{2,3}
краем поглощения кремния в результате формирования стоячей
электромагнитной волны в структурах КНИ.

<u>Достоверность результатов работы.</u>

Достоверность и надежность результатов работы обеспечивается применением комплексного подхода к анализу электронного строения современными экспериментальными методами, В TOM числе С использованием ресурсов крупнейших мировых центров коллективного пользования научным аналитическим оборудованием - синхротронных центров США и Германии, а также воспроизводимостью характеристик объектов, исследуемых многократной экспериментальной проверкой

результатов измерений, использованием метрологически аттестованной измерительной техники.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на более чем пятидесяти научных конференциях, симпозиумах и семинарах, посвященных физике и технологии полупроводников, наноструктур, нанотехнологиям, физике поверхности и границ раздела, рентгеновской и электронной спектроскопии и материаловедению: Всеросс. конф. (школасеминар) «Рентгеновские и электронные спектры и химическая связь» (Ижевск, 1998, 2007; Екатеринбург, 1999; Воронеж, 2000; Новосибирск 2010); Всеросс. конф. «Химия поверхности и нанотехнология», Санкт-Петербург – Хилово (1999, 2009, 2012), Серия междунар. конф. "Кремний 2000" (Москва), "Кремний-2008" (Черноголовка), "Кремний-2009" (Новосибирск), "Кремний-2010" (Нижний "Кремний-2011" (Москва), "Кремний-2012" (Санкт-Петербург); Новгород), Междунар. науч. конф. «Химия твёрдого тела и современные микро- и нанотехнологии» (Кисловодск, 2003, 2004, 2006); Междунар. конф. «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург, 2004, 2008, 2010); Нац. конф. "Рентгеновское, Синхротронное Излучения, Нейтроны и Электроны для исследования наносистем и материалов Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии" РСНЭ (Москва, 2005, 2007, 2009, 2011); VII и VIII Росс. конф. по физике полупроводников "Полупроводники" (Москва, 2005; Екатеринбург, 2007); VIII Всерос. конф. «Физикохимия Ультрадисперсных (нано-) систем», (Белгород, 2008), Всерос. конф. «Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов» (Белгород, 2009); Междунар. науч.-тех. конф. "Кибернетика и высокие технологии XXI века" (Воронеж, 2012, 2013); Asia-Pacific Surface and Interface Analysis Conference (Пекин, Китай, 2000); VUV XIII и XV Int. Conf. on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics (Триест, Италия, 2001; Берлин, Германия, 2007); Int. conf. on electron spectroscopy and structure (ICESS-9, 10, 11, 12) (Уппсала, Швеция, 2003; Фоз-Ду-Игуасу, Бразилия, 2006; Нара, Япония, 2009; Сан Мало, Франция, 2012); Int. Conf. Nanoparticles, Nanostructures & Nanocomposites (Санкт-Петербург, Россия, 2004); Europ. Conf. on Applications

of Surface and Interface Analysis ECASIA 2005, 2009, 2011 (Вена, Австрия, 2005; Анталия, Турция, 2009; Кардифф, Великобритания, 2011); The Europ. Materials Research Society 2006, 2007, 2011, 2013 Spring Meetings (Ницца, Франция, 2006, 2011; Страсбург, Франция, 2007, 2013); Synchrotron Radiation Center (SRC) Users Meeting 2007, 2008 (Стоутон, США); Int. Conf. on Porous semiconductors – science and technology, (Са-Кома, Испания, 2008); 21st Int. Conf. on X-ray and inner-shell processes X-08 (Париж, Франция, 2008); Int. Conf. Nanomeeting-2011 (Минск, Белоруссия, 2011); German-Russian Conf. of Fundamentals and Applications of Nanoscience (Берлин, Германия, 2012).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 173 научных работах, в том числе в 30 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторских диссертаций.

Личный вклад автора. В диссертацию включены результаты исследований, выполненных автором лично или в соавторстве во время его работы в Воронежском государственном университете. Автором была осуществлена постановка целей и задач диссертации, решение которых позволило сформировать положения, выносимые на защиту, отработать экспериментальные методики, позволившие решить ЭТИ задачи, сформулированы выводы по представленной работе. Все экспериментальные данные по исследованию электронно-энергетического спектра валентной зоны и зоны проводимости наноразмерных структур на основе кремния и его соединений получены лично автором.

На всех этапах работы исследования проводились совместно с В.А. Тереховым, Э.П. Домашевской. Также в работе принимали участие на различных этапах В.М. Кашкаров, Э.Ю. Мануковский, К.Н. Панков, Д.А. Ховив, А.С. Леньшин, Е.В. Паринова, Д.Е. Спирин, Д.Н. Нестеров, Д.А. Коюда.

<u>Научные гранты и программы.</u> Непосредственное отношение к выполнению настоящей работы имеют следующие научно-исследовательские гранты и программы, выполненные под руководством автора. Грант Президента Российской Федерации (МК-4932.2007.2 "Электронное строение нанокомпозитных пленочных структур на основе кремния и его соединений". 2007-2008 гг). Грант Федеральной целевой научно технической программы Министерства Образования и Науки РФ (Государственный контракт № 02.444.11.7262 от 28 февраля 2006 г., Тема работ "Исследование электронного строения наноструктур, содержащих квантовые точки и наночастицы". 2006 г). Грант Аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы" (№ РНП.2.2.2.3.1757, "Влияние процессов эволюции состава поверхностных слоёв на фотолюминесценцию нанопористого кремния". 2006-2007 г). Грант CRDF - Фонда гражданских исследований и развития (США, "The influence of the surface phase composition evolution on photoluminescence in nanoporous silicon" - "Влияние процессов эволюции поверхностных слоёв фотолюминесценцию состава на нанопористого кремния". 2006-2008 гг). Грант Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" (Государственный контракт № П413 от 30 июля 2009 г., Тема работ "Получение принципиально новых прецизионных данных по электронно-энергетическому строению, закономерностям его формирования и его особенностям для новых конденсированных материалов на основе кремния, включая микро- и нано образования и кремниевые системы на их основе" 2009 - 2011 гг). Грант Программы Стратегического Развития Воронежского государственного университета "Формирование массивов нанокристаллов и нанокластеров в многослойных нанопериодических светоизлучающих структурах на основе кремния по данным синхротронных исследований" (2012 - 2013 гг).

<u>Структура и объем диссертации.</u> Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, содержащего основные результаты и выводы, и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 277 страниц, в том числе 141 рисунок и 20 таблиц. Список литературы содержит 237 библиографических ссылок. **Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы, основные задачи, научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены литературные данные о полупроводниковых системах на основе кремния и его соединений, содержащих наноразмерные объекты: пористый кремний, системы, содержащие нанокристаллы и нанокластеры кремния, многослойные наноструктуры на основе кремния. Даны характеристики способов ИХ формирования, проявляемых перспективных свойств. приведены результаты ряда исследований электронного строения этих объектов. Излагаются теоретические основы методов ультрамягкой рентгеновской спектроскопии, используемых в работе. Дается обоснование актуальности проводимых в диссертации исследований.

Во второй главе изложены методические основы экспериментальных методов, использованных в работе - ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии модернизированном лабораторном рентгеновском на спектрометре-монохроматоре РСМ-500, а также методика анализа фазового состава по ультрамягким рентгеновским спектрам эмиссии, и спектроскопии рентгеновского фотоэффекта квантового выхода с использованием синхротронного излучения (СИ). Описываются методики и условия получения исследуемых наноструктур на основе кремния и его соединений.

В третьей главе представлены результаты исследования особенностей электронно-энергетического спектра занятых и свободных состояний в нанопористом кремнии (НПК) с различной пористостью, эволюции его электронного строения, состава и фотолюминесценции в процессе естественного старения в атмосфере. Показан сдвиг энергетического положения дна зоны проводимости, приводящий к увеличению ширины запрещенной зоны при возрастании пористости.

На Рис. 1. представлены результаты измерения фотолюминесцентных свойств в процессе естественного старения НПК в течение 1 года, сформированного на пластинах КЭФ с удельным сопротивлением

0.5 Ом см, которые показывают существенную трансформацию спектров фотолюминесценции (ФЛ) с течением времени хранения: падение интенсивности ФЛ и изменение положения спектрального максимума.

Для выяснения причин такой трансформации ФЛ были проведены исследования энергетического спектра валентных состояний кремния. На Рис. 2 приведены результаты исследования методом УМРЭС L_{2,3} спектров кремния в образцах, хранившихся на воздухе в течение 3, 40 и 240 дней при глубине анализа 60 нм. Результаты моделирования УМРЭС для анализа фазового состава показали (Рис. 2, Табл. 1), что в первые дни хранения образцов в составе поверхностных слоев (60 нм) преобладает кристаллический и аморфный кремний с небольшим содержанием субоксида кремния.



Рис. 1. Спектры фотолюминесценции образцов пористого кремния сформированных на подложках КЭФ (111, 0.5 Ом·см) и состаренных на атмосфере в течении различного времени ($\lambda_{Hg} = 363$ нм).

С увеличением времени пребывания образцов на воздухе на форму Si $L_{2,3}$ спектров начинает оказывать влияние появление в поверхностных слоях оксида кремния, близкого к SiO₂, что приводит к росту интенсивности при энергии ~ 95 эВ, как это видно на спектрах ПК после 40 дней выдержки (Рис. 2).



Рис. 2. Si L_{2,3} УМРЭС спектры НПК (подложки КЭФ) с различным временем выдержки на атмосфере и спектры эталонных образцов. Непрерывная линия – модельный спектр. Шкала энергий относительно Si 2p-уровня.

При наибольшей выдержке на воздухе (240 дней) субоксид полностью переходит в нормальный оксид, и аморфный кремний практически исчезает. Таким образом, при выдержке на воздухе

происходит постепенное окисление аморфного кремния, покрывающего столбы нанокристаллического кремния с образованием сначала субоксида, а затем нормального диоксида кремния (Табл. 1).

Табл. 1. Фазовый состав образцов НПК, сформированных на подложках КЭФ и выдержанных на атмосфере. Глубина анализа 60 нм.

Время выдержки,	Фазы					
ДНИ	a-Si	c-Si	$SiO_{1,3}$	SiO ₂		
3	29	56	15	0		
40	15	55	15	15		
240	4	67	0	29		

Исследования тех же образцов методом спектроскопии КВ в области Si L_{2,3} края (Рис. 3), дающие информацию о более поверхностных слоях ~ 5 нм, подтвердили преобладание фазы аморфного кремния на поверхности свежесформированного образца пористого кремния с присутствием оксида с искаженной структурой (субоксида).



Рис. 3. Si L_{2,3} спектры КВ пористого кремния с различным временем выдержки на атмосфере и спектры эталонных образцов.

Результаты наших исследований показали, что формирование нормального оксида на поверхности образцов НПК начинается после 2-3 недель выдержки образцов на воздухе, и естественный оксид, близкий к SiO₂, формируется после 45 дней окисления на воздухе. При этом в энергетической области, характерной для элементарного кремния (hv ≥ 100эB),

наблюдается существенно меньшая интенсивность и сглаженная структура плотности состояний (Рис. 3), свидетельствующие об уменьшении содержания аморфного кремния в поверхностных слоях НПК. Переход a-Si в субоксид кремния, а затем в диоксид кремния сопровождается возрастанием относительной интенсивности и формированием тонкой структуры спектра характерного для SiO₂ (hv > 105 эВ).

Аналогичные результаты были получены для образцов пористого кремния, сформированных на пластинах, легированных сурьмой. Отличие состоит лишь в том, что слой аморфного кремния формируется более тонким, 5 нм < d < 20 нм.

Таким образом, результаты исследований ПК, сформированного на подложках n-типа, показали, что в процессе его формирования на поверхности нанокристаллических (nc-Si) столбов формируется достаточно толстый слой аморфного кремния (d>5нм), который при выдержке на воздухе достаточно медленно окисляется сначала в субоксид SiO_x (x<2), а затем в нормальный диоксид.



Рис. 4. Изображение излома образца ПК, сформированного на подложке КЭФ, полученное растровой электронной микроскопией (вверху) и предполагаемая модель фотолюминесценции ПК и эволюции ее свойств (внизу). Цифрами указаны значения ширины запрещённых зон соответствующих фаз и возможные оптические переходы.

Поэтому трансформация спектров ФЛ при хранении пористого кремния на воздухе может быть объяснена изменениями состава и толщины слоев на поверхности столбов кремния (Рис.

4). В главе также дополнительно показано, что при аморфизации в низкоэнергетической плазме H^+ , He^+ и Ar^+ наблюдается увеличение толщины нанослоя поверхностного SiO₂ пластин кремния. Модельное представление о трансформации ФЛ свойств ПК на Рис. 4 показывает как вклад формирующегося слоя a-Si, так и возможных дефектных оксидных фаз. Также приведены соответствующие значения ширины запрещенных зон компонентов слоя ПК.

Четвертая глава представляет результаты исследований особенностей атомного и электронного строения систем, содержащих нанокластеры/нанокристаллы кремния, сформированных различными способами, как погруженных в матрицу оксида кремния, так и в свободном состоянии (нанопорошки).

Формирование светоизлучающих структур на кремнии требует создания массива нанокристаллов кремния небольших размеров в матрице, препятствующей их срастанию при высоких температурах. Поэтому возникает необходимость

применения различных технологий формирования таких систем и диагностики образования в них наночастиц кремния. Для этого в настоящей главе с использованием методики спектроскопии рентгеновского поглощения и эмиссии были исследованы образцы, полученные с применением различных технологий формирования нанокристаллов кремния в матрице SiO₂. Первыми представлены структуры SiO₂/Si, в которых ионной имплантацией Si⁺ создавался избыток кремния в пленках оксида, и затем проводился отжиг при 1100 С в атмосфере азота. Доза имплантации составляла 10^{17} см⁻² и набиралась в один, два или три приема. Энергия ионов кремния составляла 140 кэВ, что обеспечивало пробег ионов ~ 0.2 мкм. Пленка оксида толщиной 0.5 мкм формировалась окислением исходной пластины во влажном кислороде. Помимо этого часть пленок до имплантации была дополнительно отожжена на воздухе для повышения плотности пленки оксида.

Анализ результатов синхротронных исследований показал, что циклический набор дозы имплантации является более эффективным при формировании нанокристаллического кремния в поверхностном слое матрицы оксида кремния, о чем свидетельствует рост интенсивности Si L_{2,3} – спектра в области элементарного кремния (Рис. 5, слева).



Рис. 5. Si L_{2,3} спектры KB nc-Si, полученных при различном количестве циклов набора общей дозы имплантации ($\Phi=10^{17}$ cm⁻²) 01: Φ ; 02:2x($\Phi/2$); 03:3x($\Phi/3$) в пленку SiO₂ (слева). Для образцов 11, 12 и 13 (пленка SiO₂ дополнительно отожжена): 11: Φ ; 12:2x($\Phi/2$); 13:(3x $\Phi/3$) (справа). Вставки - края поглощения в области элементарного кремния.

При использовании матрицы с более плотным оксидом относительное содержание нанокристаллической фазы (nc-Si) в поверхностных слоях SiO₂ понижается (Рис. 5, справа). Следует отметить, что обнаруженная нами тонкая структура Si $L_{2,3}$ спектров KB (Рис. 5) свидетельствует о преобладании упорядоченного атомного строения нанокластеров/нанокристаллов кремния в оксидной матрице.

Другой системой для получения нанокристаллов кремния в матрице SiO₂ были пленки субоксида кремния толщиной 350 нм, нанесенные на пластины монокристаллического Si (100) и отожженные при температурах 900-1100 °C. Исследование энергетического спектра валентных электронов по данным УМРЭС исходных плёнок SiO_x при глубине анализа 60 нм позволило установить, что сразу после нанесения плёнки в ней обнаруживается значительное количество элементарного Si (Puc. 6.a), что проявляется в наличии заметного максимума в Si L_{2,3} – спектрах при энергии 92 эВ, обусловленного наличием в пленке нанокристаллического кремния.



Рис. 6. а: УМРЭС Si $L_{2,3}$ спектры исходного порошка SiO_x и плёнок SiO_x:nc-Si/Si с различными температурами отжига; б: Si $L_{2,3}$ KB плёнок SiO_x:nc-Si/Si, полученных: 1 - без отжига (θ =90°), 2 - отжиг 1100°C (θ =90°), 3 - отжиг 1100°C (θ =30°), 4 - отжиг 1100°C (θ =10°).

Данные рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с ионным травлением показали, что в изученных плёнках $SiO_x:nc-Si/Si$ элементарный кремний находится на глубине ≥ 60 нм, что соответствует данным УМРЭС (Рис. 6), а образование кристаллов с размером в десятки нанометров подтверждено методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеновской дифракции (Рис. 7).



Рис. 7. а: данные ПЭМ для образца SiO_x:nc-Si/Si, сформированного при отжиге в 1000 °C; б: дифрактограммы поликристаллического кремния (pc-Si), порошка SiO и плёнки SiO_x:nc-Si/Si.

Причем согласно рентгеновской дифракции (Рис. 7), образующиеся нанокристаллы имеют преимущественную ориентацию, параллельную плоскости подложки, несмотря на то, что они формировались в слое аморфного SiO₂.

При исследовании спектров КВ пленок SiO_x:nc-Si/Si было обнаружено их необычное поведение. Вместо роста поглощения они показывают инверсию части спектра в области элементарного Si (Рис. 6.б) при достаточно больших $(30^{\circ}-90^{\circ})$ углах скольжения θ синхротронного излучения. Лишь при $\theta=10^{\circ}$ ход спектра приобретает нормальный вид (Рис. 6.б).

В работе приведена модель возможного механизма возникновения аномального хода спектра КВ в таких структурах, схематически показанная

на Рис. 8. Квантовый выход рентгеновского фотоэффекта, регистрируемый в эксперименте, есть отношение числа ежесекундно вылетевших электронов к числу падающих квантов:

$$\chi = \frac{\left[1 - R(\theta)\right]hc}{4E\lambda} \frac{\mu}{\sin\theta}$$
(1)

Здесь θ - угол скольжения, μ - коэффициент поглощения, R - коэффициент отражения от внешней границы образца.



c-Si (111)

Рис. 8. Модель формирования КВ при взаимодействии ультрамягкого рентгеновского излучения со структурой SiO₂/SiO₂:nc-Si/Si.

Для θ более 20° можно считать, что R=0 и χ~μ. Аномальное поведение спектра квантового выхода (Рис. 6.б) и

характер его изменения с уменьшением угла скольжения в изученных SiO_x:nc-Si/Si могут быть объяснены проявлением плёнках эффектов интерференции в анализируемой области длин волн, что не учтено в выражении (1). Наличие в объеме пленки SiO₂ нанокристаллов кремния приводит к возникновению обратного потока фотонов упруго рассеянных волн синхротронного излучения на nc-Si, так как их размеры порядка длины волны СИ. При энергиях фотонов, совпадающих с энергией края поглощения, может наблюдаться провал в интенсивности в результате рассеяния. Кроме того, учитывая близость аномального размеров нанокристаллов кремния и длины волны падающего излучения, следует учитывать также и возможность интерференции обратно рассеянного излучения на формирующихся nc-Si (Рис. 8).

Так как сформированные таким образом nc-Si в матрице SiO₂ имеют сильный разброс по размеру (Рис. 7), то следующим объектом изучения

возможности создания массивов достаточно однородных по размеру нанокристаллов кремния в многослойных нанопериодических структурах (MHC), за счет ограничивающих барьерных слоев были $Al_2O_3/SiO_x/Al_2O_3/SiO_x...Si$, сформированные при высокотемпературном отжиге от 500 до 1100 °C с соотношением толщин Al_2O_3/SiO_x 5/4 нм, 5/7 нм,



5/11 нм и общим числом периодов слоев 9. Для этих МНС L_{2,3} спектры квантового выхода кремния представлены на Рис. 9.

Рис. 9. Si $L_{2,3}$ спектры KB для MHC $Al_2O_3/SiO_x/Al_2O_3/SiO_x...Si$ с различным соотношением толщин слоев (вставка: края поглощения в области элементарного кремния), θ =30°.

Как показывают данные Рис. 9, из-за верхнего (закрывающего) слоя Al₂O₃ толщиной 5 нм спектры кремния регистрируются достаточно низкими по

интенсивности сигнала по отношению к фону. Однако удалось установить, что с ростом температуры отжига идет увеличение интенсивности максимума в спектре КВ при hv ~ 102 эВ, обусловленное образованием нанокластеров кремния (Рис. 9, вставка). Значительная их часть имеет заметный беспорядок в расположении атомов даже после отжига при температуре 1100 °C, что проявляется в отсутствии тонкой структуры спектра в области энергий 100-102 эВ.

При толщине бислоя МНС 12 нм $(Al_2O_3/SiO_x = 5/7 \text{ нм})$ и угле скольжения θ =30° в спектре КВ вместо максимума хорошо наблюдается

минимум интенсивности (Рис. 9), как следствие эффективного отражения синхротронного излучения от слоистой структуры МНС в результате явления брегговской дифракции:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta \tag{2}$$

Расчет толщины дает значение d=11.4 нм, что близко к технологическому значению толщины бислоя: $d(Al_2O_3/SiO_x) = d(SiO_x) + d(Al_2O_3) = 12$ нм. Это подтверждает достаточную технологическую точность оценки толщины формируемых слоев и совершенство границ нанослоев их разделяющих. Отжиг при 1100° С этой структуры приводит к существенному уменьшению этого провала в результате межфазного взаимодействия на границах раздела слоев, и, соответственно, к ухудшению их качества.

Также в четвертой главе показано, на основании комплексных исследований методов УМРЭС и КВ, а также ПЭМ и комбинационного рассеяния света, что частицы нанопорошков кремния, обладающих свойством видимой фотолюминесценции, являются нанокристаллами кремния, покрытыми более толстым слоем оксида кремния (> 5 нм), чем естественный поверхностный оксид объемного Si.

В пятую главу включены результаты исследований особенностей электронного строения напряженных структур на основе твердых растворов Si_{1-x}Ge_x и растянутого кремния в структурах "кремний на изоляторе".

Показано, что при максимальном содержании германия в нанослое ТР наблюдается заметный сдвиг дна зоны проводимости и первого максимума плотности состояний в сторону больших энергий связи, что соответствует уменьшению E_g.

В структуре КНИ, содержащей напряженный нанослой кремния, дифрактометрическим методом установлено уменьшение параметра решетки в нормальном направлении по отношению к значению параметра подложки на 0.035 Å для нанослоя Si, растянутого в латеральном направлении (Рис. 10). При этом по данным УМРЭС это сопровождается увеличением межатомных расстояний в латеральном направлении слоя растянутого кремния, что проявляется в уменьшении энергетического расстояния между максимумами плотности валентных состояний в соответствующих точках L'_{2v} и L_{1v} зоны Бриллюэна (Рис. 11) в соответствии с эмпирической формулой:

$$\Delta E (\Im B) = 8 - 2.2 d (\text{\AA}) \tag{3}$$

где d - минимальное расстояние между атомами кремния в решетке, а ∆Е - расстояние между главными пиками плотности s-состояний кремния.



Рис.11. Si L_{2,3}-спектры образца КНИ в сопоставлении со спектром эталонного с-Si (сплошная линия) и плотностью состояний в с-Si (ниже). Показаны хвосты плотности состояний (пунктир). Слева: данные УМРЭС. Справа: данные КВ.

Кроме того, вблизи E_v и выше (Рис. 11) наблюдается хвост плотности локализованных состояний. Еще более заметный хвост плотности локализованных состояний наблюдается в области E_c по данным KB. Все это

свидетельствует в пользу того, что по крайней мере на поверхности напряженного слоя возникает широкий спектр локализованных состояний.

Анализ спектров КВ структуры КНИ с толщиной растянутого слоя ~ 100 нм показал, что при малых углах скольжения синхротронного излучения (θ <21°) наблюдается частотно модулированное распределение интенсивности в области энергий синхротронного излучения, предшествующей энергии главного края поглощения (hv<100эВ), приведенное на Рис. 12.



Рис. 12. Si L_{2,3} спектры КВ растянутого кремния в структуре КНИ при различных значениях угла скольжения θ в различных интервалах энергий СИ.

При этом с изменением угла скольжения на каждые 2° происходит инверсия интенсивности, максимум спектра квантового выхода становится минимумом и наоборот. Поэтому для $\lambda > 12,4$ нм и углов $\theta < 20^{\circ}$, меньших критического для полного внешнего отражения, КНИ структуру можно рассматривать как рентгеновский волновод с образованием стоячей волны электромагнитного излучения. Как показали наши совместные расчеты с проф. М.А. Андреевой (МГУ), периодические изменения выхода электронов при изменении энергии фотонов и угла скольжения обусловлены соответствующими изменениями напряженности электромагнитного поля на поверхности структуры.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Комплексные исследования, в том числе с привлечением синхротронного излучения, атомного и электронного строения различных наноразмерных структур на основе кремния позволили установить ряд закономерностей формирования энергетического спектра электронов, их влияние на проявляемые свойства, показать особенности взаимодействия изученных структур с синхротронным излучением нанометрового диапазона и сделать следующие выводы:

1. Для пористого кремния впервые экспериментально установлено влияние пористости на энергетическое положение дна зоны проводимости, приводящее к увеличению ширины запрещенной зоны при возрастании пористости.

2. Развита модель фотолюминесценции пористого кремния, объясняющая трансформацию его излучающих свойств при естественном старении плавным окислением поверхностных слоев аморфного кремния на нанокристаллических столбах до субоксида, а затем до диоксида кремния.

 Показано, что при высокотемпературных отжигах структур SiO_x/Si(111) в слоях субоксида кремния происходит рост нанокристаллов Si с преимущественной ориентацией кристаллографических направлений, параллельной ориентации подложки.

4. Впервые экспериментально обнаружено, что формирование нанокристаллов кремния в матрице SiO₂ может приводить к инверсии интенсивности спектра квантового выхода рентгеновского фотоэффекта в области главного края поглощения элементарного кремния. Это происходит в результате взаимодействия с нанокристаллами электромагнитного излучения синхротронного источника, обладающего длиной волны, сопоставимой с их размерами.

5. Показано, что нанопорошок, полученный распылением кремниевой мишени мощным электронным пучком, состоит из нанокристаллов кремния, покрытых слоем оксида толщиной более 5 нм, значительно превышающей толщину естественного оксида на монокристаллическом кремнии.

6. Установлено формирование кластеров кремния в поверхностных слоях многослойных нанопериодических структур (Al₂O₃/SiO_x)_n/Si(100) при высокотемпературных отжигах до 1100 °C.

7. В МНС, отожженных при температурах ниже 1100 °С, обнаружены провалы в спектрах поглощения кремния Si $L_{2,3}$ при длине волны синхротронного излучения, близкой к периоду многослойной структуры $(Al_2O_3/SiO_x)_n/Si(100)$, в результате эффективного Брэгговского отражения.

8. В напряженной структуре КНИ обнаружены хвосты плотности состояний вблизи краев валентной зоны и зоны проводимости нанослоев растянутого кремния и уменьшение энергетического расстояния между двумя главными максимумами плотности s-состояний в валентной зоне.

9. В структурах КНИ при толщине слоя Si около 100 нм и малых углах скольжения СИ обнаружено явление интерференции синхротронного излучения ультрамягкого рентгеновского диапазона перед главным L_{2,3} краем поглощения кремния в результате формирования стоячей электромагнитной волны.

10. Показано увеличение толщины слоя SiO₂, покрывающего пластины кристаллического кремния, в результате обработки пластин в низкоэнергетической плазме, содержащей ионы H⁺, He⁺, Ar⁺.

Таким образом, на основе проведенных исследований получены новые результаты, совокупность которых представляет собой крупное научное достижение в области физики полупроводников: особенности атомного, электронного строения и состава наноразмерных структур, сформированных на основе кремниевых технологий и обладающих видимой фотолюминесценцией.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

 Домашевская Э.П. Рентгеноспектральные исследования фазового состава пористого кремния окисленного при высокой температуре // Э.П. Домашевская,
В.М. Кашкаров, Э.Ю. Мануковский, В.А. Терехов, С.Ю. Турищев // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2000. – Т.1, №1. – С. 37–44. 2. Torchynska T.V. USXES and optical phenomena in Si low-dimensional structures dependent on morphology and silicon oxide composition on Si surface / T.V. Torchynska, M. Morales Rodrigues, G.P. Polupan, L.I. Khomenkova, N.E. Korsunskaya, V.P. Papusha, L.V. Scherbina, E.P. Domashevskaya, V.A. Terekhov, S. Yu. Turishchev // Surface Review and Letters. – 2002. – V.9, №2. – P. 1047 – 1052.

 Домашевская Э.П. Синхротронные исследования особенностей электронноэнергетического спектра кремниевых наноструктур / Э.П. Домашевская, В.А. Терехов, В.М. Кашкаров, С.Ю. Турищев, Э.Ю. Мануковский, С.Л. Молодцов, Д.В. Вялых, А.Ф. Хохлов, А.И. Машин, В.Г. Шенгуров, С.П. Светлов, В.Ю. Чалков // ФТТ. – 2004. – Т.46, №2. С. – 335 – 340.

4. Терехов В.А. Исследование локальной электронной и атомной структуры в аморфных сплавах а-Si_xC_{1-х} методом ультрамягкой рентгеновской спектроскопии / В.А. Терехов, Е.И. Теруков, И.Н. Трапезникова, В.М. Кашкаров, О.В. Курило, С.Ю. Турищев, А.Б. Голоденко, Э.П. Домашевская // ФТП. – 2005. – Т.39, №7. С. – 863 – 867.

5. Терехов В.А. Синхротронные исследования электронного строения нанокристаллов кремния в матрице SiO₂ / Терехов В.А., Турищев С.Ю., Кашкаров В.М., Э.П. Домашевская В.М., Михайлов А.Н., Тетельбаум Д.И. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования – 2007. – 1, – С. 61 – 65.

6. Turishchev S.Yu. Investigations of the electron energy structure and phase composition of porous silicon with different porosity / S.Yu. Turishchev, V.A. Terekhov, V.M. Kashkarov, E.P. Domashevskaya, S.L. Molodtsov, D.V. Vyalykh // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 2007. – 156 – 158, – P. 445 – 451.

7. Terekhov V.A. Silicon nanocrystals in SiO₂ matrix obtained by ion implantation under cyclic dose accumulation / V.A. Terekhov, S.Yu. Turishchev, V.M. Kashkarov, E.P. Domashevskaya, A.N. Mikhailov, D.I. Tetel'baum // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures – 2007. – 38, – P. 16 – 20. 8. Terekhov V.A. Structure and optical properties of silicon nanopowders / V.A. Terekhov, V.M. Kashkarov, S.Yu. Turishchev, K.N. Pankov, V.A. Volodin, M.D. Efremov, D.V. Marin, A.G. Cherkov, S.V. Goryainov, A.I. Korchagin, V.V. Cherepkov, A.V. Lavrukhin, S.N. Fadeev, R.A. Salimov, S.P. Bardakhanov // Journal of Materials Science and Engineering B. – 2008. – V.147, Issues 2 – 3. – P. 222 – 225.

Терехов В.А. Структура, фазовый состав и оптические свойства нанопорошков кремния / В.А. Терехов, В.М. Кашкаров, С.Ю. Турищев, К.Н. Панков, В.А. Володин, М.Д. Ефремов, Д.В. Марин, А.Г. Черков, С.В. Горяйнов, А.И. Корчагин, В.В. Черепков, А.В. Лаврухин, С.Н. Фадеев, Р.А. Салимов С.П. Бардаханов // Известия РАН. Серия физическая. – 2008. – Т.72, №4. С. – 532 – 535.

10. Кашкаров В.М. Состав и строение слоев нанопористого кремния с гальванически осажденным Fe и Co / В.М. Кашкаров, А.С. Леньшин, А.Е. Попов, Б.Л. Агапов, С.Ю. Турищев // Известия РАН. Серия физическая. – 2008. – Т.72, №4. С. – 484 – 490.

11. Kashkarov V.M. Electron structure of porous silicon obtained without the use of HF acid / V.M. Kashkarov, I.V. Nazarikov, A.S. Lenshin, V.A. Terekhov, S.Yu. Turishchev, B.L. Agapov, K.N. Pankov, E.P. Domashevskaya // Phys. Status Solidi C, (2009), 6, No. 7, 1557–1560.

12. Turishchev S.Yu. Evolution of nanoporous silicon phase composition and electron energy structure under natural ageing / S.Yu. Turishchev, A.S. Lenshin, E.P. Domashevskaya, V.M. Kashkarov, V.A. Terekhov, K.N. Pankov, and D.A. Khoviv // Phys. Status Solidi C, (2009), 6, No. 7, 1651–1655.

Кашкаров В.М. Получение нанокомпозитов пористого кремния с железом и кобальтом и исследование их электронного строения методами рентгеновской спектроскопии / В.М. Кашкаров, А.С. Леньшин, Б.Л. Агапов, С.Ю. Турищев, Э.П. Домашевская // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т.35, №17. С. – 89 – 96.

14. Pushkarchuk A. Quantum chemical modelling of Si sub-surface amorphisation due to incorporation of H atoms and its stabilisation by O atoms / A. Pushkarchuk,

A. Saad, V. Pushkarchuk, A. Fedotov, A. Mazanik, O. Zinchuk, S. Turishchev // Phys. Status Solidi C, (2010), 7, No. 3-4, 650–653.

15. Terekhov V.A. XANES, USXES and XPS investigations of electron energy and atomic structure peculiarities of the silicon suboxide thin film surface layers containing Si nanocrystals / V.A. Terekhov, S.Yu. Turishchev, K.N. Pankov, I.E. Zanin, E.P. Domashevskaya, D.I. Tetelbaum, A.N. Mikhailov, A.I. Belov, D.E. Nikolichev, S.Yu. Zubkov // Surface and Interface Analysis. -2010. -42, -P. 891 - 896.

16. Домашевская Э.П. Особенности атомного и электронного строения оксидов на поверхности пористого кремния по данным XANES / Э. П. Домашевская, В. А. Терехов, С. Ю. Турищев, Д. А. Ховив, В. А. Скрышевский, И. В. Гаврильченко // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования – 2010. – 5, – С. 28 – 33.

 Домашевская Э.П. Особенности атомного и электронного строения поверхностных слоев пористого кремния / Э.П. Домашевская, В.А. Терехов, С.Ю. Турищев, Д.А. Ховив, Е.В. Паринова, В.А. Скрышевский, И.В. Гаврильченко // Журнал Общей Химии – 2010. – Т.80, В.6. – С. 958 – 965.

18. Домашевская Э.П. Интерференция синхротронного излучения перед краем поглощения кремния в структурах кремний на изоляторе / Домашевская Э.П., Терехов В.А., Турищев С.Ю. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования – 2011. – 2, – С. 42 – 50.

19. Домашевская Э.П. Особенности электронно-энергетического строения поверхностных слоев пористого кремния, сформированного на подложках ртипа / Домашевская Э.П., Терехов В.А., Турищев С.Ю., Ховив Д.А., Паринова Е.В., Скрышевский В.А., Гаврильченко И.В. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов - 2011. - Т.77, В.1. - С. 42 - 48.

20. Fedotov A. Structure of the near-surface layer of Cz Si wafers subjected to low-temperature low-energy ion-beam treatment / A. Fedotov, I. Ivashkevich, S. Kobeleva, O. Korolik, A. Mazanik, N. Stas'kov and S. Turishchev // Phys. Status Solidi C, 2011, 8, No. 3, 739–742.

21. Леньшин А.С. Влияние естественного старения на фотолюминесценцию пористого кремния / А.С. Леньшин, В.М. Кашкаров, С.Ю. Турищев, М.С. Смирнов, Э.П. Домашевская // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т.37, №17. С. – 1 – 8. 22. Терехов В.А. Синхротронные исследования особенностей электронной и атомной структуры поверхностных слоев пленок оксида кремния, содержащих нанокристаллы кремния / В.А. Терехов, С.Ю. Турищев, К.Н. Панков, И.Е. Занин, Э.П. Домашевская, Д.И. Тетельбаум, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, Д.Е. Николичев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования – 2011. – 10– С. 46 – 55.

23. Турищев С.Ю. Структура и электронное строение поверхностных слоев пластин кремния после обработки в низкоэнергетической плазме водорода и аргона / С.Ю. Турищев, В.А. Терехов, Е.В. Паринова, Королик О.В., Мазаник А.В., Федотов А.К., Ивашкевич И.В., Стаськов Н.И. // Известия ВУЗов, Материалы электронной техники. - 2011. - №2, С. - 15 - 20.

24. Andreeva M.A. Interference phenomena of synchrotron radiation in TEY spectra for silicon-on-insulator structure / M.A. Andreeva, E.P. Domashevskaya, E.E. Odintsova, V.A. Terekhov, S.Yu. Turishchev // Journal of Synchrotron Radiation. 2012. - V.19, P. 609 - 618.

 Леньшин А.С. Влияние естественного старения на фотолюминесценцию пористого кремния / А.С. Леньшин, В.М. Кашкаров, С.Ю. Турищев, М.С. Смирнов, Э.П. Домашевская // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – №2. – С. 150–152.

26. Turishchev S.Yu. Synchrotron investigation of the multilayer nanoperiodical $Al_2O_3/SiO/Al_2O_3/SiO:Si$ structure formation / S.Yu. Turishchev, V.A. Terekhov, D.A. Koyuda, K.N. Pankov, E.P. Domashevskaya, A.V. Ershov, I.A. Chugrov and A.I. Mashin // Surface and Interface Analysis. – 2012. – 44, – P. 1182 – 1186.

 Домашевская Э.П. Синхротронные исследования многослойных нанопериодических структур Si/Mo/Si...с-Si (100) / Э.П. Домашевская, В.А. Терехов, С.Ю. Турищев, Д.А. Коюда, Н.А. Румянцева, Ю.П. Першин, В.В. Кондратенко, N. Appathurai // ФТТ. – 2013. – Т.55, №3. С. – 577 – 584. 28. Терехов В.А. Влияние имплантации углерода на фазовый состав пленок SiO₂:nc-Si/Si по данным ближней тонкой структуры рентгеновского поглощения / В. А. Терехов, Д. И. Тетельбаум, С. Ю. Турищев, Д. Е. Спирин, К. Н. Панков, Д. Н. Нестеров, А. Н. Михайлов, А. И. Белов, А. В. Ершов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2013. – Т. 15, № 1. – С. 48 – 53.

29. Turishchev S. Yu. Surface modification and oxidation of Si wafers after low energy plasma treatment in hydrogen, helium and argon / S.Yu. Turishchev, V.A. Terekhov, E.V. Parinova, O.V. Korolik, A.V. Mazanik, A.K. Fedotov // Materials Science in Semiconductor Processing, – 2013. – V. 16, Issue 6. – P. 1377 – 1381.

30. Турищев С.Ю. Синхротронные исследования формирования нанокластеров кремния в многослойных наноструктурах Al₂O₃/SiO_x/Al₂O₃/SiO_x/.../Si(100) / С.Ю. Турищев, В.А. Терехов, Д.А. Коюда, К.Н. Панков, А.В. Ершов, Д.А. Грачев, А.И. Машин, Э.П. Домашевская // ФТП. – 2013. – Т.47, №10. С. – 1327 – 1334.

> Подписано в печать 25.03.14. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,86. Тираж 120 экз. Заказ 269.

> > Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии Издательского дома ВГУ. 394000, Воронеж, ул. Пушкинская, 3