

На правах рукописи

ЧУГРОВ Иван Александрович

**ФОРМИРОВАНИЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА
ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР С МАССИВАМИ
НАНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ В ДИЭЛЕКТРИКЕ**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2012

Работа выполнена на кафедре физики полупроводников и оптоэлектроники
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент

Ершов Алексей Валентинович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор

Герасименко Николай Николаевич

кандидат физико-математических наук,

Степихова Маргарита Владимировна

Ведущая организация: Воронежский государственный университет,
г. Воронеж

Защита состоится «3» октября 2012 г. в 16:00 на заседании диссертационного
совета Д.212.166.01 в Нижегородском государственном университете им. Н.И.
Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижего-
родского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Автореферат разослан « » августа 2012 г.

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



А.И. Машин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В современной электронике кремний (Si) является основным материалом для создания больших и сверхбольших интегральных схем. Большие запасы сырья, легкость образования химически и электрически прочного оксида (SiO_2), высокий уровень развития кремниевой планарной технологии являются главными достоинствами этого полупроводникового материала. С другой стороны, кремний, в силу «непрямозонности» энергетической диаграммы, обладает низкой эффективностью люминесценции при комнатной температуре.

Ключевым подходом к повышению эффективности кремния как излучателя является формирование массивов низкоразмерных (порядка единиц нанометров) нанокристаллов (НК) Si в матрице широкозонного полупроводника или диэлектрика. Уменьшение размеров кремния от «объемных» кристаллов до квантовых точек модифицирует его энергетический спектр, в той или иной степени снимая проблему слабой люминесценции и одновременно решая проблему спектрального сдвига области люминесценции в область более коротких, чем «межзонное» излучение массивного Si, длин волн. Установлено, что система НК Si в диэлектрической матрице проявляет интенсивную люминесценцию в видимой и ближней инфракрасной области спектра (0.7–0.9 мкм) при комнатной температуре. Применение структур с НК Si открывает возможности эффективного функционирования, интегрирования и дизайна таких устройств, как светоизлучатели, оптические усилители, солнечные элементы нового поколения. Создание высокоэффективных светоизлучающих структур позволит, в частности, без дорогостоящих затрат перейти от интегральных «чисто электронных» к интегральным оптоэлектронным микросхемам, где излучательные, приемные и соединительные компоненты будут изготовлены по единой кремниевой планарной технологии в монолитном исполнении.

Одним из типов наноструктур являются многослойные системы «нанокристаллический кремний / оксид» (НК Si/оксид), полученные путем высокотемпературного (1000–1100 °C) отжига (ВТО) аморфных многослойных нанопериодических структур (МНС) $a\text{-Si}$ /оксид или $a\text{-SiO}_x$ /оксид – аморфных аналогов кристаллических сверхрешеток. Формирование наноструктур основано на модификации фазового состава МНС при ВТО: в кремнийсодержащих слоях ($a\text{-Si}$ или $a\text{-SiO}_x$) образуются НК Si, а их размер в направлении роста ограничен

толщиной данных слоев. Таким образом, система представляет собой массивы НК, разделенные диэлектрическими барьерными слоями в вертикальном направлении (направлении роста). Размер НК в каждом слое задается толщиной слоя a -Si или a -SiO_x, а упорядоченность системы в направлении роста – периодичностью МНС. При этом имеется возможность создания массивов НК с одинаковыми средними размерами, либо с их чередованием в направлении роста.

Многослойные системы НК Si/оксид должны обладать набором перспективных технологических достоинств, позволяющих управлять их свойствами, в частности люминесцентными. *Первое* – это возможность изменения диапазона длин волн и интегральной интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) путем задания соответственно толщины кремнийсодержащих слоев (размеров НК) и их слоевой концентрации (количества НК на единицу площади в направлении роста). *Второе* – потенциальная возможность задания параметров энергетической диаграммы (в частности разрывов зон) и характера движения носителей с помощью регулирования высоты и ширины барьеров для электронов и дырок в НК (т.е. вероятности термической или туннельной эмиссии носителей) путем выбора материала оксида (SiO₂, Al₂O₃, ZrO₂ и т.п.) и его толщины. Выбор материала барьерного оксида позволяет также регулировать величину эффективной диэлектрической проницаемости (или показателя преломления) наноструктуры в целом, что важно при создании световодных структур в ряде оптоэлектронных приборов. *Третье* – практически не изученная для многослойных систем НК Si/оксид возможность управления квантово-размерными свойствами (в том числе эффективностью люминесценции) и особенностями формирования НК Si путем введения электрически активных примесей, таких как бор и фосфор, а также возможность повышения эффективности люминесценции путем подавления безызлучательной рекомбинации с помощью гидрогенизации.

К началу выполнения данной работы в литературе был представлен цикл публикаций (см., например, [1]), где для создания массивов НК Si в матрице SiO₂ использовался высокотемпературный (≥ 1000 °C) отжиг аморфных «сверхрешеток» SiO/SiO₂, полученных испарением монооксида кремния в реактивной кислородной атмосфере. При реактивном испарении SiO кислородная среда использовалась для формирования барьерных слоев SiO₂ [1].

В настоящей работе, с использованием «сверхрешеточного» подхода [1], формирование аморфных МНС осуществлялось испарением SiO и стехиомет-

рического оксида (SiO_2 , ZrO_2 или Al_2O_3) из отдельных источников. Именно применение отдельных источников испарения при формировании МНС, в отличие от метода [1], дает бóльшую степень свободы в выборе материалов гетерогенных систем, а именно – возможность замены материалов «ямных» и/или «барьерных» слоев, например SiO_x на $\alpha\text{-Si}$ или SiO_2 на ZrO_2 и Al_2O_3 . Однако на начальном этапе исследований понадобилась отработка условий напыления и отжига и изучения их влияния на оптические свойства названных систем, начиная с SiO_2 -матрицы.

Цель и основные задачи работы

Цель работы – получение и исследование структурных, оптических и электрофизических свойств систем с упорядоченными в направлении роста массивами нанокристаллов кремния в оксидных матрицах с разной диэлектрической проницаемостью.

Основные *задачи* работы:

1. Разработка методики создания систем массивов нанокристаллов кремния в оксидных диэлектрических матрицах (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2) путем высокотемпературного отжига аморфных многослойных нанопериодических структур $\alpha\text{-SiO}_x$ /оксид, полученных вакуумным испарением из отдельных источников.

2. Исследование влияния условий отжига, материала диэлектрика, периодичности системы в направлении роста, размера и структур нановключений кремния на люминесцентные свойства систем.

3. Исследование связи между люминесцентными свойствами и фазовым составом, структурой системы массивов нанокристаллов кремния в диэлектрических матрицах (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2) с использованием методов просвечивающей электронной микроскопии, ИК-спектроскопии, комбинационного рассеяния света.

4. Изучение влияния гидрогенизации и ионного легирования (P^+ и B^+) на ФЛ НК Si в матрицах с разной диэлектрической постоянной.

5. Изучение характеристик электронного транспорта в многослойных нанопериодических структурах НК Si/диэлектрик (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2).

Научная новизна работы

1. Впервые обнаружена и измерена фотолюминесценция массивов нанокристаллов кремния в диэлектрической матрице, сформированных высоко-

температурным отжигом многослойных нанопериодических структур $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$, $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ и $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$, полученных по оригинальной методике вакуумного испарения из отдельных источников.

2. Экспериментально показано, что интенсивность люминесценции массивов нанокристаллов кремния в диэлектрических матрицах (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2), полученных по указанной методике, может быть повышена путем отжига образцов в молекулярном водороде при $500\text{ }^\circ\text{C}$.

3. Впервые предпринята попытка модифицирования ФЛ полученных структур с нанокристаллами кремния в диэлектрических матрицах (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2) путем ионного легирования.

4. Установлено, что в МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$, $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ и $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$, подвергнутых высокотемпературному отжигу, протекание тока может быть описано теорией электронного транспорта по цепочкам гранул в условиях кулоновской блокады.

Практическая ценность работы

Результаты работы могут быть использованы при разработке опто- и наноэлектронных устройств, предположительно для решения задач замены электрических межсоединений на оптические, синтеза светоизлучающих элементов на базе «непрямозонных» полупроводников, в частности кремния, создания на едином чипе многофункциональных устройств (источников излучения, оптических световодов, усилителей, преобразователей оптического сигнала, элементов памяти и др.).

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается использованием комплекса современных взаимодополняющих методов исследования: малоугловой рентгеновской дифракции, высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии, оптических и электрофизических измерений, использованием современного программного обеспечения для численной обработки и хорошей воспроизводимости результатов эксперимента, полученных на современном оборудовании научно-исследовательского центра физики твердотельных наноструктур (НОЦ ФТНС) ННГУ, института физики микроструктур РАН и кафедры ФПО ННГУ.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Многослойные нанопериодические структуры $a\text{-SiO}_x/\text{диэлектрик}$ (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2), полученные вакуумным испарением из отдельных источников, после высокотемпературного (1000–1100 °С) отжига в атмосфере азота демонстрируют размерно-зависимую фотолюминесценцию в области 650–850 нм.

2. Высокотемпературный отжиг многослойных нанопериодических структур $a\text{-SiO}_x/\text{диэлектрик}$ (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2) при 1100 °С приводит к формированию вертикально упорядоченных кремниевых кристаллических нановключений с размерами, близкими к исходной толщине слоев SiO_x .

3. Изменение оптических свойств многослойных нанопериодических структур $a\text{-SiO}_x/\text{диэлектрик}$ (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2) по мере роста температуры отжига от 500 до 1100 °С обусловлено термически стимулированными структурно-фазовыми превращениями в слоях субоксида кремния в последовательности: нефазовые включения кремния – аморфные Si кластеры – нанокристаллы; а гидрогенизация систем с массивами НК Si в матрицах ZrO_2 и Al_2O_3 путем отжига в молекулярном водороде при 500 °С приводит к росту интенсивности ФЛ за счет пассивации водородом оборванных связей.

4. Вольтамперные характеристики многослойных нанопериодических структур $a\text{-SiO}_x/\text{диэлектрик}$ (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2), подвергнутых высокотемпературному отжигу, могут быть описаны теорией электронного транспорта по цепочкам гранул в условиях кулоновской блокады.

Публикации и апробация результатов работы

Основные результаты диссертации были представлены на конференциях: Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011), Всероссийская конференция «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Казань, 2008; Н.Новгород, 2010), Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (С.Петербург, 2009, 2011), Нижегородская научная сессия молодых ученых (Н.Новгород, 2008, 2009, 2010), Ежегодный Симпозиум «Наноп физика и наноэлектроника» (Н.Новгород, 2009, 2010, 2011, 2012), 5th IUPAC International

Symposium on Novel materials and their Synthesis (Shanghai, China, 2009), International Conference on Ion Beam Modification of Materials (Vieux Montréal (Québec), Canada, 2010), Международная конференция «Кремний» (Н.Новгород, 2010; Москва, 2011), International Conference on the Structure of Non-Crystalline Materials (Paris, France, 2010), 7-я международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (С.Петербург, 2010), 2-я международная научная конференция «Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь – Россия – Украина» (Киев, Украина, 2010), 2-я конференция-школа для молодых ученых «Дифракционные методы исследования вещества: от молекулы к кристаллам и наноматериалам» (Черноголовка, 2010), 16-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Волгоград, 2010), 20-я Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Звенигород, 2011), 17-я Всероссийская научная конференция студентов физиков и молодых ученых (Екатеринбург, 2011), Международная конференция «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2011), а также на студенческих конференциях физического факультета ННГУ, семинарах НОЦ ФТНС ННГУ и кафедры физики полупроводников и оптоэлектроники ННГУ (2006–2011).

Ряд докладов отмечен дипломами: на 13-ой Нижегородской сессии молодых ученых (Н.Новгород, 2008), на 11-ой всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой оптики и наноэлектронике (С.Петербург, 2009).

Работа по теме диссертации выполнялась автором, будучи *руководителем* проекта ГК №П2086 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и *ответственным исполнителем* проектов: АВЦП Федерального агентства по образованию «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект РНП.2.1.1.933), проектов ГК №П1414, ГК №П314, № 16.740.11.0202 и № 14.740.11.1060 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», гранта Президента РФ (МК-185.2009.2) и гранта РФФИ № 10-02-00995.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 48 печатных работ, в том числе 7 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК, 10 статей в сборниках трудов конференций, 30 тезисов докладов и 1 учебно-методическое пособие.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 153 страницы, включая 50 рисунков, 8 таблиц, список литературы, который содержит 205 наименований, и список публикаций по теме диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** отражена актуальность проблемы, указаны научная новизна и практическая значимость работы; приведены цель и основные задачи работы, представлены сведения о структуре и содержании диссертации; сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** сделан краткий обзор, проведены анализ и обобщение литературных данных по направленной модификации свойств многослойных наноструктур на основе субоксида кремния (SiO_x при $x < 2$) и стехиометрического диоксида кремния (SiO_2). Рассматриваются процессы термически индуцированного формирования НК Si в слоях субоксида кремния, разделенных в направлении роста тонкими слоями стехиометрического диоксида кремния.

Рассмотрение материала осуществляется в следующей последовательности: получение и свойства отдельных слоев SiO_x , многослойных нанопериодических структур $a\text{-Si/SiO}_2$ и $\text{SiO}_x/\text{SiO}_2$. Для каждого материала рассматриваются фазовые превращения при термическом отжиге, а затем люминесцентные свойства массивов НК в матрице SiO_2 . Далее обсуждается электронный транспорт в системах с массивами НК Si в диэлектрической матрице. В завершение обсуждаются основные свойства оксидов с высокой диэлектрической проницаемостью (*high-k* диэлектриков) как альтернативных подзатворных диэлектриков. Глава заканчивается выводами, обоснованием и формулировкой цели и основных задач диссертации.

Вторая глава посвящена описанию оригинальной методики формирования систем оксидов с разной диэлектрической проницаемостью, содержащих массивы нановключений кремния, путем ВТО полученных вакуумным испарением *из отдельных источников* МНС $a\text{-SiO}_x/\text{оксид}$ (SiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3). Были изготовлены несколько серий образцов трех типов МНС: $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$, $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ и $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$, отличающихся геометрией слоев. Толщины «барьерных» слоев – оксидов SiO_2 , ZrO_2 и Al_2O_3 – варьировались от 2 до 16 нм. Толщины слоев SiO_x изменялись от 2 до 10 нм, а число периодов (пар слоев) в структурах – от 2

до 40. В главе описаны также методики проведения высокотемпературного отжига, гидрогенизации и ионного легирования. Изложены методы структурных исследований: малоугловой рентгеновской дифракции и высокоразрешающей просвечивающей микроскопии (ВР ПЭМ); методы исследования оптических и электрических свойств – измерение и обработка спектров пропускания, фотолюминесценции (ФЛ), комбинационного рассеяния света (КРС), измерения вольтамперных характеристик (ВАХ).

В третьей главе представлены результаты исследований по влиянию условий формирования, геометрии, температуры и времени отжига, а также ионной имплантации фосфора и бора на оптические и структурные свойства полученных МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$. Измерение спектров ФЛ МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$, показали интенсивную люминесценцию в диапазоне длин волн 350–900 нм. Для неотожженных структур характерно наличие широкого спектра со слабым экстремумом ФЛ в коротковолновой области (500–600 нм), что обусловлено люминесценцией излучательных центров в оксидных слоях кремния. Широкая полоса ФЛ свидетельствует о разнообразии природы излучательных центров, включающих нефазовые включения Si: кольца, малоразмерные кластеры, а также излучательные низкокоординированные центры в SiO_2 .

Отжиг структур приводит к закономерному «красному» смещению максимума коротковолновой полосы ФЛ по мере роста температуры отжига, начиная с 500 °С. Эта полоса исчезает после отжига при 800 °С, и дальнейшее увеличение температуры приводит к появлению и росту интенсивности ФЛ при 700–900 нм. Данная полоса относится к излучательной рекомбинации в НК Si, образующихся в слоях SiO_x после ВТО вследствие фазового разделения. При температуре отжига 1100 °С интенсивность этой полосы ФЛ становится максимальной. При этом практическое отсутствие коротковолновой полосы ФЛ указывает на низкую концентрацию излучательных «дефектных» центров.

На рис. 1 прослеживается явная зависимость полосы ФЛ для отожженных структур от толщины слоев SiO_x в исходных МНС. Уменьшение толщины слоев SiO_x в МНС от 8 до 2 нм приводит к уменьшению размеров НК Si и соответствующему снижению длины волны пика ФЛ от 810 до 740 нм. «Синее» смещение пика ФЛ структур сопровождается сужением спектров из-за уменьшения дисперсии НК Si по размерам. Интенсивность ФЛ немонотонно изменяется с уменьшением толщины слоев SiO_x в МНС от 8 до 2 нм, что может быть

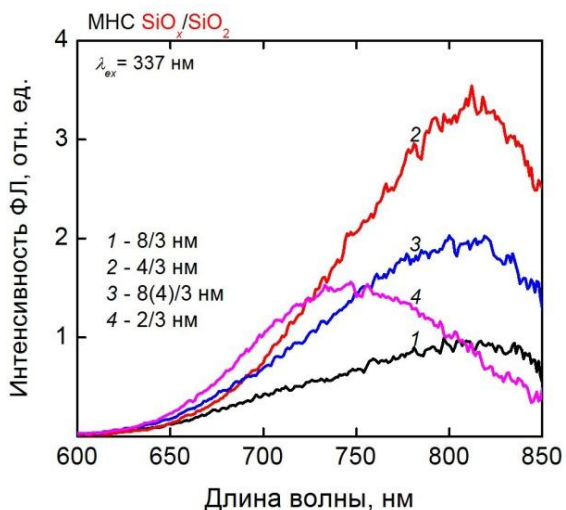


Рис. 1. Спектры ФЛ МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$, подвергнутых отжигу при $1100\text{ }^\circ\text{C}$.

обусловлено разным вкладом безызлучательных процессов как в отдельном НК, так и в массиве нанокристаллов в целом.

При температуре отжига $1100\text{ }^\circ\text{C}$ размерно-зависимая ФЛ имеет максимальную интенсивность после термообработки в течение 120 мин. для всех случаев вариации периода структур. МНС с периодом $8/3$ и $4/3$ нм показали монотонное «синее» смещение пика ФЛ по мере роста времени отжига, связан-

ное с уменьшением диаметра НК Si из-за увеличения толщины SiO_2 -оболочки НК. Этого не наблюдается для структур $2/3$ нм, что связано с более выраженной ограничительной ролью барьеров. Таким образом, диаметры НК Si регулируются путем задания исходной толщины SiO_x -слоев, а ее вариация позволяет управлять длиной волны ФЛ. Увеличение количества SiO_x -слоев ведет к закономерному усилению интенсивности пика ФЛ, что объясняется увеличением числа НК Si, участвующих в излучательной рекомбинации.

Изложенные данные об образовании и росте НК Si в МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$ по мере увеличения температуры отжига подтверждаются эволюцией спектров ИК-пропускания и КРС структур. Спектры ИК-пропускания показывают, что с ростом температуры отжига полосы поглощения, характерные для мод Si-O-Si в монооксиде кремния, трансформируются в полосы поглощения, свойственные модам колебаний связей в диоксиде SiO_2 . Это подтверждает факт термического фазового разделения SiO_x с выделением SiO_2 по реакции: $2\text{SiO}_x \rightarrow x\text{SiO}_2 + (2-x)\text{Si}$. По мере отжига на фоне широкого пика КРС на 480 см^{-1} , свойственного аморфному Si, появляется и растет узкий пик при 520 см^{-1} , относящийся к кристаллическому кремнию. Согласно представленным результатам по влиянию температуры и времени ВТО на спектры ФЛ, ИК-пропускания и КРС МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$, можно заключить о качественно сходном их поведении под действием термообработки.

По данным микроскопических исследований МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$ ($4/3$ нм), не подвергнутых ВТО, установлено формирование сплошных наноразмерных

слоев SiO_x и SiO_2 , причем имеется соответствие реального и заданного периодов. ВТО приводит к формированию наноразмерных включений кремния (с плотностью $\sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) в аморфной матрице SiO_2 с сохранением исходной периодичности системы $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$.

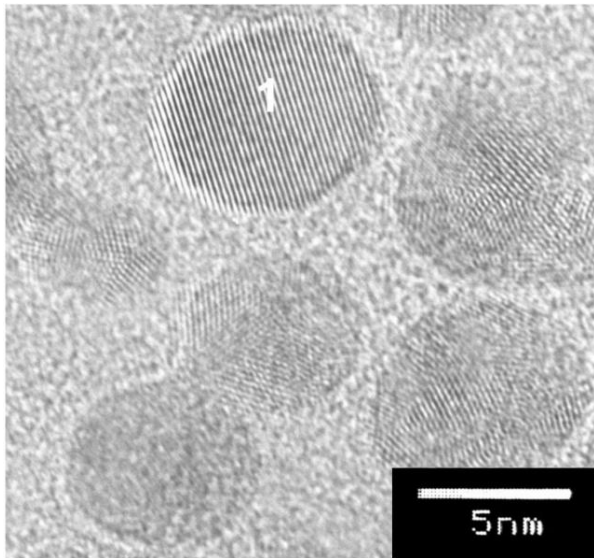


Рис. 2. ВР ПЭМ-изображение поперечного среза МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$ (4/3 нм), отожженной при температуре 1100 °С.

Период МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$ (4/3 нм) после ВТО составил 7.4 ± 1.5 нм. Согласно данным по ВРПЭМ-изображениям кремниевые включения имели кристаллическую структуру (рис. 2). Ориентации нанокристаллов в массиве имеют хаотичный характер. В качестве примера на рис. 2 приведено изображение для одной из МНС. Для нанокристалла, помеченного на рис. 2 цифрой 1, расстояние между параллельными прямыми дает значение $1.91 \pm 0.02 \text{ \AA}$, что соот-

ветствует отражению (220). Для решетки кремния $d_{220} = 0.191$ нм. Фурье-анализ различных ПЭМ-изображений дал межплоскостные расстояния $3.2 \pm 0.1 \text{ \AA}$, $1.91 \pm 0.02 \text{ \AA}$, $1.64 \pm 0.04 \text{ \AA}$ и $1.35 \pm 0.04 \text{ \AA}$, что соответствует отражениям {111}, {220}, {400}, {311} для кремния.

Установлено, что диаметры НК Si не превышают толщину исходных слоев SiO_x в МНС. Найденная из данных ПЭМ функция распределения НК Si по размерам дала наиболее вероятный диаметр НК Si, равный 4.6 ± 1.5 нм для МНС с периодом 4/3 нм. Распределение аппроксимировалось функцией Гаусса, что характерно для подобных наносистем. По результатам ВР ПЭМ делается вывод, что при ВТО в МНС формируются массивы вертикально упорядоченных НК Si с диаметрами, не превышающими исходной толщины слоев SiO_x , с плотностью $\sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Ионное легирование P^+ , B^+ и Ne^+ с последующим отжигом практически во всех случаях приводит к качественно одинаковому влиянию, а именно – подавлению люминесценции во всем изучаемом диапазоне длин волн. Ослабление ФЛ обусловлено совокупностью нескольких факторов, таких как преципитация примеси и радиационное ускорение химического взаимодействия кремния с материалом матрицы, а также (в случае P^+ и B^+), возможно, оже-

рекомбинацией при наличии в НК Si более одного электрона или дырки. Исключение составил случай усиления ФЛ (в 2.5 раза) при ионном легировании фосфором (с дозой $\sim 10^{16} \text{ см}^{-2}$) с последующим отжигом при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, что связано с ускоренной фосфором кристаллизации аморфных нановключений Si либо пассивирующей ролью фосфора, а также внесением донорных центров в НК Si, как и в случае ионно-синтезированной системы *nc*-Si/SiO₂.

В четвертой главе с применением комплекса спектроскопических методов и электронной микроскопии исследовано влияние высокотемпературного отжига на формирование, структурные и оптические свойства МНС *a*-SiO_x/(оксид с высокой диэлектрической проницаемостью), полученные вакуумным испарением из отдельных источников. В качестве барьерных слоев использовались слои ZrO₂ и Al₂O₃.

В общем случае для ФЛ МНС *a*-SiO_x/ZrO₂ наблюдаются три основных полосы эмиссии с пиками интенсивности при ~ 550 , ~ 600 – 700 и ~ 700 – 850 нм. Неотожженные образцы дают широкую полосу с максимумом при 550 нм и относительно слабую при ~ 650 нм. Отжиг при $500 \text{ }^\circ\text{C}$ увеличивает интенсивность полос при ~ 550 нм и при ~ 600 – 700 нм. Полоса с пиком при ~ 600 – 700 нм становится наиболее выраженной в случае отжигов при 600 и $700 \text{ }^\circ\text{C}$, тогда как интенсивность ФЛ при 550 нм ослабляется. Дальнейшее повышение температуры отжига демонстрирует смещение длинноволнового максимума последовательно к 700 , 780 , 800 , 750 нм. Пик при 750 – 800 нм, присутствующий после ВТО при 1000 и $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, обусловлен ФЛ от НК Si.

На рис. 3 представлены спектры ФЛ МНС *a*-SiO_x/ZrO₂, подвергнутых отжигу при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ для четырех структур. Для структуры $8/2$ нм после отжига при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ максимум полосы ФЛ приходится на длину волны 800 нм, а для МНС $4/2$ нм (т.е. с более тонким слоем SiO_x) пик соответствует меньшей длине волны – 750 нм. Следовательно, уменьшение толщины слоев

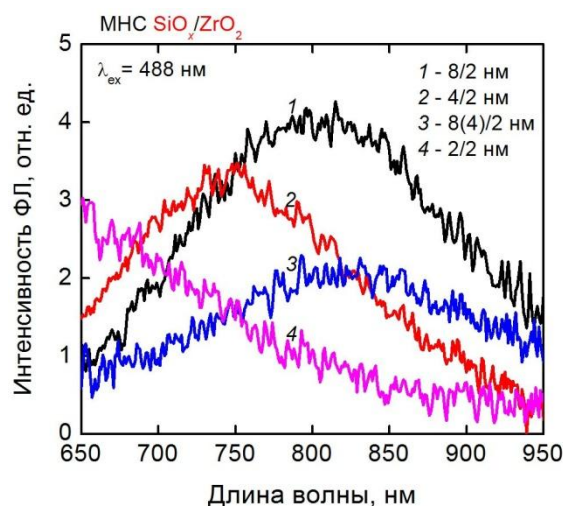


Рис. 3. Спектры ФЛ при возбуждении аргоновым лазером МНС *a*-SiO_x/ZrO₂, отожженных при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Период МНС, нм: $8/2$ – кривая 1; $4/2$ – кривая 2; $8(4)/2$ – кривая 3, $2/2$ – кривая 4.

SiO_x приводит к «синему» смещению полосы ФЛ, что согласуется с квантово-размерным эффектом.

На рис. 4 приведены спектры ИК-пропускания неотожженного образца $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ с периодом 8/2 нм и таких же образцов, отожженных при разных температурах. При росте температуры отжига происходит трансформация полос, характерных для SiO , в полосы ИК-поглощения, типичные для SiO_2 . ВТО приводит также к появлению слабой полосы поглощения при 570 см^{-1} , соответствующей моде колебаний растяжения O-Zr-O в моноклинном ZrO_2 , свидетельствуя о сохранении фазы диоксида циркония.

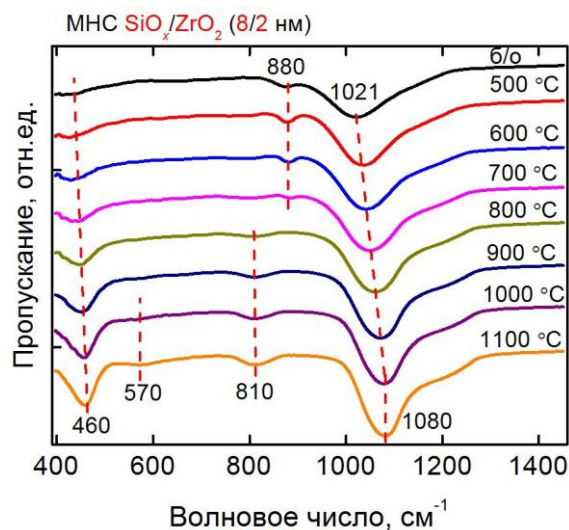


Рис. 4. Влияние отжига на спектры ИК-пропускания МНС $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ 8/2 нм.

На рис. 5 приведены типичные спектры КРС структур на сапфировой подложке. Отжиг закономерно модифицирует спектры, отражая образование нанокристаллов кремния при температурах отжига 1000 и 1100 °С.

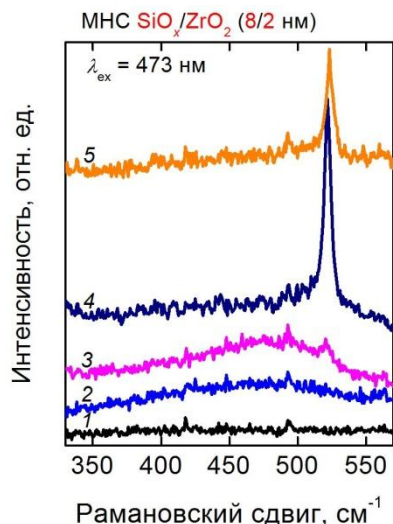


Рис. 5. Влияние температуры отжига на спектры КРС МНС $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ (8/2 нм) на сапфировой подложке. Температура отжига МНС, °С: кривая 1 – без отжига; 2 – 700, 3 – 900, 4 – 1000, 5 – 1100.

Отжиг закономерно модифицирует спектры, отражая образование нанокристаллов кремния при температурах отжига 1000 и 1100 °С. В случае отжига при температурах менее 1000 °С имеется широкий пик рассеяния со слабым максимумом при 480 см^{-1} , а отжиг при 1000 °С приводит к исчезновению этого пика и появлению узкого асимметричного пика при $\sim 521\text{ см}^{-1}$.

МНС $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$ до отжига обладают слабой ФЛ во всем исследованном диапазоне спектра. В результате отжигов при 500–700 °С возникает широкая полоса ФЛ в области 550–850 нм с максимумом при 600–670 нм. Эту ФЛ можно объяснить формированием аморфных кластеров в пленках $a\text{-SiO}_x$ (либо очень мелких НК).

С повышением температуры отжига до 1000–1100 °С максимум сдвигается к типичному для НК Si (с диаметром $\sim 3\text{ нм}$) значению $\sim 750\text{ нм}$. Таким образом, отличие поведения спектров ФЛ от

температуры отжига для МНС $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$ от $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ сводится к меньшей выраженности полосы, связанной с дефектами и/или кольцевыми (либо цепочечными) структурами, что, возможно, вызвано механическими напряжениями, ведущими при отжиге к дрейфу дефектов к интерфейсам.

При сравнении спектров ФЛ систем $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ была замечена ситуация, когда максимальная интенсивность полосы ФЛ от НК Si наблюдается для структур с максимальной толщиной слоев SiO_x , равной 8 нм. С уменьшением толщины SiO_x -слоя наблюдается монотонное ослабление интенсивности ФЛ от НК Si вплоть до ее полного гашения для МНС с периодом 2/3 нм. По-видимому, при ВТО в системах $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ имеет место эффект химического взаимодействия SiO_x с материалом барьерных слоев, и частичного «съедания» нанокристаллов кремния.

Спектры ИК-пропускания образцов $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$, подвергнутых ВТО, также показали, что по мере роста температуры отжига происходит трансформация полос, характерных для SiO, в полосы ИК-поглощения, типичные для SiO_2 . ВТО при 1000 и 1100 °C приводит к появлению слабых полос поглощения при 550 см^{-1} и 735 см^{-1} , соответствующих колебаниям Al–O связей, что объясняется кристаллизацией Al_2O_3 .

Как следует из данных по ИК-пропусканию и КРС, по мере отжига в МНС $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ и $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$ имеет место в целом та же схема структурно-фазовых переходов, что и для МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$. В исходных МНС присутствуют точечные дефекты типа кислородно-дефицитных центров, а также цепочки из атомов Si, которые могут быть замкнуты в кольца либо образовывать разветвленные (фрактальные) структуры без фазовой границы. По мере отжига структуры формируют аморфные нановключения, которые после отжигов при 1000–1100 °C кристаллизуются и преобразуются в НК Si.

С точки зрения максимальной интенсивности ФЛ от нанокристаллов система НК Si/ SiO_2 является предпочтительной. Для *high-k* барьерных МНС относительное снижение световой эмиссии связано с влиянием термически активированных процессов химического взаимодействия между НК Si и оксидом (ZrO_2 или Al_2O_3). С другой стороны, применение диэлектрических барьерных слоев с разной, в частности более высокой, диэлектрической проницаемостью (ZrO_2 , Al_2O_3) может служить способом повышения эффективного показателя

преломления системы как активной оптической среды для создания светоизлучающих и оптических резонаторных кремниевых структур.

На рис. 6 представлены ПЭМ-изображения поперечного среза МНС $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ 8/2 нм, подвергнутых отжигу при разных температурах, в прямом и обратном пространстве (Фурье-образ в верхней части рисунка). Неотожженная структура (рис. 6(а)) характеризуется аморфностью сплошных слоев SiO_x и ZrO_2 (темно-серый), что выражается в отсутствии точечных рефлексов и колец на Фурье-образе. Средний период МНС составил 11.3 ± 0.8 нм, что согласуется с прогнозируемым периодом ($8.4 + 2.1 = 10.5$ нм). Можно выделить достаточно резкие границы раздела между аморфными слоями субоксида кремния и диоксида циркония.

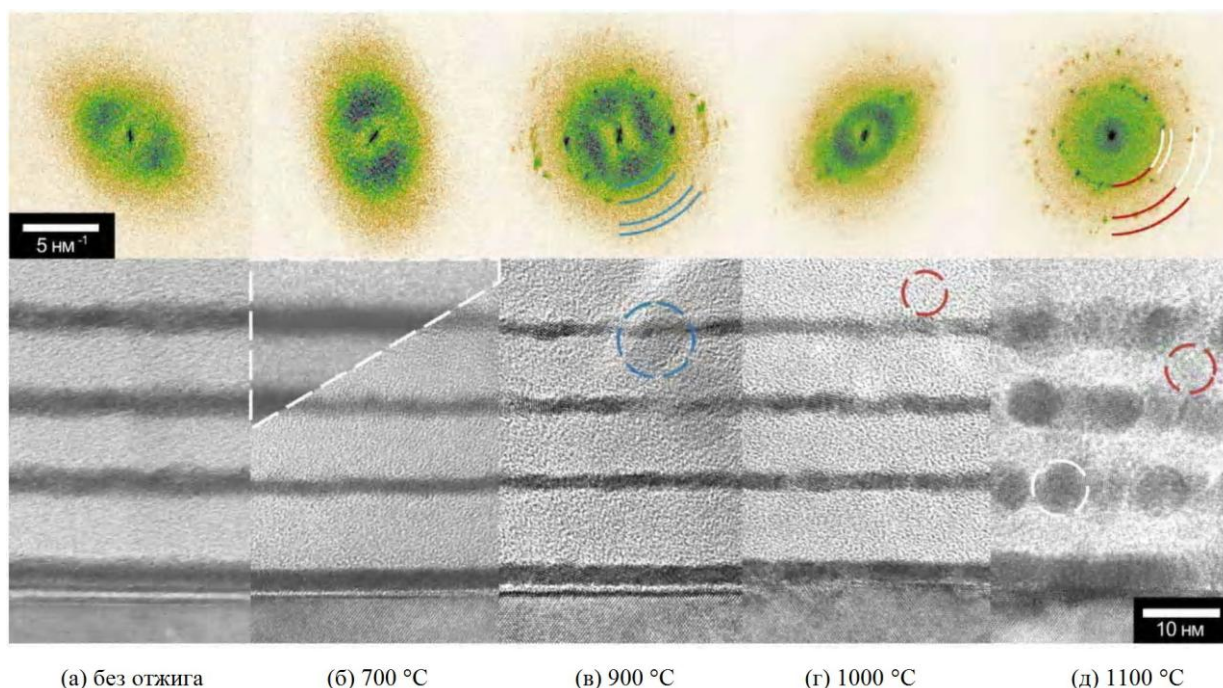


Рис. 6. ПЭМ-изображения поперечного среза МНС $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ с периодом 8/2 нм, подвергнутых отжигу при разных температурах, °С: б/о (а), 700 (б), 900 (в), 1000 (г), 1100 (д) (внизу) и Фурье-образы изображения (вверху). Радиальные полукольца на Фурье-образе соответствуют окружностям на ПЭМ-изображениях.

Отжиг системы $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ при 700 °С (рис. 6(б)) не приводит к заметным изменениям в структуре, наблюдается «аморфное» гало на Фурье-образе. Картина существенным образом меняется при повышении температуры отжига до 900 °С (рис. 6(в)). Появление ярко-выраженных точечных рефлексов свидетельствует о появлении включений кристаллической фазы в слоях. Их положения оказались близкими к значениям для ZrSi . Слои субоксида кремния остаются аморфными. Повышение температуры отжига до 1000 °С (рис. 6(г)) при-

водит к структурной модификации, при которой толщины исходных ZrO_2 слоев не претерпевают значительных изменений. В слоях SiO_x видно формирование кристаллических нановключений, слабоконтрастных и без четко выраженных границ. Точечные рефлексы на Фурье-образе дают набор межплоскостных расстояний, удовлетворяющий наличию одновременно нескольких кристаллических фаз: SiO_2 , Si, ZrSi, ZrO_2 , Zr.

Кардинальные изменения в структуре МНС $a-SiO_x/ZrO_2$ наблюдаются после отжига при $1100\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 6(д)). На ПЭМ-изображении можно выделить нанокристаллы двух типов: «сильноконтрастные» (более темные, в слоях ZrO_2 , обведенные белым контуром) и «слабоконтрастные» (светло-серые, в слоях SiO_x , обведенные темной окружностью). Все нановключения, согласно положению рефлексов на Фурье-образе, имеют структуру алмаза. «Низкоконтрастные» нановключения являются чисто кремниевыми и кристаллическими, доказывая формирование нанокристаллов кремния в слоях SiO_x . Для «сильноконтрастных» нановключений, которые расположены в областях исходных слоев диоксида циркония (обведены белым контуром на рис. 6(д)), Фурье-обработка дала дополнительно к «кремниевым» межплоскостным расстояниям рефлексы для гранцентрированной решетки, значения которых соответствуют цирконийсодержащим кристаллическим веществам. Таким образом, после отжига при $1100\text{ }^\circ\text{C}$ исходные слои ZrO_2 теряют сплошность и на их месте формируются нанобразования кубического диоксида циркония структурного типа $\{Fm3m\}$ с недостатком кислорода.

Термообработка в водороде сильно влияет на ФЛ МНС с барьерами как из ZrO_2 , так и из Al_2O_3 . Интенсивность ФЛ системы НК Si/Al_2O_3 растет с температурой гидрогенизации, достигая максимального значения при $500\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 7). При дальнейшем повышении температуры наблюдается ослабление интенсивности, что связано с нарастающим вкладом процесса эффузии водорода. Обнаружено «красное» смещение

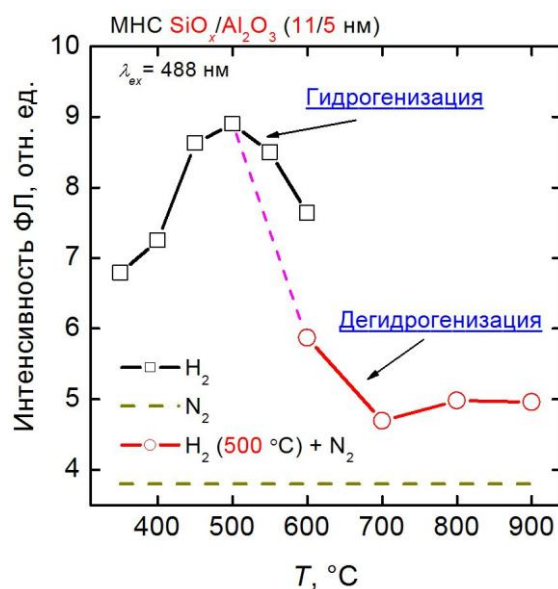


Рис. 7. Спектры ФЛ МНС $a-SiO_x/Al_2O_3$, отожженных при $1100\text{ }^\circ\text{C}$ в атмосфере N_2 , с последующим отжигом при разных температурах в молекулярном водороде.

пика ФЛ с увеличением температуры гидрогенизации, что свидетельствует о более выраженном пассивирующем эффекте для более крупных НК Si с большей поверхностью и числом оборванных связей. Интенсивность полосы ФЛ, связанной с НК Si, при дегидрогенизации спадает примерно в 1.5 раза для температуры 600 °С, что свидетельствует о выходе водорода из системы и увеличении концентрации центров безызлучательной рекомбинации.

В пятой главе анализируется вертикальный электронный транспорт структур с массивами НК Si в матрицах SiO₂, Al₂O₃ и ZrO₂. В главе приводятся результаты исследования вольтамперных характеристик (ВАХ) подвергнутых высокотемпературному отжигу МНС *a*-SiO_{*x*}/(SiO₂, Al₂O₃, ZrO₂) с варьируемыми параметрами периодичности. Учитывая, что в МНС после ВТО формируются НК Si с диаметрами, не превышающими толщину исходных кремнийсодержащих слоев, с заданным технологически количеством последних, МНС НК Si/оксид представляют интерес как модельный объект исследования явлений дискретного или резонансного туннелирования, связанного с квантово-размерными эффектами.

Для анализа транспортных свойств МНС НК Si/оксид использовалась теория дискретного туннелирования [2], где методом функций Грина, как в [3], была решена задача электронного транспорта сквозь цепочку из большого числа гранул (более одной) в широкозонной среде для области напряжений, в которой имеет место кулоновская блокада туннелирования.

В МНС *a*-SiO_{*x*}/SiO₂, отожженных при 1100 °С, оценка дает среднее значение количества гранул на цепочку $N \sim 25$. Видим, что это значение соответствует числу слоев SiO_{*x*} в МНС. Это является еще одним доказательством образования массива нанокристаллов Si в МНС *a*-SiO_{*x*}/SiO₂, подвергнутых ВТО. При этом диаметры НК Si соизмеримы с толщиной слоев SiO_{*x*}, расположенных между слоями SiO₂, что хорошо согласуется с данными просвечивающей электронной микроскопии и используемых спектроскопических методик.

Для МНС *a*-SiO_{*x*}/ZrO₂ и *a*-SiO_{*x*}/Al₂O₃, подвергнутых ВТО, результаты оценки среднего значения гранул представлены в табл. 1 и 2. Из таблиц можно проследить, как изменяются ВАХ в зависимости от типа подложки и исходного количества слоев (периода) SiO_{*x*}.

Качественное подобие вида ВАХ независимо от периода структур свидетельствовало о правильности применения механизма электронного транспорта по цепочкам гранул в условиях кулоновской блокады туннелирования для опи-

сания протекания тока в столь сложных системах, по крайней мере в области малых и средних полей (до $\sim 10^6$ В/см).

Табл. 1 – Количество гранул в цепочке для МНС $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$, сформированных на кремниевых подложках n - и p -типа и отожженных при 1100 °С.

Параметр	МНС на КЭФ-0.03		МНС на КДБ-12			
	период, нм		период, нм			
	7/5	11/5	4/5	7/5	11/5	4/16
Число периодов МНС	9	9	9	9	9	9
Количество гранул N (НК Si)	8.8	9.0	8.5	8.6	9.0	9.5

Табл. 2 – Количество гранул в цепочке для МНС $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$, сформированных на кремниевой подложке n - типа и отожженных при 1100 °С.

Параметр	МНС на КЭМ-0.002				
	период, нм				
	8/2	4/2	8/2	8/2	8/2
Число периодов МНС	21	26	9	5	3
Количество гранул N (НК Si)	20.6	25.7	8.8	4.8	3.5

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Многослойные нанопериодические структуры $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$, $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ и $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$, полученные вакуумным испарением из отдельных источников, после высокотемпературного (1000–1100 °С) отжига демонстрируют размерно-зависимую фотолюминесценцию в области 650–850 нм при комнатной температуре.
2. Установлено, что модификация спектров фотолюминесценции, ИК-пропускания и КРС многослойных наноструктур $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$, $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ и $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$ под действием термообработки в интервале температур 500–1100 °С осуществляется через структурно-фазовые превращения в слоях субоксида кремния в последовательности: нефазовые включения кремния – аморфные Si кластеры – нанокристаллы. Пониженная интенсивность ФЛ от систем НК Si/(*high-k* диэлектрик) объясняется влиянием химического взаимодействия на гетерогранице под действием высокотемпературного отжига.
3. С помощью комплекса микроскопических исследований для отожженных при 1100 °С МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$, $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ и $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$ установле-

но формирование нанокристаллов кремния с размерами, близкими к исходной толщине слоев SiO_x в МНС. Для системы НК Si/SiO_2 поверхностная плотность нанокристаллов составляет $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

4. Имплантация ионов бора, фосфора и неона дозами $9 \cdot 10^{13} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ в МНС $a\text{-SiO}_x/\text{оксид}$ с последующим отжигом при 1000 и 1100 °С в большинстве случаев ведет к ослаблению ФЛ от НК Si , вызванному несколькими факторами, включая преципитацию примеси, аморфизацию нанокристаллов и радиационное ускорение химического взаимодействия кремния с материалом матрицы. Повышение интенсивности люминесценции в 2.5 раза происходит при легировании МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$ ионами фосфора с дозами $\sim 10^{16} \text{ см}^{-2}$ с использованием отжига при 1000 °С, что связывается с насыщением оборванных связей либо с ускоренной кристаллизацией и/или эффектом легирования при введении фосфора.
5. Установлен рост интенсивности фотолюминесценции от НК Si в матрицах ZrO_2 и Al_2O_3 после гидрогенизации образцов при 500 °С, что связано с пассивацией водородом оборванных связей.
6. Для обработки и анализа вольтамперных характеристик МНС $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$, $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ и $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$, подвергнутых высокотемпературному отжигу, может быть применена модель электронного транспорта по цепочкам гранул в условиях кулоновской блокады туннелирования, по крайней мере в области малых и средних полей (до $\sim 10^6 \text{ В/см}$). Среднее число гранул в цепочке токопереноса согласуется с количеством слоев SiO_x в МНС.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Si nanocrystal based memories: Effect of the nanocrystal density / T.Z. Lu, M. Alexe, R. Scholz, V. Talalaev, R.J. Zhang, M. Zacharias // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. P. 014310-(1-5).
- [2] Дискретное туннелирование в электронных транспортных свойствах наногранулированного пористого кремния и подобных гетерофазных систем / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, и др. // ФТТ. 2009. Т. 51, вып. 10. С. 1894–1899.]
- [3] Kulik I.O., Shekhter R.I. Kinetic phenomena and charge discreteness effects in granulated media // Sov. Phys.-JETP. 1975. V. 41, № 2. P. 308–316.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [A1] Сравнительное исследование люминесцентных свойств многослойных нанопериодических структур $a\text{-Si/ZrO}_2$ и $a\text{-SiO}_x\text{/ZrO}_2$, подвергнутых высокотемпературному отжигу и гидрогенизации / А.В. Ершов, И.А. Чугров, Д.И. Тетельбаум, С.С. Андреев, А.И. Белов, Ю.А. Вайнер, А.А. Ершов, И.А. Карабанова, А.И. Машин, А.Н. Михайлов // Вестник ННГУ. Сер. ФТТ. – 2009. – №4. – С. 45-52.
- [A2] Влияние ионного легирования, отжига и гидрогенизации на фотолюминесценцию многослойных нанопериодических структур $a\text{-Si/ZrO}_2$ и $a\text{-SiO}_x\text{/ZrO}_2$ / А.В. Ершов, Д.И. Тетельбаум, И.А. Чугров, А.И. Белов, В.К. Васильев, А.А. Ершов, И.А. Карабанова, А.И. Машин, А.Н. Михайлов, А.В. Нежданов // Вестник ННГУ. Сер. ФТТ. – 2010. – №1. – С. 35-44.
- [A3] Фотолюминесценция и комбинационное рассеяние света в периодических массивах нановключений кремния в диоксиде циркония / И.А. Чугров, А.А. Ершов, А.В. Нежданов, А.Н. Михайлов, А.В. Ершов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Физико-математические науки. – 2010. – №1. – С. 71-79.
- [A4] Атомно-силовая микроскопия поверхности плёнок Al_2O_3 , подвергнутых ионному облучению кремнием и высокотемпературному отжигу / А.И. Белов, А.В. Ершов, М.А. Кудряшов, А.Н. Михайлов, И.А. Чугров, А.И. Машин, Д.И. Тетельбаум // Вестник ННГУ. Сер. ФТТ. – 2010. – №3. – С. 54-60.
- [A5] Дискретное туннелирование в многослойных нанопериодических структурах $nc\text{-Si/Al}_2\text{O}_3$ / И.А. Чугров, Е.С. Демидов, А.В. Ершов // Вестник ННГУ. Сер. ФТТ. – 2011. – №3. – С. 44-49.
- [A6] Эволюция оптических свойств при отжиге многослойной нанопериодической системы $\text{SiO}_x\text{/ZrO}_2$, содержащей нанокластеры кремния / А.В. Ершов, Д.И. Тетельбаум, И.А. Чугров, А.И. Машин, А.Н. Михайлов, А.В. Нежданов, А.А. Ершов, И.А. Карабанова // ФТП. – 2011. – Т.45, №6. – С. 747-753.
- [A7] Формирование методом ионной имплантации наночастиц золота в однослойных и многослойных массивах светоизлучающих нанокристаллов кремния / А.Н. Михайлов, А.Б. Костюк, Д.С. Королев, И.Ю. Жаворонков, И.А. Чугров, А.И. Белов, В.А. Бурдов, А.В. Ершов, Д.И. Тетельбаум // Известия Академии наук. Сер. физическая – 2012. – №2. – С. 244-248.
- [A8] Модификация люминесцентных свойств многослойных наноструктур $a\text{-SiO}_x\text{/Al}_2\text{O}_3$ и $a\text{-Si/Al}_2\text{O}_3$ путем водородной пассивации, ионного легирования и отжига / А.В. Ершов, Д.И. Тетельбаум, И.А. Чугров // Труды XIII международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», Н.Новгород, 16-20 марта. – 2009. – Т. 2. – С. 342-343.
- [A9] Особенности электропереноса в многослойных нанопериодических структурах $\text{SiO}_x\text{/Al}_2\text{O}_3$, подвергнутых высокотемпературному отжигу / И.А. Чугров, Е.С. Демидов, А.В. Ершов, И.А. Карабанова, А.И. Машин, Д.И. Тетельбаум // Труды XIII международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», Н.Новгород, 16-20 марта. – 2009. – Т. 2. – С. 449-450.
- [A10] Оптические свойства многослойных нанопериодических структур $a\text{-SiO}_x\text{/ZrO}_2$ и $a\text{-Si/ZrO}_2$, подвергнутых легированию и отжигу / А.А. Ершов, И.А. Чугров, А.В. Ершов, А.В. Нежданов, А.И. Машин, А.Н. Михайлов, Д.И. Тетельбаум // Труды XIV международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», Н.Новгород, 15-19 марта. – 2010. – Т. 2. – С. 486-487.
- [A11] Оптические свойства периодических структур с нанокристаллами кремния в матрице диоксида циркония / А.А. Ершов, И.А. Чугров, А.В. Ершов // Труды 16-ой Всероссийской

научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, Волгоград, 22-29 апреля. – 2010. – С. 197.

- [A12] Особенности фотолюминесценции ионно-легированных многослойных нанопериодических систем *nc-Si/high-k*-оксид / А.В. Ершов, И.А. Чугров, А.А. Ершов, А.И. Бобров, Д.А. Павлов, А.И. Машин, Д.И. Тетельбаум // Труды XV международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», Н.Новгород, 14-18 марта. – 2011. – Т. 2. – С. 478.
- [A13] Формирование методом имплантации наночастиц золота в однослойных и многослойных массивах светоизлучающих нанокристаллов кремния / А.Н. Михайлов, А.Б. Костюк, Д.С. Королев, И.Ю. Жаворонков, И.А. Чугров, А.И. Белов, М.Е. Шенина, А.П. Касаткин, В.А. Бурдов, А.В. Ершов, Ю.А. Дудин, Д.И. Тетельбаум // Труды XV международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», Н.Новгород, 14-18 марта. – 2011. – Т. 2. – С. 438.
- [A14] Ионное внедрение золота в однослойные и многослойные оксидные структуры с нанокристаллами кремния / А.Н. Михайлов, А.Б. Костюк, Д.С. Королев, И.Ю. Жаворонков, И.А. Чугров, А.И. Белов, А.В. Ершов, Д.И. Тетельбаум // Труды XXI Международной конференции «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, Украина, 22-27 августа. – 2011. – Т.1. – С.230-237
- [A15] Особенности радиационного повреждения нанокристаллических материалов при ионном облучении / Д.И. Тетельбаум, А.Н. Михайлов, А.Б. Костюк, А.И. Белов, Д.В. Гусейнов, Д.А. Лаптев, Д.С. Королев, М.П. Федонин, А.В. Ершов, И.А. Чугров // Труды XX Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2011», Звенигород, 25-29 августа. – 2011. – Т.2. – С.41-44.
- [A16] Температурная зависимость фотолюминесценции нанопериодических структур с упорядоченными массивами нанокристаллов кремния в оксидной матрице / И.А. Чугров, С.Н. Нагорных, В.И. Павленков, А.В. Ершов, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, В.А. Бурдов, Д.И. Крыжков, Л.В. Красильникова, Д.И. Тетельбаум // Труды XVI международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», Н.Новгород, 12-16 марта. – 2012. – Т. 2. – С. 426.
- [A17] Структурная морфология и оптические свойства системы вертикально упорядоченных массивов нанокристаллов кремния в матрице диоксида кремния / А.В. Ершов, И.А. Чугров, Д.А. Грачев, А.И. Бобров, Д.А. Павлов // Труды XVI международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», Н.Новгород, 12-16 марта. – 2012. – Т. 1. – С. 251.