

На правах рукописи



МЕНДЕЛЕВА ЮЛИЯ АЛЕКСЕЕВНА

**ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ КРЕМНИЯ,  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПУТЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИ НЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор **Давид Исаакович Тетельбаум**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор **Николай Николаевич Герасименко**

кандидат физико-математических наук,  
доцент **Владимир Дмитриевич Скупов**

**Ведущая организация:** Казанский физико-технический институт им.  
Е.К.Завойского КазНЦ РАН, г.Казань

**Защита состоится «19» сентября 2007 г. в 14:00 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 (НИФТИ)**

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

Автореферат разослан «\_\_\_» августа 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
д.ф.-м.н., профессор  
Машин



А.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Кремний – наиболее распространенный элемент земной коры, сыграл выдающуюся роль в полупроводниковой электронике. Сама природа позаботилась о том, чтобы обеспечить этому материалу лидерство: практически неограниченные сырьевые ресурсы, физико-химические свойства, облегчающие глубокую очистку от примесей и дефектов, близкие к идеальным для планарной технологии свойства термического окисла и др. По оценкам специалистов, ведущее положение кремния в микроэлектронике сохранится и в обозримом будущем. Однако в последнее время лидерству кремния был брошен серьезный вызов в связи с новым этапом в развитии информационных технологий. Непрерывное повышение требований к быстродействию интегральных схем, развитие систем волоконной оптики в коммуникационных сетях и другие факторы выдвинули на первый план оптоэлектронику, как альтернативу традиционной микроэлектронике. Действительно, возможности дальнейшего повышения быстродействия могут быть достигнуты только путем замены электрических связей между активными элементами на оптические. Кроме того, развитие волоконной оптики потребовало разработки комплекса новых светоизлучающих и фотоэлектронных устройств.

*Актуальность работы* продиктована необходимостью разработки физических основ формирования созданных на основе кремния материалов, обладающих свойствами, которые обеспечили бы применение этого непрямозонного полупроводника для задач оптоэлектроники. Создание излучателей света на основе кремния имеет исключительно важное значение, так как это в конечном итоге позволило бы инкорпорировать в монокристаллические интегральные схемы устройства, генерирующие и преобразующие оптические сигналы.

Главная проблема, возникающая на пути оптоэлектронных применений кремния, состоит в низкой эффективности собственной люминесценции, обусловленной, в первую очередь, непрямозонностью энергетической структуры этого полупроводника.

Среди различных подходов к решению проблемы важное место занимает наноструктурирование путем создания нанокристаллов Si (квантовых точек), погруженных в широкозонную матрицу SiO<sub>2</sub> (система SiO<sub>2</sub>:nc-Si). Однако диэлектрический характер матрицы SiO<sub>2</sub> затрудняет функционирование в устройствах с токопереносом, например, в светодиодах.

В НИФТИ ННГУ был предложен один из способов наноструктурирования, который заключается в облучении поверхности кремния ионами инертных газов. Идея основана на том, что в области доз облучения, близких к дозе аморфизации, внутри аморфного слоя сохраняются наноразмерные кристаллические области, способные выполнять роль квантовых точек. Было экспериментально установлено, что такая система *a*-Si/nc-Si обладает фотолюминесценцией в красном и ближнем ИК диапазоне, и при этом спектр фотолюминесценции оказался близким к спектру системы SiO<sub>2</sub>:nc-Si. Было обнаружено, что аналогичный спектр фотолюминесценции наблюдается также в случае облучения кремния ионами инертных газов при дозах, намного превышающих дозу аморфизации. Однако, закономерности формирования данных систем, механизмы люминесценции и её особенности в зависимости от условий облучения оставались мало изученными.

Исследование светоизлучающих свойств ионно-облученного кремния важно не только само по себе, но и для расширения фундаментальных знаний о свойствах относительно нового класса материалов – композитных аморфно-нанокристаллических полупроводников. Это способствовало бы поискам путей применения материалов такого типа в качестве функциональных элементов наноэлектронных устройств различного назначения.

### **Цель и основные задачи работы**

Цель работы – разработка физических основ создания светоизлучающих в красном и ближнем ИК-диапазоне наноструктур в кремнии при облучении ионами электрически неактивных элементов.

#### Основные задачи работы:

1. Детальное исследование люминесцентных свойств кремния, наноструктурированного облучением ионами инертных газов при дозах, близких к дозе аморфизации («малые» дозы), изучение связанных с процессом формирования и эволюции наноструктур особенностей дозовых зависимостей концентрации парамагнитных центров.
2. Компьютерное моделирование процесса формирования и эволюции системы нанокристаллов в ионно-облученном «малыми» дозами кремнии с учетом вторичных процессов.
3. Исследование оптических свойств кремния, облученного «малыми» дозами ионов инертных газов, и уточнение модели фотолюминесценции аморфного слоя, содержащей нанокристаллы Si.
4. Разработка модели формирования светоизлучающих нанокристаллов кремния для «больших» доз ионного облучения.

### **Научная новизна работы**

1. Впервые установлена зависимость фотолюминесценции слоев аморфизованного кремния, содержащих нанокристаллические включения, при облучении ионами средних масс –  $Ar^+$  и  $Ne^+$  в области «малых» доз: от дозы, температуры отжига и температуры измерения.
2. Предложен и реализован модифицированный алгоритм компьютерного расчета процесса формирования слоев, состоящих из нанокристаллов Si в аморфной кремниевой матрице, с учетом вторичных процессов при ионном облучении.
3. Впервые установлена немонотонность дозовой зависимости концентрации ЭПР-центров, обусловленная формированием наносистемы  $\alpha$ -Si:nc-Si и коррелирующая с дозовой зависимостью фотолюминесценции в красной и ближней ИК-области спектра.
4. На основе исследования оптических свойств ионно-облученного кремния предложен уточненный механизм фотолюминесценции аморфизованного слоя, содержащего нанокристаллы кремния.
5. Предложена и обоснована количественными оценками «механическая» модель формирования нанокристаллов кремния при ионном облучении для доз, существенно превышающих дозу аморфизации.

### **Практическая ценность**

1. Разработанный алгоритм расчета формирования аморфизованных слоев с нанокристаллами кремния позволяет прогнозировать диапазон доз ионного облучения, в котором имеет место максимальная интенсивность фотолюминесценции, а также может быть использован для решения других задач, в которых применяется способ наноструктурирования путем частичной аморфизации полупроводников ионными пучками (полупроводниковые газовые датчики, каталитические системы и др.).
2. Показана возможность оптимизации люминесцентных свойств слоев аморфизованного кремния, содержащих нанокристаллические включения, путем вариации дозы имплантации Si.
3. Установленная связь между фотолюминесцентными, парамагнитными свойствами и наноструктурированием может быть использована как средство диагностики и мониторинга процесса формирования наноструктур при ионном облучении.
4. Подход к процессу наноструктурирования, предложенный для области «больших» доз, может быть использован не только в случае ионного облучения, но и при других способах обработки материалов, при которых формируются неоднородные в наномасштабе области, например, при импульсном лазерном (электронном) облучении структур с нанолитографическим рисунком или шероховатых поверхностей.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Экспериментально найденный немонотонный характер дозовой зависимости интенсивности фотолюминесценции Si и согласие с результатами расчетов эволюции структуры облученного слоя, выполненных с использованием предложенного в работе алгоритма, подтверждают, что фотолюминесценция при дозах, близких к дозе аморфизации, обусловлена процессом наноструктурирования.
2. Процесс наноструктурирования при дозах, близких к дозе аморфизации, является причиной немонотонной дозовой зависимости концентрации парамагнитных центров.
3. «Механическая» модель фрагментации кремния при «больших» дозах позволяет объяснить формирование нанокристаллов, с которыми связаны люминесцентные свойства.

### **Личный вклад автора**

Основные эксперименты и расчеты были спланированы автором совместно с научным руководителем. Самостоятельно выполнялись подготовка образцов, исследования ЭПР и люминесцентных свойств, обработка и анализ результатов, а также разработка и реализация алгоритма компьютерного расчета ионно-лучевого формирования слоев, состоящих из нанокристаллов Si в аморфной матрице. Ионная имплантация производилась вед. инж. НИФТИ В.К. Васильевым. В расчетах принимали участие Е.В.Волкова и Е.С.Коваленко. Экспериментальные данные, необходимые для разработки модели формирования нанокристаллов в области «больших» доз предоставлены д.ф.-м.н. А.А. Ежевским.

## **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы [А1-А26] и докладывались на следующих конференциях: V Международная конференция «Оптика, оптоэлектроника и технологии» (О<sup>2</sup>T5) (Ульяновск, 2003), V Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2003)» (Минск, Белоруссия, 2003), Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто – и наноэлектронике (С-Петербург, 2003, 2005), Десятая ежегодная международная научно-технической конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2004), Нижегородская сессия молодых ученых (Нижний Новгород, 2005, 2006, 2007), Всероссийское совещание «Нанофотоника-2004» (Н.Новгород, 2004), Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2004, 2005, 2007), IV Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (С. Петербург, 2004), MRS Spring Meeting 2004 (San-Francisco, CA, USA, 2004), European Microelectronics and Packaging Symposium EMPS-2004 (Prague, Czech Republic, 2004), Межрегиональная научная школа для студентов и аспирантов «Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение» (Саранск, 2004, 2005), Всероссийский семинар (Н.Новгород, 2004, 2006), 12-й Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Микроэлектроника и информатика - 2005" (Москва, Зеленоград, 2005), Международная научная конференция «Фундаментальные проблемы физики» (Казань, 2005), Международная научная конференция «Тонкие пленки и наноструктуры» (Москва, 2005), Всероссийская конференция инновационных проектов аспирантов и студентов «Индустрия наносистем и материалы» (Москва, Зеленоград, 2005),

Ряд докладов отмечен дипломами: диплом лауреата 12-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов "Микроэлектроника и информатика - 2005" (Москва, Зеленоград, 2005), диплом I-ой Всероссийской конференции «Физико-химические основы ионной имплантации» (Нижний Новгород, 2006).

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 22 работы, в том числе 4 статьи и 18 тезисов докладов. Список публикаций приведен в конце автореферата.

## **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 156 наименований. Объем диссертации составляет 116 страниц машинописного текста, включая 31 рисунок и 3 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дано обоснование выбора темы диссертационной работы и ее актуальность. Сформулированы цель работы, научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту. Указаны структура и объем диссертации. Содержатся сведения об апробации работы.

В **главе 1**, носящей обзорный характер, обсуждается проблема применения кремния в оптоэлектронных устройствах и рассмотрены различные пути ее решения на основе улучшения светоизлучающих свойств кремния, как непрямозонного полупроводника: усиление собственной и дефектной люминесценции массивного Si, синтез бинарных соединений и сплавов ( $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{SiGe}$ ), легирование редкоземельными элементами и наноструктурирование. Рассмотрены свойства аморфного кремния и перспективы его использования в качестве матрицы для формирования светоизлучающей системы, содержащей нанокристаллы кремния. Особое внимание уделено ионно-лучевому способу формирования такой системы. Предложенный в литературе компьютерный алгоритм формирования наноразмерной системы  $\alpha\text{-Si}/\text{nc-Si}$  хорошо описывает ситуацию только при облучении кремния тяжелыми ионами. Для легких ионов, где существенно влияние вторичных процессов, необходимо модифицирование алгоритма. Для этого нужно знать закономерности кинетики накопления дефектов и основные закономерности аморфизации, кратко изложенные в данной главе.

В заключение главы на основе анализа литературных данных формулируется постановка целей настоящей работы.

**Глава 2** посвящена экспериментальному исследованию закономерностей влияния условий ионного облучения на свойства системы  $\alpha\text{-Si}/\text{nc-Si}$  при дозах, близких к дозе аморфизации (область «малых» доз).

В *разделе 2.1.* описывается методика приготовления и исследования экспериментальных образцов. В качестве исходного материала использовались образцы Si (100) и Si (111) с удельным сопротивлением 0.1 Ом·см и 2000 Ом·см (высокоомный кремний применялся для исследований методом ЭПР). Пластины подвергались стандартной химико-механической обработке с последующим стравливанием нарушенного слоя (~ 20 мкм). Облучение проводилось ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 150 кэВ, дозами  $4 \cdot 10^{13}$  -  $5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, ионами  $\text{Ne}^+$  с энергией 150 кэВ, дозами  $5 \cdot 10^{14}$  -  $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и ионами  $\text{Ge}^+$  – с энергией 80 кэВ, дозами  $2 \cdot 10^{13}$  -  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Плотность ионного тока не превышала 3 мкА/см<sup>2</sup>. Образцы, предназначенные для исследования фотолюминесценции (ФЛ), после облучения отжигались при температуре  $T = 200, 250, 300$  и  $350^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Измерение ФЛ (с использованием спектроскопического комплекса КСВУ-23) проводилось при комнатной температуре и при температуре 77 К с возбуждением аргоновым лазером ( $\lambda = 488$  нм). При обработке спектров ФЛ для избавления от шумов использовались методы частотной фильтрации. Измерение ЭПР (на спектрометре ЭПА-2М) проводилось при температуре жидкого азота с использованием эталона  $\text{MgO:Mn}$ .

Для исследования спектров оптического пропускания аморфизованного ионным облучением кремния пленки Si толщиной ~ 1 мкм наносились с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии на подложки сапфира. Облучение проводилось ионами неона с энергией 100 кэВ, дозами  $1 \cdot 10^{14}$  –  $1 \cdot 10^{16}$ . Для уменьшения степени неоднородности дефектности по глубине в образцы дополнительно проводилась

имплантация ионов  $\text{Ne}^+$  с энергией 50 кэВ, причем доза второй имплантации подбиралась так, чтобы степень неоднородности концентрации вакансий (рассчитанной по программе TRIM) была минимальной.

Раздел 2.2 данной главы посвящен исследованию фотолуминесцентных свойств системы  $a\text{-Si}/nc\text{-Si}$ , полученной облучением ионами  $\text{Ar}^+$  и  $\text{Ne}^+$ . Как при облучении  $\text{Ar}^+$ , так и  $\text{Ne}^+$  наблюдалось два пика ФЛ (рис.1).

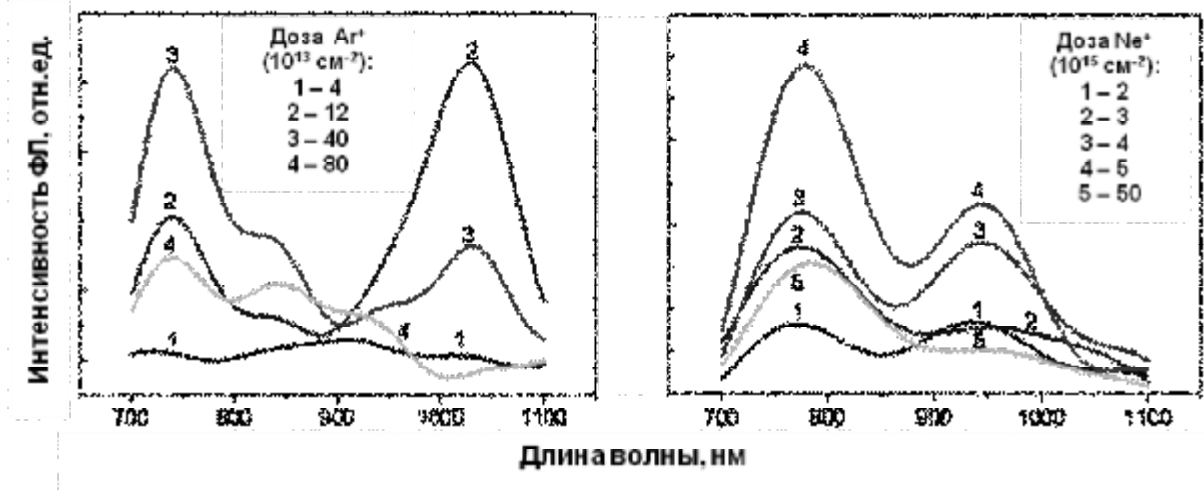


Рис.1. Спектры ФЛ образцов Si, облученных различными дозами ионов  $\text{Ar}^+$  и  $\text{Ne}^+$  и отожженных при  $300^\circ\text{C}$  (30 мин).

Один из них (при  $\sim 750$  нм) приписан нанокристаллам (НК), другой (при  $\sim 950\text{-}1000$  нм) – аморфной фазе. Основанием для этого является то, что:

- 1) положение пика при  $\sim 750$  нм практически совпадает с положением для НК Si, созданных другими методами [1, 2];
- 2) данный пик появляется при дозах, для которых ожидается формирование наноразмерной композиции  $a\text{-Si}/nc\text{-Si}$ , и ослабевает при дальнейшем увеличении дозы, когда согласно расчетам и данным ЭПР формируется сплошной аморфный слой (здесь не идет речь об области «больших» доз (см. ниже));
- 3) пик при  $\sim 950\text{-}1000$  нм появляется при дозах, близких к известной из литературы (и полученных в наших расчетах) дозе аморфизации.

Интенсивность ФЛ с дозой сначала возрастает, а затем падает, что связано с появлением (в переходной к аморфизации области доз), а затем (при полной аморфизации) исчезновением нанокристаллов Si в  $a\text{-Si}$ . Оптимальная температура отжига –  $300^\circ\text{C}$ . При ней достигается отжиг дефектов – центров безызлучательной рекомбинации и одновременно еще сохраняется структура системы, необходимая для соблюдения условий, при которых нанокристалл в матрице  $a\text{-Si}$  ведет себя (с точки зрения люминесцентных свойств) как квантовая точка.

Поскольку в литературе для  $a\text{-Si:H}$ , полученного путем осаждения, наблюдалось температурное гашение ФЛ [3], представляло интерес исследование ФЛ, кроме комнатной температуры, при температуре жидкого азота. Как видно из рис.2, возрастание интенсивности длинноволнового пика при  $T = 77$  К действительно имеет место. При 77 К пик в области  $\lambda = 750$  нм слабо выражен, т.е. имеет место изменение соотношения между интенсивностями двух пиков в пользу сигнала от  $a\text{-Si}$ .



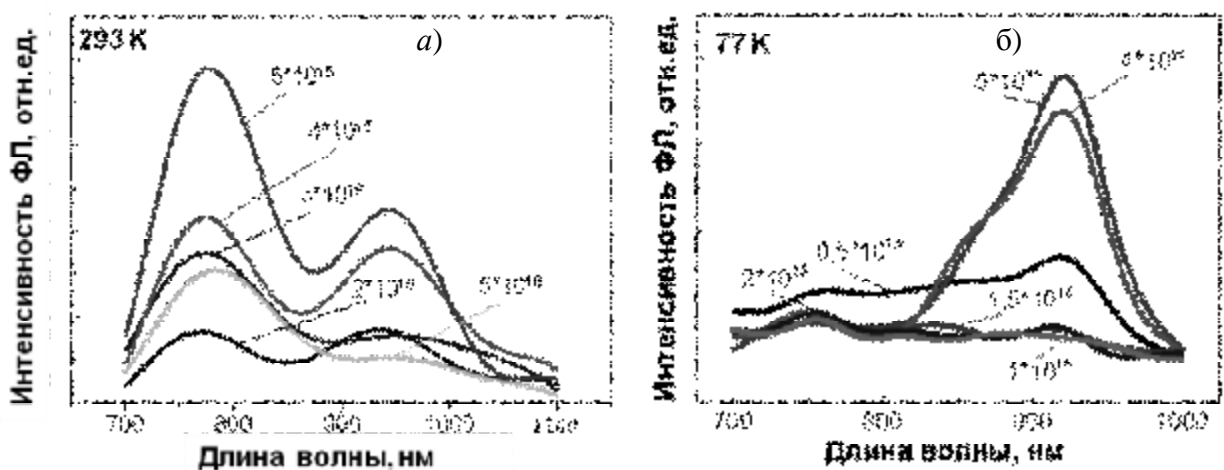


Рис.2. Спектры ФЛ образцов Si, облученных различными дозами ионов  $\text{Ne}^+$  и отожженных при  $300^\circ\text{C}$  (30 мин): измерение ФЛ – при 293К (а) и 77К (б).

В разделе 2.3 изучается влияние дозы на спектр ЭПР системы  $a\text{-Si}/nc\text{-Si}$ .

В литературе дозовые зависимости спектров ЭПР при ионном облучении обычно исследовались с довольно большим шагом по дозе [4], поэтому особенности, связанные с формированием системы  $a\text{-Si}/nc\text{-Si}$ , могли оказаться не замеченными. Мы исследовали дозовые зависимости спектров ЭПР при облучении Si ионами с меньшим шагом. На рис.3 приведены дозовые зависимости концентрации центров ЭПР с  $g$ -фактором 2.0055 при облучении Si ионами различных масс ( $\text{Ne}^+$ ,  $\text{Ar}^+$  и  $\text{Ge}^+$ ). Видно, что во всех трех случаях зависимости имеют экстремальный характер. Положения максимумов кривых на дозовых зависимостях близки к дозам аморфизации (ДА) [5, 6], так что экстремальное поведение характеризует область доз, непосредственно предшествующую формированию сплошного аморфного слоя. Такое поведение объясняется следующим образом. Аморфизация при ионном облучении не является единовременным актом, охватывающим сразу всю облученную область. Должна существовать некоторая переходная область доз, при которой структура облученного слоя представляет собой смесь аморфных и кристаллических областей. Это обстоятельство и лежит в основе впервые предложенного в НИФТИ ННГУ метода создания системы  $a\text{-Si}:nc\text{-Si}$  [7-11]. Аморфный

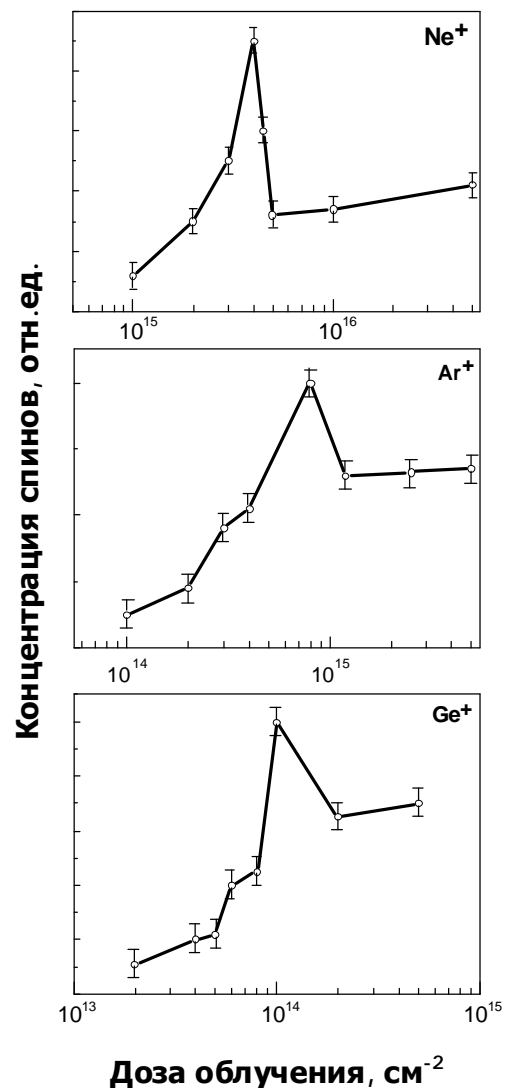


Рис.3. Дозовые зависимости концентрации ЭПР-центров с  $g = 2.0055$  образцов Si, облученных ионами  $\text{Ne}^+$ ,  $\text{Ar}^+$  и  $\text{Ge}^+$ .

кремний характеризуется несколько большими межатомными расстояниями (длинами связей) по сравнению с *c*-Si [3]. Поэтому на границах кристаллических и аморфных областей существуют механические напряжения, и следует ожидать наличия высокой концентрации оборванных связей на этих границах. С учетом предельной концентрации VV-центров в *a*-Si [4] можно показать, что в переходной к сплошной аморфизации области доз, когда в аморфной матрице существуют малые кристаллические включения, суммарная концентрация оборванных связей, дающих вклад в сигнал ЭПР с  $g = 2.0055$ , может быть выше, чем в области насыщения, т.е. при дозах, соответствующих существованию сплошного («однородного») аморфного слоя.

В разделе 3.4 описаны результаты исследования оптических свойств слоев *a*-Si/*nc*-Si и *a*-Si, полученных ионным облучением в области «малых» доз.

В соответствии с ранее предложенной моделью [8, 11], люминесцентные свойства ионно-облученного кремния в области доз, близких к дозе аморфизации, объяснялись формированием гетерогенной системы, представляющей собой включения нанокристаллов кремния в аморфную матрицу (в слой аморфизованного кремния). При этом предполагалось, что *a*-Si играет роль широкозонной матрицы, так что разрыв зон на границе *nc*-Si/*a*-Si достаточен для осуществления квантового конфайнмента. Для установления реальности этой модели важно знать зонную структуру матрицы. Информацию о зонной структуре может дать исследование оптических свойств облученного кремния. Хотя подобного рода исследования проводились и ранее [12], необходимо было изучить эти свойства именно для тех режимов имплантации, которые нами использовались при исследовании ФЛ.

Были сняты спектры пропускания эпитаксиальных слоев Si на сапфире, облученных ионами  $Ne^+$ , при дозах, несколько превышающих дозу аморфизации, а затем по зависимостям Тауца найдена оптическая ширина «запрещенной зоны» (оптическая щель) (рис.4). Величина оптической щели составила  $\Delta E_g = 1,34$  эВ до отжига

и  $\Delta E_g = 1,55$  эВ после отжига при  $300^\circ C$ . Эти величины недостаточны для того, чтобы обеспечить квантовый конфайнмент *nc*-Si в аморфной матрице за счет разрыва энергетических зон *a*-Si и *nc*-Si (энергия перехода для пика при  $\sim 750$  нм составляет  $E = 1,65$  эВ). Однако, в работе [13] было показано, что локализация (конфайнмент) носителей в НК Si, погруженном в матрицу *a*-Si, может иметь место за счет другого механизма – разупорядоченной структуры аморфной фазы (переход от периодического к хаотическому потенциалу для носителей заряда).

На рис.5 (а и б) представлены две возможные схемы ФЛ в нашей системе. Излучение НК Si в обеих схемах происходит вследствие перехода электрона с

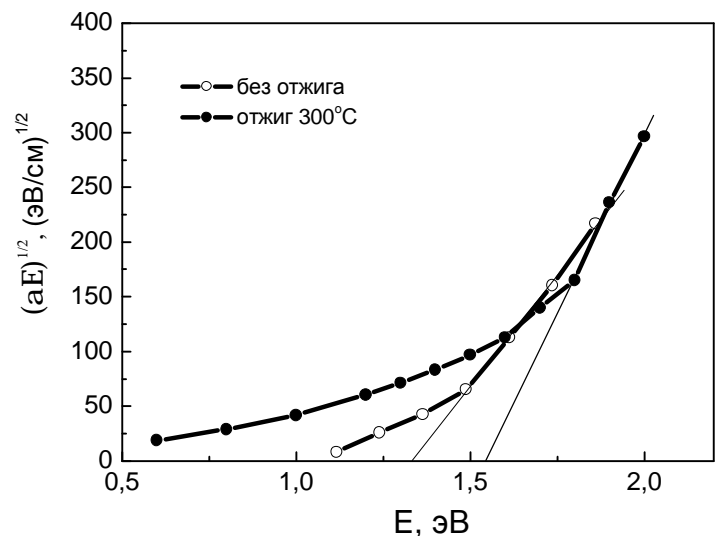


Рис.4. Зависимость Тауца пленки Si на сапфире, облученной ионами  $Ne^+$  (доза  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ).  $\alpha$  – коэффициент пропускания; E – энергия кванта.

первого уровня в зоне проводимости НК на уровень в валентной зоне. Излучение же *a*-Si может происходить за счет одного из двух альтернативных процессов. В первой схеме имеет место возбуждение носителей в *a*-Si на один из высележащих уровней в *s*-зоне с безызлучательным переходом на дно «зоны проводимости» и последующим излучательным переходом на уровни, расположенные в хвосте плотности состояний валентной зоны (а).

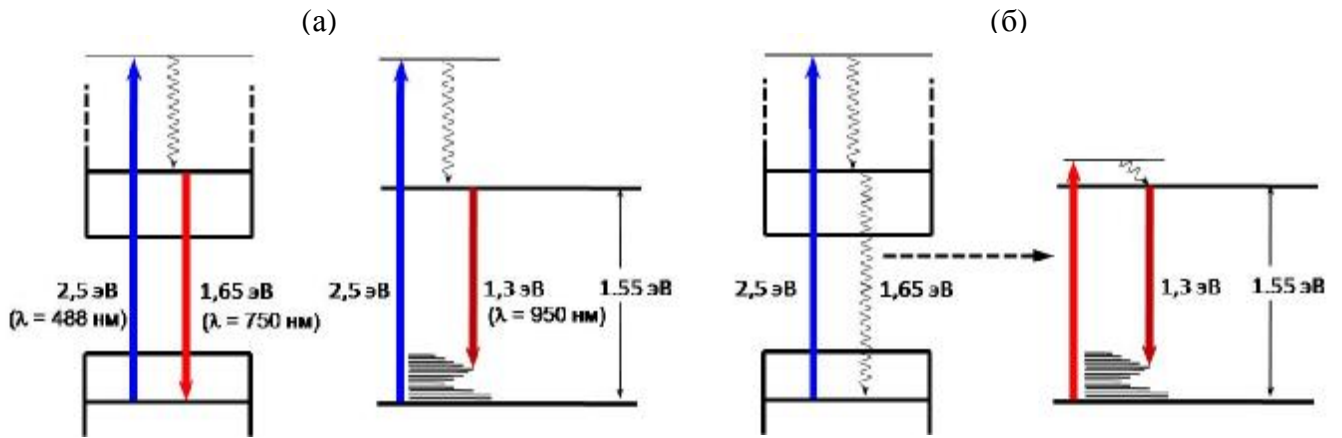


Рис.5. Возможные каналы ФЛ в системе *a*-Si/nc-Si:  
а) независимое возбуждение; б) сенсбилизация ФЛ *a*-Si НК Si.

Во второй схеме (б) осуществляется сенсбилизация *a*-Si нанокристаллами Si: энергия основного перехода в НК (1.65 эВ) не излучается, а передается матрице Si с последующим излучательным переходом того же типа, что и в первой схеме. Так как вероятности указанных переходов для НК и *a*-Si в общем случае не одинаково зависят от температуры, этим объясняется разное соотношение между интенсивностями пиков, связанных с nc-Si и *a*-Si, при комнатной температуре и температуре жидкого азота (см. рис.2). В пользу второй схемы ФЛ свидетельствует то, что с ростом дозы (когда исчезают НК Si и формируется сплошной слой) интенсивность ФЛ при 950-1000 нм (относящейся к аморфной фазе) тоже падает. Более детальное изучение этого вопроса требует квантово-механического расчета матрицы переходов, что не входило в нашу задачу (строгая теория люминесценции системы *a*-Si:nc-Si вообще еще не разработана).

**Глава 3** посвящена моделированию процесса формирования и эволюции наноструктуры Si при ионном облучении.

Упрощенная модель формирования нанокристаллических включений при облучении Si (глава 1) достаточно адекватно описывает ситуацию для случая тяжелых ионов. При этом каскады смещенных атомов являются плотными, и в первом приближении можно не учитывать ни распределение дефектов внутри каскадов, ни вторичные процессы. Поскольку ионы средних и малых масс создают более разветвленную структуру каскадов смещенных атомов, для этого случая предложенная ранее модель не применима. Нами разработана уточненная модель наноструктурирования с учетом детальной структуры каскадов смещения и влияния вторичных процессов.

В основу алгоритма положен метод статистических испытаний (Монте-Карло). Модельный слой (с площадью  $200 \times 200 \text{ нм}^2$ ) делился на ячейки ( $2 \times 2 \times 2 \text{ нм}^3$ ). По заданной плотности ионного тока рассчитывается среднее время между двумя актами падения иона на площадку, и методом Монте-Карло разыгрываются: момент времени очередного падения иона, координаты (x, y) точки падения. Координаты вакансий (x, y, z), генерированных в каскадах смещений, определяются по программе TRIM, сортируются по номерам ячеек, затем для каждой ячейки определяется количество вакансий, оставшихся к моменту следующего акта падения. Вторичные процессы («динамический» отжиг) учитывались в соответствии с моделью [14], а именно, предполагалось, что в промежутках времени между падениями очередного иона происходят:

1) захват вакансий ненасыщающимися ловушками, концентрация которых ( $N_t$ ) есть заданная величина;

2) объединение вакансий в дивакансии.

При этом учтено, что при реальных плотностях ионного тока характерные длительности вторичных процессов весьма велики по сравнению с характерными временами «горячей» стадии каскада.

Изменения концентраций вакансий ( $N_1$ ) и дивакансий ( $N_2$ ) в промежутках между падениями ионов описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= k_t N_t N_1 - k_1 N_1^2 \\ \frac{dN_2}{dt} &= k_1 N_1^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $k_t$  и  $k_1$  – кинетические коэффициенты. В данном алгоритме не учтена возможность образования более сложных, чем дивакансии, дефектов, а также в явном виде не приняты во внимание междоузельные атомы и их комплексы. Неявно междоузельные атомы учитываются тем, что захват вакансий ненасыщающимися ловушками математически эквивалентен *непрямой* рекомбинации с междоузельными атомами, согласно [15] доминирующей в случае облучения кремния. Параметры для конкретных расчетов были заимствованы из [14].

Уравнения (1) имеют следующие решения:

$$\left\{ \begin{aligned} N_1(t) &= \frac{k_t N_t}{\left( \frac{k_t N_t + k_1 N_1(0)}{N_1(0)} \right) \cdot e^{k_t N_t t} - k_1}; \\ N_2(t) &= N_2(0) + \frac{k_t N_t}{2 \left( \left( \frac{k_t N_t + k_1 N_1(0)}{N_1(0)} \right) - k_1 \right)} - \frac{N_1}{2} + \frac{k_t N_t}{2k_1} \ln \left( \frac{\left( \frac{k_t N_t + k_1 N_1(0)}{N_1(0)} \right) - k_1}{k_t N_t} \cdot N_1 \cdot e^{k_t N_t t} \right) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где  $N_1(0)$  и  $N_2(0)$  – концентрации вакансий и дивакансий в каждой ячейке перед падением очередного иона, соответственно.

Вакансии, внесенные каждым новым ионом, реагируют между собой и с ловушками, а также с вакансиями, накопленными до этого времени. Таким путем определяется полное количество вакансий и дивакансий в каждой ячейке при любой

дозе ионов. После того, как суммарная концентрация вакансий в ячейке – свободных и связанных в дивакансии становится равной заданной пороговой величине (принятой равной 10 ат. % [16]), ячейка считается «аморфизованной», и слежение за ней прекращается. Таким путем рассчитываются, как функции дозы, доля аморфной фазы, средние размеры еще не аморфизованных участков и количество (на  $1 \text{ см}^2$ ) таких участков, имеющих размеры, меньшие определенного значения. Эволюция структуры кремния при облучении ионами  $\text{Ne}^+$  (150 кэВ) на глубине  $R_p$  в разрезе представлена на рис.6.

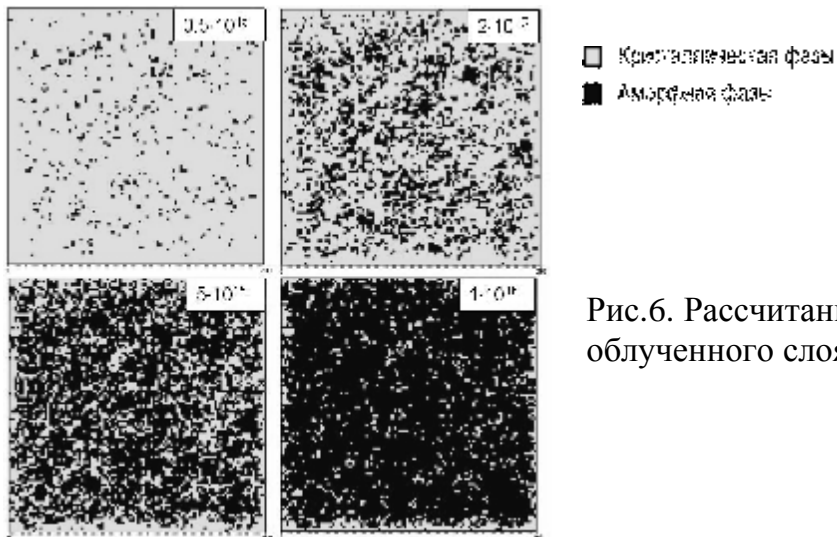


Рис.6. Рассчитанная эволюция структуры облученного слоя кремния ионами  $\text{Ne}^+$  (150 кэВ).

Как видно, с ростом дозы доля аморфной фазы увеличивается, аморфные участки сливаются и в некотором интервале доз внутри сплошного аморфного слоя остаются кристаллические включения нанометрового размера, которые и играют роль нанокристаллов кремния.

На рис.7 приведены кривые накопления аморфной фазы в зависимости от дозы и плотности ионного тока для ионов  $\text{Ar}^+$  (150 кэВ) на глубине  $R_p$ .

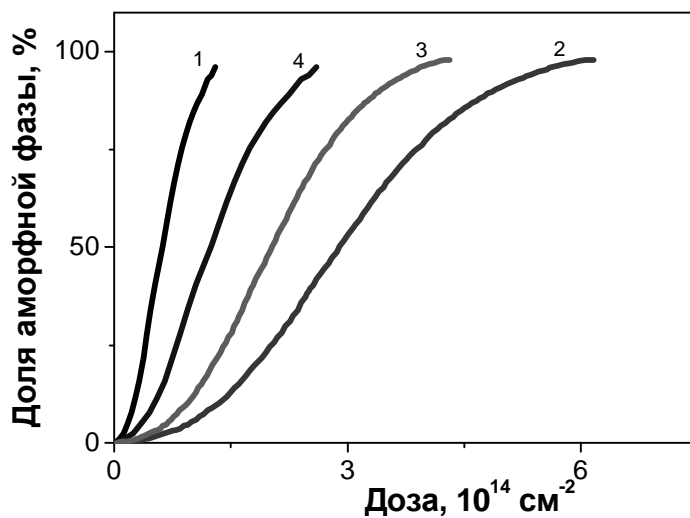


Рис.7. Расчетная зависимость доли аморфной фазы на глубине  $R_p$  от дозы при облучении Si ионами  $\text{Ar}^+$  (150 кэВ) без учета вторичных процессов (кривая 1) и с их учетом при различных плотностях ионного тока: кривая 2 –  $3 \text{ мкА/см}^2$ , кривая 3 –  $30 \text{ мкА/см}^2$ , кривая 4 –  $100 \text{ мкА/см}^2$ .

Там же приведена зависимость, рассчитанная без учета вторичных процессов («динамического» отжига). С ростом плотности ионного тока  $j$  кривые к ней приближаются. Это связано с тем, что с ростом  $j$  повышается мгновенная

концентрация вакансий и, следовательно, увеличивается (квадратично по концентрации) темп их связывания в дивакансии, а относительные потери вакансий на захват ловушками (этот процесс линеен по концентрации) уменьшаются.

На рис.8 приведена зависимость числа кристаллических областей с размерами  $d < 4$  нм (НК) в слое на глубине  $R_p$  от дозы ионов  $Ar^+$  (150 кэВ), а на рис.9 – экспериментальная дозовая зависимость интенсивности ФЛ для пика в районе 750 нм.

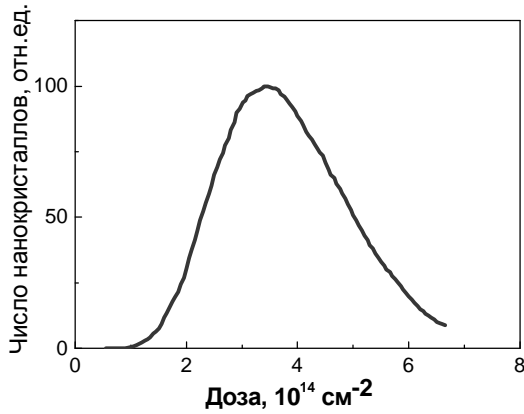


Рис.8. Рассчитанная дозовая зависимость числа НК с размерами  $d < 4$  нм для  $Ar^+$  (150 кэВ,  $j \sim 3 \text{ мкА/см}^2$ ).

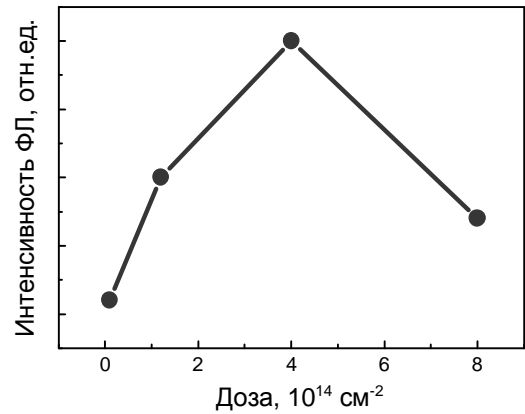


Рис.9. Дозовая зависимость интенсивности ФЛ для пика в районе 750 нм ( $j \sim 3 \text{ мкА/см}^2$ ).

Видно удовлетворительно согласие расчетных и экспериментальных данных: максимальная ФЛ наблюдается приблизительно при тех же дозах, при которых согласно расчетам, число нанокристаллов максимально, что свидетельствует об адекватности нашего алгоритма и согласуется с предположением, что пик ФЛ при  $\sim 750$  нм обусловлен НК Si. Конечно, граница размеров (4 нм), при которых НК ведет себя, как квантовая точка, несколько условна и выбрана по аналогии с системой  $SiO_2:nc-Si$  [1, 2]. Кроме того, следует учесть, что, в силу неоднородности распределения дефектов, кинетика накопления НК по дозе зависит от глубины; но слой вблизи  $R_p$  вносит наибольший вклад.

**В главе 4** предложена и обоснована механическая модель формирования нанокристаллов кремния (фрагментации) при ионном облучении дозами, существенно превышающими дозу аморфизации («большие» дозы).

В работах [17, 18] было установлено, что похожими на приведенные выше для «малых» доз люминесцентными свойствами обладает Si, облученный ионами инертного газа ( $Ne^+$ ) при дозах, существенно (на порядок величины) превосходящих дозу аморфизации. В качестве примера спектр ФЛ для такой высокой дозы после травления в HF при различных выдержках на воздухе показан на рис.10 [17].

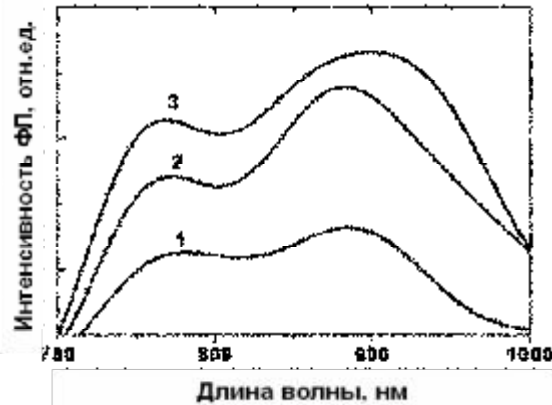


Рис.10. Спектры ФЛ образца Si, облученного  $\text{Ne}^+$  (40 кэВ) с дозой  $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и протравленного в HF в течение 12 мин. 1 – сразу после травления, 2 – после 50 минут выдержки на воздухе, 3 – после 7 дней выдержки на воздухе [17].

Характерной особенностью ФЛ в этом диапазоне доз является то, что она наблюдается не только от слоя с толщиной  $R_p + \Delta R_p$ , но и от более глубоких слоев. Это свидетельствует о том, что если ФЛ обусловлена НК Si (а об этом говорит сходство спектров при «малых» и «больших» дозах), то они залегают не только в пределах глубин до  $R_p + \Delta R_p$ , но и гораздо глубже. В пользу того, что формирование НК на таких глубинах может быть связано с глубоко проникающими дефектами, говорят данные ЭПР и электронографии, полученные при послойном травлении облученного Si. Они свидетельствуют о наличии глубоких слоев с нанокристаллической и мозаичной структурой (кольца и точечные рефлексы, соответственно). Области «больших» доз, при которых наблюдалась ФЛ, характеризовались наличием блистеров и пузырьков [18]. Эти закономерности связывались [18] с образованием НК в Si при облучении «большими» дозами, но образование НК при этом не находило адекватного объяснения.

Для объяснения формирования НК под аморфным слоем используем модель, ранее нами развитую применительно к процессу аморфизации («механическая модель аморфизации») [А.1]. Применительно к нашему случаю суть модели состоит в следующем: дефекты, проникающие на большие глубины из облученного слоя, за счет флуктуаций плотности создают неоднородное волновое поле упругих напряжений, которое при превышении некоторого предела по амплитуде вызывает повороты блоков, т.е. фрагментацию монокристалла. В отличие от аморфизации, размеры блоков в этом случае крупнее. Расчеты, выполненные в предположении, что собственные междоузельные атомы, вытесненные из объемов, сформированных при «больших» дозах блистеров и пузырьков, проникают в слой, лежащий под аморфным, приводят к выводу, что возникающие *статические* напряжения еще недостаточны для фрагментации путем поворотов кристаллических блоков. Однако в *динамическом* случае (когда учитываются акустические волны, генерируемые при реакциях между дефектами [19]) расчет показывает, что значения глубины, на которой может наблюдаться фрагментация, приводящая к наноструктурированию, достигают десятых долей мкм или 1 мкм.

Необходимая для квантового конфайнмента изоляция блоков друг от друга и/или от матрицы кремния может быть осуществлена формированием тонких оболочек  $\text{SiO}_x$  за счет кислорода, «вбиваемого» ионами и/или проникающего по

дефектам на требуемые глубины, с последующей сегрегацией на интерфейсах блоков. В пользу этого свидетельствуют данные, приведенные на рис.10: интенсивность ФЛ возрастает при выдержке образца на воздухе в течение нескольких суток. Это может быть связано с усилением конфайнмента НК (блоков) вследствие диффузии кислорода из атмосферы и дополнительного окисления интерфейсов. «Рыхлая» структура слоя с блистерами облегчает диффузию, а наличие высокой концентрации дефектов по границам блоков повышает их реакционную способность и облегчает процесс окисления, происходящий при комнатной температуре.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Предложен и реализован алгоритм компьютерного расчета процесса ионно-лучевого формирования композитных слоев, состоящих из нанокристаллов Si в аморфной матрице ( $a\text{-Si:nc-Si}$ ), учитывающий вторичные процессы при ионном облучении, в области доз, близких к дозе аморфизации (области «малых» доз).
2. Экспериментально полученный при ионном облучении  $\text{Ne}^+$  и  $\text{Ar}^+$  характер дозовой зависимости ФЛ в области «малых» доз совпадает с характером изменения концентрации нанокристаллов, установленным путем компьютерного расчета процесса формирования и эволюции наносистемы.
3. Впервые установлен немонотонный характер дозовой зависимости концентрации парамагнитных центров, обусловленный формированием наносистемы  $a\text{-Si:nc-Si}$ .
4. Путем исследования оптических свойств аморфизованного ионным облучением Si показано, что его эффективная ширина запрещенной зоны недостаточна для осуществления обычного квантового конфайнмента, обусловленного разрывом энергетических зон нанокристаллов и  $a\text{-Si}$ . Квантовый конфайнмент в системе  $a\text{-Si:nc-Si}$  обусловлен флуктуациями потенциала в аморфной матрице, окружающей нанокристаллы.
5. При «больших» дозах облучения Si люминесцирующие нанокристаллы могут формироваться вследствие фрагментации глубоких слоев монокристалла силами, связанными с акустическими волнами, испускаемыми дефектами.
6. Предложено две альтернативные схемы фотолюминесценции в системе  $a\text{-Si:nc-Si}$ : в первой схеме возбуждение происходит независимо в каждой из компонентов системы, а во второй – излучение  $a\text{-Si}$  происходит за счет сенсбилизации возбужденными нанокристаллами Si.

#### Список цитируемой литературы

1. Особенности фотолюминесценции в  $\text{SiO}_2$  с нановключениями кремния, полученными методом ионной имплантации / Д.И. Тетельбаум, И.А. Карпович, М.В. Степихова, В.Г. Шенгуров, К.А. Марков, О.Н. Горшков // Поверхность. – 1998. – №5. – С.31-33.
2. Формирование кремниевых нанокристаллов в слоях  $\text{SiO}_2$  при имплантации ионов Si с промежуточными отжигами / Г.А. Качурин, В.А. Володин, Д.И. Тетельбаум, Д.В. Марин, А.Ф. Лейер, А.К. Гутаковский, А.Г. Черков, А.Н. Михайлов // ФТП. – 2005. – Т.39, №5. – С.582-586.
3. Аморфные полупроводники. Под редакцией М. Бродски. Перевод с англ. – М.: Мир, 1982. – 419 с.



4. Физические процессы в облученных полупроводниках. Под редакцией Л.С. Смирнова – Новосибирск: Наука, 1977. – 256 с.
5. Зорин, Е.И. Ионное легирование полупроводников / Е.И. Зорин, П.В. Павлов, Д.И. Тетельбаум. – М.: Энергия, 1975.
6. Риссел, Х. Ионная имплантация / Х.Риссел, И. Руге. – М.: Наука, 1983. – 304 с.
7. The room temperature photoluminescence of Si nanocrystals in a-Si matrix composite system produced by the irradiation of silicon with ions of high and medium masses / D.I. Tetelbaum, A.A. Ezhevskii, S.A. Trushin, A.N. Mikhaylov, A.Yu. Azov, A.K. Mukhamatullin, S.E. Akis, D.M. Gaponova // *Material Science and Engineering B*. – 2003. – V.101(1-3). – P.279-282.
8. Формирование аморфно-кристаллических нанокпозиций кремния путем облучения тяжелыми ионами / Тетельбаум Д.И., Шенгуров В.Г., Шенгуров Д.В., Питиримова Е.А., Питиримов А.В. // *Поверхность*. 1998. – №5. – С.34-37.
9. Тетельбаум, Д.И. Компьютерное моделирование формирования аморфно-кристаллической двухфазной наносистемы при ионном облучении кремния / Д.И. Тетельбаум, С.А. Трушин, А.В. Питиримов // *Известия РАН. Сер. физ.* – 2000. Т.64(11). – С.2168-2169.
10. Электронно-микроскопическая диагностика аморфно-кристаллических наносистем, полученных путем бомбардировки кремния ионами  $Kr^+$  / А.В. Питиримов, Е.А. Питиримова, Д.И. Тетельбаум, В.Г. Шенгуров, А.Ф. Хохлов // *Поверхность*. – 1999. – №. 5-6. – С.11-13.
11. Luminescence of silicon nanostructured by irradiation with heavy ions / D.I. Tetelbaum, S.A. Trushin, Z.F. Krasil'nik, D.M. Gaponova, A.N. Mikhaylov // *Optical Materials*. – 2001. – V.17(1-2). – P.57-59.
12. Optical-absorption studies of ion-implantation damage in Si on sapphire / U. Zammit et.al. // *Phys. Rev. B*. – 1994. – V.49(20). – P.14322-14330.
13. Electron confinement in nanocrystals embedded in random media: Anderson localization effects / V.A.Burdov, M.F.Cerqueira, A.M.Satanin, M.I.Vasilevskiy // *AIP Conference Proceedings: 28<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors*. – 2007. – V.2. – P.332-334.
14. Морозов, Н.П. Закономерности накопления дефектов при облучении полупроводников легкими ионами / Морозов Н.П., Тетельбаум Д.И. // *ФТП*. – 1980. – Т.14(5). – С.934-938.
15. Непрямая рекомбинация вакансий и междоузельных атомов в облученном кремнии / Г.А. Хлодарь и др. // *ФТП*. – 1976. – Т.10(9). – С.17212-1718.
16. Gibbons, J.F. Ion implantation in semiconductors. Part 2: Damage production and annealing / Gibbons J.F. // *Proc.IEEE*. – 1972. – №9. – P.1062-1096.
17. Ежевский, А.А. Фотолуминесценция нанокристаллического кремния, полученного методом имплантации ионов инертных газов / Ежевский А.А., Лебедев М.Ю., Морозов С.В. // *ФТТ*. – 2005. – Т.47(1). – С.22-25.
18. Атомно-силовая микроскопия кремния, модифицированного ионной бомбардировкой. / А.А. Ежевский, А.Ф. Хохлов, Г.А. Максимов, Д.О. Филатов, М.Ю. Лебедев. *Вестник Нижегородского Университета*. – 2000. – В.1(3). – С. 221-229.
19. Влияние упругих волн, возникающих при ионной бомбардировке, на структурное совершенство полупроводниковых кристаллов / П. В. Павлов, Ю. А. Семин, В. Д. Скупов, Д. И. Тетельбаум // *ФТП*. – 1986. – Т.20(3). – С.503-507.

### **Основные публикации по теме диссертации**

- A.1. Тетельбаум, Д.И. Механическая модель аморфизации при ионном облучении / Д.И. Тетельбаум, Ю.А. Менделева // ФТТ. – 2004. – Т.46. – В.11. – С.1960-1963.
- A.2. Two mechanisms of nanocrystals formation under ion irradiation of silicon / A.A. Ezhevskii, D.I. Tetelbaum, Yu.A. Mendeleva, D.V. Guseinov, E.V. Kiseleva // Nucl. Instr. Meth. B. – 2007. – Vol.257. – P.68-70.
- A.3. Ионно-лучевое наноструктурирование кремния – новый метод создания светоизлучающих слоев. / А.А. Ежевский, Д.И. Тетельбаум, А.Н. Михайлов, М.Ю. Лебедев, Ю.А. Менделева, С.В. Морозов, Д.В. Гусейнов // Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Технология материалов и компонентов электронной техники. – 2004. – Т.7. – С.17-27.
- A.4. Менделева, Ю.А. Влияние температуры отжига на фотолюминесценцию и ЭПР ионно-облученного кремния. / Ю.А. Менделева // Материалы Всероссийской конференции инновационных проектов аспирантов и студентов «Индустрия наносистем и материалы» (Москва, Зеленоград, 16-17 ноября 2005 г.) – С.117-121.
- A.5. Влияние интерфейсов на оптические и люминесцентные свойства наноструктур на основе кремния / Е.С. Демидов, Д.И. Тетельбаум, О.Н. Горшков, А.Н. Михайлов, Ю.А. Менделева, С.В. Морозов, Д.М. Гапонова // Тезисы V Международной конференции «Оптика, оптоэлектроника и технологии» (O<sup>2</sup>T5) (Ульяновск, 23-27 июня 2003 г.). – 2003. – С.200-201.
- A.6. О природе спектров фотолюминесценции в кремниевых наноструктурах, полученных ионным облучением / Д.И. Тетельбаум, А.Н. Михайлов, Ю.А. Менделева, Е.А. Петриченко, С.В. Морозов // Тезисы V Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2003)» (Минск, Белоруссия, 6-9 октября 2003 г.). – 2003. – С.306-307.
- A.7. Менделева, Ю.А. Влияние дозы и температуры отжига на свойства наноструктурированных ионным облучением слоев / Ю.А. Менделева, Д.И. Тетельбаум // Пятая Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто – и наноэлектронике (С-Петербург, Россия 1 – 5 декабря 2003 г.). – 2003. – С.45.
- A.8. Оптимизация люминесцентных свойств кремния, облученного ионами средних энергий / Д.И. Тетельбаум, Ю.А. Менделева, А.Н. Михайлов, А.А. Ежевский, М.Ю. Лебедев // Тезисы докладов Десятой ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, Россия, 2-3 марта 2004 г.). – 2004. – Т.1. – С.237-238.
- A.9. About the Luminescence Mechanisms of Composite a-Si:nc-Si System Obtained by Ion-Beam Amorphization in the Wide Dose Region / D.I. Tetelbaum, A.A. Ezhevskii, A.N. Mikhaylov, M.Yu. Lebedev, Yu.A. Mendeleva, R.G. Ershov, S.V. Morozov // Proceedings of MRS Spring Meeting (San-Francisco, CA, USA April 12-16 2003). – 2004. – V.808. – A4.36.
- A.10. Ионно-лучевой синтез и свойства нанокристаллов кремния в различных матрицах (a-Si, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) / Д.И. Тетельбаум, О.Н. Горшков, А.Н. Михайлов, Ю.А. Менделева, А.И. Белов, С.В. Морозов // Труды Всероссийского совещания «Нанопотоника-2004» (Н. Новгород, ИФМ РАН, 2-6 мая 2004 г.). – 2004. – С.291.
- A.11. Моделирование методом Монте-Карло формирования аморфно-нанокристаллических слоев в кремнии при ионном облучении / А.Н. Михайлов, Ю.А. Менделева, Р.Г. Ершов, Д.И. Тетельбаум // Тезисы докладов 34-й Международной

конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, Россия, 31 мая-2 июня 2004 г.). – 2004. – С.73.

А.12. Влияние условий ионного облучения и отжига на фотolumинесцентные свойства ионно-синтезированных аморфно-кристаллических слоев кремния / Ю.А. Менделева, А.Н. Михайлов, Д.И. Тетельбаум, С.А. Трушин // Тезисы докладов IV Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (С. Петербург, Россия, 5-8 июля 2004 г.). – 2004. – С.140.

А.13. Amorphization by ion beam – a new way for development of silicon nanostructures luminescent at room temperature / D.I. Tetelbaum, A.A. Ezhevskii, A.N. Mikhaylov, M.Yu. Lebedev, Yu.A. Mendeleva, R.G. Ershov, S.V. Morozov // Proceedings of European Microelectronics and Packaging Symposium EMPS-2004 (Prague, Czech Republic, 16-18 June 2004). – 2004. –P.535-545.

А.14. Влияние условий ионной имплантации и отжига на фотolumинесценцию системы  $a$ -Si/nc-Si / Ю.А. Менделева, А.Н. Михайлов, Д.И. Тетельбаум, С.В. Оболенский // Тезисы докладов VII Всероссийского семинара "Физические и физико-химические основы ионной имплантации" (Нижний Новгород, Россия, 26-29 октября 2004 г.). – 2004. – С.41-42.

А.15. Исследование процессов формирования и свойств кремниевых наноструктур, полученных ионно-лучевым методом / А.Н. Михайлов, Ю.А. Менделева, А.И. Белов // Тезисы докладов 12-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов "Микроэлектроника и информатика - 2005" (Москва, Зеленоград, 19-21 апреля 2005 г.). – 2005. – С.34-35.

А.16. Некоторые закономерности фотolumинесценции ионно-облученного (наноструктурированного) кремния / Д.И. Тетельбаум, А.А. Ежевский, Ю.А. Менделева, Д.В. Гусейнов, И.В. Зайцева, Д.М. Гапонова // Тезисы докладов 35-ой Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, Россия, 30 мая – 1 июня 2005 г.). – 2005. – С.157.

А.17. Моделирование процесса формирования аморфно-кристаллических слоев в кремнии при ионном облучении / Ю.А. Менделева, Д.И. Тетельбаум, С.В. Оболенский, И.В. Зайцева // Тезисы 3-й Международной научной конференции «Фундаментальные проблемы физики» (Казань, Россия, 13-18 июня 2005 г.). – 2005. – С.154.

А.18. Фотolumинесцентные свойства кремниевых наноструктур, полученных ионной бомбардировкой / Д.В. Гусейнов, М.Ю. Лебедев, Ю.А. Менделева, А.А. Ежевский, Д.И. Тетельбаум // Материалы Международной научной конференции «Тонкие пленки и наноструктуры» (Москва, Россия, 22-26 ноября 2005 г.). – 2005. – Часть 1. – С.197-200.

А.19. Менделева, Ю.А. Свойства ионно-синтезированных аморфно-кристаллических слоев кремния / Менделева Ю.А., Тетельбаум Д.И. // Труды четвертой межрегиональной молодежной научной школы "Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение" (Саранск, Россия, 5-7 октября 2005 г.). – 2005. –С.81.

А.20. Менделева, Ю.А. О формировании и трансформации светоизлучающего наноструктурированного слоя в кремнии при ионном облучении / Менделева Ю.А., Тетельбаум Д.И. // Труды Седьмой всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектроники (Санкт-Петербург, Россия, 5-9 декабря 2005 г.). – 2005. – С.61.

А.21. Эволюция структуры кремния при получении светоизлучающих слоев путем ионного облучения / Ю.А. Менделева, Е.В. Киселева, Е.С. Коваленко, Д.В. Гусейнов, А.А. Ежевский, Д.И. Тетельбаум // Тезисы докладов I Всероссийской конференции "Физические и физико-химические основы ионной имплантации" (Нижний Новгород, Россия, 24-27 октября 2006 г.). – 2006. – С.42-43.

А.22. Оптические свойства кремния, наноструктурированного ионным облучением / Ю.А. Менделева, А.Ю. Дудин, А.И. Белов, Е.В. Волкова, В.Г. Шенгуров, Д.И. Тетельбаум // Тезисы докладов 37-ой Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, Россия, 28 мая – 30 мая 2007 г.). – 2007. – С.117.