

На правах рукописи

Лобанов Дмитрий Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ РОСТА И  
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ Ge(Si) САМОФОРМИРУЮЩИХСЯ  
ОСТРОВКОВ, ВЫРАЩЕННЫХ НА Si(001) ПОДЛОЖКАХ И  
НАПРЯЖЁННЫХ Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> СЛОЯХ**

01.04.07- физика конденсированного состояния

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2006

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
А.В.Новиков

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Г.Э.Цырлин

доктор физико-математических наук,  
профессор И.А.Карпович

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н.Лебедева,  
г.Москва

Защита состоится 13 апреля 2006 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 в Институте физики микроструктур РАН (603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан \_13\_ марта 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических  
наук, профессор

К.П.Гайкович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследований

В настоящее время активно развивается физика низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур. Интерес к подобным исследованиям связан как с изучением фундаментальных физических явлений, проявляющихся в низкоразмерных системах, так и с возможностью применения таких структур в полупроводниковых приборах. Несмотря на то, что наибольшие успехи в области практического использования гетероструктур к настоящему времени достигнуты для полупроводников группы  $A_3B_5$  [1], значительный интерес, как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения представляют исследования низкоразмерных гетероструктур на основе кремния.

Германий является наиболее интересной гетеропарой для кремния, позволяя получать эпитаксиальные гетероструктуры на кремневых подложках в широком диапазоне состава и толщин слоев твердого раствора SiGe. В настоящее время ведутся активные исследования особенностей роста и свойств SiGe/Si(001) гетероструктур с квантовыми ямами и квантовыми точками (см. например [2]). Данная диссертация посвящена изучению особенностей формирования и фотолюминесценции одного из типов низкоразмерных систем на Si подложках – Ge(Si) самоформирующимся островкам. Актуальность исследования Ge/Si структур связана с выявлением на примере данной гетеропары общих для напряженных полупроводниковых гетероструктур механизмов зарождения и роста самоформирующихся нанообъектов.

Электрические и оптические свойства полупроводниковых гетероструктур с самоформирующимися Ge(Si) наноостровками зависят от энергетического спектра носителей заряда в островках. Последний существенно зависит от таких параметров островков как их размеры, состав, форма и упругие напряжения. В связи с этим, важно уметь получать структуры с самоформирующимися островками, имеющими определённые параметры. К моменту начала работ над диссертацией процессы зарождения и роста Ge(Si) самоформирующихся островков на Si(001) подложках были достаточно подробно исследованы. Для структур без верхнего покровного слоя была получена экспериментальная зависимость состава Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков от температуры роста [3, 4]. В то же время имелись лишь единичные исследования параметров Ge(Si) островков с покровным слоем в одно и многослойных структурах.

Наряду с исследованием особенностей роста Ge(Si) самоформирующихся островков важным является установление однозначной связи между

параметрами (размерами, составом, формой и упругими напряжениями) островков и энергией оптических переходов в них. К моменту начала работы над диссертацией такая однозначная количественная связь не была установлена. Хотя в литературе имелись отдельные сообщения о наблюдении сигнала электро- и фотолюминесценции (ФЛ) в структурах с Ge(Si) островками вплоть до комнатной температуры [5], не были определены условия получения Ge/Si структур для повышения интенсивности сигнала люминесценции от островков при комнатной температуре. Существовали противоречивые объяснения различий в спектрах ФЛ одно- и многослойных структур с Ge(Si) островками. В литературе отсутствовали однозначные результаты по исследованию особенностей фотолюминесценции Ge(Si) островков, имеющих различную форму.

Одной из трудностей интерпретации результатов исследований ФЛ структур с Ge(Si)/Si(001) самоформирующимися островками является ФЛ от дефектов кристаллической решетки в Si, которая наблюдается в той же области длин волн ( $\geq 1,3$  мкм), в которой наблюдается сигнал ФЛ от островков. В этой связи важным становится установление критериев, позволяющих однозначно отделить сигнал ФЛ от Ge(Si) самоформирующихся островков от сигнала ФЛ, связанного с оптической рекомбинацией на дефектах кристаллической решетки.

### **Основные цели работы состояли в следующем:**

1. Установление количественной связи между параметрами (размером, составом, упругими напряжениями и формой) Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков в одно- и многослойных структурах и их спектрами фотолюминесценции. Определение условий получения структур с GeSi/Si(001) самоформирующимися островками, имеющих высокую интенсивность сигнала фотолюминесценции от островков в области длин волн 1,3-1,55 мкм при комнатной температуре.
2. Проведение сравнительного анализа спектров фотолюминесценции GeSi/Si(001) гетероструктур с самоформирующимися наноструктурами и структур с дефектами кристаллической решетки с целью установления критериев, позволяющих определить происхождение сигнала ФЛ от GeSi гетероструктур в области длин волн 1,3-2 мкм.
3. Модификация роста GeSi/Si(001) самоформирующихся островков за счет предосаждения напряжённых  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоёв.

### **Научная новизна**

1. Смещение пика ФЛ от Ge(Si) самоформирующихся островков в область меньших энергий при понижении температуры роста связывается с подавлением диффузии атомов Si в островки и увеличением доли Ge в

них. Впервые наблюдался сигнал фотолюминесценции от Ge(Si) островков в области энергий значительно меньших ширины запрещенной зоны объемного Ge.

2. Показано, что энергия непрямого в реальном пространстве оптического перехода между дырками, локализованными в островках, и электронами, находящимися в Si на гетерогранице с островком, рассчитанная с учетом экспериментально полученных данных о составе и упругих напряжениях островков в многослойных структурах хорошо совпадает с экспериментальным положением пика ФЛ от островков.
3. Продемонстрирован различный характер зависимости от мощности оптической накачки сигнала ФЛ от Ge(Si) самоформирующихся островков и от дефектов кристаллической решетки. Продемонстрировано, что сигналы ФЛ от Ge(Si) самоформирующихся островков и от дефектов кристаллической решетки имеют различный характер температурной зависимости.
4. Показано, что рост Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков может быть существенно модифицирован в результате предосаждения упруго напряжённого  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя. Обнаружено, что критическая толщина двумерного роста Ge существенно уменьшается при росте доли Ge в предосажденном напряженном  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое.

### **Научная и практическая значимость работы**

Установлена количественная связь между экспериментально определенными параметрами (размерами, составом и упругими напряжениями) Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков и положением сигнала ФЛ, связанного с оптической рекомбинацией носителей заряда в островках.

Предложен способ изменения параметров Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков с помощью предосаждения напряжённых  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоёв.

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

1. Низкотемпературный сигнал ФЛ от Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков в области 1,3-2 мкм связан с непрямым в реальном пространстве оптическим переходом между дырками, локализованными в островках, и электронами, находящимися в Si на гетерогранице II-типа с Ge(Si) островком.
2. Смещение сигнала ФЛ от островков в область меньших энергий при понижении температуры роста с 750 °С до 600 °С вызвано подавлением диффузии Si в островки и увеличением доли Ge в них при понижении температуры роста.

3. Сдвиг в область больших энергий пика ФЛ от островков в многослойных структурах по сравнению с однослойными объясняется уменьшением среднего содержания Ge в островках.
4. Предосаждение упруго напряжённого  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя позволяет получать массивы самоформирующихся Ge(Si) островков пирамидальной и куполообразной формы с высокой поверхностной плотностью.

### **Личный вклад автора в получение результатов**

- Основной вклад в рост Ge(Si)/Si(001) одно- и многослойных структур с самоформирующимися островками при различных температурах [A1-A31].
- Основной вклад в интерпретацию спектров ФЛ Ge(Si)/Si(001) одно- и многослойных структур с самоформирующимися островками, выращенными при различных температурах [A2-A7, A9-A10, A14, A16-A26, A29] (совместно с Н.В.Востоковым, Ю.Н.Дроздовым, М.В.Шалеевым, А.Н.Яблонским).
- Определяющий вклад в сравнительном анализе спектров ФЛ Ge(Si)/Si(001) структур с самоформирующимися островками и структур с дефектами кристаллической решетки [A7, A20] (совместно с А.Н.Яблонским).
- Основной вклад в рост и проведение исследований структур с Ge(Si)/Si(001) самоформирующимися островками, выращенными на напряжённых  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоях [A12, A13, A15, A31] (совместно с Ю.Н.Дроздовым, М.В.Шалеевым, А.Н.Яблонским).

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертации докладывались на V и VI Российских конференциях по физике полупроводников (Нижний Новгород, 10 – 14 сентября, 2001; Санкт-Петербург, 27 – 31 октября, 2003), Всероссийских совещаниях «Нанофотоника» (Нижний Новгород, 26 - 29 марта, 2001; 11 – 14 марта, 2002; 17 - 20 марта, 2003; 2 - 6 мая, 2004), Международных конференциях по сканирующей зондовой микроскопии (Нижний Новгород, 26 февраля - 1 марта, 2001; 1 – 5 марта, 2003), Совещаниях по росту кристаллов, плёнок и дефектам структуры кремния «Кремний-2002» и «Кремний-2004» (Новосибирск, 9 - 12 июля, 2002; Иркутск, 5 – 9 июля, 2004), Симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 25 - 29 марта, 2005), 11-ом Европейском совещании по молекулярно-лучевой эпитаксии (Германия, 4 – 7 февраля, 2001), 10-ом Международном симпозиуме «Наноструктуры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 17 – 21 июня, 2002), Международных конференциях по материаловедению (Страсбург, Франция, 5 – 8 июня, 2001; 24 – 28 мая, 2004), 4-ом и 5-ом Международном совещании по моделированию, росту,

свойствам и приборам на поверхностях с оригинальным индексом (Аспет, Франция, 16 – 20 сентября, 2001; Штутгарт, Германия, 13 – 15 октября, 2003), Международной конференции по сверхрешёткам, наноструктурам и наноприборам (Тулуза, Франция, 22 – 26 июля, 2002), Международном совещании по квантовым точкам (Крит, Греция, 20 – 24 июня, 2003), а также на семинарах ИФМ РАН и НИОЦ СЗМ при ННГУ им.Н.И.Лобачевского.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликована 31 работа, включая 15 статей в реферируемых журналах и 16 публикаций в материалах конференций.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Объем диссертации составляет 160 страниц, включая 71 рисунок и 7 таблиц. Список цитированной литературы включает 151 наименование, список работ автора по теме диссертации – 31 наименование.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, показана ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели работы, представлены сведения о структуре и содержании работы, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** проведен обзор работ, посвященных исследованию роста и свойств самоформирующихся объектов на поверхности полупроводниковых гетероструктур. Приведено краткое описание физических причин, приводящих к формированию трёхмерных нанобъектов на поверхности напряженных полупроводниковых гетероструктур. Особое внимание уделено исследованиям изменений морфологии поверхности при осаждении Ge на Si (001). Проанализировано состояние работ, посвященных изучению образования, роста, а также оптических и электрических свойств Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся nanoостровков.

**Глава 2** посвящена исследованию фотолюминесценции одно и многослойных SiGe/Si(001) структур с самоформирующимися островками. В первом параграфе описана высоковакуумная установка “BALZERS”, модернизированная для роста гетероструктур GeSi методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Во втором параграфе приведено описание метода подготовки подложек к росту структур и представлено описание методик исследования структур с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгенодифракционного анализа (РД), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ).

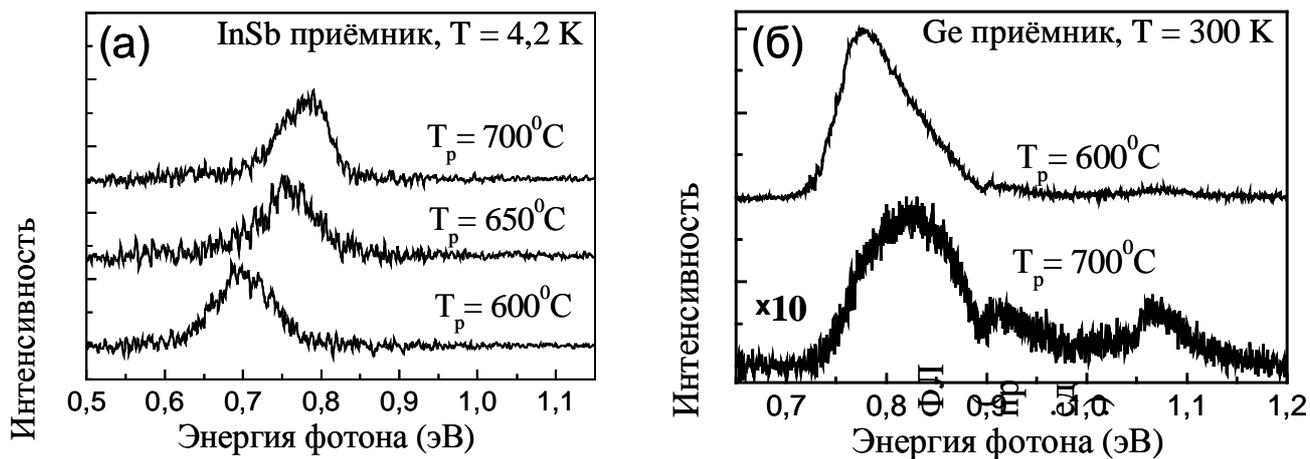


Рис. 1. (а) Спектры низкотемпературной ФЛ однослойных структур с Ge(Si) островками, выращенных при различных температурах. Спектры нормированы на максимум сигнала от островков. (б) Спектры ФЛ многослойных (5 слоёв) структур с островками, выращенных при 600<sup>0</sup>С и 700<sup>0</sup>С, измеренные при комнатной температуре. Для возбуждения сигнала ФЛ использовался Ar<sup>+</sup> лазер (линия 514 нм).

В третьем параграфе Главы 2 представлены результаты исследований спектров ФЛ однослойных Ge/Si структур с самоформирующимися островками, в зависимости от температуры роста. В спектрах ФЛ исследованных структур наблюдался сигнал ФЛ в области энергий 0,6-0,9 эВ, который связывался с оптической рекомбинацией носителей заряда в островках (рис. 1а). Показано, что с понижением температуры роста пик ФЛ от островков смещается в область меньших энергий. Данное смещение связывается с подавлением диффузии Si в островки и увеличением содержания Ge в них при понижении температуры роста. Увеличение содержания Ge в островках структур без покровного слоя Si с уменьшением температуры роста было обнаружено ранее методами комбинационного рассеяния света и РД [A1, A2, A3]. Методами РД было обнаружено уменьшение содержания Ge в островках при их заращивании по сравнению с островками без покровного слоя, что связывается с дополнительной диффузией Si в островки в процессе их заращивания. Для структур с наноструктурами, выращенных при 600<sup>0</sup>С, впервые наблюдался сигнал ФЛ от островков при энергиях меньших ширины запрещенной зоны объемного Ge до 0,6 эВ (до ~ 2 мкм) (рис. 1а) [A5, A6, A7]. С использованием экспериментально полученных данных о составе и упругих напряжениях в островках, выращенных при 600<sup>0</sup>С, была рассчитана зонная диаграмма в окрестности островка. Показано, что положение максимума сигнала ФЛ от островков хорошо согласуется с энергией непрямого в реальном пространстве оптического перехода между дырками, локализованными в

островках, и электронами, находящимися в Si на гетерогранице с островком.

В четвертом параграфе Главы 2 рассмотрены особенности роста и фотолюминесценции многослойных структур с самоформирующимися островками, выращенными при температуре  $600^{\circ}\text{C} \div 700^{\circ}\text{C}$ . Методами РД в приближении упруго напряженного слоя были экспериментально определены значения среднего состава и остаточных упругих напряжений островков в многослойных структурах, выращенных при различных температурах [А5]. Методами РД было обнаружено уменьшение содержания Ge в островках многослойных структур по сравнению с островками однослойных структур с покровным слоем Si. Уменьшение содержания Ge в островках многослойных структур связывается с дополнительной диффузией Si в островки в результате более продолжительного роста многослойных структур, а также с влиянием упругих напряжений от островков в нижележащих слоях многослойной структуры на рост островков в верхних слоях. Сигнал ФЛ от островков многослойных структур сдвинут в область больших энергий по сравнению с однослойными, что связывается с экспериментально обнаруженным уменьшением среднего содержания Ge в островках в многослойных структурах по сравнению с однослойными. Рост ширины пика ФЛ от островков в многослойных структурах по сравнению с однослойными связывается с различием среднего состава островков, расположенных в разных слоях многослойной структуры.

В пятом параграфе Главы 2 приведены результаты исследования спектров ФЛ одно- и многослойных структур с Ge(Si) самоформирующимися островками, измеренных при комнатной температуре. Обнаружено, что интенсивность сигнала ФЛ от островков при комнатной температуре увеличивается с понижением температуры роста с  $T_p=700^{\circ}\text{C}$  до  $T_p=600^{\circ}\text{C}$  (рис. 1б) [А5, А6, А7, А14]. Данное увеличение сигнала ФЛ связывается с ростом глубины потенциальной ямы для дырок в островках и для электронов в Si на гетерогранице с островком. Рост глубины потенциальной ямы для дырок в островках происходит из-за увеличения доли Ge в островках при понижении температуры роста и, следовательно, увеличения разрыва валентных зон на гетерогранице с Si. Увеличение потенциальной ямы для электронов, находящейся в Si на гетерогранице с островком, при понижении температуры роста вызвано возрастанием упругих напряжений растяжения в Si слоях вблизи островков с большим содержанием Ge. При температуре роста  $600^{\circ}\text{C}$  получены многослойные структуры с Ge(Si)/Si(001) самоформирующимися островками, в которых интенсивность сигнала ФЛ при комнатной температуре от островков в области длин волн 1,3-2 мкм более чем на

порядок превосходит интенсивность сигнала ФЛ, связанного с излучательными переходами в кремнии (рис. 1б).

**Глава 3** посвящена сравнительному анализу ФЛ SiGe/Si(001) гетероструктур с самоформирующимися островками и дефектами кристаллической решетки.

В первом параграфе Главы 3 рассмотрены спектры ФЛ SiGe/Si(001) структур с дислокациями и различными примесными комплексами. Показано влияние условий роста SiGe/Si(001) гетероструктур на дислокационную люминесценцию от них. Продемонстрировано уменьшение интенсивности сигнала ФЛ от островков в SiGe/Si(001) гетероструктурах при появлении в них дефектных островков.

Во втором параграфе Главы 3 представлены результаты сравнительного анализа зависимости спектров ФЛ от островков и дислокаций от мощности оптической накачки. Показан различный характер зависимости от мощности оптической накачки сигнала ФЛ от островков и от дефектов кристаллической решетки [A7, A20]. Для структур с островками с увеличением мощности накачки происходит увеличение ширины сигнала ФЛ от островков и сдвиг его максимума в область больших энергий. Полученная зависимость сигнала ФЛ, связанного с островками, от мощности оптической накачки связывается с многочастичными эффектами в островках. При увеличении мощности накачки происходит рост заселенности дырками верхних энергетических уровней в островках и их рекомбинация с этих уровней. Кроме этого к росту энергии оптического перехода в островках приводит увеличение изгиба энергетических зон, вызванного кулоновским потенциалом дырок, локализованных в островках [6]. Положение линий ФЛ от дислокаций остаётся неизменным при увеличении мощности оптической накачки, так как сигнал ФЛ от дислокаций связан с рекомбинацией носителей с глубоких уровней в запрещённой зоне, положение которых не зависит от мощности оптической накачки.

Также во втором параграфе Главы 3 представлены результаты сравнительного анализа спектров ФЛ от Ge(Si) самоформирующихся островков и от дислокаций в зависимости от температуры образца [A7, A20]. Показан различный характер зависимости от температуры измерения сигнала ФЛ от островков и от дефектов кристаллической решетки. Линии ФЛ, связанные с рекомбинацией свободного экситона в Si и с рекомбинацией на дислокациях, при увеличении температуры образца с 77 К до 300 К смещаются в область меньших энергий. Данное смещение вызвано температурным уменьшением ширины запрещенной зоны Si. В то же время положение линии ФЛ от островков слабо зависит от температуры. Это связывается с тем, что уменьшение ширины запрещенной зоны при

росте температуры частично компенсируется увеличением заселенности дырками возбужденных уровней в островках. Оптическая рекомбинация дырок с этих уровней приводит к увеличению энергии оптического перехода в островках, которое частично компенсирует уменьшение ширины запрещенной зоны при увеличении температуры измерения.

**Глава 4** посвящена исследованию особенностей роста и фотолюминесценции Ge(Si) самоформирующихся островков, полученных осаждением Ge на напряжённый слой  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с малым содержанием Ge ( $x \leq 20\%$ ).

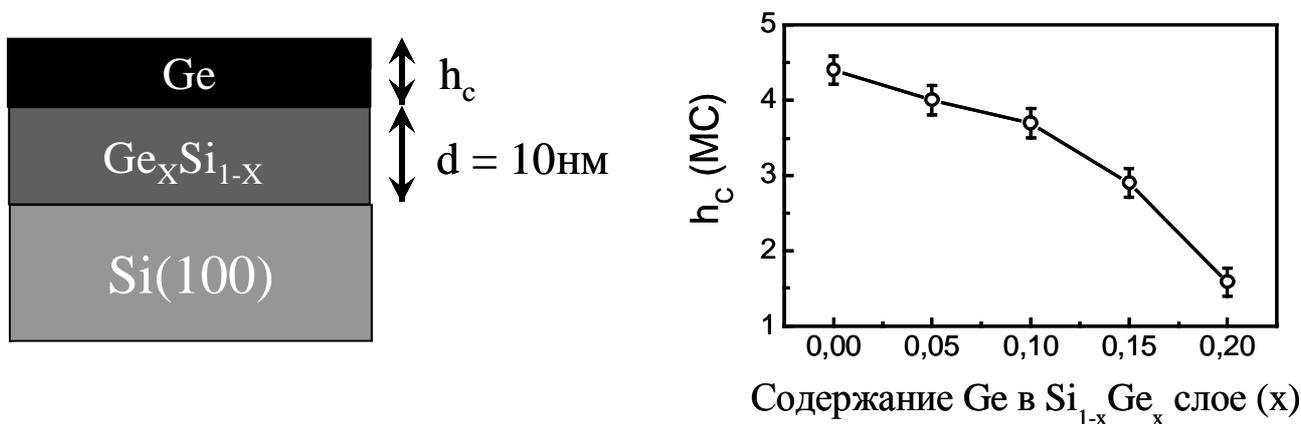


Рис. 2. Схема структуры для определения критической толщины двумерного роста Ge на напряжённом  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое ( $h_c$ ) (слева) и зависимость  $h_c$  от содержания Ge в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое (справа).

В первом параграфе представлено описание методик исследования выращенных структур с помощью АСМ, РД, дифракции быстрых электронов (ДБЭ) и ФЛ.

Второй параграф Главы 4 посвящен исследованию особенностей роста Ge(Si) самоформирующихся островков на напряжённом  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое. С помощью АСМ показано, что размеры и поверхностная плотность островков увеличиваются с ростом содержания Ge в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое [A12, A13, A30, A31]. Обнаружено, что формирование Ge(Si) островков на напряженном  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое при  $x \geq 10\%$  в зависимости от количества осаждённого Ge позволяет получать однородные по форме массивы как пирамидальных, так и куполообразных островков. Увеличение поверхностной плотности островков, сформированных на  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое, связывается с ростом шероховатости поверхности роста в результате осаждения напряженного  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя. Рост размеров островков объясняется более высоким содержанием Si в островках, что является результатом увеличения диффузионного потока атомов из  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя в островки вследствие экспериментально обнаруженного уменьшения

толщины смачивающего слоя при росте доли Ge в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое (рис. 2). С помощью ДБЭ была построена экспериментальная зависимость критической толщины двумерного роста Ge от состава предосажденного напряженного  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя (рис. 2). Значительное уменьшение критической толщины двумерного роста Ge при его осаждении на  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слой связывается с сегрегацией Ge на поверхность  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя и с накопленной в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое упругой энергией. Показано, что увеличение относительной площади поверхности, занятой островками, в результате увеличения размеров и поверхностной плотности островков приводит к пространственному самоупорядочению во взаимном расположении островков, выращенных на напряженных SiGe слоях. Упорядочение островков, проанализированное с помощью автокорреляционной функции поверхности, показало наличие корреляции ближнего порядка во взаимном расположении островков в направлении  $\langle 100 \rangle$  вплоть до третьего соседнего островка.

В третьем параграфе Главы 4 представлены результаты исследования ФЛ структур с Ge(Si) самоформирующимися островками, выращенными на напряжённом  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое. Выявлены особенности ФЛ островков с различной формой [A15, A31]. Показано, что пик ФЛ от куполообразных островков смещён в сторону меньших энергий по сравнению с пиком ФЛ от пирамидальных островков. Наблюдаемое смещение не согласуется с известным из литературы [7] меньшим содержанием Ge в куполообразных островках по сравнению с пирамидальными. Последнее должно приводить к увеличению энергии оптических переходов в куполообразных островках по сравнению с пирамидальными. Наблюдаемое смещение пика ФЛ от куполообразных островков в сторону меньших энергий связывается со значительным увеличением высоты островков при их переходе от пирамидальной к куполообразной форме. Увеличение высоты островков приводит к уменьшению эффектов размерного квантования, смещению основного уровня дырок в куполообразных островках к потолку валентной зоны и, как следствие, уменьшению энергии непрямого в реальном пространстве оптического перехода в островках.

Показано, что увеличение содержания Si в островках, выращенных на  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое, приводит к смещению сигнала ФЛ от островков в сторону больших энергий с ростом доли Ge в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое. Обнаружено увеличение интенсивности сигнала ФЛ в области 1,3-1,55 мкм при комнатной температуре в структурах с островками, выращенными на  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоях, по сравнению со структурами с островками, сформированными непосредственно на Si [A12, A15, A30, A31].

**Заключение** содержит основные результаты диссертационной работы.

## Основные результаты работы

1. Проведены исследования фотолюминесценции одно и многослойных SiGe/Si(001) структур с Ge(Si) самоформирующимися островками. Показано, что с понижением температуры роста с  $750^{\circ}\text{C}$  до  $600^{\circ}\text{C}$  пик ФЛ от островков смещается в область меньших энергий. Данное смещение связывается с подавлением диффузии Si в островки и увеличением содержания Ge в них при понижении температуры роста. Для структур с наноструктурами, выращенных при  $600^{\circ}\text{C}$ , впервые наблюдался сигнал ФЛ от островков при энергиях меньших ширины запрещенной зоны объемного Ge вплоть до энергии 0,6 эВ ( $\sim 2$  мкм).
2. С использованием полученных экспериментальных значений среднего состава и остаточных упругих напряжений в островках SiGe/Si(001) многослойных структур, выращенных в диапазоне температур роста  $600^{\circ}\text{C} \div 700^{\circ}\text{C}$ , рассчитаны энергии оптических переходов в островках. Показано, что положение линии ФЛ от островков связано с непрямым в реальном пространстве оптическим переходом между дырками, локализованными в островках, и электронами, находящимися в Si на гетерогранице с островком. Сигнал ФЛ от Ge(Si) островков в многослойных структурах сдвинут в область больших энергий по сравнению с однослойными, что связывается с экспериментально обнаруженным уменьшением среднего содержания Ge в островках многослойных структур по сравнению с однослойными.
3. Обнаружено увеличение интенсивности сигнала ФЛ от Ge(Si)/Si(001) островков при комнатной температуре с понижением температуры роста с  $700^{\circ}\text{C}$  до  $600^{\circ}\text{C}$ . Данное увеличение сигнала ФЛ связывается с ростом глубины потенциальной ямы для дырок в островках и для электронов в Si на гетерогранице с островком, вследствие увеличения доли Ge в островках при понижении температуры роста.
4. Проведён сравнительный анализ сигнала ФЛ от Ge(Si) самоформирующихся островков и от дефектов кристаллической решетки. Показан различный характер зависимости от мощности оптической накачки сигнала ФЛ от Ge(Si) островков и от дефектов. Продемонстрировано, что положение пиков ФЛ от Ge(Si) островков и от дефектов кристаллической решетки имеют различный характер зависимости от температуры измерения. Установленные различия в спектрах ФЛ могут быть использованы для разделения вкладов дефектов и островков в сигнал фотолюминесценции в области энергий 0,7 – 0,9 эВ.
5. Обнаружено, что при росте Ge(Si) самоформирующихся островков на тонком напряжённом  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое размеры и поверхностная плотность островков увеличиваются с ростом содержания Ge в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое.

Увеличение поверхностной плотности островков связывается с ростом шероховатости поверхности роста в результате осаждения напряженного  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя. Рост размеров островков объясняется более высоким содержанием Si в островках.

6. Обнаружено уменьшение критической толщины двумерного роста Ge при его осаждении на напряженный  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слой по сравнению с аналогичным процессом роста на кремниевой подложке. Построена экспериментальная зависимость критической толщины двумерного роста Ge от состава предосажденного напряженного  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя. Значительное уменьшение критической толщины двумерного роста Ge при его осаждении на напряженный  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слой связывается с сегрегацией Ge на поверхность  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя и с накопленной в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое упругой энергией.

### Список цитированной литературы

- [1] В. М. Устинов. Длинноволновые лазеры ближнего ИК-диапазона на квантовых точках на подложках GaAs/ В. М. Устинов, А. Е. Жуков, А. Р. Ковш, Н. А. Малеев, С. С. Михрин, Б. В. Воловик, Ю. Г. Мусихин, А. Ф. Цацульников, М. В. Максимов, Ю. М. Шерняков, Ж. И. Алфёров, Н. Н. Леденцов, Д. Бимберг, Д. Лотт// Известия Академии Наук: Серия Физическая – 2001. - № 2. – С. 214-218.
- [2] C.Teichert. Self-organization of nanostructures in semiconductor heteroepitaxy/ C.Teichert// Physics Reports – 2002. V. 365 – P. 335-432.
- [3] G.Capellini. SiGe intermixing in Ge/Si(100) islands/ G.Capellini, M.De Seta, F.Evangelisti// Applied Physics Letters – 2001. V. 78 – P. 303-305.
- [4] M.Floyd. Nanometer-scale composition measurements of Ge/Si(100) islands/ M.Floyd, Y.Zhang, K.P.Driver, J.Drucker, P.A.Crozier, D.J.Smith// Applied Physics Letters – 2003. V. 82 – P. 1473-1475.
- [5] R.Apertz. Photoluminescence and electroluminescence of SiGe dots fabricated by island growth/ R.Apertz, L.Vescan, A.Hartmann, C.Dieker, and H.Luth// Applied Physics Letters – 1995. V. 66 – P. 445-447.
- [6] C.-K. Sun. Optical investigations of the dynamic behavior of GaSb/GaAs quantum dots/ C.-K. Sun, G. Wang, J. E. Bowers, B. Brar, H.-R. Blank, H. Kroemer, and M. H. Pilkuhn// Applied Physics Letters – 1996. V. 68 – P. 1543-1545.
- [7] R.Magalhaes-Paniago. Direct evaluation of composition profile, strain relaxation, and elastic energy of Ge:Si(001) self-assembled islands by anomalous x-ray scattering/ R.Magalhaes-Paniago, G.Medeiros-Ribeiro, A.Malachias, S.Kycia, T.I.Kamins, R.Williams// Physical Review B – 2002. V. 66 – P. 245312-245317.

## Список работ автора по теме диссертации

[A1] N.V.Vostokov. The relation between composition and sizes of GeSi/Si(001) islands grown at different temperatures/ N.V.Vostokov, S.A.Gusev, Yu.N.Drozdov, Z.F.Krasil'nik, D.N.Lobanov, N.Mesters, M.Miura, L.D.Moldavskaya, A.V.Novikov, J.Pascual, V.V.Postnikov, Y.Shiraki, V.A.Yakhimchuk, N.Usami, and M.Ya.Valakh// Physics of Low-Dimensional Structures – 2001. V. 3/4 - P. 295-302.

[A2] A.V.Novikov. Strain-driven alloying: effect on sizes, shape and photoluminescence of GeSi/Si(001) self-assembled islands/ A.V.Novikov, B.A.Andreev, N.V.Vostokov, Yu.N.Drozdov, Z.F.Krasil'nik, D.N.Lobanov, L.D.Moldavskaya, A.N.Yablonskiy, M.Miura, N.Usami, Y.Shiraki, M.Ya.Valakh, N.Mesters and J.Pascual// Materials Science and Engineering B – 2002. V. 89 – P. 62-65.

[A3] М.Я.Валах. Влияние диффузии Si на рост, параметры и фотолюминесценцию GeSi/Si(001) самоорганизующихся наностроек/ М.Я.Валах, Н.В.Востоков, С.А.Гусев, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, Л.Д.Молдавская, А.В.Новиков, В.В.Постников, М.В.Степихова, Н.Усами, Ю.Шираки, В.А.Юхимчук// Известия Академии наук. Серия физическая – 2002. - № 2. - С. 160-163.

[A4] Z.F.Krasil'nik. Microscopic and optical investigation of Ge nanoislands on silicon substrates/ Z.F.Krasil'nik, P.Lytvyn, D.N.Lobanov, N.Mesters, A.V.Novikov, J.Pascual, M.Ya.Valakh and V.U.Yukhymchuk// Nanotechnology – 2002. V.13 - P. 81-85.

[A5] Н.В.Востоков. Низкоэнергетическая фотолюминесценция структур с GeSi/Si(001) самоорганизующимися наностроекками/ Н.В.Востоков, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, А.Н.Яблонский// Письма в ЖЭТФ – 2002. – Вып. 6. - С. 425-429.

[A6] A.V.Novikov. Photoluminescence of Ge(Si)/Si(001) self-assembled islands in the near infra-red wavelength range/ A.V.Novikov, D.N.Lobanov, A.N.Yablonskiy, Yu.N.Drozdov, N.V.Vostokov and Z.F.Krasilnik// Physica E – V. 16 – P. 467-472.

[A7] Н.В.Востоков. Фотолюминесценция структур с GeSi/Si(001) самоорганизующимися наностроекками/ Н.В.Востоков, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, А.Н.Яблонский// Известия Академии наук. Серия физическая – 2003. - № 2. - С. 159-162.

[A8] М.С.Дунаевский. Визуализация выращенных наностроекков GeSi в кремниевых структурах методом атомно-силовой микроскопии сколов/ М.С.Дунаевский, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, А.Н.Титков, R.Laiho// ФТП – 2003. – Вып. 6. - С. 692-699.

[A9] A.V. Novikov. Photoluminescence of GeSi/Si(001) self-assembled islands with dome and hut shape/ A.V. Novikov, M.V. Shaleev, D.N. Lobanov,

A.N. Yablonsky, N.V. Vostokov, Z.F. Krasilnik// Physica E – 2004. V. 23. - P. 416-420.

[A10] Н.В. Востоков. Фотолюминесценция GeSi/Si(001) самоорганизующихся наноструктур различной формы/ Н.В. Востоков, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, А.Н. Яблонский// ФТТ – 2004. – Вып. 1. - С. 63-66.

[A11] M.S.Dunaevskii. Visualization of buried SiGe quantum dots at cleavages by cross-sectional atomic force microscopy/ M.S.Dunaevskii, A.N.Titkov Z.F.Krasilnik, A.V.Novikov, D.N.Lobanov, and R.L.Laiho// Applied Physics Letters – 2004. V. 85 – P. 1999-2001.

[A12] D.N. Lobanov. Growth and photoluminescence of Ge(Si) self-assembled islands obtained during the deposition of Ge on a strained SiGe layer/ D.N. Lobanov, A.V. Novikov, N.V. Vostokov, Y.N. Drozdov, A.N. Yablonskiy, Z.F. Krasilnik, M. Stoffel, U. Denker, O.G. Schmidt// Optical Materials – 2005. V. 27 - P. 818-821.

[A13] Н.В. Востоков. Влияние предосаждения  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя на рост Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков/ Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский// ФТТ – 2005. – Вып. 1. - С. 29-32.

[A14] N.V.Vostokov. GeSi/Si(001) structures with self-assembled islands: growth and optical properties”, in “Quantum Dots: Fundamentals, Applications, and Frontiers/ N.V.Vostokov, Yu.N.Drozdov, D.N.Lobanov, A.V.Novikov, M.V.Shaleev, A.N.Yablonskii, Z.F.Krasilnik, A.N.Ankudinov, M.S.Dunaevskii, A.N.Titkov, P.Lytvyn, V.U.Yukhymchuk, M.Ya.Valakh// NATO Science Series II – 2005. V. 190 - P. 333-351.

[A15] Ю.Н.Дроздов. Особенности фотолюминесценции Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков, выращенных на напряженном  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое/ Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В.Новиков, М.В.Шалеев, А.Н.Яблонский// ФТП – 2006. – Вып. 3. - С. 343-346.

[A16] Н.В.Востоков. Влияние диффузии Si на рост, параметры и фотолюминесценцию GeSi/Si(001) самоорганизующихся островков/ Н.В.Востоков, С.А.Гусев, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, Л.Д.Молдавская, А.В.Новиков, В.В.Постников, М.В.Степихова, М.Miura, N.Usami, Y.Shiraki, В.А.Юхимчук, М.Я.Валах, N.Mesters, J.Pascual// Всероссийское Собрание Нанофотоника, Нижний Новгород, 26-29 марта 2001, Материалы совещания. - С. 28-31.

[A17] A.V.Novikov. Strain-driven alloying: effect on sizes, shape and photoluminescence of GeSi/Si(001) self-assembled islands/ A.V.Novikov, B.A.Andreev, N.V.Vostokov, Yu.N.Drozdov, Z.F.Krasil'nik, D.N.Lobanov, L.D.Moldavskaya, A.N.Yablonskiy, M.Miura, N.Usami, Y.Shiraki, M.Ya.Valakh, N.Mesters and J.Pascual// E-MRS 2001 Spring Meeting, Strasbourg, France, June 5 – 8, 2001. Book of abstracts. - D – IV.6.

- [A18] Н.В.Востоков. Влияние температуры роста и предосаждения  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  слоев на рост  $\text{GeSi/Si(001)}$  самоорганизующихся наноостровков/ Н.В.Востоков, С.А.Гусев, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, Л.Д.Молдавская, А.В.Новиков, В.В.Постников, М.В.Степихов, М.Я.Валах, В.А.Юхимчук// V Российская конференция по физике полупроводников, Нижний Новгород, 10-14 сентября 2001, Тезисы докладов. - С. 347.
- [A19] N.V.Vostokov. The dependence of structural and optical properties of  $\text{GeSi/Si(001)}$  islands on growth temperature/ N.V.Vostokov, Yu.N.Drozdov, Z.F.Krasil'nik, D.N.Lobanov, N.Mesters, M.Miura, L.D.Moldavskaya, A.V.Novikov, J.Pascual, Y.Shiraki, N.Usami, M.Ya.Valakh, A.N.Yablonskiy// Fourth International Workshop on modelling, growth, properties and devices of epitaxial semiconductors on Novel Index Surfaces (NIS'01), Aspet, France, September 16-20, 2001, Abstract booklet. – С. 42-43.
- [A20] Н.В.Востоков, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, А.Н.Яблонский, В.Н.Кукин, С.К.Максимов, «Фотолюминесценция структур с  $\text{GeSi/Si(001)}$  самоорганизующимися наноостровками/ Н.В.Востоков, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, А.Н.Яблонский, В.Н.Кукин, С.К.Максимов// Всероссийское Совещание Нанофотоника, Нижний Новгород, 15-18 марта 2002, Материалы Совещания. - С. 14-17.
- [A21] A.V.Novikov. Photoluminescence of  $\text{GeSi/Si(001)}$  self-assembled islands at wavelengths up to  $2 \mu\text{m}$ / A.V.Novikov, D.N.Lobanov, A.N.Yablonsky, Yu.N.Drozdov, N.V.Vostokov and Z.F.Krasilnik// Second International Workshop on New Group IV (Si-Ge-C) Semiconductors: Control of Properties and Applications to Ultrahigh Speed and Opto-Electronic Devices, Kofu, Japan, 2-4 June, 2002, Abstracts. – P. III-05.
- [A22] Yu.N.Drozdov. Room-temperature photoluminescence of  $\text{GeSi/Si(001)}$  self-assembled islands in  $1.3 - 1.7 \mu\text{m}$  wavelength range/ Yu.N.Drozdov, Z.F.Krasil'nik, D.N.Lobanov, A.V.Novikov, M.Ya.Valakh, N.V.Vostokov, A.N.Yablonskiy, V.A.Yukhymchuk// 10<sup>th</sup> International Symposium Nanostructures: Physics and Technology, St. Petersburg, Russia, 17-21 June, 2002, Proceedings. - P. 183-186.
- [A23] A.V.Novikov. Photoluminescence of  $\text{GeSi/Si(001)}$  self-assembled islands at wavelengths up to  $2 \mu\text{m}$ / A.V.Novikov, D.N.Lobanov, A.N.Yablonsky, Yu.N.Drozdov, N.V.Vostokov and Z.F.Krasilnik// International conference on superlattice, nano-structures and nano-device ICSNN, Toulouse, France, July 22-26, 2002, Abstracts. –P. I-P046.
- [A24] Н.В. Востоков. Фотолюминесценция  $\text{GeSi/Si(001)}$  самоорганизующихся наноостровков, имеющих различную форму/ Н.В. Востоков, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В.Шалеев, А.Н. Яблонский// Всероссийское Совещание Нанофотоника, Нижний Новгород, 17-20 марта 2003, Материалы Совещания. - С. 33-36.

- [A25] М.Я. Валах. Компонентный состав и упругие напряжения в многослойных структурах с  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  наноструктурами/ М.Я. Валах, В.Н. Джаган, П.М. Литвин, В.А. Юхимчук, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков// Всероссийское Совецание Нанофотоника, Нижний Новгород, 17-20 марта 2003, Материалы Совецания. - С. 284-287.
- [A26] N.V.Vostokov. GeSi/Si(001) structures with self-assembled islands: growth and optical properties/ N.V.Vostokov, Yu.N.Drozдов, D.N.Lobanov, A.V.Novikov, M.V.Shaleev, A.N.Yablonskii, Z.F.Krasilnik, A.N.Ankudinov, M.S.Dunaevskii, A.N.Titkov, P.Lytvyn, V.U.Yukhymchuk, M.Ya.Valakh// NATO Advanced Research Workshop "Quantum Dots: Fundamentals, Applications, Frontiers", 20-24 June 2003, Crete, Greece, Abstracts. – P. 20.
- [A27] З.Ф.Красильник. Самоорганизующиеся островки SiGe/Si(001), выращенные на SiGe подслоях/ З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, В.Б.Шмагин, А.Н.Яблонский// VI Российская конференция по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 27-31 октября 2003, Тезисы докладов. - С. 137.
- [A28] М.С.Дунаевский. Визуализация зарощенных полупроводниковых квантовых точек на сколах содержащих их структур методами атомно-силовой микроскопии/ М.С.Дунаевский, А.В.Анкудинов, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, З.Ф.Красильник, Reino Laiho, А.Н.Титков// VI Российская конференция по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 27-31 октября 2003, Тезисы докладов. - С. 227.
- [A29] Т.С.Шамирзаев. Фотолюминесценция квантовых точек Ge, выращенных в матрице Si при различных температурах эпитаксии/ Т.С.Шамирзаев, А.И.Никифоров, М.С.Секенбаев, К.С.Журавлев, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, З.Ф.Красильник// Всероссийское Совецание Кремний-2004, Иркутск, 5-9 июля 2004, Сборник тезисов докладов. - С. 109.
- [A30] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский, «Влияние предосаждения  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя на рост и фотолюминесценцию SiGe/Si(001) самоформирующихся островков/ Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский// Всероссийское Совецание Нанофотоника, Нижний Новгород, 2-6 мая 2004, Материалы Совецания. - С. 314-317.
- [A31] Н.В. Востоков. Особенности фотолюминесценции SiGe/Si(001) самоформирующихся островков, выращенных на напряжённом  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое/ Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский// Симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника», Нижний Новгород, 25-29 марта 2005, Материалы Симпозиума. - С. 401-402.

**Дмитрий Николаевич Лобанов**

**ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ РОСТА И  
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ Ge(Si) САМОФОРМИРУЮЩИХСЯ  
ОСТРОВКОВ, ВЫРАЩЕННЫХ НА Si(001) ПОДЛОЖКАХ И  
НАПРЯЖЁННЫХ Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> СЛОЯХ**

Автореферат

Подписано к печати 17 февраля 2006 г. Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур РАН,  
603950, г. Н. Новгород, ГСП-105