

Шалеев Михаил Владимирович

**ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С Ge(Si) САМОФОРМИРУЮЩИМИСЯ  
НАНООСТРОВКАМИ И КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ НА Si(001)  
ПОДЛОЖКАХ И РЕЛАКСИРОВАННЫХ SiGe/Si(001) БУФЕРНЫХ  
СЛОЯХ: ОСОБЕННОСТИ РОСТА И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ**

05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,  
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

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,  
профессор Д.И.Тетельбаум

кандидат физико-математических наук,  
доцент А.И.Никифоров

Ведущая организация: Научно-образовательный комплекс  
"Санкт-Петербургский физико-  
технический научно-образовательный  
центр РАН", Санкт-Петербург

Защита состоится 02 ноября 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 2 октября 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических  
наук, профессор

К.П.Гайкович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Одним из активно развивающихся направлений современной физики и технологии полупроводников является направление, связанное с получением и исследованием полупроводниковых самоформирующихся нанообъектов. К настоящему времени найдены возможности создания широкого класса таких объектов: самоформирующихся наноостровков, квантовых точек, проволок, субмонослойных включений одного полупроводникового материала в матрицу другого. За счет пространственного ограничения движения носителей заряда их энергетический спектр в формируемых полупроводниковых структурах пониженной размерности принципиально отличается от спектра носителей заряда в объемных полупроводниках. Предельным случаем локализации носителей заряда является их локализация во всех трех пространственных направлениях. Такой тип локализации реализуется в трехмерных самоформирующихся объектах – островках – одного полупроводника, заключенного в матрицу другого, более широкозонного полупроводника.

Наиболее исследованными на сегодняшний день являются самоформирующиеся нанообъекты в полупроводниковых гетероструктурах на основе соединений  $A_3B_5$ . Преимуществом полупроводников данного семейства является возможность широкого выбора материалов с различными ширинами запрещенных зон и параметрами кристаллических решеток [1]. Итогом исследований стало создание новых приборов на основе структур  $A_3B_5$  с самоформирующимися объектами.

Однако основой современной микро- и наноэлектроники остается кремниевая технология. В этой связи реализация на ее основе новых полупроводниковых приборных решений на основе гетероструктур является очень привлекательной и перспективной. Германий является единственным химическим элементом, который позволяет получать гетероструктуры на кремниевых подложках в широком диапазоне состава и толщин слоев. Особенностью для гетеропары Ge/Si является рассогласование кристаллических решеток кремния и германия. Наличие упругих напряжений в гетероструктурах Ge/Si накладывает ограничения на толщину роста псевдоморфных слоев. Для определенных условий формирования структур и их компонентного состава накопленные упругие напряжения могут приводить к формированию трехмерных самоформирующихся объектов – Ge(Si) наноостровков и квантовых точек. В достаточно узком интервале ростовых параметров удастся сформировать массив бездефектных Ge(Si) островков. Структуры с Ge(Si) самоформирующимися островками представляются привлекательными как для исследования фундаментальных научных про-

блем, так и с точки зрения создания на их основе оптоэлектронных приборов.

Практический интерес к структурам с Ge(Si) островками во многом связан с наблюдаемым в спектрах электро- и фотолюминесценции (ФЛ) этих структур сигнала в области длин волн 1,3 – 1,55 мкм, соответствующей минимуму потерь оптоволоконных линий связи. Ранее проведенные исследования роста Ge(Si) островков выявили существенную зависимость формы образующихся островков от условий роста. Однако к моменту начала работ над диссертацией в литературе не были представлены результаты исследований особенностей ФЛ островков с различной формой. Одной из задач настоящей диссертационной работы являлось установление зависимости сигнала ФЛ от типа Ge(Si) островков.

Важной задачей, на решение которой направлены исследования структур с Ge(Si) островками, является увеличение эффективности излучательной рекомбинации носителей заряда в этих структурах. Полагается, что слабая локализация электронов в структурах с Ge(Si) островками, выращенными на Si(001) подложках, является одной из причин, препятствующих эффективной излучательной рекомбинации носителей заряда. В литературе было предложено несколько путей решения данной проблемы: использование субмонослойных покрытий углерода, рост многослойных структур с тонкими барьерными слоями Si и т.д. Однако известно [2], что эффективная яма для электронов в GeSi гетероструктурах может быть реализована в напряженных слоях Si, выращенных на релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоях. Совмещение локализации электронов в таких напряженных Si ( $\epsilon$ -Si) слоях, сформированных рядом с Ge(Si) островками, и дырок в островках может дать ряд преимуществ, одним из которых может являться увеличение интенсивности сигнала ФЛ в структурах такого типа. Поэтапная реализация (от формирования «искусственных подложек» на основе релаксированных SiGe буферных слоев до исследования фотолюминесцентных свойств полученных структур) идеи встраивания Ge(Si) островков между  $\epsilon$ -Si слоями представлена в данной диссертационной работе.

Необходимо отметить, что получение высококачественных релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоев с малой шероховатостью поверхности и низкой концентрацией дефектов является отдельной важной задачей. В настоящее время релаксированные SiGe буферные слои активно используются для формирования быстродействующих полевых транзисторов, для исследования возможности создания на основе SiGe структур каскадного лазера терагерцового диапазона и т.д. Для формирования SiGe буферных слоев используется большое количество различных методов (рост градиентных слоев, низкотемпературный рост, использование поверхностно активных примесей («сульфактантов»), селективное окисление SiGe слоев и т.д.) В данной диссертационной работе представлены результаты отработки лабораторной технологии формирования высококачественных градиентных релаксированных SiGe слоев с использованием метода газофазной эпитак-

сии и химико-механического полирования поверхности выращенных SiGe слоев.

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

1. Установление зависимости положения и ширины сигнала фотолюминесценции в структурах с Ge(Si) самоформирующимися островками от параметров островков (формы, размеров, состава), определяемых условиями роста (температурой, скоростью осаждения, типом подложки).
2. Обработка технологии формирования «искусственных подложек» на основе высококачественных релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоев с малой шероховатостью поверхности и низкой плотностью прорастающих дислокаций.
3. Исследование возможности увеличения интенсивности сигнала фотолюминесценции в ближнем инфракрасном диапазоне от структур с Ge(Si) островками за счет их встраивания в напряженный Si слой, сформированный на релаксированном SiGe/Si(001) буферном слое.

### **Научная новизна**

1. Впервые обнаружено, что изменение типа Ge(Si) островков, доминирующих на поверхности, с куполообразных наноструктур на пирамидальные квантовые точки, происходящее при понижении температуры роста, приводит к смещению пика ФЛ от островков в область больших энергий. Наблюдаемое смещение пика ФЛ связано резким уменьшением средней высоты островков, происходящим при смене их типа, которое приводит к выталкиванию уровня размерного квантования дырок в пирамидальных островках к потолку валентной зоны Si, и, как следствие, к увеличению энергии оптического перехода в островках.
2. Впервые выявлены особенности роста Ge(Si) самоформирующихся островков на релаксированных GeSi/Si(001) буферных слоях с малой шероховатостью поверхности и на напряженных Si слоях. Обнаружено, что изменение морфологии поверхности (смена типа островков, доминирующих на поверхности с dome на hut) при понижении температуры роста, в случае роста островков на напряженных Si слоях происходит при более высокой температуре (в интервале температур роста 630 °C – 600 °C), чем в случае роста островков на Si(001) подложках (600 °C – 550 °C).
3. Впервые обнаружен сигнал фотолюминесценции от Ge(Si) островков, заключенных между слоями напряженного Si. Показано, что обнаруженный сигнал ФЛ связан с непрямой в реальном пространстве излучательной рекомбинацией дырок, находящихся в Ge(Si) островках, и электронов, локализованных в напряженных Si слоях над и под островками. Продемонстрирована возможность эффективного управления положением

ем пика ФЛ от Ge(Si) островков, встроенных в напряженный Si слой, за счет изменения толщин Si слоев над и под островками.

4. Обнаружено существенное (более чем на порядок) увеличение интенсивности сигнала ФЛ при 77 К от островков, встроенных в напряженный Si слой, по сравнению с островками, выращенными на Si(001) подложках. Увеличение интенсивности связывается с лучшей локализацией электронов в напряженных Si слоях над и под островками.

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

Отработана технология получения высококачественных релаксированных SiGe буферных слоев с малой шероховатостью поверхности и низкой плотностью прорастающих дислокаций. Продемонстрирована возможность их использования в качестве «искусственных подложек» для формирования на них методом молекулярно-пучковой эпитаксии широкого класса GeSi гетероструктур.

Найдены режимы роста для формирования на напряженных Si слоях массива куполообразных Ge(Si) островков с малым (~ 10 %) разбросом по размерам.

Подтверждена возможность увеличения интенсивности сигнала ФЛ от структур с Ge(Si) самоформирующимися островками, за счет встраивания массива островков в напряженный Si слой, сформированный на релаксированном SiGe буферном слое.

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

1. Положение максимума сигнала ФЛ от Ge(Si) самоформирующихся островков зависит от их типа. Изменение типа Ge(Si) островков, выращенных на Si(001) подложках и на релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоях, происходящее при понижении температуры роста и сопровождаемое резким уменьшением средней высоты островков, обуславливает смещение положения пика ФЛ от островков в область больших энергий. Данное смещение связано с выталкиванием уровня размерного квантования дырок в островках малой высоты к потолку валентной зоны Si, что приводит к увеличению энергии оптического перехода, связанного с островками.
2. Впервые обнаруженный сигнал ФЛ от Ge(Si) самоформирующихся островков, заключенных между слоями напряженного Si, связан с не прямой в реальном пространстве излучательной рекомбинацией дырок, находящихся в Ge(Si) островках, и электронов, локализованных в напряженных Si слоях над и под островками.
3. Встраивание Ge(Si) самоформирующихся островков между напряженными Si слоями позволяет более чем на порядок увеличить интенсивность сигнала ФЛ от островков при 77 К по сравнению с интенсивностью сигнала ФЛ от Ge(Si) островков, сформированных на Si(001) подложках.

4. Изменение толщин напряженных Si слоев над и под островками позволяет эффективно управлять положением пика ФЛ от структур с Ge(Si) островками, заключенными между напряженными Si слоями. Смещение положения пика ФЛ при изменении толщин напряженных Si слоев связано с изменением положения уровня размерного квантования электронов в квантово-размерных напряженных Si слоях на гетерогранице с островком.

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

- Основной вклад в рост Ge(Si)/Si(001) структур с самоформирующимися островками при различных температурах и скоростях роста [A1–A3, A6, A10–A17] (совместно с А.В.Новиковым, Д.Н.Лобановым).
- Основной вклад в интерпретацию спектров ФЛ Ge(Si)/Si(001) структур с самоформирующимися островками, выращенными при низких температурах и различных скоростях осаждения Ge [A1–A3, A6, A10–A17] (совместно с Ю.Н.Дроздовым, Д.Н.Лобановым, А.В.Новиковым, А.Н.Яблонским).
- Равноценный вклад в отработку технологии формирования «искусственных подложек» на основе релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоев [A4, A5, A18–A20, A22, A26] (совместно с Ю.Н.Дроздовым, О.А.Кузнецовым, В.А.Перевощиковым, А.В.Новиковым, А.Н.Яблонским).
- Определяющий вклад в рост и АСМ исследования структур с Ge(Si) самоформирующимися островками, выращенными на релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоях [A7–A9, A21, A23–A27] (совместно с Д.Н.Лобановым, А.В.Новиковым).
- Основной вклад в интерпретацию спектров ФЛ структур с Ge(Si) самоформирующимися островками, выращенными на релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоях [A7–A9, A21, A23–A27] (совместно с Ю.Н.Дроздовым, А.В.Новиковым, А.Н.Яблонским).

#### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертации докладывались на VI и VII Российских конференциях по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 27 – 31 октября, 2003; Москва, 18 – 23 сентября, 2005), Всероссийских совещаниях «Нанофотоника» (Нижний Новгород, 17 – 20 марта, 2003; 2 – 6 мая, 2004), 4-ом и 5-ом ежегодных международных симпозиумах «Электронные приборы и материалы» (Эрлагол, Алтай, 1 – 4 июля, 2003; 1 – 5 июля, 2004), Совещании по росту кристаллов, плёнок и дефектам структуры кремния «Кремний-2004» (Иркутск, 5 – 9 июля, 2004), Симпозиумах «Нанозифика и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 25 – 29 марта, 2005; 13 – 17 марта, 2006), Пятом международном российско-украинском семинаре «Нанозифика и нанозлектроника» (Санкт-Петербург, 17 – 19 июня, 2004), Симпозиуме «Нано и гига задачи в микрозлектронике»

(Краков, Польша, 13 – 17 сентября, 2004), Международной конференции по материаловедению (Ницца, Франция, 29 мая – 2 июня, 2006), 5-ом Международном совещании по моделированию, росту, свойствам и приборам на поверхностях с оригинальным индексом (Штутгарт, Германия, 13 – 15 октября, 2003), Третьей международной конференции по кремний-германиевым технологиям и приборам (Принстон, США, 15 – 17 мая, 2006), 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 опубликовано 27 работ, включая 9 статей в реферируемых журналах и 18 публикаций в материалах конференций.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Объем диссертации составляет 152 страницы, включая 66 рисунков. Список цитированной литературы включает 151 наименование, список работ автора по теме диссертации – 27 наименований.

## **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 трехмерных 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. На основе литературных данных показаны возможности формирования Ge/Si гетероструктур с заданным дизайном зонной диаграммы как за счет варьирования компонентного состава осаждаемых слоев, так и за счет управления упругими напряжениями в формируемой гетероструктуре. Кратко представлены современные достижения по формированию SiGe/Si(001) релаксированных буферных слоев и использованию их в качестве «искусственных подложек» для роста на них SiGe гетероструктур.

**Глава 2** посвящена исследованию зависимости роста и фотолюминесценции структур с Ge(Si)/Si(001) самоформирующимися островками от температуры и скорости осаждения Ge. В первом параграфе приведена мо-



тивация исследований роста Ge(Si) островков при низких температурах ( $< 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), обоснована необходимостью установления связи сигнала ФЛ от Ge(Si) островков с их формой. Во втором параграфе описана высоковакуумная установка “BALZERS”, модернизированная для роста гетероструктур GeSi методом молекулярно-пучковой эпитаксии. 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).

В третьем параграфе Главы 2 представлены результаты исследований зависимости параметров Ge(Si) островков от температуры осаждения Ge. Показано, что при понижении температуры формирования островков в интервале  $600 - 550\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит ранее описанное в литературе [3] изменение морфологии островков – переход от куполообразных (dome) наноостровков к вытянутым пирамидальным (hut) островкам. Проведен подробный анализ АСМ данных, полученных для островков различной формы. Показано, что при смене типа островков с dome на hut скачкообразно уменьшается (в 4 – 5 раз) средняя высота островков (рис. 1а). Приведены возможные причины смены типа островков при изменении температуры роста в достаточно узком интервале ( $\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). При низких температурах роста ( $\sim 460\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) сформированы массивы hut островков – квантовых точек со средней высотой  $< 1\text{ нм}$  (рис. 1а) и поверхностной плотностью  $\sim 2,5 \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}$ .

В четвертом параграфе Главы 2 приведены результаты исследования зависимости сигнала ФЛ, связанного с Ge(Si) островками, от температуры осаждения Ge. В спектрах ФЛ исследованных структур наблюдался сигнал ФЛ в области энергий  $0,6 - 0,9\text{ эВ}$ , который связывался с оптической рекомбинацией носителей заряда в островках (рис. 1б). Обнаружено, что при понижении температуры формирования островков в интервале  $600 - 550\text{ }^{\circ}\text{C}$  положение максимума пика ФЛ смещается в область больших энергий (рис. 1б, в). Данное смещение связывается с тем, что при уменьшении температуры формирования островков в рассматриваемом интервале (как было показано в параграфе 3 Главы 2) происходит переход от dome к hut островкам, сопровождаемый резким уменьшением средней высоты островков (рис. 1а). Как было показано ранее [4], при понижении температуры роста островков в интервале температур  $750 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  положение пика ФЛ, связанного с островками, смещается в область меньших энергий из-за увеличения среднего содержания Ge в dome островках. При дальнейшем понижении температуры среднее содержание Ge в островках увеличивается [5], но из-за малой высоты hut островков ( $< 2\text{ нм}$ ) положение уровня размерного квантования дырок в них выталкивается к потолку валентной зоны Si (рис. 1г, д), что приводит к увеличению энергии непрямого в реальном пространстве оптического перехода в островках.

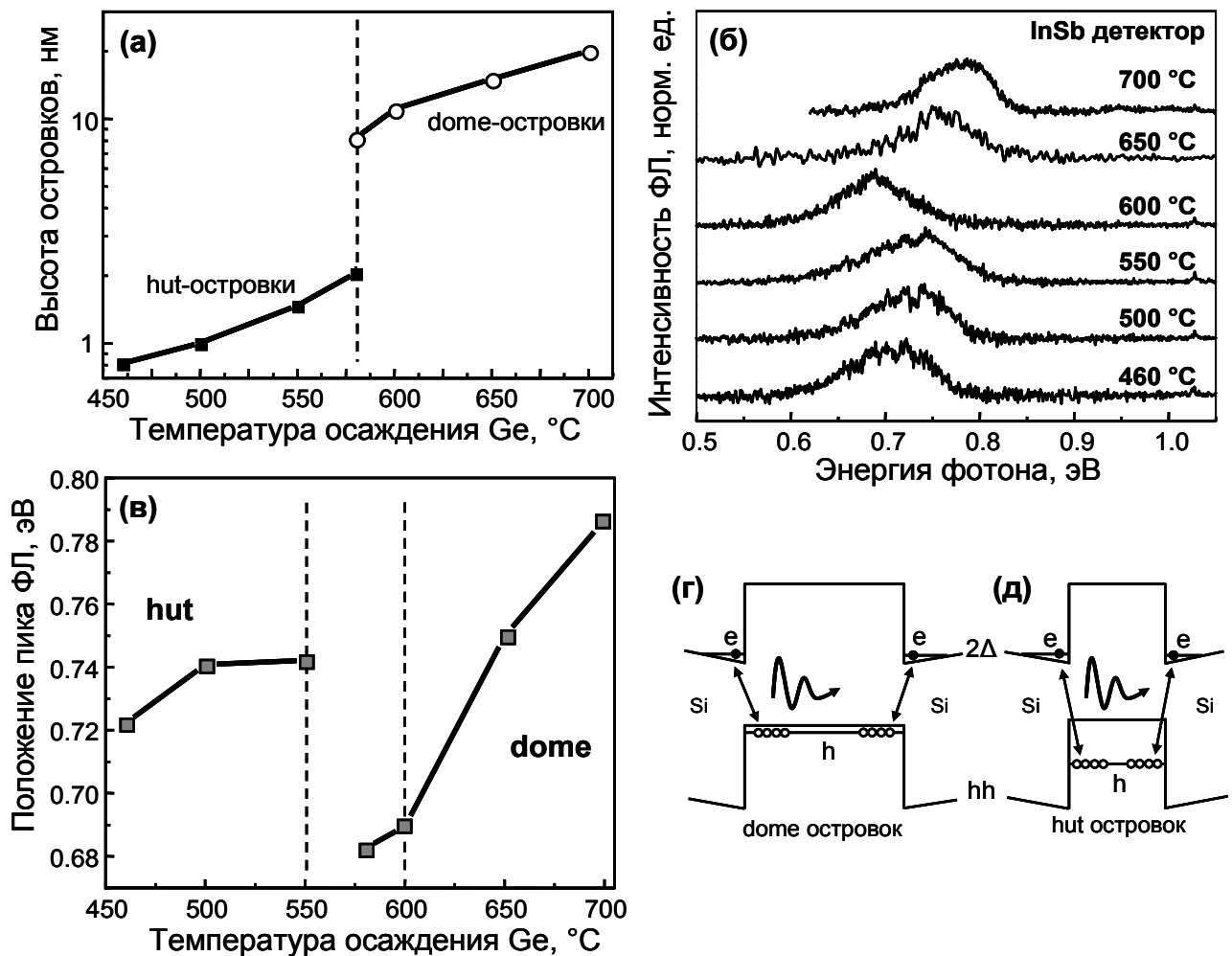


Рис. 1. (а) Зависимость средней высоты островков от температуры осаждения Ge. Пунктирная линия разделяет области существования островков различного типа.

(б) Спектры ФЛ структур с островками, выращенных при различных температурах осаждения Ge. Спектры ФЛ записаны при 4 К.

(в) Положение максимума пика ФЛ от островков в зависимости от температуры осаждения Ge. Пунктирные линии разделяют области существования hut и dome островков и соответствуют интервалу 550 – 600 °С.

(г) и (д) Схематическое изображение модели непрямого в реальном пространстве оптического перехода для dome (г) и hut (д) островков. На рисунке показано положение потолка валентной зоны  $E_v$  для тяжелых дырок и дна зоны проводимости для электронов в  $2\Delta$  долинах в островках и их окрестностях. Стрелками показан не прямой оптический переход.

В пятом параграфе Главы 2 представлены результаты исследований влияния скорости осаждения Ge на рост и ФЛ Ge(Si) островков, сформированных при 600 °С. Выявлен интервал скоростей роста, в котором происходит наиболее сильное изменение параметров островков. Показано, что с ростом скорости осаждения Ge с 0,1 Å/с до 0,75 Å/с поверхностная плотность островков увеличивается ~ в 5 раз. Обнаружена зависимость положе-

ния пика ФЛ, связанного с Ge(Si) самоформирующимися островками, от скорости осаждения Ge. Показано, что положение пика ФЛ смещается в низкоэнергетическую область спектра при увеличении скорости роста, что связывается с увеличением содержания Ge в островках при увеличении скорости роста и, соответственно, уменьшении времени формирования островков (времени, в течение которого может происходить диффузия Si в островки в процессе их формирования).

**Глава 3** посвящена отработки технологии изготовления «искусственных подложек» на основе высококачественных релаксированных градиентных  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$  ( $x \leq 50\%$ ) буферных слоев.

В первом параграфе Главы 3 представлено описание методики формирования высококачественных релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоев. Описана технология роста градиентных SiGe/Si(001) буферных слоев методом гидридной газофазной эпитаксии (ГФЭ) при атмосферном давлении и методика химико-механического полирования (ХМП) поверхности выращенных релаксированных SiGe буферных слоев.

Во втором параграфе Главы 3 представлены результаты исследований сформированных релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоев различными методами. РД исследования выращенных структур показали наличие в РД спектрах пиков, соответствующие отдельным слоям градиентного SiGe буфера. Показано, что степень релаксации упругих напряжений во всех сформированных структурах близка к 100%. Представлены результаты АСМ исследований сформированных структур до и после ХМП. Показано, что первоначально на поверхности структур присутствует характерная «cross-hatch» картина неровностей, обусловленная наличием сетки дислокаций несоответствия и возникающая вследствие высоких температур роста, используемых в методе ГФЭ. АСМ исследования поверхности SiGe буферных слоев после ХМП показали, что использование ХМП позволяет удалить с поверхности вышеописанную картину неровностей и получить «искусственные SiGe подложки», шероховатость поверхности которых лишь незначительно превосходит шероховатость поверхности исходных Si(001) подложек. Плотность прорастающих дислокаций в сформированных SiGe буферных слоях, определенная методом селективного травления, не превышала значения  $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$  для буферных слоев с содержанием Ge в верхнем слое 20 – 35%.

В третьем параграфе Главы 3 представлены результаты исследований возможности использования полученных SiGe/Si(001) буферных слоев в качестве «искусственных подложек» для роста различных SiGe гетероструктур методом МПЭ. Представлены результаты исследований сформированных методом МПЭ тестовых структур, в которых показано высокое структурное качество формируемых слоев и возможность эпитаксиального роста на релаксированных SiGe буферных слоях без развития шероховатости поверхности.

**Глава 4** посвящена исследованию особенностей роста и фотолюминесценции нового класса Ge/Si гетероструктур – Ge(Si) самоформирующихся островков, выращенных на «искусственных подложках» на основе гладких релаксированных SiGe буферных слоев.

В первом параграфе изложена мотивация формирования структур с Ge(Si) островками на релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоях. Указано на то, что одной из причин низкой эффективной излучательной рекомбинации в структурах с Ge(Si)/Si(001) островками является слабая локализация электронов в Si вблизи с островком (рис. 1г). Эта проблема может быть решена в случае роста островков на релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоях за счет встраивания Ge(Si) островков между напряженными Si ( $\epsilon$ -Si) слоями, которые будут являться эффективными потенциальными ямами для локализации электронов (рис. 2а).

Во втором параграфе Главы 4 изложены результаты исследований особенностей роста Ge(Si) самоформирующихся островков на гладких релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоях с предосажденным  $\epsilon$ -Si слоем (Ge(Si)/ $\epsilon$ -Si островков). Впервые обнаружено, что в случае формирования Ge(Si) островков на релаксированных SiGe буферных слоях температура, при которой происходит переход от роста dome к росту hut островков, повышается по сравнению с ростом Ge(Si) островков на Si(001) подложках. Данное изменение связывается как с меньшим рассогласованием кристаллических решеток Ge(Si)/ $\epsilon$ -Si островка и релаксированного буферного слоя, так и с несколько большей поверхностной плотностью островков в случае их роста на релаксированных Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> буферных слоях. Выявлены параметры роста, необходимые для формирования массива куполообразных dome Ge(Si)/ $\epsilon$ -Si островков с малым (~ 10 %) разбросом по размерам. Приведены результаты исследований зависимости параметров Ge(Si) островков от толщины  $\epsilon$ -Si слоя под островками. Показано, что наиболее существенные изменения параметров островков происходят в интервале толщин напряженного Si под островками 0 – 0,55 нм, а в интервале толщин 1 – 3 нм параметры островков слабо зависят от толщины  $\epsilon$ -Si слоя.

Третий параграф Главы 4 посвящен исследованиям ФЛ структур с Ge(Si) островками, заключенными между  $\epsilon$ -Si слоями. В спектрах ФЛ структур с Ge(Si) самоформирующимися островками, заключенными между слоями напряженного Si, впервые обнаружен сигнал ФЛ, который связывается с непрямой в реальном пространстве излучательной рекомбинации дырок, локализованных в островках, и электронов, локализованных в напряженных Si слоях над и под островками (рис. 2а). Обнаружено увеличение на порядок интенсивности сигнала ФЛ при 77 К от Ge(Si)/ $\epsilon$ -Si островков по сравнению с интенсивностью сигнала ФЛ от Ge(Si) островков, выращенных на Si(001) подложках (рис. 2б). Увеличение интенсивности сигнала ФЛ связывается с эффективной локализацией электронов в напряженных Si слоях над и под островками (рис. 2а). Продемонстрирована возможность эффек-

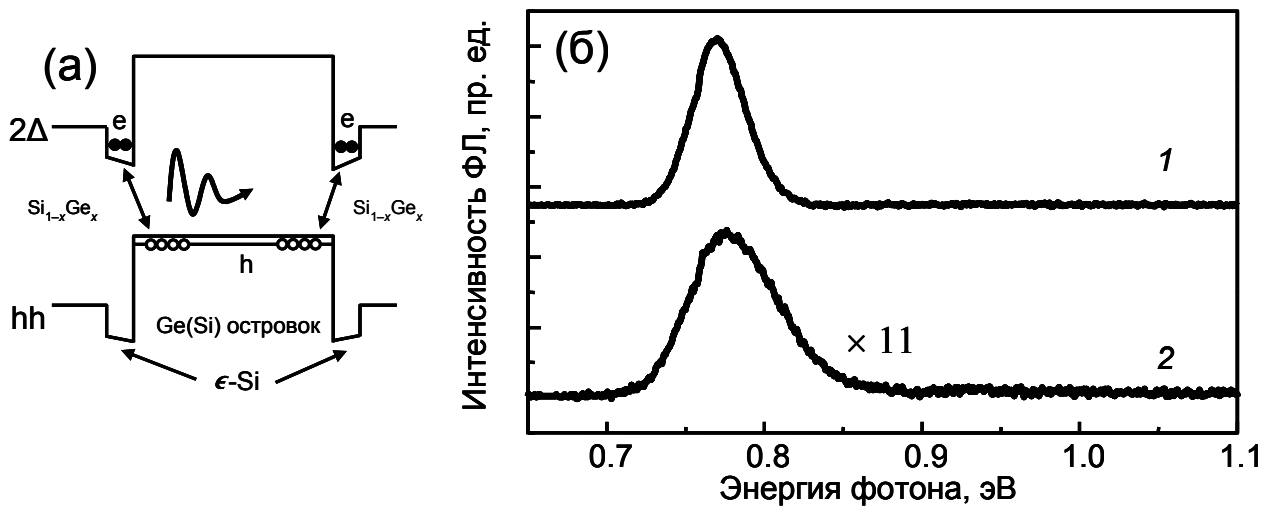


Рис. 2. (а) Схематическое изображение зонной диаграммы для структуры с Ge(Si) островками, заключенными между слоями напряженного Si. (б) Спектры ФЛ ( $T = 77$  К, Ge детектор) структур с Ge(Si)/ $\epsilon$ -Si островками (спектр 1) и Ge(Si) островками, выращенными на Si(001) (спектр 2).

тивного управления положением пика ФЛ от структур с Ge(Si) островками, заключенными между  $\epsilon$ -Si слоев за счет изменения толщин  $\epsilon$ -Si слоев над и под островками. Показано, что при уменьшении толщин  $\epsilon$ -Si слоев над и под островками положение пика ФЛ от островков смещается в область больших энергий, что связано с выталкиванием уровней размерного квантования электронов из ям, образованных  $\epsilon$ -Si слоями, к дну зону проводимости SiGe слоев (рис. 2а). Данное смещение электронных уровней приводит к увеличению энергии непрямого в реальном пространстве оптического перехода. Представлены расчеты положения энергетических уровней электронов в  $\epsilon$ -Si слоях и дырок в островках с учетом экспериментально определенных параметров островков. Рассчитанные энергии непрямого в реальном пространстве оптического перехода для структур с различной толщиной  $\epsilon$ -Si слоев хорошо согласуются с экспериментально наблюдаемыми положениями пика ФЛ. Исследована зависимость спектров ФЛ Ge(Si)/ $\epsilon$ -Si самоформирующихся островков от температуры их роста. Обнаруженное для интервала температур роста  $630 - 700$  °C смещение пика ФЛ от Ge(Si)/ $\epsilon$ -Si островков в область меньших энергий при уменьшении температуры роста связывается с увеличением содержания Ge в островках. Обнаружено, что при уменьшении температуры формирования островков с  $630$  °C до  $600$  °C наблюдается смещение положения пика ФЛ от островков в область больших энергий. Как и в случае роста островков на Si(001) подложках обнаруженное смещение связывается со сменой типа островков с dome на hut, происходящей в данном интервале температур и сопровождаемой резким уменьшением средней высоты островков. Данное обстоятельство приводит к выталкиванию уровня размерного квантования дырок в островках к потолку валентной зоны SiGe и, как следствие, увеличению энергии непрямого в реальном пространстве оптического перехода.

**Заключение** содержит основные результаты диссертационной работы.

## Основные результаты работы

1. Проведены исследования роста и фотолюминесценции Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков, выращенных при низких температурах ( $\leq 600$  °C). Обнаруженное смещение пика ФЛ от Ge(Si) островков в сторону больших энергий при понижении температуры роста островков с 600 °C до 550 °C связывается с изменением морфологии островков, происходящим в этом диапазоне температур роста и сопровождающимся резким уменьшением средней высоты островков. При уменьшении высоты островков происходит выталкивание уровня размерного квантования дырок в островках к потолку валентной зоны Si и, как следствие, увеличиваются энергии оптических переходов, связанных с островками.
2. Для температуры роста 600 °C исследовано влияние скорости осаждения Ge на параметры (размеры, форму, поверхностную плотность) Ge(Si) островков и положение сигнала ФЛ, связанного с островками. Показано, что положение пика ФЛ от островков смещается в низкоэнергетическую область спектра при увеличении скорости осаждения Ge, что связывается с ростом доли Ge в островках при увеличении скорости роста и, соответственно, уменьшении времени формирования островков.
3. Отработана технология формирования «искусственных подложек» на основе релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоев, сочетающая в себе рост градиентных SiGe буферных слоев методом гибридной газофазной эпитаксии и последующую химико-механическую полировку их поверхности. Получены высококачественные  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$  ( $x = 20\% - 30\%$ ) буферные слои с плотностью прорастающих дислокаций  $< 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$  и шероховатостью поверхности  $< 0,5 \text{ нм}$ .
4. Впервые исследованы особенности роста Ge(Si) самоформирующихся островков на релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоях с малой шероховатостью поверхности. Обнаружено, что резкое изменение морфологии островков, происходящее при понижении температуры роста (переход от куполообразных наноструктур к пирамидальным квантовым точкам), в случае роста Ge(Si) островков на SiGe буферных слоях происходит при более высоких температурах роста (630 °C – 600 °C) по сравнению с ростом островков на Si(001) подложках (600 °C – 550 °C).
5. Впервые обнаружен сигнал фотолюминесценции от Ge(Si) островков, сформированных на релаксированных SiGe/Si(001) буферных слоях и заключенных между слоями напряженного Si. Смещение сигнала ФЛ от Ge(Si) островков, заключенных между напряженными Si слоями, в сторону меньших энергий при увеличении толщин Si слоев подтверждает связь обнаруженного сигнала ФЛ с непрямой в реальном пространстве излучательной рекомбинации дырок, находящихся в островках, и электронов, локализованных в напряженных Si слоях на гетерогранице с островком.

6. Продемонстрировано увеличение на порядок интенсивности сигнала ФЛ при 77 К от Ge(Si) островков, заключенных между напряженными Si слоями, по сравнению с сигналом ФЛ от Ge(Si) островков, сформированных на Si(001) подложках. Увеличение интенсивности сигнала ФЛ связывается с эффективной локализацией электронов в напряженных Si слоях на гетерогранице с островком.

### Список цитированной литературы

- [1] Ашкрофт, Н. Физика твердого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мермин // М.: Мир, 1979. – Т. 1. – С. 93.
- [2] Schäffler, F. High-mobility Si and Ge structures / F. Schäffler // Semiconductor Science and Technology. – 1997. – V. 12. – P. 1515–1550.
- [3] Mo, Y.-W. Kinetic pathway in Stranski-Krastanov growth of Ge on Si(001) / Y.-W. Mo, D. E. Savage, B. S. Swartzentruber, M. G. Lagally // Physical Review Letters. – 1990. – V. 65. – P. 1020–1023.
- [4] Востоков, Н. В. Низкоэнергетическая фотолюминесценция структур с GeSi/Si(001) самоорганизующимися наноструктурами / Н. В. Востоков, Ю. Н. Дроздов, З. Ф. Красильник, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, А. Н. Яблонский // Письма в ЖЭТФ. – 2002. – Т. 76. Вып. 6. – С. 425–429.
- [5] Milekhin, A.G. Phonons in Ge/Si Quantum Dot Structures: influence of growth temperature / A. G. Milekhin, A. I. Nikiforov, M. Yu. Ladanov, O. P. Pchelyakov, D. N. Lobanov, A. V. Novikov, Z. F. Krasil'nik, S. Schulze, D. R. T. Zahn // Physica E. – 2004. – V. 21. – P. 464–468.

### Список работ автора по теме диссертации

- [A1] Востоков, Н. В. 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. – Т. 46. Вып. 1. – С. 63–66.
- [A2] Novikov, A. V. 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.
- [A3] Востоков, Н. В. Влияние скорости осаждения Ge на рост и фотолюминесценцию Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков / Н. В. Востоков, З. Ф. Красильник, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, М. В. Шалеев, А. Н. Яблонский // ФТТ. – 2005. – Т. 47. Вып. 1. – С. 41–43.
- [A4] Востоков, Н. В. Релаксированные  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$  буферные слои, выращенные методом газовой фазной эпитаксии при атмосферном давлении / Н. В. Востоков, Ю. Н. Дроздов, О. А. Кузнецов, З. Ф. Красильник, А. В. Новиков, В. А. Перевозчиков, М. В. Шалеев // ФТТ. – 2005. – Т. 47. Вып. 1. – С. 44–46.
- [A5] Востоков, Н. В. Получение релаксированных  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$  буферных слоев с малой шероховатостью поверхности / Н. В. Востоков,

Ю. Н. Дроздов, З. Ф. Красильник, О. А. Кузнецов, А. В. Новиков, В. А. Перевошиков, М. В. Шалеев // Микроэлектроника. – 2005. – Т. 34. Вып. 1. – С. 1–8.

[A6] Vostokov, N. V. 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.

[A7] Shaleev, M. V. Ge self-assembled islands grown on SiGe/Si(001) relaxed buffer layers / M. V. Shaleev, A. V. Novikov, O. A. Kuznetsov, A. N. Yablonsky, N. V. Vostokov, Yu. N. Drozdov, D. N. Lobanov, Z. F. Krasilnik // Materials Science and Engineering B. – 2005. – V. 124–125C. – P. 466–469.

[A8] Shaleev, M. V. Photoluminescence of Ge(Si) self-assembled islands embedded in a tensile-strained Si layer / M. V. Shaleev, A. V. Novikov, A. N. Yablonskiy, Y. N. Drozdov, D. N. Lobanov, Z. F. Krasilnik, O. A. Kuznetsov // Applied Physics Letters. – 2006. – V. 88. – P. 011914.

[A9] Востоков, Н. В. Особенности формирования Ge(Si) островков на релаксированных  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$  буферных слоях / Н. В. Востоков, Ю. Н. Дроздов, З. Ф. Красильник, О. А. Кузнецов, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, М. В. Шалеев // ФТП. – 2006. – Т. 40. Вып. 2. – С. 235–239.

[A10] Востоков, Н. В. Фотолюминесценция GeSi/Si(001) самоорганизующихся наностроек, имеющих различную форму / Н. В. Востоков, З. Ф. Красильник, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, М. В. Шалеев, А. Н. Яблонский // Нанопотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 17–20 марта 2003. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2003. – Т. 1. – С. 33–36.

[A11] Vostokov, N. V. GeSi/Si(001) structures with self-assembled islands: growth and optical properties / 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 Advanced Research Workshop «Quantum Dots: Fundamentals, Applications, Frontiers»: Abstracts, Crete, Greece, June 20–24, 2003. – P. 20.

[A12] Shaleev, M. V. Photoluminescence of GeSi/Si(001) self-assembled islands with dome and hut shape / M. V. Shaleev, Z. F. Krasilnik, D. N. Lobanov, A. V. Novikov, N. V. Vostokov, A. N. Yablonsky // 4<sup>th</sup> Siberian Russian workshop and tutorials EDM'2003: Proceedings, Erlagol, Altay, Russia, July 1–4, 2003. – P. 27–30.

[A13] Krasilnik, Z. F. Photoluminescence of GeSi/Si(001) self-assembled islands with different shape / Z. F. Krasilnik, D. N. Lobanov, A. V. Novikov, M. V. Shaleev, N. V. Vostokov, A. N. Yablonsky // 5<sup>th</sup> International Workshop



on “Epitaxial Semiconductors on Patterned Substrates and Novel Index Surface” (ESPS-NIS): Workshop Program & Abstract booklet, Stuttgart, Germany, October 13–15, 2003. – P. 61.

[A14] Востоков, Н. В. Зависимость формы GeSi/Si(001) самоорганизующихся островков от температуры осаждения Ge / Н. В. Востоков, З. Ф. Красильник, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, М. В. Шалеев, А. Н. Яблонский // VI Российская конференция по физике полупроводников: Тезисы докладов, Санкт-Петербург, Россия, 27–31 октября 2003. – СПб: ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, 2003. – С. 145.

[A15] Shaleev, M. V. Dome to hut Ge(Si)/Si(001) islands shape transition / M. V. Shaleev, Z. F. Krasilnik, D. N. Lobanov, A. V. Novikov, N. V. Vostokov, A. N. Yablonsky // Nano and Giga Challenges in Microelectronics: Book of Abstracts, Cracow, Poland, September 13–17, 2004. – P. 227.

[A16] Востоков, Н. В. Влияние скорости осаждения Ge на рост и фотолюминесценцию Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков / Н. В. Востоков, З. Ф. Красильник, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, М. В. Шалеев, А. Н. Яблонский // Нанопотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 2–6 мая 2004. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004. – С. 322–325.

[A17] Shaleev, M. V. Effect of Ge deposition rate on growth and optical properties of Ge(Si)/Si(001) self-assembled islands / M. V. Shaleev, Z. F. Krasilnik, D. N. Lobanov, A. V. Novikov, N. V. Vostokov, A. N. Yablonsky // 5<sup>th</sup> Annual International Siberian Workshop on Electronic Devices and Materials: Proceedings, Erlagol, Altay, Russia, July 1–5, 2004. – P. 24–27.

[A18] Востоков, Н. В. Релаксированные Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si(001) буферные слои, выращенные методом газофазной эпитаксии при атмосферном давлении / Н. В. Востоков, Ю. Н. Дроздов, З. Ф. Красильник, О. А. Кузнецов, А. В. Новиков, В. А. Перевощиков, М. В. Шалеев, А. Н. Яблонский // Нанопотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 2–6 мая 2004. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004. – С. 125–128.

[A19] Новиков, А. В. Релаксированные Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si(001) буферные слои с малой шероховатостью поверхности / А. В. Новиков, О. А. Кузнецов, Ю. Н. Дроздов, В. А. Перевощиков, М. В. Шалеев, Н. В. Востоков, З. Ф. Красильник // Пятый международный российско-украинский семинар «Нанопотоника и наноэлектроника»: Тезисы докладов, Санкт-Петербург, Россия, 17–19 июня 2004. – С. 24.

[A20] Новиков, А. В. Рост GeSi/Si(001) гетероструктур на релаксированных SiGe буферных слоях, выращенных методом газофазной эпитаксии при атмосферном давлении / А. В. Новиков, О. А. Кузнецов, Ю. Н. Дроздов, В. А. Перевощиков, Н. В. Востоков, М. В. Шалеев, З. Ф. Красильник // Совещание «Кремний-2004»: Сборник тезисов докладов, Иркутск, Россия, 5–9 июля 2004. – С. 147.

- [A21] Шалеев, М. В. Ge(Si) самоформирующиеся островки на релаксированных  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  буферных слоях / М. В. Шалеев, Н. В. Востоков, Ю. Н. Дроздов, З. Ф. Красильник, О. А. Кузнецов, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков // Нанопластика и наноэлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 25–29 марта 2005. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2005. – С. 226–227.
- [A22] Востоков, Н. В. Искусственные подложки на основе релаксированных  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  буферных слоев / Н. В. Востоков, Ю. Н. Дроздов, З. Ф. Красильник, О. А. Кузнецов, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, М. В. Шалеев // VII Российская конференция по физике полупроводников: Тезисы докладов, Звенигород, Россия, 18–23 сентября 2005. – М.: ФИАН, 2005. – С. 155.
- [A23] Дроздов, Ю. Н. Фотолюминесценция Ge(Si) самоформирующихся островков, встроенных в напряженный Si слой / Ю. Н. Дроздов, З. Ф. Красильник, О. А. Кузнецов, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, М. В. Шалеев, А. Н. Яблонский // VII Российская конференция по физике полупроводников: Тезисы докладов, Звенигород, Россия, 18–23 сентября 2005. – М.: ФИАН, 2005. – С. 169.
- [A24] Дроздов, Ю. Н. Интенсивная фотолюминесценция Ge(Si) самоформирующихся островков, заключенных между слоями напряженного Si / Ю. Н. Дроздов, З. Ф. Красильник, О. А. Кузнецов, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, М. В. Шалеев, А. Н. Яблонский // Нанопластика и наноэлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 13–17 марта 2006. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – С. 98–101.
- [A25] Novikov, A. V. Intense photoluminescence from Ge(Si) self-assembled islands embedded in a tensile-strained Si layer / A. V. Novikov, M. V. Shaleev, A. N. Yablonskiy, O. A. Kuznetsov, Yu. N. Drozdov, D. N. Lobanov, Z. F. Krasilnik // Third International Silicon Germanium Technology and device Meeting (ISTDM 2006): Conference Digest, Princeton, NJ, USA, May 15–17, 2006. – P. 186–187.
- [A26] Krasilnik, Z. F. Smooth relaxed SiGe/Si(001) buffer layer as an «artificial» substrate for growth of structures with Ge(Si) self-assembled islands / Z. F. Krasilnik, M. V. Shaleev, A. V. Novikov, A. N. Yablonsky, O. A. Kuznetsov, Yu. N. Drozdov, D. N. Lobanov // 6<sup>th</sup> International Workshop on Epitaxial Semiconductors on Patterned Substrates and Novel Index Surfaces: Workshop Program & Abstract Booklet, University of Nottingham, UK, April 3–5, 2006. – P. 62.
- [A27] Shaleev, M. V. Effect of tensile-strained Si layer on photoluminescence of Ge(Si) self-assembled islands grown on relaxed SiGe/Si(001) buffer layer / M. V. Shaleev, A. V. Novikov, A. N. Yablonskiy, O. A. Kuznetsov, Yu. N. Drozdov, D. N. Lobanov, Z. F. Krasilnik // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. 14<sup>th</sup> International Symposium, St. Petersburg, Russia, June 26–30, 2006. – St. Petersburg: Ioffe Institute, 2006. – P. 359–360.

**Михаил Владимирович Шалеев**

**ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С Ge(Si) САМОФОРМИРУЮЩИМИСЯ  
НАНООСТРОВКАМИ И КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ НА Si(001)  
ПОДЛОЖКАХ И РЕЛАКСИРОВАННЫХ SiGe/Si(001) БУФЕРНЫХ  
СЛОЯХ: ОСОБЕННОСТИ РОСТА И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ**

Автореферат

Подписано к печати 26 сентября 2006 г. Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур РАН,  
603950, г. Н. Новгород, ГСП-105