

На правах рукописи

Исаков Михаил Александрович

**Морфология и оптические свойства самоформирующихся
островков GeSi/Si(001), выращенных методом сублимационной
молекулярно-лучевой эпитаксии в среде GeH₄**

Специальность 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, 2010

Работа выполнена в
Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
с.н.с. Научно-исследовательского
физико-технического института
Нижегородского государственного
университета им. Н. И. Лобачевского
Д. О. Филатов

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
профессор, зам. директора
Института физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН
О. П. Пчеляков

Доктор физико-математических наук,
в.н.с. Научно-исследовательского
физико-технического института
Нижегородского государственного
университета им. Н. И. Лобачевского
Д. И. Тетельбаум

Ведущая организация: Физический Институт им. П. Н. Лебедева
Российской Академии Наук
(ФИАН, г. Москва)

Защита диссертации состоится 19 января 2011 г. в 14:00
на заседании диссертационного совета Д 212.166.01
при ННГУ им. Н.И. Лобачевского
по адресу: 603950 Нижний Новгород, пр-т Гагарина, 23, корп. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
ННГУ им. Н. И. Лобачевского

Автореферат разослан 18 декабря 2010 г.

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

А. И. Машин

Актуальность темы диссертационного исследования

В области практического применения низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур (ГС) видимый прогресс к настоящему времени достигнут для наноструктур (НС) на основе полупроводниковых соединений типа A^3B^5 [1]. Однако, в связи с тем, что современная интегральная твердотельная электроника основана на кремниевой технологии, одним из приоритетных направлений развития современной микроэлектроники является так называемая кремниевая оптоэлектроника [2]. Главной проблемой указанной области науки и техники является создание на основе Si светоизлучающих устройств (светодиодов и инжекционных лазеров). Основным препятствием на пути её решения является непрямозонность Si, в связи с чем квантовый выход фотолюминесценции (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ) структур на основе Si недостаточен для практических применений. В качестве одного из путей повышения эффективности ФЛ и ЭЛ в Si рассматриваются самоформирующиеся наноструктуры GeSi/Si, формирующиеся в процессе гетероэпитаксии Ge на Si по механизму Странски-Крастанова [3]. Ожидалось, что благодаря эффекту размерного квантования, в таких НС возможны квазипрямые межзонные излучательные переходы [4]. В последние годы усилился интерес к фотоэлектрическим свойствам НС GeSi/Si, связанный с расширением спектрального диапазона фотодетекторов на базе Si в ИК-область (прежде всего, на практически важный для оптоволоконной связи коммуникативный диапазон длин волн $\lambda = 1,3 \div 1,55 \mu\text{м}$) [5]. Перспективными фотоприёмниками коммуникативного диапазона считаются $p-i-n$ фотодиоды на базе Si с многослойными массивами островков GeSi в i -области [6].

Настоящая диссертационная работа посвящена изучению морфологии, состава и оптических свойств ГС GeSi/Si(001) с самоформирующимися островками, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) в среде GeH₄ [7]. В этом методе слои Si осаждаются из сублимационных источников, а для осаждения Ge в ростовую камеру напускается GeH₄ с парциальным давлением $p_g \sim 10^{-4} \div 10^{-3}$ Торр, который разлагается на поверхности нагретой подложки. Таким образом, данный метод представляет собой гибрид молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) с сублимационным источником Si и газофазной эпитаксии (ГФЭ) при низком давлении. Использование сублимационного источника для осаждения Si позволяет выращивать структуры любой сложности с высоким кристаллическим совершенством при достаточно низких температурах осаждения слоёв Si (до 450°C). С другой стороны, использование пиролиза GeH₄ позволяет осаждавать однородные слои Ge на подложки любых размеров.

Для широкого практического применения метода СМЛЭ в среде GeH₄ необходимо установить зависимость морфологии, энергетического спектра, электронных и оптических свойств островков GeSi/Si, выращиваемых данным методом, от условий роста. К моменту начала работы над диссертацией процессы зарождения и роста самоформирующихся островков GeSi/Si(001) были исследованы достаточно подробно для структур, выращенных методом МЛЭ и менее подробно — методом ГФЭ [8]. Детальных исследований структур с островками

GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄ не проводилось, за исключением нескольких работ, имеющих характер предварительных исследований [9].

Таким образом, тема настоящего диссертационного исследования является актуальной как с фундаментальной (выявление особенностей процессов роста и обусловленных ими особенностей морфологии, состава, и оптических свойств островков GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄), так и с прикладной точек зрения (выяснение перспективности метода СМЛЭ в среде GeH₄ для выращивания приборных структур нано- и оптоэлектроники).

Цель работы

Установление фундаментальных закономерностей, связывающих морфологию и оптические свойства структур с самоформирующимися островками GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄, с условиями роста.

Задачи работы

1. Исследование количественных зависимостей параметров морфологии, состава и спектров ФЛ самоформирующихся островков GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄, от условий роста.
2. Выявление отличительных особенностей процессов формирования, морфологии, состава и энергетического спектра самоформирующихся островков GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄, в сравнении с островками, выращенными методами МЛЭ и ГФЭ.
3. Построение теоретических моделей, связывающих особенности спектров ФЛ структур с самоформирующимися островками GeSi/(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄, с особенностями морфологии и состава материала островков.

Научная новизна и практическая значимость работы

1. Впервые проведён количественный анализ зависимостей параметров морфологии самоформирующихся островков GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄, от условий роста. Установлено, что морфология массивов определяется процессами переконденсации в процессе роста.
2. Впервые для исследования состава и упруго-напряжённого состояния самоформирующихся островков GeSi/Si(001) применён метод конфокальной рамановской микроскопии (КРМ). Показана возможность получения карт распределения доли Ge и относительной деформации в слое GeSi по поверхности образца и визуализации на них островков и поля упругих напряжений в слое GeSi.
3. Впервые показано, что в условиях достаточно сильного фотовозбуждения влияние потенциала избыточных носителей заряда, локализованных в островках GeSi/Si(001), может приводить к тому, что островки становятся гетероструктурами I типа. С указанным эффектом связано доминирование в спектрах фотолюминесценции линий, обусловленных прямыми в реальном пространстве переходами внутри островков.

4. Установлено, что линии фотолюминесценции от островков GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄, имеют тонкую структуру, связанную с неоднородным распределением Ge по объёму островков (вершины островков обогащены Ge).
5. Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке технологии выращивания методом СМЛЭ в среде GeH₄ приборных структур на основе GeSi/Si(001) для кремниевой оптоэлектроники.

На защиту выносятся следующие основные положения

1. При выращивании самоформирующихся островков GeSi/Si(001) методом СМЛЭ в среде GeH₄ при температурах подложки $T_g = 700 \div 800^\circ\text{C}$ и давлении GeH₄ в ростовой камере $5 \times 10^{-4} \div 1,5 \times 10^{-3}$ Торр зарождение островков происходит по механизму Странски-Крастанова, но при дальнейшем росте морфология островков определяется процессами переконденсации.
2. В спектрах фотолюминесценции гетероструктур с самоформирующимися островками GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄, доминируют линии, связанные с прямыми в реальном пространстве межзонными оптическими переходами в островках.
3. Расщепление линий фотолюминесценции в островках, выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄, связано с наличием у поверхности островков области, обогащенной Ge.

Личный вклад автора в получение результатов работы

1. Обработка и анализ данных атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследований поверхностных островков GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄; разработка алгоритма и программного обеспечения (ПО) для анализа данных АСМ и определения параметров морфологии островков; количественный анализ зависимостей параметров морфологии островков от условий роста.
2. Обработка и анализ данных КРМ исследований гетероструктур GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄; разработка методики определения пространственного распределения состава и локальной упругой деформации слоя GeSi из данных КРМ; анализ зависимости состава и упруго-напряжённого состояния островков от условий роста.
3. Анализ зависимостей спектров ФЛ гетероструктур GeSi/Si(001) с самоформирующимися островками, выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄, от условий роста, температуры измерения и интенсивности фотовозбуждения; построения теоретических моделей зонной структуры островков, объясняющих экспериментальные зависимости.

Планирование экспериментов, проектирование образцов для исследования и анализ экспериментальных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертации докладывались на российских и международных научных конференциях, в том числе:

- V Всероссийской молодежной научной школе, посвященной 75-летию Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева (Саранск, 3 – 6 октября 2006 г.),
- VIII и IX Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2006 и 2007 гг.);
- XI, XII и XIV Международных симпозиумах «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2007, 2008 и 2010 гг.);
- XV & XVIII International Symposia «Nanostructures: Physics and Technology» (Novosibirsk, June 25 – 29, 2007 & St.-Petersburg, June 21-26, 2010);
- VIII Российской конференции по физике полупроводников (Екатеринбург, 3-7 октября 2007 г.);
- XIII конференции «Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение» (Нижний Новгород, 28 - 31 мая 2007 г.);
- XV Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел, РЭМ-2007 (Черноголовка, 4–7 июня 2007 г.);
- XII и XIII Нижегородских сессиях молодых ученых (Нижний Новгород, 2007 и 2008 гг.;

а также на семинарах научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (НОЦ ФТНС ННГУ) и Физического Института РАН им. П. Н. Лебедева (г. Москва).

Публикации

По теме диссертации опубликовано в соавторстве 16 печатных научных работ, включая 7 статей в ведущих научных журналах и 9 публикаций в материалах российских и международных научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 2 приложений. Объем диссертации составляет 152 страницы, включая 54 рисунка и 1 таблицу. Список цитированной литературы содержит 158 наименований. В Приложении 1 приведён список работ автора по теме диссертации. В Приложении 2 приведён листинг оригинального ПО для анализа данных АСМ исследований островков GeSi/Si(001), разработанного в рамках выполнения диссертационной работы (электронная книга MathCAD 2001 с описанием алгоритмов выделения островков на АСМ изображении и определения их геометрических параметров). Там же приведены результаты тестирования вышеописанного ПО, а также ПО других разработчиков, предназначенного для анализа АСМ изображений.

Основное содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значи-

мость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора в получение результатов работы, а также приведены сведения об апробации работы, публикациях автора по тематике диссертации, структуре и объёме диссертации.

В Главе 1 приведен обзор литературы, посвященной исследованиям процессов роста, электронной структуры и оптических свойств ГС с самоформирующимися наноструктурами GeSi/Si(001).

В Разделе 1.1 проводится сравнительный анализ различных методов эпитаксиального выращивания полупроводниковых ГС: МЛЭ, ГФЭ, ГФМЛЭ и др., в том числе СМЛЭ в среде GeH₄. Обсуждаются достоинства и недостатки различных методов применительно к выращиванию самоформирующихся наноструктур GeSi/Si.

В Разделе 1.2 рассматриваются механизмы зарождения и роста самоформирующихся наноструктур GeSi/Si(001) в процессе эпитаксиального наращивания, трансформации формы и состава островков в процессе роста, обсуждаются эффекты упорядочения в массивах наноструктур и разнообразные способы повышения поверхностной плотности и однородности наноструктур GeSi/Si(001) по размерам, описанные в литературе.

В Разделе 1.3 обсуждается зонная структура самоформирующихся наноструктур GeSi/Si(001), влияние на неё состава материала островков и упругих напряжений.

В Разделе 1.4 приведен обзор исследований ФЛ ГС с самоформирующимися наноструктурами GeSi/Si(001), в том числе её температурной зависимости, а также дислокационной ФЛ в Si и ГС GeSi/Si.

В Главе 2 описаны методики экспериментальных исследований.

В Разделе 2.1 приведено описание методики выращивания образцов для исследования. Образцы были выращены в лаб. №2 научно-исследовательского физико-технического института Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (НИФТИ ННГУ) м.н.с. НИФТИ ННГУ С. А. Денисовым и м.н.с. НИФТИ ННГУ В. Ю. Чалковым, под руководством зав. лаб. №2 НИФТИ ННГУ д.ф.-м.н. В. Г. Шенгурова. Рабочее давление в ростовой камере составляло $\sim 10^{-8}$ Торр. Источниками Si служили бруски, вырезанные из монокристаллов Si, легированных примесями *n*- и *p*-типа, нагреваемые прямым пропусканием электрического тока до ≈ 1370 °С. Скорость роста Si регулировалась температурой источника. Подложки прямоугольной формы размером $\approx 75 \times 10$ мм² вырезались из пластин Si(001) толщиной 500 μ м и располагались в камере параллельно источникам Si на расстоянии ≈ 40 мм. Буферные слои Si толщиной $\approx 0,2$ μ м выращивались при температуре подложки ≈ 1000 °С. При осаждении Ge геттерно-ионные насосы и сублимационный источник Si отключался, температура подложки T_g уменьшалась до $600 \div 800$ °С, и в ростовую камеру напускался GeH₄. Парциальное давление GeH₄ в ростовой камере p_g варьировалось в пределах $2 \times 10^{-4} \div 1,5 \times 10^{-3}$ Торр. Время напуска GeH₄ t_g составляло $0,25 \div 5$ мин, время установления давления GeH₄ ≈ 10 с. После осаждения Ge GeH₄ откачивался с помощью диффузионного насоса, время установления давления $\sim 10^{-6}$ Торр было ≈ 1 мин.

Для исследования связи между условиями роста, морфологией и оптическими свойствами островков GeSi выращивались две серии образцов. Первая, с поверхностными островками, выращивалась на подложках КДБ-0,005, буферный слой легировался В до концентрации дырок $p \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Вторая серия, для измерений ФЛ, выращивалась на подложках КДБ-12 с буферным слоем p -типа ($p \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Островки GeSi, выращенные при тех же параметрах ростового процесса (T_g , p_g и t_g), что и поверхностные островки в соответствующих образцах первой серии, зарастивались при 600 °С покровным слоем Si толщиной ≈ 40 нм.

Номинальная толщина осаждённого слоя Ge d_{Ge} при заданных T_g , p_g и t_g определялась на серии калибровочных образцов с поверхностными островками GeSi методом обратного резерфордского рассеяния (ОРР). Измерения были выполнены в НИИ ядерной физики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова м.н.с. П. С. Черных.

В разделе 2.2 описана методика исследования морфологии поверхностных островков GeSi/Si(001) методом АСМ. Большая часть АСМ измерений выполнена студенткой 5 курса Физического факультета ННГУ С. В. Сипровой при помощи АСМ Solver Pro производства компании NT MDT (Зеленоград, Россия). Использовались Si зонды NT MDT CSG-01 с радиусом кривизны острия $R_p < 10$ нм (паспортные данные). Перед каждым измерением проводились калибровка АСМ по координатам x , y и z , а также контроль значений R_p с помощью калибровочных образцов NT MDT TGZ-03 и TGT-01. Морфология массивов островков характеризовалась следующими параметрами: средняя высота островков $\langle H \rangle$, средний латеральный размер по основанию $\langle D \rangle$ (на уровне 0,1H над плоскостью смачивающего слоя) и поверхностная плотность островков N_S . Указанные параметры определялись при помощи оригинального ПО в системе MathCAD 2001. Использовался алгоритм выделения островков по порогу среза по координате z с применением компандерного алгоритма подавления шума, чтобы исключить ложную идентификацию неровностей смачивающего слоя как островков.

В Разделе 2.3 описаны методики исследования оптических свойств ГС с островками GeSi/Si(001) методами КРМ и спектроскопии ФЛ. КРМ измерения проводились при 300К с помощью микро/спектроскопического комплекса NT MDT Integra Spectra н.с. кафедры физики полупроводников и оптоэлектроники Физического факультета ННГУ А. В. Неждановым. Измерения спектров ФЛ проводились при помощи решёточного монохроматора Acton SP-558i при возбуждении Ag^+ лазером непрерывного излучения (длина волны 514 нм, мощность 1,4 Вт) доцентом кафедры кристаллографии и экспериментальной физики ННГУ к.ф.-м.н. М. О. Марычевым. Регистрация ФЛ проводилась охлаждаемым InGaAs/InP фотодиодом Acton ID441C на модулированном сигнале при помощи цифрового синхронного детектора Stanford Research Systems SR-810. Для измерения температурной зависимости ФЛ в диапазоне температур 9 – 300 К использовался гелиевый криостат замкнутого цикла Janis CCS-150. Для измерения ФЛ при 77 К образцы помещались в молибденитовый сосуд Дьюара с жидким азотом.

Глава 3 посвящена исследованию морфологии гетероструктур с поверхностными островками GeSi/Si(001) методом АСМ.

В Разделе 3.1 приводятся результаты исследований связи параметров морфологии островков с условиями роста.

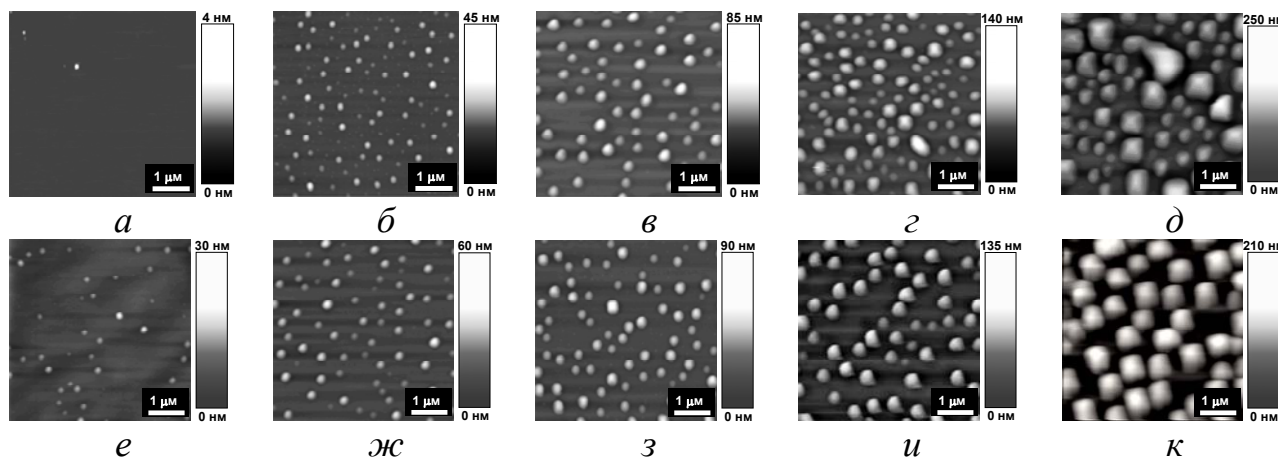


Рис. 1. АСМ изображения поверхностных островков GeSi/Si(001). $p_g=9 \times 10^{-4}$ Торр. $T_g, ^\circ\text{C}$: $a-d - 700$; $e-k - 800$. t_g , мин: $a, e - 0,25$; $б, ж - 0,5$; $в, з - 1$; $г, и - 2$; $д, к, - 5$.

Установлено, что зарождение островков происходит по механизму Странски-Крастанова. На Рис. 1 приведены 2 серии АСМ изображений ГС с поверхностными островками GeSi/Si(001), выращенных при различных t_g для $T_g=700$ и 800°C . Для $T_g=700^\circ\text{C}$ при $t_g=0,25$ мин на поверхности образуется двумерный слой Ge (Рис. 1а), но его толщина $d_{\text{Ge}}=4$ монослоя (МС), по данным ОРР, не достигает критической толщины (т. наз. толщины смачивающего слоя d_{WL}), при которой происходит переход от слоевого роста к трехмерному. При выращивании ГС с наноструктурами Ge/Si(001) методом МЛЭ d_{WL} уменьшается от 5 до 3 МС при увеличении T_g от 500 до 800°C [10]. При $t_g=0,5$ мин ($d_{\text{Ge}}=4,8$ МС) на поверхности смачивающего слоя начинают формироваться островки (Рис. 1б). При $T_g=800^\circ\text{C}$ формирование островков наблюдается уже при $t_g=0,25$ мин (Рис. 1е).

При дальнейшем росте существенное влияние на морфологию островков оказывают процессы переконденсации (оствальдовского созревания) по механизму, аналогичному механизму Лифшица-Слэзова-Вагнера (ЛСВ) [11], когда большие островки растут за счет растворения меньших путём обмена адатомами посредством поверхностной диффузии. Зависимости $\langle H \rangle$ и $\langle D \rangle$ от t_g (Рис. 2а и б) могут быть аппроксимированы степенной функцией вида $y = At^b$ с $b \approx 1/2$, что является характерным признаком для процесса переконденсации по механизму ЛСВ. В то же время N_s убывает с ростом t_g также по степенному закону (Рис. 2в).

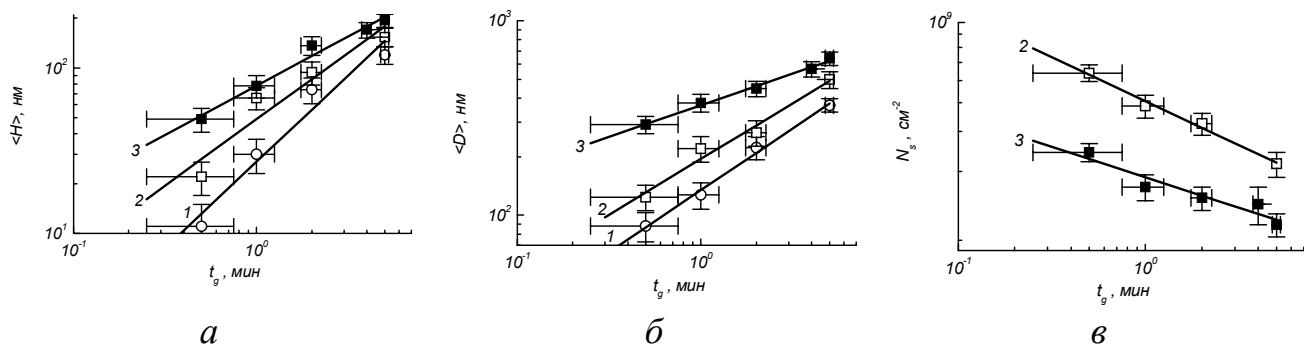


Рис. 2. Зависимости $\langle H \rangle$ (а), $\langle D \rangle$ (б) и N_s (в) для островков GeSi/Si(001) от t_g . T_g , °C: 1, 2 — 700; 3 — 800. p_g , 10^{-4} Торр: 1 — 5.0; 2, 3 — 9.0.

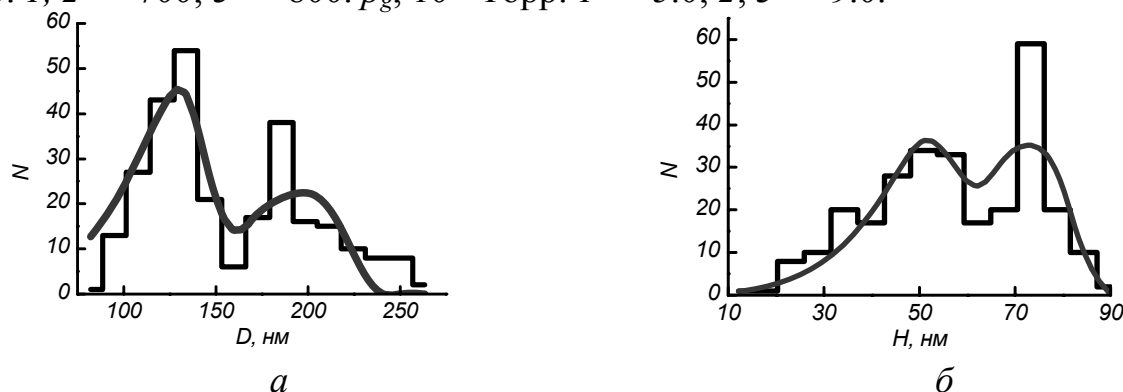


Рис. 3. Гистограммы распределения островков GeSi/Si(001) по D (а) и по H (б) и их аппроксимация суперпозицией двух функций распределения Лифшица-Слэзова $P(D/\langle D \rangle)$ [$P(H/\langle H \rangle)$] [12]. $T_g = 700^\circ\text{C}$, $p_g = 1,5 \times 10^{-3}$ Торр, $t_g = 2$ мин.

Процесс переконденсации стимулирует газовая атмосфера в ростовой камере, наличие которой приводит к пассивации ненасыщенных связей на растущей поверхности атомами водорода, отщеплённых при пиролизе GeH_4 [13]. В свою очередь, это приводит к увеличению скорости поверхностной диффузии по сравнению с МЛЭ при тех же значениях T_g [14].

Как правило, островки имели бимодальное распределение по размерам (Рис. 3). Подобное распределение характерно и для островков, выращенных методом МЛЭ, оно связано с сосуществованием на поверхности островков двух форм: пирамидальных и куполообразных [15]. На поверхности ГС, выращенных методом СМЛЭ в среде GeH_4 , при $d_{\text{Ge}} > 10$ МС островки меньших размеров были подобны куполообразным островкам, получаемым методом МЛЭ (Рис. 4). Островки больших размеров имели форму полуоктаэдров, ограниченных плоскостями (101) – т. наз. super-dome островков [16]. Образование подобных островков наблюдалось ранее в процессе послеростового отжига ГС, выращенных методом МЛЭ [16]. При дальнейшем увеличении d_{Ge} размеры крупных островков увеличиваются до $400 \div 800$ нм, $\langle H \rangle$ — до $130 \div 150$ нм и начинается их коалесценция (Рис. 1д, к).

В разделе 3.2 приводятся результаты количественного анализа морфологии разрывов смачивающего слоя вокруг островков (Рис. 5а). Подобные разрывы наблюдались ранее в структурах, выращенных методом МЛЭ; было найдено, что глубина разрыва пропорциональна D [17]. Такая же зависимость наблюдалась и для островков, выращенных методом СМЛЭ в среде GeH_4 (Рис. 5б).

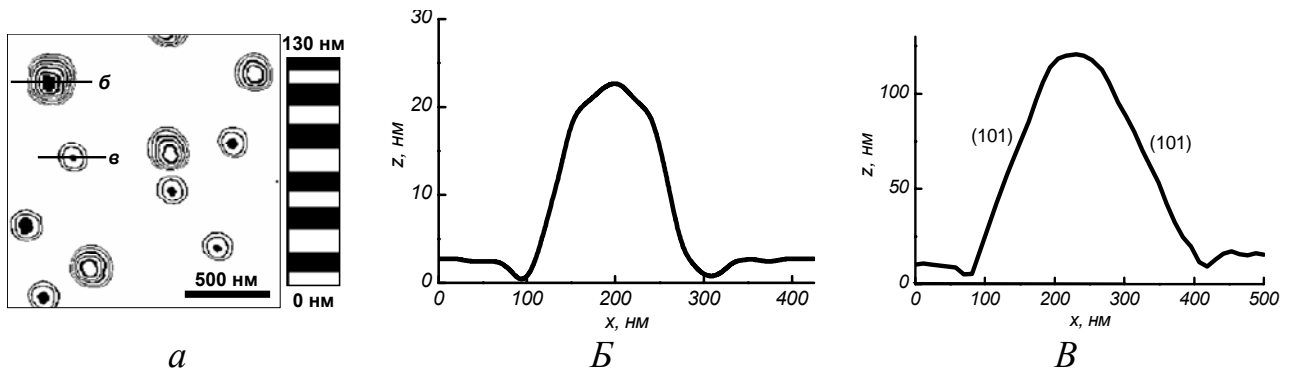


Рис. 4. АСМ изображение ГС GeSi/Si(001) (а); профили куполообразных (б) и super-dome (в) островков. $T_g=700^\circ\text{C}$, $p_g=9\times 10^{-4}$ Торр, $t_g=2$ мин ($d_{\text{Ge}}\approx 27$ МС).

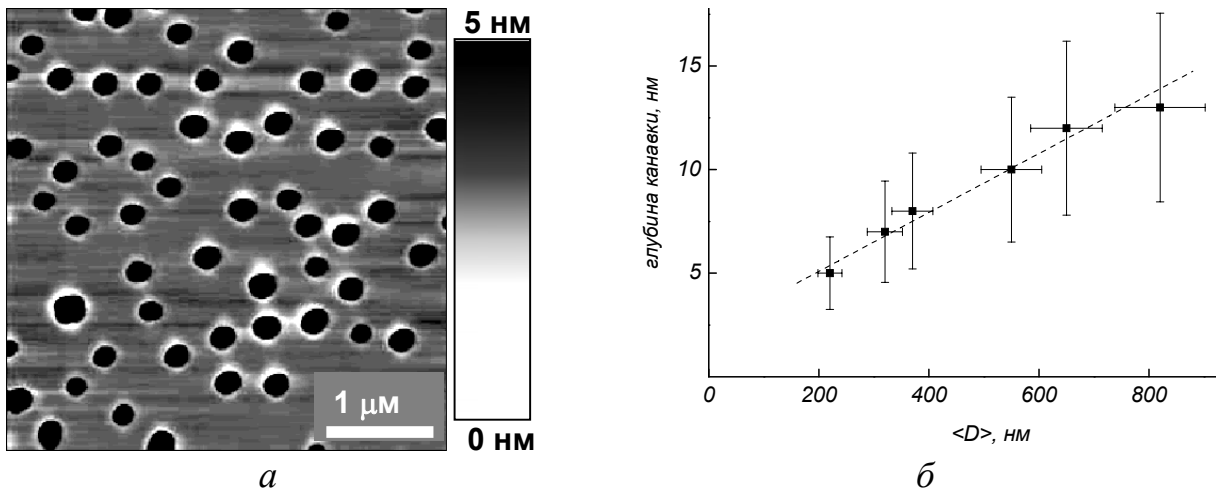


Рис. 5. а - АСМ изображение поверхности ГС с островками GeSi/Si(001); б - зависимость средней глубины разрывов смачивающего слоя вокруг островков от среднего латерального размера островков D . $T_g = 800^\circ\text{C}$, $p_g=9\times 10^{-4}$ Торр, $t_g=2$ мин.

Формирование разрывов смачивающего слоя, в частности, связанная с ним диффузия Si из подложки в объём островков являются важными механизмами релаксации упругих напряжений в наноструктурах GeSi/Si(001) [18]. При росте ГС с островками GeSi/Si(001) методом СМЛЭ в среде GeH₄, разрывы играют важную роль в механизме перекоонденсации, ограничивая приток адатомов к островку. На это указывает наличие вздутия на поверхности смачивающего слоя в виде кольцевого вала по внешнему краю разрыва (рис. 4б, в). Наряду с повышением скорости поверхностной диффузии, это приводит к тому, что скорость массообмена между островками лимитируется скоростью отрыва/присоединения адатомов к островкам, как это и предполагается в модели Вагнера. В противном случае, когда скорость массообмена лимитируется скоростью поверхностной диффузии, процесс перекоонденсации описывается моделью Чакраверти [19].

В Главе 4 приводятся результаты исследований состава и упругих напряжений в островках GeSi/Si(001) методом КРМ.

В разделе 4.1 проведён сравнительный анализ АСМ и конфокальных микроскопических (КМ) изображений ГС с самоформирующимися островками

GeSi/Si(001), выращенных в различных условиях, проанализирована возможность визуализации отдельных островков GeSi на КМ изображениях.

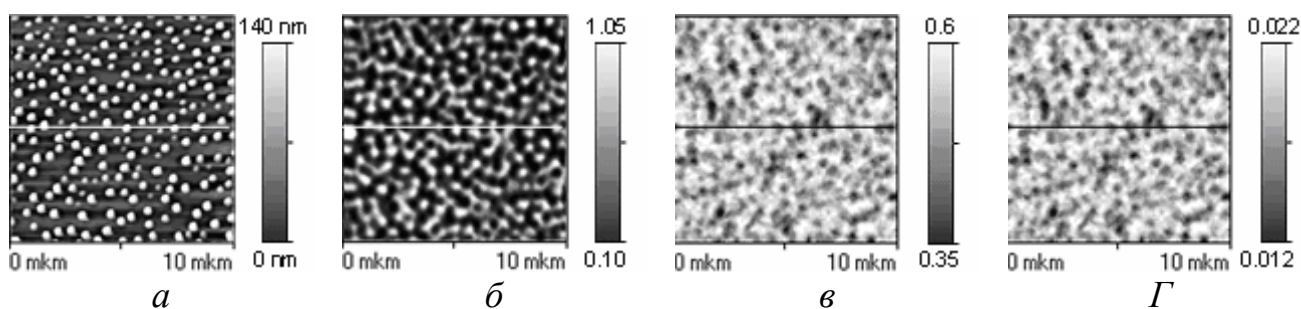


Рис. 6. АСМ (а) и КМ (б) изображения ГС с островками GeSi/Si(001); карты распределения x (в) и $|\epsilon|$ (г) по поверхности образца. $T_g=800^\circ\text{C}$, $t_g=2$ мин.

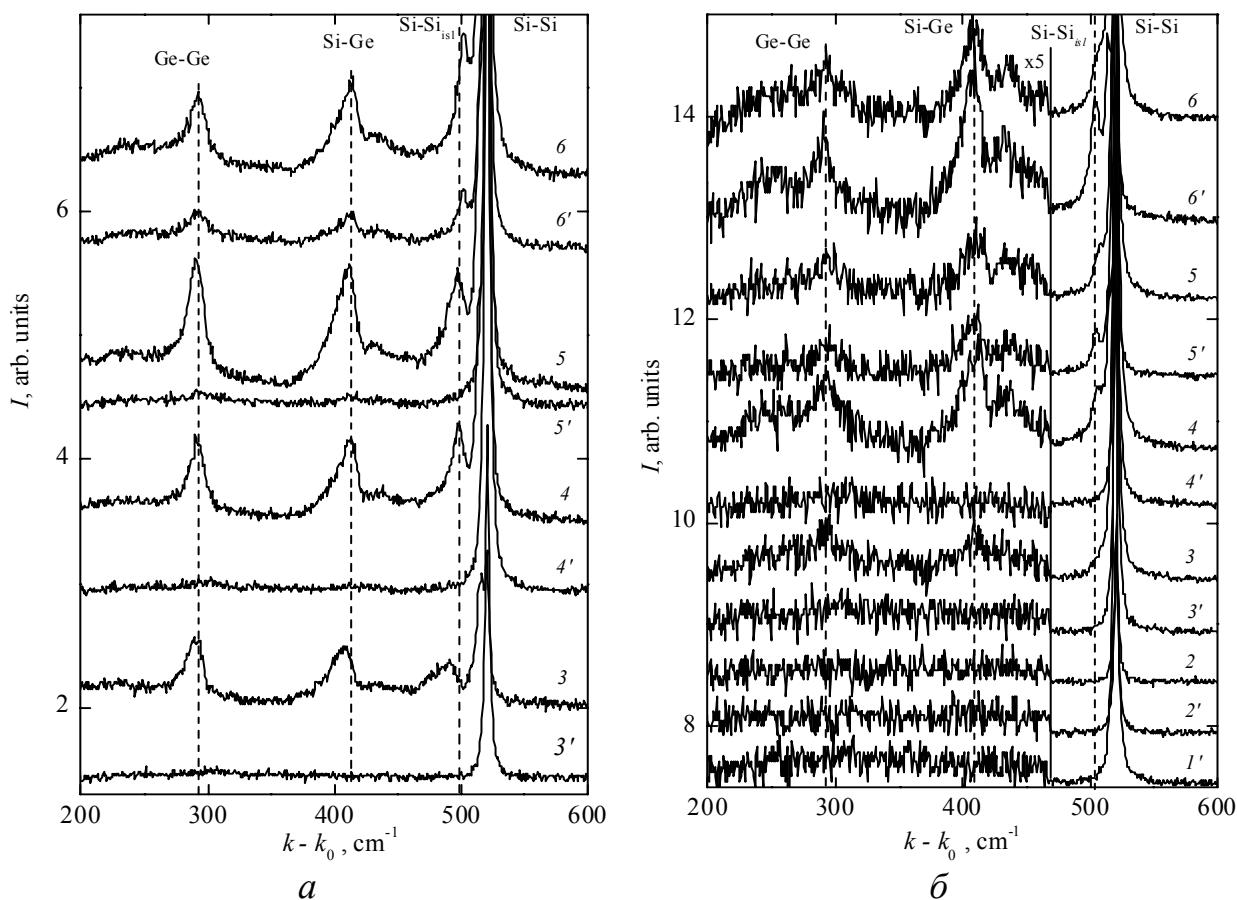


Рис. 7. Локальные спектры КРС ГС с самоформирующимися островками GeSi/Si(001), измеренные в центре островков (I—б) и между островками (I'—б'). T_g , $^\circ\text{C}$: а—700, б—800; t_g , мин: 1—0,25; 2—0,5; 3—1,0; 4—2,0; 5—4,0; 6—5,0.

На КМ изображениях ГС с выращенными островками (рис. 6б) наблюдаются особенности, идентифицированные как островки GeSi. Сравнение КМ изображений с АСМ изображениями ГС с поверхностными островками GeSi, выращенными в тех же условиях (рис. 6а), показало, что N_s на соответствующих изображениях приблизительно одинакова, однако КМ изображения островков более размыты, изображения соседних островков зачастую сливаются между собой, что связано с меньшим пространственным разрешением КМ.

Оценка последнего по [20] составляет $\approx 0,44\lambda/nN_A \approx 200$ нм ($N_A=0,95$ — числовая апертура объектива, $n=1$ — показатель преломления среды, $\lambda=473$ нм — длина волны лазерного излучения).

В разделе 4.2 приводятся результаты анализа локальных спектров КРС ГС с островками GeSi/Si(001) и определения из них состава материала индивидуальных островков. На рис. 7 приведены локальные спектры КРС, измеренные в островках (1—6) и между ними (1'—6'). В спектрах наблюдались пики вблизи 300 см^{-1} , 400 см^{-1} и 500 см^{-1} , соответствующие колебательным модам Ge—Ge и Si—Ge в $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и Si—Si в напряжённом материале островков или в покровном слое.

Для определения x использовались две различные методики:

- 1) По спектральным положениям пиков Ge—Ge и Si—Ge. Согласно [21], последние связаны с x и относительной деформации GeSi $\varepsilon=(a_s-a_r)/a_r$, где a_s и a_r — параметры решётки в деформированном и свободном состояниях, соответственно, соотношениями

$$\begin{aligned} x &\approx 0.154k_{\text{Ge-Ge}} - 0.103k_{\text{Si-Ge}} - 2.209, \\ \varepsilon &\approx (3.804k_{\text{Ge-Ge}} - 4.286k_{\text{Si-Ge}}) \cdot 10^{-3} + 0.642. \end{aligned} \quad (1)$$

- 2) по соотношению интенсивностей пиков Ge—Ge и Si—Ge, используя градуировочные графики, приведённые в [21].

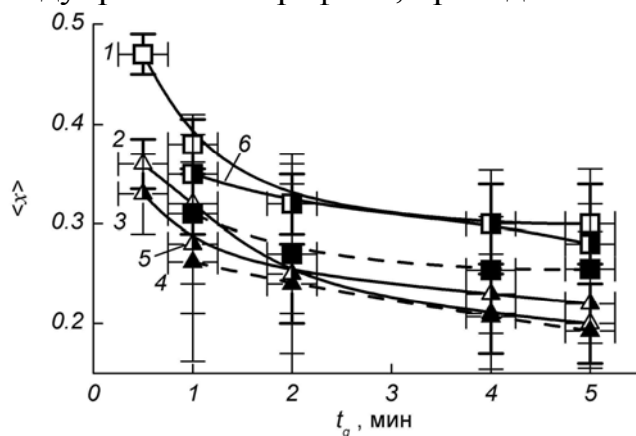


Рис. 8. Зависимость $\langle x \rangle$ в объеме островков $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$, определённого методами КРМ (1—4) по спектральному положению (1, 3) и по соотношению интенсивностей (2, 4) пиков Ge—Ge и Ge—Si и спектроскопии ФЛ (5, 6), от t_g . $T_g, ^\circ\text{C}$: 1, 3, 5 — 700; 2, 4, 6 — 800.

С увеличением t_g значения $\langle x \rangle$, полученные с применением обеих методик, уменьшаются (рис. 8), что связано с увеличением времени диффузии Si из подложки в объём островка. При $T_g=800^\circ\text{C}$ $\langle x \rangle$ меньше, чем при 700°C , что связано с увеличением скорости диффузии Si при повышении T_g . Данные зависимости согласуются с литературными данными [3, 4, 8].

Полученные методом КРМ карты распределения $k_{\text{Ge-Ge}}$ и $k_{\text{Si-Ge}}$ по поверхности образцов были пересчитаны по формулам (1) в карты распределения x и ε (рис. 6в и г, соответственно). На них наблюдаются островки GeSi в виде участков с пониженными x и $|\varepsilon|$ на фоне псевдоморфного смачивающего слоя с большим содержанием Ge.

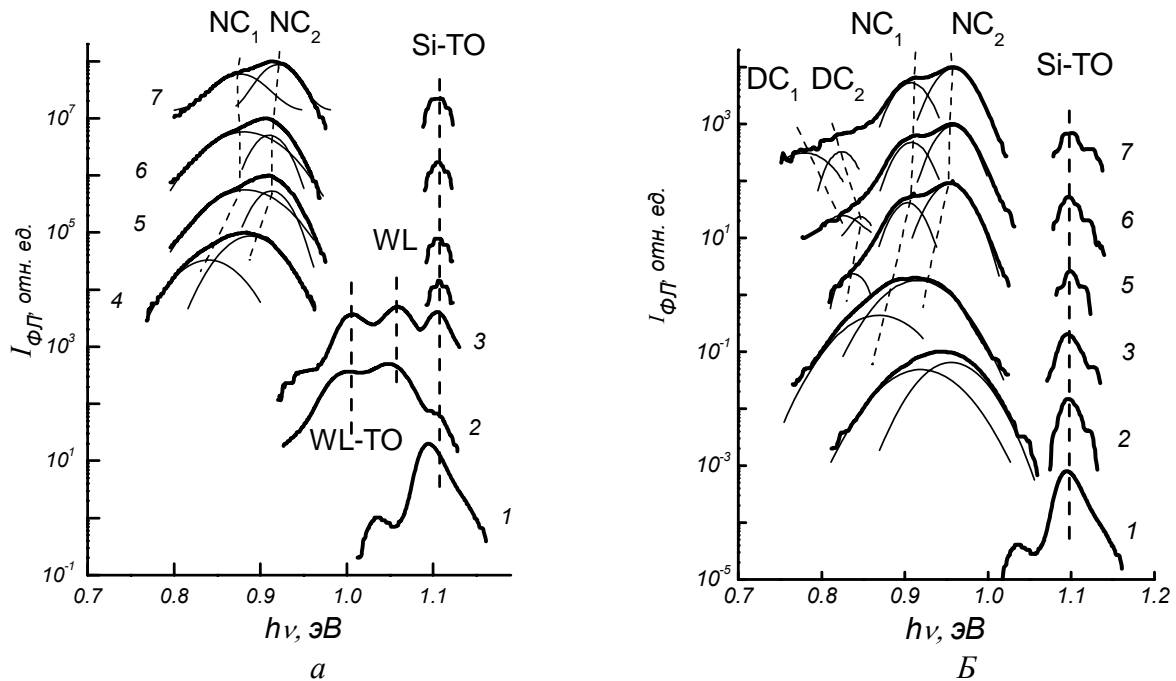


Рис. 9. Спектры ФЛ (77 К) ГС GeSi/Si. $p_g = 9 \times 10^{-4}$ Торр, T_g , °C: а — 700; б — 800. t_g , мин: 1 — 0; 2 — 0,25; 3 — 0,5; 4 — 1; 5 — 2; 6 — 4; 7 — 5.

В Главе 5 излагаются результаты исследований спектров ФЛ ГС с островками GeSi/Si(001). В разделе 5.1 приводятся результаты исследования зависимости спектров ФЛ от условий роста. Полученные зависимости спектров ФЛ от T_g и d_{Ge} (рис. 9) сходны с приведенными в литературе для ГС, выращенных методами МЛЭ и ГФЭ. В спектре ФЛ (77К) образца, выращенного при $T_g=700^\circ\text{C}$, $t_g=0,25$ мин ($d_{Ge} \approx 4,0$ МС, рис. 9а, кривая 2), помимо линии краевой ФЛ Si с участием ТО фонона Si-TO (энергия максимума $h\nu_m \approx 1,107$ эВ), наблюдаются линии с $h\nu_m \approx 1,06$ и $1,00$ эВ, связанные с непрямыми в реальном пространстве фоновыми и бесфононными переходами из состояний c -зоны Si на размерноквантованные состояния тяжелых дырок в смачивающем слое (WL и WL-TO, соответственно). С увеличением d_{Ge} в спектре ФЛ появляется линия с $h\nu_m \approx 0,93$ эВ, связанная с переходами на дырочные состояния в островках GeSi (рис. 9а, кривая 3). При $t_g=1$ мин (рис. 9а, кривая 4) линии ФЛ от смачивающего слоя исчезают, и в спектре доминируют линии, связанные с островками. Эти линии могут быть разложены на две гауссовы компоненты (NC_1 и NC_2). Расщепление линий ФЛ в островках GeSi/Si(001) обычно наблюдается в ГС, выращенных методом МЛЭ, где оно связывается с наличием фоновых и бесфононных переходов [22]. В данном случае такая интерпретация неприемлема по следующим причинам:

- 1) интенсивность пика NC_2 больше, чем NC_1 ; соотношение интенсивностей не меняется в диапазоне температур $T=9 \div 300\text{K}$;
- 2) ширина компонент NC_1 и NC_2 различна и меняется от спектра к спектру;
- 3) разность энергий максимумов NC_1 и NC_2 также варьирует от спектра к спектру в пределах $27 \div 52$ мэВ и не соответствует энергиям фононов в $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с соответствующим значением x .

Расщепление линий ФЛ в исследованных образцах связано с неоднородностью распределения Ge по объёму островков. Ранее методом растровой Оже-

микроскопии (РОМ) было установлено, что в островках GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄, тонкий (~1 нм) приповерхностный слой вблизи вершины островка обогащён Ge ($x \rightarrow 1$) [23].

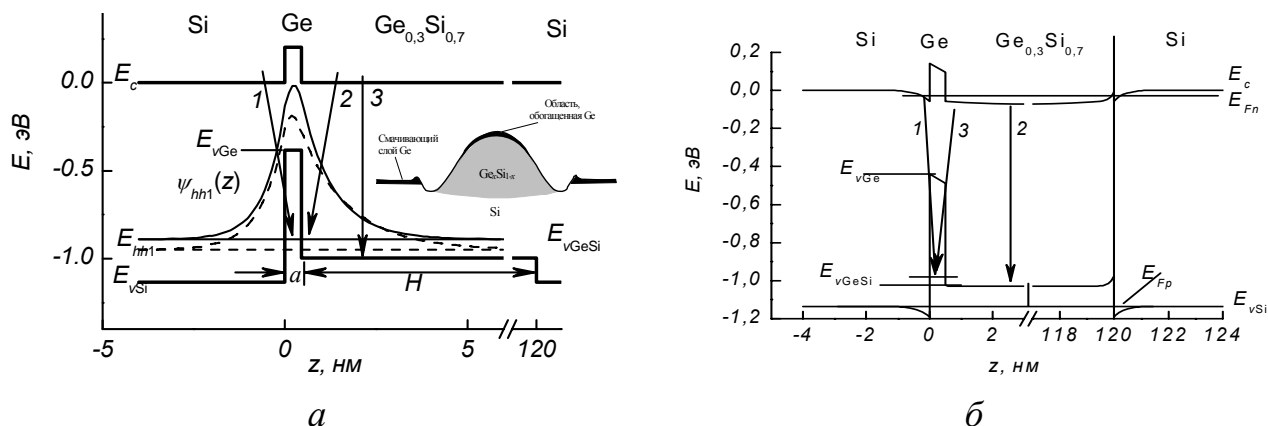


Рис. 10. Модельные зонные диаграммы (77К) островка Ge_{0,3}Si_{0,7}/Si(001) в приближении плоских зон (а) и с учётом заряда островка избыточными носителями (б). Показаны уровни энергии и огибающие основного состояния тяжёлых дырок в островках для случаев бесфононного (сплошная линия) и фононного (пунктир) переходов. На вставке: схема распределения Ge по объёму наноструктур Ge_xSi_{1-x}/Si, выращенного методом СМЛЭ в среде GeH₄, по данным РОМ (качественно).

В объёме островков $x < 0,5$ и распределение Ge по глубине островка более однородно (см. вставку на рис. 10а). Такое распределение Ge энергетически выгодно, поскольку в вершине островка концентрируются напряжения растяжения. В островках, выращенных методом МЛЭ в сходных условиях, повышения концентрации Ge вблизи поверхности не наблюдалось, что связано с большим коэффициентом поверхностной диффузии в процессе СМЛЭ в среде GeH₄ по сравнению с МЛЭ. В связи с вышеизложенным, линия ФЛ NC₂ была связана с прямыми в реальном пространстве переходами из состояний *c*-зоны в состояния *v*-зоны внутри островков (переход 3 на рис. 10), а линия NC₁ — с непрямыми в реальном пространстве переходами из состояний в КЯ вблизи границы островка с покровным слоем Si на размерно-квантованные дырочные состояния в прослойке Ge. Была сделана оценка толщины прослойки Ge *a* по энергии максимума линии NC₁ путём решения одномерного уравнения Шрёдингера в приближении эффективной массы [24]. Было получено значение $a \sim 1$ нм, что согласуется с данными РОМ.

Для однозначной интерпретации линий ФЛ в островках необходимо учесть эффект заполнения островков избыточными носителями при измерении ФЛ. На рис. 10б представлена зонная диаграмма островка в условиях сильного фотовозбуждения, рассчитанная путём совместного решения уравнений непрерывности и Пуассона в стационарном неравновесном состоянии. Заряд избыточных дырок, локализованных в островках, приводит к изгибу зон на их границах. При достаточно больших размерах островков и сильном фотовозбуждении величина изгиба зон может превышать разрыв *c*-зоны ΔE_c на границе GeSi/Si, так что островок становится ГС I рода.

Данный эффект, наряду со значительными размерами островка, приводит к доминированию в спектрах ФЛ в островках прямых в реальном пространстве переходов внутри островка (компонента NC_2). Островки, выращенные методом МЛЭ в сходных условиях, характеризуются, как правило, меньшими размерами и большими значениями x (и, как следствие, ΔE_c). Как следствие, заряд избыточных дырок, локализованных в таких островках, экранируется электронами в КЯ на границах островков [25], и в спектрах ФЛ доминируют переходы, непрямые в реальном пространстве.

Поскольку интеграл перекрытия огибающих основного состояния тяжёлых дырок в прослойке Ge с электронными состояниями в треугольной КЯ вблизи границы указанной прослойки с покровным слоем Si существенно больше, чем с огибающей электронных состояний в островке, компонента NC_1 была связана с переходами (1) (рис. 10).

С увеличением t_g линии ФЛ в островках смещаются в коротковолновую область спектра (рис. 9а, кривые 4–7; рис. 9б, кривые 3–7), что связано с уменьшением x в объёме островков вследствие диффузии Si из подложки в процессе роста. По значениям $h\nu_m$ компонент NC_2 было оценено значение $\langle x \rangle$ в объёме островков по модели [26]. Результаты, представленные на рис. 8, согласуются с полученными методом КРМ.

В разделе 5.2 изложены результаты исследования зависимости спектров ФЛ островков GeSi/Si(001) от интенсивности фотовозбуждения.

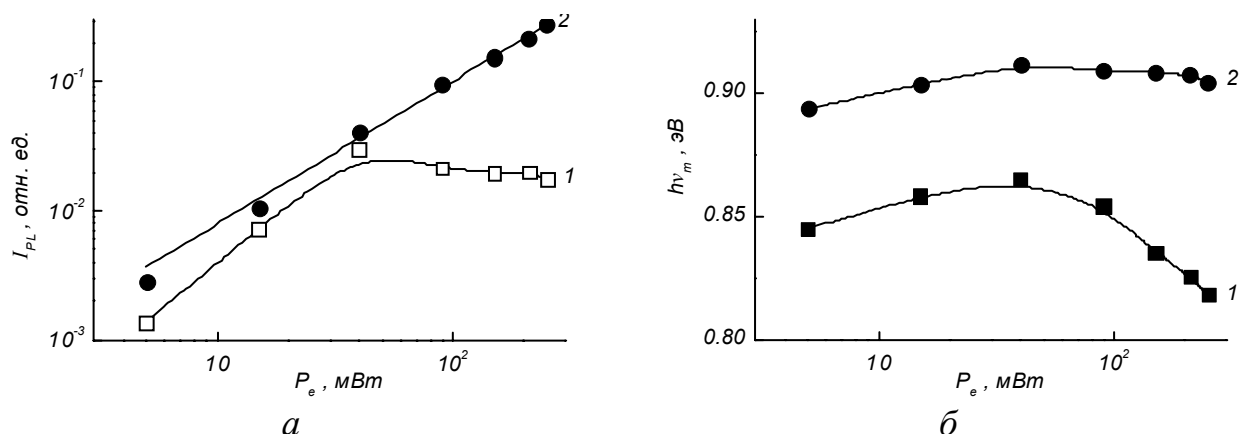


Рис. 11. Зависимости интенсивности (а) и спектрального положения максимумов (б) компонент линий ФЛ (77 К) в островках GeSi/Si от P_e . $p_g=9 \times 10^{-4}$ Торр, $T_g=700^\circ\text{C}$, $t_g=1,0$ мин ($d_{Ge} \approx 10,3$ мс). 1 — NC_1 ; 2 — NC_2 .

Интенсивность компоненты NC_2 практически пропорциональна мощности возбуждения P_e (рис. 11а), что соответствует линейной рекомбинации в островках ($n \ll p$). интенсивность компоненты NC_1 при низких уровнях возбуждения также почти пропорциональна P_e , однако при $P_e > 40$ мВт зависимость $I_{PL}(P_e)$ испытывает насыщение, что было связано с заполнением основного состояния в треугольной КЯ на границе обогащённой Ge прослойки с покровным слоем Si.

Энергия максимумов обеих компонент NC_1 и NC_2 в области $P_e < 40$ мВт возрастает с ростом P_e (рис. 11б), что связано с ростом заполнения островков электронами и дырками [27]. При $P_e > 40$ мВт $h\nu_m$ компоненты NC_2 испытывает

насыщение, тогда как компоненты NC_1 — уменьшается, что связано с увеличением напряжённости электрического поля на границе островков с увеличением P_e . Указанный эффект можно рассматривать как своеобразное проявление квантоворазмерного эффекта Штарка.

В разделе 5.3 изложены результаты исследования температурной зависимости ФЛ в ГС с островками GeSi/Si. ФЛ в островках наблюдалась при T от 9 до 250К (рис. 11). Характер температурной зависимости интенсивности линий ФЛ в островках $I_{PL}(T)$ соответствует типичным зависимостям, приводимым в литературе для ГС с наноструктурами GeSi/Si(001), выращенных методом МЛЭ [27]. Для аппроксимации зависимости $I_{PL}(T)$ использовалась эмпирическая формула [28]

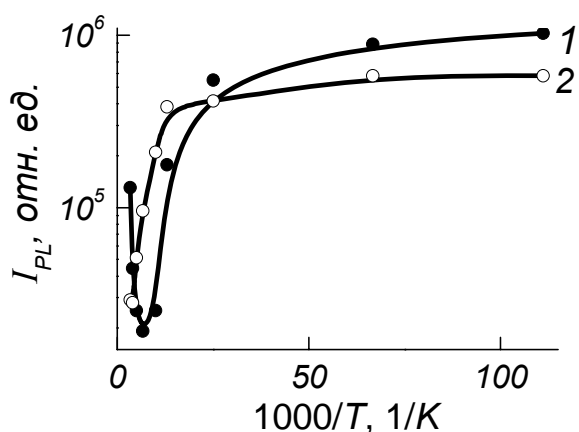


Рис. 12. Температурные зависимости интенсивности линий ФЛ Si-TO (1) и NC_2 (2) в ГС с самоформирующимися островками GeSi/Si(001). $p_g=9 \times 10^{-4}$ Торр, $T_g=700^\circ\text{C}$, $t_g=1$ мин ($d_{Ge} \approx 10,3$ нм).

$$I_{PL}(T) = \frac{1}{1 + C_1 \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right) + C_2 \exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right)}, \quad (2)$$

где E_1 и E_2 — характеристические энергии температурного гашения ФЛ, C_1 и C_2 — константы. Так, для зависимости $I_{PL}(T)$ на рис. 12 определённые методом аппроксимации значения $E_1 \approx 29$ мэВ и $E_2 \approx 130$ мэВ. Последнее значение соответствует расчётной высоте потенциального барьера для лёгких дырок в островках (с учётом упругих отношений и заряда островка избыточными носителями). Это свидетельствует, что основным механизмом температурного гашения ФЛ в островках является термоактивированная эмиссия лёгких дырок из островков. Подобный эффект отмечен в [29] для КЯ AlGaAs/GaAs(001).

В Заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Установлена зависимость морфологии самоформирующихся островков GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH_4 , от параметров процесса роста. Показано, что определяющее влияние на морфологию островков оказывают процессы переконденсации по механизму, сходному с механизмом Лифшица-Слёзова-Вагнера.
2. Методом конфокальной рамановской микроскопии исследована зависимость состава и упруго-напряжённого состояния самоформирующихся островков GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде германа, от условий роста. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность измерения локальных рамановских спектров индивидуальных островков GeSi/Si(001). Обнаружено уменьшение концентрации Ge в мате-

риале островков с увеличением температуры и времени роста, связанное с диффузией Si в объём островков в процессе роста.

3. Методом спектроскопии фотолюминесценции установлена зависимость энергетического спектра самоформирующихся островков GeSi/Si(001), выращенных методом СМЛЭ в среде GeH₄, от условий роста. Установлено, что расщепление линий ФЛ, обусловленных излучательной рекомбинацией в островках GeSi, связано с неоднородным распределением Ge по объёму островков (поверхность островков обогащена Ge).
4. Показано, что доминирование в спектрах фотолюминесценции линий, обусловленных переходами внутри островков GeSi (прямых в реальном пространстве) связано с влиянием заряда островков избыточными носителями в условиях сильного фотовозбуждения.

Список опубликованных работ автора по теме диссертации

[A1] Филатов, Д. О. Фотолюминесценция самоформирующихся наноструктур GeSi/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде германа / Д. О. Филатов, М. В. Круглова, М. А. Исаков, С. В. Сипрова, М. О. Марычев, В. Г. Шенгуров, С. П. Светлов, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов // Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. Серия «Физика твердого тела». — 2007. — №1. — С. 42 – 46.

[A2] Филатов, Д. О. Морфология и фотолюминесценция самоформирующихся наноструктур GeSi/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде германа / Д. О. Филатов, М. В. Круглова, М. А. Исаков, С. В. Сипрова, М. О. Марычев, В. Г. Шенгуров, С. П. Светлов, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов // Известия РАН. Серия физическая. — 2008. — Т. 72, №2. — С. 267 – 270.

[A3] Филатов, Д. О. Фотолюминесценция наноструктур GeSi/Si, формирующихся в процессе сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде германа / Д. О. Филатов, М. В. Круглова, М. А. Исаков, С. В. Сипрова, М. О. Марычев, В. Г. Шенгуров, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов // Физика и техника полупроводников. — 2008. — Т. 42, №9. — С. 1116 – 1121.

[A4] Филатов, Д. О. Фотолюминесценция самоформирующихся наноструктур в гетероструктурах GeSi/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде GeH₄ / Д. О. Филатов, М. В. Круглова, М. А. Исаков, С. В. Сипрова, М. О. Марычев, В. Г. Шенгуров, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов // Неорганические материалы. — 2008. — Т. 44, №11. — С. 1287 – 1292.

[A5] Филатов, Д. О. Фотоэлектрические свойства гетероструктур с самоформирующимися нанокластерами GeSi/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде GeH₄ / Д. О. Филатов, М. В. Круглова, М. А. Исаков, А. П. Горшков, В. Г. Шенгуров, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов // Поверхность: рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2009. — №9. — С. 58 – 67.

- [A6] Машин, А. И. Конфокальная рамановская микроскопия самоформирующихся островков GeSi/Si(001) / А. И. Машин, А. В. Нежданов, Д. О. Филатов, М. А. Исаков, В. Г. Шенгуров, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов // Физика и техника полупроводников. — 2010. — Т. 44, №11. — С. 1552 - 1558.
- [A7] Исаков, М. А. Особенности процесса роста и фотолюминесценции самоформирующихся островков GeSi/Si(001), выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде GeH₄ / М. А. Исаков, Д. О. Филатов, М. О. Марычев, В. Г. Шенгуров, В. Ю. Чалков, С.А. Денисов // Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. — 2010. — №5.
- [A8] Филатов, Д. О. Рост самоформирующихся nanoостровков GeSi/Si методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде германа / Д. О. Филатов, М. А. Исаков, М. В. Круглова // Материалы nano-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: Докл. V Всероссийской молодежной научной школы, Саранск. 3 – 6 окт. 2006. — Саранск, 2006. — С. 39.
- [A9] Исаков, М. А. Исследование зависимости морфологии самоформирующихся nanoостровков GeSi/Si от условий выращивания методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде германия. / М. А. Исаков, М. В. Круглова, С. В. Сипрова, Д. О. Филатов // VIII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике: Докл., С.-Петербург, 27 нояб. – 1 дек. 2006. — СПб, 2006. — С. 45.
- [A10] Филатов, Д. О. Морфология и фотолюминесценция самоформирующихся nanoостровков GeSi/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде германа / Д. О. Филатов, М. В. Круглова, М. А. Исаков, С. В. Сипрова, М. О. Марычев, В. Г. Шенгуров, С. П. Светлов, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов // Нанofизика и наноэлектроника: Докл. Междунар. симп., Н.Новгород, 15 – 19 мар. 2007. — Н. Новгород, 2007. — С. 317 – 318.
- [A11] Филатов, Д. О. Фотолюминесценция самоформирующихся nanoостровков GeSi/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде германа / Д. О. Филатов, М. В. Круглова, С. В. Сипрова, М. А. Исаков, М. О. Марычев, В. Г. Шенгуров, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов // Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение: Докл. XIII Всеросс. конф., Н. Новгород, 28 – 31 мая 2007. — Н. Новгород, 2007. — С. 246.
- [A12] Круглова, М. В. Исследование поверхностных nanoостровков GeSi/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде германа, методом атомно-силовой микроскопии / М. В. Круглова, Д. О. Филатов, С. В. Сипрова, М. А. Исаков, В. Г. Шенгуров, С. П. Светлов, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов // РЭМ - 2007: Докл. XV Росс. симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел: Черно-головка, 4 – 7 июн. 2007. — М., 2007. — С. 35 –36.
- [A13] Kruglova, M. V. Growth and photoluminescence of the SiGe/Si self-assembled nanoclusters grown by Sublimation Molecular Beam Epitaxy in GeH₄ ambient / M. V. Kruglova, D. O. Filatov, S. V. Siprova, M. A. Isakov, M. O. Marychev, V. G. Shengurov, S. P. Svetlov, V. Yu. Chalkov, S. A. Denisov // Nanostructures: Physics and Technology: Proc. XV Int. Symp.: Novosibirsk, Russia, Jun. 25 – 29, 2007. — Novosibirsk, 2007. — P. 255 – 256.

- [A14] Филатов, Д. О. Фотоэлектрические свойства гетероструктур с самоформирующимися наноструктурами GeSi/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде GeH₄ / Д. О. Филатов, М. В. Круглова, М. А. Исаков, А. П. Горшков, В. Г. Шенгуров, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов // *Нанопизика и нанозлектроника: Докл. XII Международ. симп.: Н. Новгород, 25 – 29 мар. 2008.* — Н.Новгород, 2008. — С. 507 – 508.
- [A15] Машин, А. И. Конфокальная рамановская микроскопия самоформирующихся островков GeSi/Si(001) / А. И. Машин, А. В. Нежданов, Д. О. Филатов, М. А. Исаков, В. Г. Шенгуров, В. Ю. Чалков, С. А. Денисов // *Нанопизика и нанозлектроника: Докл. XIV Международ. симп.: Н. Новгород, 15 – 19 мар. 2010.* — Н. Новгород, 2010. — С. 250 – 251.
- [A16] Mashin, A. I. Confocal Raman Microscopy of the self-assembled GeSi/Si(001) nanoislands / A. I. Mashin, A. V. Nezhdanov, D. O. Filatov, M. A. Isakov, V. G. Shengurov, V. Yu. Chalkov, S. A. Denisov // *Nanostructures: Physics and Technology: Proc. XVIII Int. Symp.: St. Petersburg, Russia, Jun. 21 – 26, 2010.* – SPb, 2010. — P. 35 – 36.

Список цитированной литературы

1. Nano-optoelectronics: physics, concepts, and devices. - Ed. M. Grundmann / Berlin: Springer, 2002. — 442 p.
2. Reed, G.T. Silicon Photonics: The State of the Art. / G.T. Reed — Blackwell: Wiley-Interscience, 2008. — 354 p.
3. Shiraki, Y. Fabrication technology of SiGe hetero-structures and their properties / Y. Shiraki, A.Sakai // *Surface Science Reports.* — 2005. — V. 59, №7-8. — P. 153 – 207.
4. Пчеляков, О. П. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства. Обзор / О. П. Пчеляков, Ю. Б. Болховитянов, А. В. Двуреченский и др. // *Физика и техника полупроводников.* — 2000. — Т. 34, №11 — С. 1281 – 1299.
5. Якимов, А. И. Ge/Si-фотодиоды и фототранзисторы со встроенными слоями квантовых точек Ge для волоконно-оптических линий связи / А. И. Якимов, А. В. Двуреченский, В. В. Кириенко и др. // *Физика твёрдого тела.* — 2005. — Т. 47, №1. — С. 37 – 40.
6. Якимов, А. И. Фотодиоды Ge/Si со встроенными слоями квантовых точек Ge для ближней инфракрасной области (1,3 – 1,5 мкм) / А. И. Якимов, А. В. Двуреченский, А. И. Никифоров и др. // *Физика и техника полупроводников.* — 2003. — Т. 37, №11. — С. 1383 – 1388.
7. Светлов, С. П. Гетероэпитаксиальные структуры Si_{1-x}Ge_x/Si(100), полученные сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксией кремния в среде GeH₄ / С. П. Светлов, В. Г. Шенгуров, В. Ю. Чалков и др. // *Известия РАН. Серия физическая.* — 2001. — Т. 65, №2. — С. 204 – 207.

8. Berbezier, I. SiGe nanostructures / I. Berbezier, A. Ronda // Surface Science Reports. — 2009. — V. 64, №1. — P. 47 – 98.
9. Максимов, Г. А. Фотоэлектрические свойства и электролюминесценция $p-i-n$ диодов на основе гетероструктур с самоорганизованными нанокластерами GeSi/Si / Г. А. Максимов, З. Ф. Красильник, Д. О. Филатов и др. // Физика твёрдого тела. — 2005. — Т. 47, №1. — С. 26 – 29.
10. Teichert, C. Self-organization of nanostructures in semiconductor heteroepitaxy / C. Teichert // Physics Reports. — 2002. — V. 365, №3. — P. 335 – 432.
11. Wagner, C. Z. Theorie der Alterung Von Niederschlagen durch Umlösen (Ostwald-Reifung) / C. Z. Wagner // Zeitschrift für Elektrochemie. — 1961. — В. 65, №7/8. — S. 581 – 591.
12. Лифшиц, И. М. О кинетике диффузионного распада пересыщенных твердых растворов / И. М. Лифшиц, В. В. Слёзов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1958. — Т. 35, №2, — С. 479 – 487.
13. Li, S. H. Gas-source molecular-beam epitaxy using Si_2H_6 and GeH_4 and X-ray characterization of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 \leq x \leq 0.33$) alloys / S. H. Li, S. W. Chung, J. K. Rhee et al // Journal of Applied Physics. — 1992. — V. 71, №10. — P. 4916 – 4919.
14. Cremona, M. Photoluminescence of Ge islands grown by Ultra High Vacuum-Chemical Vapour Deposition on Si(100) / M. Cremona, F. Racedo, R. Larciprete et al. // Brazilian Journal of Physics. — 1997. — V. 27/A, №4. — P. 181 – 184.
15. Medeiros-Ribeiro, G. / G. Medeiros-Ribeiro, A. M. Bratkovski, T. I. Kamens et al. // Science. — 1998. — V. 279, №2. — P. 353 – 355.
16. Kamins, T. I. Evolution of Ge islands on Si(001) during annealing / T. I. Kamins, G. Medeiros-Ribeiro, D. A. A. Ohlberg et al. // Journal of Applied Physics. — 1999. — V. 85, №2. — P. 1159 – 1162.
17. Sonnet, Ph. Physical origin of trench formation in Ge/Si(100) islands / Ph. Sonnet, P. C. Kelires // Applied Physics Letters. — 2004. — V. 85, №2. — P. 203 – 205.
18. Chaparro, S. A. Strain relief via trench formation in Ge/Si(100) islands / S. A. Chaparro, Y. Zhang, J. Drucker // Applied Physics Letters. — 2000. — V. 76, №24. — P. 3534 – 3536.
19. Chakraverty, B. K. Grain size distribution in thin films. Non conservative systems / B. K. Chakraverty // Journal of Physics and Chemistry of Solids. — 1967. — V. 28, №11. — P. 2413 – 2421.
20. Webb, R. H. Confocal optical microscopy / R. H. Webb // Reports on Progress in Physics. — 1996. — V. 59, №5 — P. 427 – 471.
21. Grönen, J. Phonons as probes in self-organized SiGe islands / J. Grönen, R. Carles, S. Christiansen et al. // Applied Physics Letters. — 1997. — V. 71, № 26. — P. 3856 – 3858.
22. Sunamura, H. Island formation during growth of Ge on Si(100): A study using photoluminescence spectroscopy / H. Sunamura, N. Usami, Y. Shiraki et al. // Applied Physics Letters. — 1995. — V. 66, №22. — P. 3024 – 3026.
23. Maximov, G. A. Composition analysis of single GeSi/Si nanoclusters by Scanning Auger Microscopy / G. A. Maximov, Z. F. Krasil'nik, A. V. Novikov et al. //

Nanophysics, Nanoclusters, and Nanodevices. — Ed. Kimberly S. Gehar. — New York: Nova Science, 2006. — P. 87 – 123.

24. Круглова М. В. Фотоэлектрические свойства гетероструктур с самоформирующимися наноструктурами GeSi/Si. – Дисс. канд. физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2009.

25. Красильник, З. Ф. Оптические свойства напряженных гетероструктур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ / З. Ф. Красильник, А. В. Новиков // Успехи физических наук. — 2000. — Т. 170, №3. — С. 338 – 341.

26. Алешкин, В. Я. Спектры электронов и дырок и правила отбора для оптических переходов в $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x/\text{Ge}$ / В. Я. Алешкин, Н. А. Бекин // Физика и техника полупроводников. — 1997. — Т. 31, №2. — С. 171 – 178.

27. Tsybeskov, L. Three-dimensional silicon-germanium nanostructures for CMOS compatible light emitters and optical interconnects / L. Tsybeskov, E.-K. Lee, H.-Y. Chang et al. // Advances in Optical Technologies. — 2008. — №21. — P. 8032 – 8035.

28. Kamenev, B. V. Optical properties of Stranski-Krastanov grown three-dimensional $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ nanostructures / B. V. Kamenev, J.-M. Baribeau, D. J. Lockwood et al. // Physica E. — 2005. — V. 26, №2. — P. 174 – 179.

29. Nelson, J. Steady-state carrier escape from single quantum wells / J. Nelson, M. Paxman, K. W. J. Barnham et al. // IEEE J. Quantum Electron. — 1993. — V. QE-29, №6. — p. 1460 – 1468.

Подписано к печати 10.11.2010 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1. Заказ № 690. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в Отделе дизайна и цифровой печати РИУ ННГУ им. Н.И. Лобачевского
603000, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37.