

*На правах рукописи*

Юрасов Дмитрий Владимирович

**Особенности образования наностроек в  
многослойных SiGe гетероструктурах и метод  
селективного легирования SiGe структур  
сегрегирующими примесями**

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2012 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики микроструктур Российской академии наук

Научный руководитель кандидат физико-математических наук  
Новиков Алексей Витальевич

Официальные оппоненты:

Садофьев Юрий Григорьевич  
Доктор физ.-мат. наук, профессор, в.н.с.  
ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Цырлин Георгий Эрнстович  
Доктор физ.-мат. наук, зав. лаб.  
Учреждение Российской академии наук  
Санкт-Петербургский Академический университет –  
научно-образовательный центр нанотехнологий РАН

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки институт физики полупроводников  
им. В.А. Ржанова Сибирского отделения РАН

Защита состоится 6 декабря 2012 г. в 14.00 на заседании  
диссертационного совета Д 002.098.01 при ФГБУН Институте физики  
микроструктур РАН по адресу 607680, Нижегородская обл., Кстовский  
район, д. Афоново, ул. Академическая, д.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ РАН

Автореферат разослан 1 ноября 2012 г.

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

К.П. Гайкович

## Актуальность темы

В последние годы значительно возрос интерес к физическим системам с пониженной размерностью, в частности, к полупроводниковым наноструктурам. Это связано как с общей тенденцией миниатюризации традиционных электронных приборов, так и с появлением у подобных объектов принципиально новых свойств, отсутствующих у объемных материалов. Изменение физических свойств полупроводников является важной с практической точки зрения задачей, которая может решаться с помощью различных подходов, например, с помощью так называемой “зонной инженерии”. При зонной инженерии, как ясно из названия, производится направленное изменение зонной структуры материала, что приводит к появлению по сути нового материала, с новыми электрофизическими и оптическими свойствами. Наиболее часто модификация зонной структуры осуществляется за счет формирования гетероструктур, в том числе гетероструктур с пониженной размерностью, таких как квантовые ямы, квантовые проволоки и квантовые точки. Другим, более традиционным способом изменения свойств полупроводников является их легирование, которое оказывает влияние как на зонную структуру материала (появление примесных уровней и подзон), так и существенным образом изменяет его электрофизические свойства.

Одним из широко используемых способов получения полупроводниковых структур (в частности, гетероструктур) является эпитаксия. С помощью эпитаксиальных методов роста возможно формирование широкого класса гетероструктур. В настоящее время гетероструктуры семейства  $A_3B_5$  [1] и Si/Ge [2] являются наиболее активно исследуемыми. Система  $A_3B_5$  привлекательна с прикладной и фундаментальной точек зрения в силу широких возможностей по подбору материалов с различными свойствами, такими как ширина запрещенной зоны и параметр кристаллической решетки. Кроме этого многие полупроводники этого класса являются прямозонными, что важно для создания оптоэлектронных приборов. В то же время, современная микро- и нанoeлектроника базируется на кремниевой технологии. Поэтому развитие физических и технологических основ получения эпитаксиальных гетероструктур на основе кремния с целью улучшения характеристик уже существующих приборов и создания новых устройств является актуальной задачей.

Практически единственным элементом IV группы, пригодным для образования гетеропары с кремнием, является германий. На основе германия и кремния возможно формирование  $Ge_xSi_{1-x}$  гетероструктур во всем диапазоне составов, что позволяет управлять шириной запрещенной зоны в таких структурах в широком интервале. Последнее может быть использовано для различных приборных приложений. В частности, для создания быстродействующих транзисторов, туннельных диодов, каскадных структур для источников ТГц излучения предлагаются достаточно сложные многослойные

структуры с планарными SiGe/Si слоями [2]. Однако из-за рассогласования параметров кристаллических решеток Si и Ge (0,357 нм и 0,357 нм соответственно) SiGe гетероструктуры являются напряженными. Релаксация упругих напряжений в них в зависимости от параметров структур и условий роста может происходить либо за счет образования дефектов кристаллической решетки (пластическая релаксация), либо за счет развития шероховатости поверхности (упругая релаксация) [2]. Для формирования приборных планарных SiGe структур с заданными параметрами необходимо знать, при каких условиях релаксация напряжений в них будет отсутствовать, не произойдет образования дефектов кристаллической решетки, и границы слоев останутся планарными. Кроме планарных SiGe структур научный и практический интерес вызывают и структуры, в которых в результате упругой релаксации напряжений произошло образование такого интересного типа низкоразмерных объектов, как самоформирующиеся наноостровки или квантовые точки. С практической точки зрения этот тип низкоразмерных GeSi гетероструктур интересен благодаря возможности получения сигнала люминесценции от подобных структур в диапазоне длин волн 1,3-1,55 мкм и возможности детектирования подобных сигналов [3, 4]. Исследования процессов зарождения и свойств самоформирующихся объектов в гетеросистеме Ge/Si имеют также и фундаментальный аспект: на их примере осуществляется изучение общих закономерностей процессов роста полупроводниковых напряженных гетеросистем.

Физические свойства Ge(Si) самоформирующихся наноостровков зависят от таких параметров, как их размеры, форма, компонентный состав и упругие напряжения. Однако сами эти параметры зависят как от условий роста, так и от условий зарождения островков. Формирование структур с Ge(Si) наноостровками для приборных приложений требует развития методов их формирования с наперед заданными свойствами. Для реализации этого, в частности, необходимо точное знание момента начала образования островков в зависимости как от условий роста, так и от параметров самой структуры. К настоящему времени известно, что зарождение Ge(Si) островков происходит по так называемому механизму Странского-Крастанова. К моменту начала работы над диссертацией наиболее простой случай, а именно рост Ge(Si) островков на Si(001) подложках был исследован достаточно подробно [2, 5]. В то же время дизайн структур для приборных приложений становится все более сложным - требуется формирование многослойных структур и сверхрешеток. Однако процессы образования островков в многослойных структурах к моменту начала работ над диссертацией были изучены в меньшей степени.

Таким образом, определение условий роста и параметров структур, при которых двумерный режим роста сменяется трехмерным, требуется как в случае роста планарных структур, где следует избежать релаксации упругих напряжений и образования островков (либо дефектов), так и в случае, когда

необходимо формирование островков с заданными параметрами. В цели настоящей диссертационной работы входило выявление особенностей образования Ge(Si) островков в многослойных структурах как с напряженными планарными SiGe слоями, так и с самоформирующимися островками.

Как указывалось выше, широко используемым методом изменения свойств полупроводников является их легирование. Создание легированных областей нанометровых масштабов в полупроводниках также приводит к формированию структур с пониженной размерностью, только появление пространственно выделенной малой области происходит не с помощью использования другого материала, как в гетероструктурах, а с помощью специальным образом полученного распределения атомов легирующих примесей. Основными акцепторными примесями для Si и SiGe структур являются элементы III группы, такие как бор и галлий, а донорными - V группы, а именно, сурьма, фосфор и мышьяк. Известно, что для Si и SiGe гетероструктур существует проблема их легирования донорными примесями [6]. Она заключается в том, что для всех основных донорных примесей ярко выражен эффект сегрегации, в результате которого атомы примеси плохо встраиваются в объем растущей пленки, и происходит их накопление на поверхности роста. Это значительно осложняет задачу по формированию легированных областей с требуемыми параметрами, в частности создание резких изменений профилей концентрации примеси и так называемых “дельта-легированных” слоев. Одной из целей диссертационной работы была разработка на примере сурьмы оригинального метода селективного легирования Si и SiGe структур сегрегирующими примесями.

### **Степень разработанности темы исследования**

Исследования, посвященные эпитаксиальному росту гетероструктур в системе Si/Ge, ведутся более 20 лет. За это время был достигнут значительный прогресс в понимании физических процессов, происходящих при гетероэпитаксии, в частности, механизма релаксации упругих напряжений в SiGe гетероструктурах за счет развития шероховатости поверхности [5, 7]. Однако большая часть выполненных исследований перехода от двумерного (2D) роста к трехмерному (3D) концентрировались на наиболее простом случае - росте однослойных структур SiGe/Si(001). Для более сложного случая роста многослойных структур с несколькими SiGe слоями различного состава было экспериментально обнаружено влияние напряженных планарных SiGe слоев на последующий рост пленки Ge [8], которое не описывалось существующими к моменту начала работ над диссертацией моделями роста SiGe структур. Однако подробных исследований механизма влияния напряженных планарных слоев на 2D-3D переход пленки Ge выполнено не было.

Для многослойных SiGe структур с самоформирующимися наноостровками к началу работ над диссертацией были установлены две

основные особенности их роста по сравнению с однослойными структурами – вертикальное упорядочение островков и уменьшение критической толщины 2D-3D перехода в верхних слоях многослойных структур [9, 10]. В то же время отсутствовало экспериментальное подтверждение высказанных идей о связи этих особенностей с перераспределением материала смачивающего слоя Ge в верхних слоях структуры. Кроме того, не был детально изучен механизм формирования островков в многослойных структурах, а также недостаточно исследованы возможности управления параметрами островков в таких структурах.

Проблема легирования Si и SiGe структур донорными примесями, связанная с их сегрегацией, также известна более 20 лет. За это время были развиты теоретические модели, позволяющие описывать основные закономерности процесса сегрегации примесей [11-13], и предложены различные методы ее подавления [6 и ссылки внутри]. Однако, к началу работ над диссертацией не было предложено метода селективного легирования Si и SiGe структур, позволяющего получать высококачественные структуры с резким профилем распределения донорной примеси и бывшего бы при этом несложным для практической реализации. Вышеперечисленные обстоятельства указывают на недостаточную проработанность выбранной темы исследования и подтверждают актуальность диссертационной работы.

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

1. Выявление особенностей смены механизма роста пленки Ge с двумерного (2D) на трехмерный (3D) в многослойных SiGe гетероструктурах с напряженными планарными SiGe слоями и самоформирующимися островками. Установление влияния захороненных напряженных SiGe слоев и островков на дальнейший рост структур. Поиск новых возможностей управления параметрами Ge(Si) островков в многослойных структурах.
2. Разработка методики селективного легирования Ge/Si эпитаксиальных структур донорными примесями, позволяющей в методе молекулярно пучковой эпитаксии (МПЭ) получать резкие профили концентрации примеси, в том числе  $\delta$ -легированные слои с сохранением высокого кристаллического качества структур, формируемых для различных приборных приложений.

### **Научная новизна работы**

1. Показано, что наибольшее влияние на переход пленки Ge от двумерного к трехмерному росту в SiGe/Si(001) структурах с напряженными планарными подслоями оказывают напряженные SiGe слои, находящиеся вблизи поверхности. Впервые установлено, что влияние захороненных напряженных

SiGe подслоев на 2D-3D переход пленки Ge сохраняется и при их заращивании тонким ненапряженным Si слоем. Уменьшение критической толщины двумерного роста пленки Ge в структурах с напряженными планарными SiGe подслоями связывается с сегрегацией Ge и упругой энергией, накопленной в таких слоях. Предложена теоретическая модель оценки критической толщины двумерного роста напряженных слоев в одно- и многослойных SiGe гетероструктурах, позволяющая с хорошей точностью описать широкий спектр имеющихся экспериментальных результатов.

2. Впервые для системы Ge/Si экспериментально обнаружено значительное перераспределение материала смачивающего слоя в верхних слоях многослойных структур с островками, приводящее к образованию локальных возвышений (холмов). Показано, что в многослойных структурах с островками механизм образования островков изменяется – их формирование происходит не за счет нуклеации зародышей, а за счет огранки склонов холмов плоскостями семейства {105}. Предложена качественная модель образования островков в верхних слоях многослойных SiGe структур.

3. Показано, что сегрегация примеси может быть использована для осуществления селективного легирования SiGe гетероструктур за счет выбора режимов роста, соответствующих кинетически ограниченной и равновесной сегрегации, и переключения между этими режимами для формирования различных слоев структуры.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Экспериментально установлено влияние планарных напряженных SiGe подслоев на переход пленки Ge от двумерного к трехмерному росту, что позволяет определять условия роста и параметры структур, необходимые для реализации как послойного, так и островкового режимов роста в структурах с напряженными слоями. Показано, что влияние захороненных напряженных SiGe подслоев на 2D-3D переход пленки Ge сохраняется и при их заращивании ненапряженным Si слоем толщиной до ~3,5 нм. Обнаруженное влияние напряженных SiGe слоев на смену механизма роста пленки Ge необходимо учитывать при разработке дизайна напряженных гетероструктур для различных приборных приложений.

2. Установлены особенности формирования смачивающего слоя Ge и образования островков в верхних слоях многослойных SiGe/Si(001) структур с самоформирующимися островками. Показана возможность управления параметрами островков в верхних слоях многослойной структуры с островками за счет использования различных температур роста островков. Продемонстрирован способ увеличения поверхностной плотности островков в верхних слоях, а также возможность формирования кластеров островков.

Полученные результаты не зависят от выбора конкретных материалов, поэтому могут быть распространены на другие гетеропары. Выявленные особенности формирования островков в многослойных структурах важны как с точки зрения понимания процессов, происходящих при росте многослойных структур с островками, так и с точки зрения решения задачи по формированию островков с заданными параметрами.

3. Предложен и на примере сурьмы отработан метод селективного легирования Si и SiGe гетероструктур сегрегирующими примесями, позволяющий получать структуры с резким ( $\sim 2-3$  нм на декаду) градиентом концентрации примеси и  $\delta$ -легированные слои с полушириной на полувысоте порядка 2,5-3 нм. Продемонстрировано, что предложенный метод легирования позволяет формировать структуры без потери кристаллического качества. Развитый метод не требует никакого специального оборудования для установок МПЭ и позволяет формировать структуры с резкими профилями концентрации примеси, требующимися для различных приборных приложений.

### **Методология и методы исследования**

Теоретико-методологическую основу исследования представляли собой работы отечественных и зарубежных ученых, в которых были развиты фундаментальные представления об основных физических процессах, происходящих при эпитаксиальном росте полупроводниковых гетероструктур, а также при их легировании. Для формирования SiGe структур использовался метод МПЭ, позволяющий контролировать количество осаждаемого материала с точностью до долей монослоя, а состав осаждаемых слоев – до единиц процентов. Использование метода дифракции быстрых электронов (ДБЭ) в методе МПЭ позволяло анализировать состояние поверхности роста непосредственно в процессе формирования структур. Представляемые в диссертации результаты были получены с помощью широкого набора экспериментальных методов исследования гетероструктур (атомно-силовой и просвечивающей электронной микроскопии, вторичной ионной масс-спектрографии, измерений эффекта Холла и вольт-фарадных характеристик), их анализа, обобщения и теоретической формализации.

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

1. Предосаждение напряженных SiGe планарных слоев ведет к существенному уменьшению критической толщины двумерного роста пленки Ge по сравнению с ростом Ge на Si(001). Впервые обнаружено, что наибольшее влияние на рост пленки Ge оказывают напряженные SiGe слои, находящиеся вблизи поверхности.



2. Впервые продемонстрировано, что влияние захороненных напряженных SiGe подслоев на переход пленки Ge от двумерного к трехмерному росту сохраняется и при их заращивании тонким ненапряженным Si слоем. Учет сегрегации и упругой энергии, накопленной в напряженных слоях, позволяет количественно объяснить зависимость критической толщины двумерного роста пленки Ge от параметров SiGe подслоев.

3. Экспериментально показано, что в многослойных структурах с Ge(Si)/Si(001) самоформирующимися островками, слои которых разделены тонкими слоями Si, в верхних слоях структуры происходит значительное перераспределение материала смачивающего слоя с образованием локальных возвышений (холмов) над островками нижележащего слоя. Это перераспределение вызвано влиянием неоднородных полей упругих напряжений от захороненных островков на диффузию атомов Ge по поверхности. Образование островков в верхних слоях происходит не путем случайной нуклеации зародышей, как в однослойных структурах, а путем огранки склонов образовавшихся холмов.

4. Разработан оригинальный метод селективного легирования Si структур сегрегирующими примесями в методе МПЭ, основанный на контролируемом использовании эффекта сегрегации примеси. Создание резких профилей распределения примеси достигается путем варьирования температуры роста и переключения между режимами кинетически ограниченной и максимальной сегрегации. Предложенный метод позволяет формировать селективно легированные Si:Sb структуры в диапазоне концентраций  $5 \cdot 10^{15} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$  высокого кристаллического качества. С его помощью возможно получение легированных слоев с градиентом концентрации примеси в 2-3 нм на декаду, масштаб толщин от единиц до сотен нанометров, а также дельта-легированных слоев с полушириной на полувывоте в 2,5-3 нм. Данные результаты находятся на уровне лучших мировых достижений, опубликованных в литературе для метода МПЭ. Реализация представленной в диссертационной работе методики, в отличие от ранее предложенных подходов, не требует специального оборудования для стандартных установок молекулярно-пучковой эпитаксии.

### **Степень достоверности и апробация работы**

Достоверность полученных результатов обусловлена тем, что изготовление всех исследуемых образцов и основные экспериментальные результаты получены с помощью общепризнанных и хорошо апробированных методов. Кроме того, достоверность полученных результатов в ряде случаев подтверждается сопоставлением с результатами, полученными другими

авторами, а также хорошим соответствием теоретических представлений и экспериментальных данных.

Основные положения и результаты диссертации докладывались на IX и X Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 3 - 7 декабря 2007; 1-5 декабря 2008), XII, XIII, XIV и XV Симпозиумах «Нанозифика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 10 – 14 марта 2008; 16 – 20 марта 2009; 15 – 19 марта 2010; 14 – 18 марта 2011), XIV и XV Нижегородских сессиях молодых ученых (Нижний Новгород, 19 – 24 апреля 2009; 19 – 23 апреля 2010), IX и X Всероссийских конференциях по физике полупроводников (Новосибирск-Томск, 28 сентября – 3 октября 2009; Нижний Новгород, 19 – 23 сентября 2011), I Международном симпозиуме по наноэлектронике и фотонике на базе кремния (Виго, Испания, 20 - 23 сентября 2009), VI Международной конференции по квантовым точкам (Ноттингем, Великобритания, 26 – 30 апреля 2010), Конференции европейского материаловедческого сообщества (Страсбург, Франция, 7 – 11 июня 2010), VII и VIII Международных конференциях по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе (Нижний Новгород, 6-9 июля 2010; 5-8 июля 2011, Москва), XIX Международном симпозиуме «Наноструктуры: физика и технология» (Екатеринбург, 20-25 июня 2011), VII Международной конференции по эпитаксии кремния и гетероструктурам (Леевен, Бельгия, 28 августа – 1 сентября 2011), а также на семинарах ИФМ РАН.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели работы, показана ее научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, представлены сведения о структуре и содержании работы. Во введении также указан личный вклад автора, который заключался в постановке задачи исследований и планировании экспериментов, росте всех исследуемых образцов методом молекулярно-пучковой эпитаксии на сверхвысоковакуумной установке Riber Siva-21, исследовании структур *in situ* методом дифракции быстрых электронов, обработке и интерпретации результатов исследований структур методами атомно-силовой микроскопии и вторично-ионной масс-спектропии. Кроме этого автор принимал участие в развитии теоретических моделей перехода от двумерного к трехмерному росту в структурах с напряженными планарными SiGe слоями и многослойных структурах с островками, в разработке метода селективного легирования SiGe структур сегрегирующими примесями, в интерпретации измерений эффекта Холла и емкостных измерений.

В главе 1 представлен обзор работ, посвященных исследованиям роста напряженных SiGe гетероструктур и релаксации упругих напряжений в них. Приведены физические причины формирования трехмерных нанобъектов при росте напряженных полупроводниковых гетероструктур. Описаны основные существующие к моменту начала работ над диссертацией теоретические модели образования островков в однослойных структурах и проанализированы условия их применимости. Рассмотрены особенности зарождения Ge(Si) островков в многослойных структурах с островками. Отмечена недостаточная изученность процессов формирования Ge(Si) островков в многослойных структурах как с напряженными планарными подслоями, так и с трехмерными островками.

В первой части главы 2 представлено подробное описание высоковакуумной установки молекулярно-пучковой эпитаксии Ge/Si гетероструктур “Riber SIVA-21”, на который были выращены все исследуемые образцы, методов подготовки Si подложек и характеристики выращенных структур. Кратко описана система регистрации *in situ* момента формирования Ge(Si) островков с помощью ДБЭ.

Во второй части главы 2 приведены результаты исследований особенностей роста пленки Ge в многослойных структурах с напряженными планарными SiGe слоями. Проанализировано влияние напряженных планарных SiGe слоев на образование Ge островков как в случае осаждения Ge непосредственно на такой слой (рис. 1а), так и в случае, когда напряженный слой отделен от растущей пленки Ge ненапряженным Si слоем (рис. 1б). Основные исследования выполнены для структур, выращенных при 700°C.

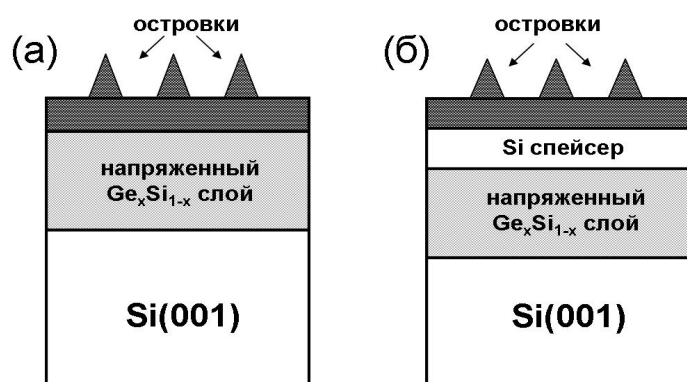


Рис. 1. Схема структур для исследования особенностей образования Ge самоформирующихся островков в структурах с SiGe напряженными слоями.

В работе получены экспериментальные зависимости критической толщины двумерного роста Ge ( $h_c$ ) от параметров SiGe подслоев и толщины Si разделительного слоя (так называемого “спейсера”) (рис. 1). Показано, что при осаждении Ge напрямую на напряженные  $Si_{1-x}Ge_x$  слои фиксированной толщины ( $d_{SiGe} = 10$  нм), но разного состава ( $X_{Ge} = 0 - 20\%$ ), критическая толщина двумерного роста Ge значительно уменьшается при увеличении количества Ge в напряженном SiGe слое (рис. 2а). Показано, что наблюдаемое в эксперименте значительное снижение  $h_c$  с увеличением  $X_{Ge}$  не может быть вызвано только

лишь сегрегацией Ge при росте SiGe слоя (рис. 2а). При исследовании роста пленки Ge на напряженных  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоях фиксированного состава ( $X_{\text{Ge}} = 15\%$  и  $20\%$ ) и различной толщины ( $d_{\text{SiGe}} = 0 - 10$  нм) обнаружена нелинейная зависимость  $h_c$  от  $d_{\text{SiGe}}$  (рис. 2б). Для тонких ( $d_{\text{SiGe}} \leq 3,5$  нм) SiGe слоев наблюдается значительное уменьшение  $h_c$  при возрастании  $d_{\text{SiGe}}$ . Для более толстых SiGe слоев величина  $h_c$  слабо зависит от  $d_{\text{SiGe}}$ , а ее значение определяется составом SiGe слоя (рис. 2б). Таким образом, показано, что основное влияние на переход к трехмерному росту оказывают напряженные SiGe слои, расположенные ближе к поверхности.

Исследования влияния напряженных SiGe слоев на рост пленки Ge в случае, когда эти слои отделены от растущей пленки Ge ненапряженным Si разделительным слоем (рис. 1б) показали, что это влияние сохраняется и при их зарастивании достаточно тонкими (до толщин  $\sim 3,5$  нм) Si слоями (рис. 2в). Полученные экспериментальные зависимости  $h_c$  от толщины Si спейсера, выращенного поверх напряженных SiGe слоев, значительно различающихся толщиной и составом, но имеющих одну и ту же упругую энергию, оказались близкими (рис. 2в). Этот экспериментальный факт совместно с данными, полученными при исследовании роста Ge непосредственно на напряженных SiGe слоях, позволил сделать вывод, что наряду с сегрегацией Ge одним из факторов, определяющих момент перехода напряженной пленки от двумерного к трехмерному росту в подобных структурах, является накопленная в напряженных SiGe слоях упругая энергия.

На основании полученных экспериментальных данных была разработана теоретическая модель оценки критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту, учитывающая влияние напряженных подслоев. В модели используется стандартный подход, основанный на соотношении энергетического баланса между выигрышем в упругой энергии и проигрышем в поверхностной энергии при образовании островка. Но, в отличие от ранее рассмотренных моделей энергетического баланса, в предложенной модели при расчете упругой энергии учитывается как влияние напряженных (в т.ч. захороненных) SiGe слоев, так и эффект сегрегации Ge. Упругая энергия рассчитывается суммированием упругой энергии для всех напряженных слоев в структуре, при этом состав этих слоев вычисляется с учетом сегрегации Ge, а преимущественное влияние тех напряженных слоев, что находятся ближе к поверхности роста, учтено введением весового множителя, экспоненциально спадающего с ростом глубины залегания слоя. Характерный масштаб спадания влияния упругой энергии, запасенной в захороненных слоях,  $L_{dec}$  является феноменологическим параметром. Изменение профиля концентрации Ge из-за эффекта сегрегации рассчитывалось с помощью модели термоактивационного обмена [14].

Показано, что развитая модель позволяет с хорошей точностью описать полученные экспериментальные результаты (рис. 2), при использовании всего 1 феноменологического параметра  $L_{dec}$  – “глубины затухания”. Напряженные слои,

расположенные на расстоянии от поверхности, меньшей, чем  $L_{dec} = 3,5$  нм оказывают наибольшее влияние на переход к трехмерному росту, влияние же слоев, расположенные глубже, слабее. В главе приведено обсуждение возможных физических причин обнаруженного влияния напряженных планарных SiGe слоев на последующий рост структур и смысла введенного параметра  $L_{dec}$ .

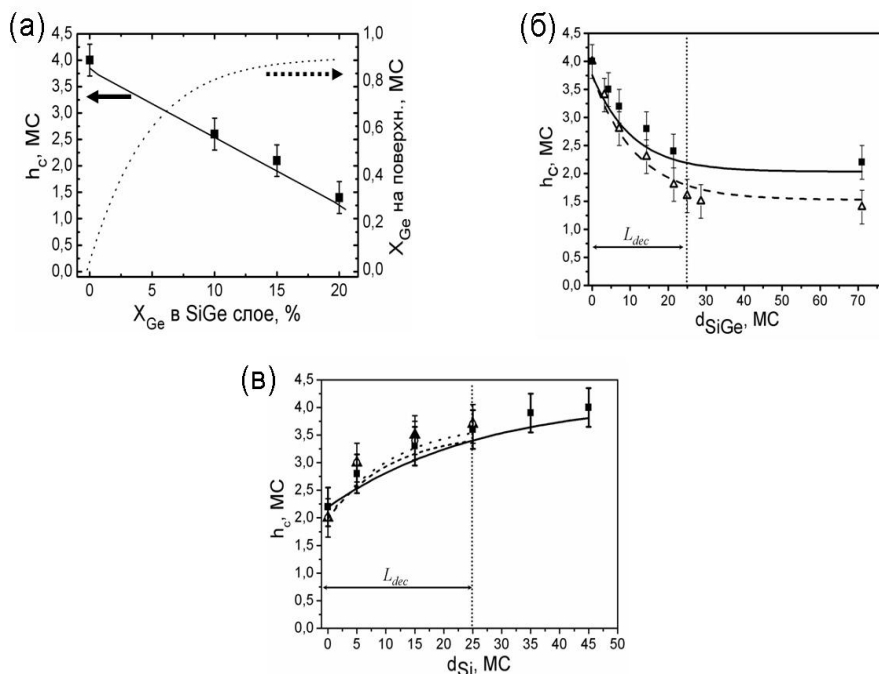


Рис. 2. Сравнение экспериментальных зависимостей  $h_c$  от параметров SiGe гетероструктур с теоретическими расчетами. (а) –  $h_c$  для роста пленки Ge на напряженных SiGe слоях толщиной 10 нм в зависимости от их состава (квадраты – экспериментальные данные, сплошная линия – теоретический расчет, пунктирная линия – расчет количества Ge, сегрегирующего на поверхность при росте напряженного SiGe слоя); (б) -  $h_c$  для роста пленки Ge на напряженных SiGe слоях в зависимости от их толщины (квадраты и треугольники – экспериментальные данные, сплошная и штриховая линии – теоретический расчет для  $X_{Ge} = 15\%$  и  $20\%$  соответственно); (в) –  $h_c$  для роста пленки Ge на Si разделительном слое, осажденном на напряженные SiGe слои различной толщины и состава, в зависимости от толщины Si слоя (квадраты, треугольники и ромбы – экспериментальные данные, сплошная, штриховая и пунктирная линии теоретический расчет для SiGe слоев с  $X_{Ge} = 15\%$  и  $d_{SiGe} = 10$  нм;  $X_{Ge} = 30\%$  и  $d_{SiGe} = 1,5$  нм;  $X_{Ge} = 100\%$  и  $d_{SiGe} = 0,28$  нм соответственно). На рисунках (б) и (в) также отмечена “глубина затухания”  $L_{dec}$ .

В главе 3 представлены результаты исследований особенностей роста смачивающего слоя Ge и формирования Ge(Si) островков в многослойных структурах с островками, слои которых разделены тонкими слоями Si. Большинство структур, результаты исследований которых представлены в главе 3, представляли собой трехслойные SiGe/Si(001) структуры, выращенные при  $600^\circ\text{C}$ . В первых двух слоях структур за счет осаждения 7-8.5 монослоев (МС)

Ge (1 монослой  $\approx 0,14$  нм) были сформированы Ge(Si) наноструктуры. Толщина Ge в третьем слое варьировалась от 0 до 5 МС. Отдельные Ge слои в структурах были разделены слоями Si толщиной 20 нм. Толщина Si разделительных слоев была достаточно малой, чтобы обеспечить значительное влияние нижележащих слоев с островками на последующий рост структур. Согласно результатам атомно-силовой микроскопии и ДБЭ критическая толщина двумерного роста Ge во втором слое структуры была меньше, чем в первом, а в третьем – такая же, как во втором. Последнее обстоятельство позволяло осаждать в третьем слое количество Ge, близкое к критической толщине двумерного роста, поскольку она становится известной после формирования второго слоя островков. Уменьшение критической толщины двумерного роста Ge в верхних слоях структуры по сравнению с первым слоем вызвано влиянием полей упругих напряжений от заросших островков.

Экспериментально обнаружено неоднородное распределение материала смачивающего слоя Ge в верхних слоях многослойных структур, вызванное неоднородными полями упругих напряжений, создаваемыми нижележащим слоем островков (рис. 3а). Эти поля создают в Si слое, разделяющем соседние слои с островками, области локального растяжения, расположенные над заросшими островками. Данные области оказываются энергетически выгодными для адатомов Ge смачивающего слоя из-за меньшего рассогласования кристаллических решеток Ge и Si слоя в этих местах. Вследствие этого происходит аккумуляция адатомов Ge в таких областях. В результате уже на ранней стадии формирования Ge смачивающего слоя происходит образование локальных неограниченных возвышений (холмов) с поверхностной плотностью и латеральными размерами близкими к их значениям для заросших островков в нижних слоях структуры. Зарождение островков в верхних слоях структуры при увеличении количества осажденного Ge происходит за счет формирования граней типа  $\{105\}$  на склонах холмов и последовательной трансформации неограниченных холмов в усеченные пирамидальные и затем в пирамидальные островки.

На основе полученных экспериментальных данных предложен механизм зарождения островков в многослойных структурах, отличающийся от такового в однослойных (рис. 3). Согласно предложенной модели, при малом количестве осажденного Ge (значительно меньшем критической толщины двумерного роста) в верхних слоях наблюдается перераспределение материала в смачивающем слое с образованием холмов над заросшими островками (рис. 3а). При приближении количества осажденного Ge к критической толщине двумерного роста образование островков происходит за счет постепенной огранки склонов холмов плоскостями  $\{105\}$  и формировании таким образом усеченных пирамид (Т-pyramids) (рис. 3б). Когда же количество осажденного Ge превышает критическую толщину двумерного роста, переходный процесс огранки холмов завершается, и усеченные пирамиды трансформируются в массив пирамидальных островков (рис. 3в).

Показано, что латеральные размеры холмов и островков в многослойных структурах определяются различными параметрами: латеральными размерами заросших островков и температурой осаждения Ge соответственно. С другой стороны, известно [7], что эти же параметры островков в однослойных структурах зависят от таких условий роста, как рассогласование кристаллических решеток, температура и скорость роста. В результате, за счет использования различных температур роста для первого и последующих слоев островков в верхних слоях многослойных структур возможно формирование островков с измененными параметрами, нехарактерными для островков выращенных при тех же условиях, но в однослойной структуре. Экспериментально продемонстрированы возможности использования данного подхода для увеличения поверхностной плотности островков и формирования кластеров из нескольких близкорасположенных островков.

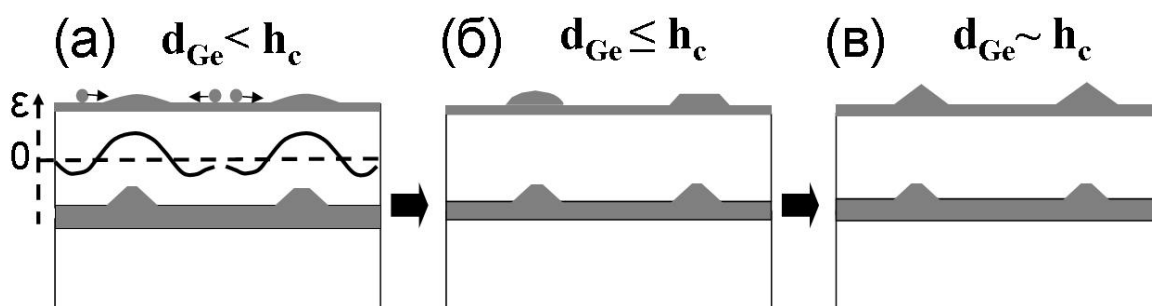


Рис. 3. Схематическое представление механизма образования Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся nanoостровков в верхних слоях многослойных структур. Представлены следующие стадии процесса формирования островков в многослойных структурах: образование холмов за счет накопления адатомов Ge в области локальных растяжений Si спейсера (а), процесс огранки склонов холмов (б), формирование массива пирамидальных островков (в). В части (а) схематически показано распределение полей упругих напряжений в Si слое, создаваемое нижележащими островками.

**Глава 4** посвящена описанию и практической реализации оригинального метода селективного легирования Si и SiGe структур сегрегирующими примесями. В начале главы описана проблема легирования Si и SiGe гетероструктур донорными примесями, в частности Sb, из-за эффекта сегрегации. Приведен краткий обзор работ, посвященных исследованию процесса сегрегации Sb в Si, а также способам ее подавления. Указано, что в диапазоне температур роста, при которых в системе Si/Ge возможно создание эпитаксиальных структур высокого кристаллического качества, сегрегация Sb значительна и сильно осложняет создание селективно легированных структур для различных приборных приложений. Коэффициент сегрегации Sb (определяемый как нормированное отношение поверхностной концентрации примеси к объемной) даже для температур роста  $\sim 300^\circ\text{C}$  имеет величину порядка 100 (рис. 4), то есть лишь 1 из 100 атомов примеси встраивается в объем

структуры. В то же время, понижение температуры роста ниже  $300^{\circ}\text{C}$  неприемлемо с точки зрения сохранения кристаллического совершенства структур. В главе приведено краткое описание предложенных ранее методов подавления сегрегации примесей, таких как ионное легирование, твердофазная эпитаксия, сублимационная молекулярно-лучевая эпитаксия и использование атомарного водорода в качестве сурфактанта. Указано, что все они обладают определенными недостатками, связанными, большей частью, с дефектностью получаемых слоев, а также технологической сложностью и дороговизной их реализации.

В основной части главы представлено описание и результаты практической реализации нового метода селективного легирования Si и SiGe структур, основанного на контролируемом использовании эффекта сегрегации примеси. В методе используется резкая зависимость коэффициента сегрегации примеси при изменении температуры роста структур между значениями, соответствующими режимам кинетически ограниченной сегрегации ( $T_p=300-350^{\circ}\text{C}$ ) и максимальной сегрегации ( $T_p=500-550^{\circ}\text{C}$ ) (рис. 4). Для Sb различие в значениях коэффициента сегрегации для этих режимов превышает 4 порядка. Такое значительное изменение коэффициента сегрегации, а значит, и доли атомов примеси, встраивающихся в объем растущей пленки, позволяет создавать слои с большим градиентом концентрации примеси. В предлагаемом методе для создания слоев с высокой объемной концентрацией примеси используются низкие температуры, соответствующие режиму кинетически ограниченной сегрегации ( $T_p=300-350^{\circ}\text{C}$ ), а для создания слоев с низким уровнем легирования – высокие температуры, соответствующие максимальной сегрегации ( $T_p=500-550^{\circ}\text{C}$ ). Для получения резких изменений уровня легирования (т.е. большого градиента концентрации примеси) применяются непродолжительные остановки роста, в течение которых происходит изменение температуры от одного режима к другому.

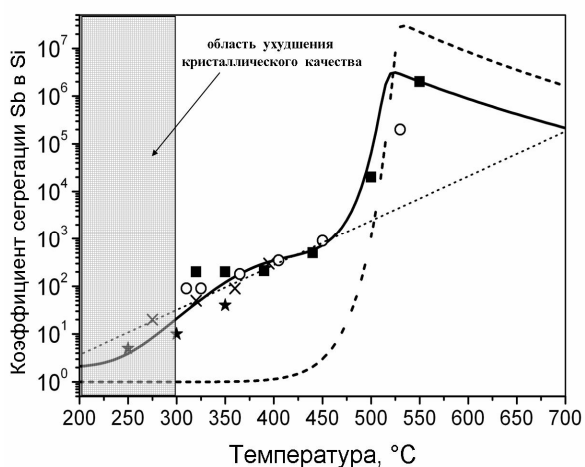


Рис. 4. Зависимости коэффициента сегрегации Sb в Si от температуры роста. Данные приведены для скорости роста кремния  $1 \text{ \AA}/\text{с}$ . Символы (■), (×), (★) и (○) обозначают экспериментальные данные из [15], [12], [16] и настоящей работы соответственно. Сплошная, пунктирная и штриховая линии – теоретически вычисленные кривые по моделям из работ [13], [12] и [11] соответственно.

В главе приведены результаты экспериментальной реализации предлагаемого метода создания селективно легированных (в том числе  $\delta$ -



легированных) Si и SiGe структур и описаны методы характеристики образцов. Экспериментально продемонстрирована возможность создания селективно легированных сурьмой областей в Si с градиентом концентрации 2-3 нм/декаду в широком диапазоне концентраций ( $5 \cdot 10^{15} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) и толщин слоев (от единиц до сотен нанометров), в том числе  $\delta$ -легированных слоев (рис. 5), что соответствует лучшим мировым достижениям, полученным для метода МПЭ.

Исследование селективно легированных структур методом просвечивающей электронной микроскопии выявило отсутствие образования дефектов в них. Анализ данных вторично-ионной масс-спектропии (ВИМС) показал, что за время, необходимое для перехода между режимами кинетически ограниченной и максимальной сегрегации (рост при этом останавливается на время порядка нескольких минут) не происходит сколько-нибудь значительного накопления загрязняющих примесей на поверхности образца. Данные результаты подтверждают высокое кристаллическое качество селективно легированных Si структур, полученных с помощью предложенного метода.

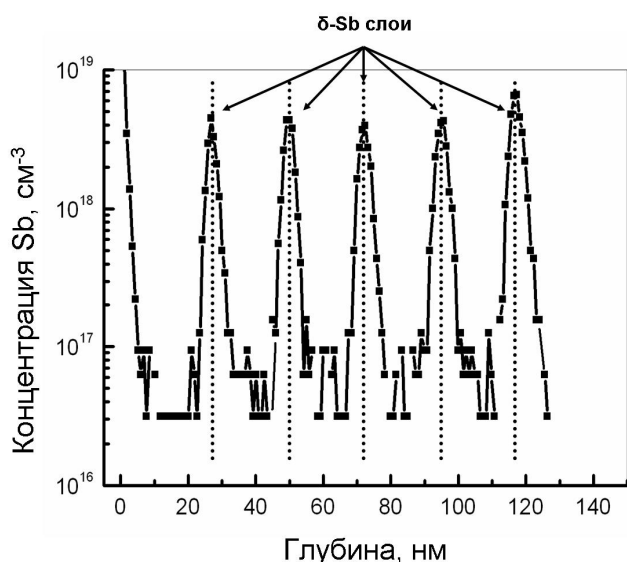


Рис. 5. Профиль распределения Sb в структуре с пятью  $\delta$ -легированными Si:Sb слоями, полученный с помощью ВИМС. Глубина отсчитывается от поверхности структуры.

Экспериментально подтверждено, что развитый метод селективного легирования может быть применен для создания на кремнии низкобарьерных диодов Шоттки.

В диссертации проанализированы особенности сегрегации Sb в SiGe гетероструктурах по сравнению с Si. Показано, что предложенный метод селективного легирования Si может быть распространен и на SiGe структуры при соответствующем учете зависимостей коэффициента сегрегации Sb от параметров (состава и упругих напряжений) SiGe слоев.

## Основные результаты и выводы исследований

1. Экспериментально обнаружены особенности роста пленки Ge и образования Ge(Si) самоформирующихся наностроек в структурах с напряженными SiGe подслоями. Получены количественные зависимости

критической толщины двумерного роста Ge при его осаждении на напряженный SiGe слой от толщины и состава этого слоя. Обнаружена нелинейная зависимость критической толщины двумерного роста Ge от толщины напряженного SiGe слоя, демонстрирующая ярко выраженную зависимость  $h_c$  от толщины SiGe слоя для тонких слоев, и отсутствие таковой зависимости для SiGe слоев толщиной более 3,5 нм. Показано, что учет одного лишь эффекта сегрегации Ge на поверхность напряженного слоя не позволяет объяснить полученные экспериментальные результаты. Обнаружено, что влияние напряженных SiGe слоев на последующий рост пленки Ge сохраняется и при их наращивании ненапряженным Si слоем толщиной до  $\sim 3,5$  нм. Получены зависимости  $h_c$  пленки Ge от толщины ненапряженного Si слоя, выращенного на SiGe подслое, для различных параметров напряженных SiGe подслоев. Продемонстрировано, что при одинаковой упругой энергии SiGe подслоя зависимости критической толщины двумерного роста Ge от толщины ненапряженного Si слоя не зависят от состава и толщины SiGe слоев.

2. На основе полученных экспериментальных результатов предложен критерий определения критической толщины двумерного роста в различных SiGe структурах, в котором учтен как эффект сегрегации Ge, так и упругая энергия, накопленная в структуре. Сравнение значений критической толщины двумерного роста определенных экспериментально и вычисленных с использованием предложенного подхода показало хорошее совпадение.

3. Экспериментально выявлены отличия в формировании смачивающего слоя Ge и образования островков в верхних слоях многослойных SiGe структур по сравнению с однослойными. Обнаружено значительное перераспределение материала смачивающего слоя Ge, вызванное неоднородными полями упругих напряжений от островков нижележащих слоев, которое приводит к формированию локальных возвышений (“холмов”). Показано, что поля упругих напряжений от нижележащих островков в многослойных структурах модифицируют процесс формирования островков в последующих слоях. Предложен новый механизм образования островков в верхних слоях многослойных структур путем огранки склонов холмов, появившихся при перераспределении материала смачивающего слоя под действием таких полей.

4. Предложен и реализован оригинальный метод селективного легирования кремниевых эпитаксиальных структур сегрегирующими примесями, основанный на контролируемом использовании сегрегации при МПЭ. Показано, что предлагаемый метод может быть реализован на серийных установках МПЭ кремния без использования дополнительного технологического оборудования. Продемонстрирована возможность получения в кремнии слоев, легированных сурьмой в диапазоне концентраций  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  -  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , в которых изменение концентрации примеси на порядок достигается на масштабах в единицы нанометров, а также  $\delta$ -легированных областей, имеющих размер в направлении роста 2,5-3 нм. Параметры (размер легированной области, градиент концентрации примеси)  $\delta$ -легированных Si:Sb слоев, сформированных с

использованием развитого метода, соответствуют рекордным значениям, приведенным в литературе. Показано, что формирование легированных областей с помощью предложенной метода не приводит к ухудшению структурных и электрических свойств образцов. Экспериментально подтверждено, что развитый метод может быть применен для создания на кремнии низкобарьерных диодов Шоттки.

5. Выявлены особенности сегрегации Sb в напряженных SiGe гетероструктурах, в зависимости от состава и упругих напряжений в них. Показано, что предложенный метод селективного легирования Si сурьмой может быть распространен и на SiGe гетероструктуры при учете зависимости сегрегационных свойств примеси от параметров (состава и упругих напряжений) SiGe слоев.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 20 работ, включая 7 статей в реферируемых журналах и 13 публикаций в материалах конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Объем диссертации составляет 153 страницы, включая 58 рисунков и 1 таблицу. Список цитированной литературы включает 166 наименований, список работ автора по теме диссертации – 20 наименований.

### **Список цитируемой литературы**

- [1] Леденцов, Н.Н. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры/ Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг // Физика и техника полупроводников. - 1998. - Т.32. - №4. - С.385-410.
- [2] Paul, D.J. Si/SiGe heterostructures: from material and physics to devices and circuits/ D.J. Paul // Semiconductor Science Technology - 2004. - V.19. - P.R75-R108.
- [3] Apertz, R. Photoluminescence and electroluminescence of SiGe dots fabricated by island growth/ R. Apertz, L. Vescan, A. Hartmann, C. Dieker, H. Luth // Applied Physics Letters. – 1995. – V.66. – P.445-447.
- [4] Tong, S. Normal-incidence Ge quantum-dot photodetectors at 1.5  $\mu\text{m}$  based on Si substrate/ S. Tong, J.L. Liu, J. Wan, and K.L. Wang // Applied Physics Letters. – 2002. - V.80. – P.1189-1191.
- [5] Brunner, K. Si/Ge nanostructures/ K. Brunner // Reports on Progress in Physics. – 2002. - V.65. - P.27-72.
- [6] Gossmann, H.-J. Delta Doping in Silicon/ H.-J. Gossmann and E.F. Schubert // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 1993. – V.18. – P.1-67.

- [7] Baribeau, J.-M. Ge dots and nanostructures grown epitaxially on Si / J.-M. Baribeau X. Wu, N.L. Rowell and D.J. Lockwood // *Journal of Physics: Condensed Matter*. - 2006. – V.18. - R139-R174.
- [8] Lobanov, D.N. Growth and photoluminescence of self-assembled islands obtained during the deposition of Ge on a strained SiGe layer/ D.N. Lobanov, A.V. Novikov, N.V. Vostokov, Y.N. Drozdov, A.N. Yablonskiy, Z.F. Krasilnik, M. Stoffel, U. Denker, O.G. Schmidt // *Optical Materials*. - 2005. - V.27. - P.818-821.
- [9] Tersoff, J. Self-Organization in Growth of Quantum Dot Superlattices/ J. Tersoff, C. Teichert and M.G. Lagally // *Physical Review Letters*. – 1996. – V.76. – P.1675-1678.
- [10] Schmidt, O.G. Multiple layers of self-assembled Ge/Si islands: Photoluminescence, strain fields, material interdiffusion, and island formation/ O.G. Schmidt and K. Eberl // *Physical Review B*. – 2000. – V.61. – P.13721-13729.
- [11] Jorke, H. Surface Segregation of Sb on Si(001) During Molecular Beam Epitaxy Growth/ H. Jorke // *Surface Science*. – 1988. – V.193. – P.569-578.
- [12] Nutzel, J.F. Segregation and diffusion on semiconductor surfaces/ J.F. Nutzel and G. Abstreiter // *Physical Review B*. – 1996. – V.53. – P.13551-13558.
- [13] Arnold, C.B. Unified kinetic model of dopant segregation during vapor-phase growth/ C.B. Arnold and M.J. Aziz // *Physical Review B*. – 2005. – V.72. – P.195419-17.
- [14] Fukatsu, S. Selflimitation in the surface segregation of Ge atoms during Si molecular beam epitaxial growth/ S. Fukatsu, K. Fujita, H. Yaguchi, Y. Shiraki, and R. Ito // *Applied Physics Letters*. – 1991. – V.59. – P.2103-2105.
- [15] Hobart, K.D. Surface Segregation and Structure of Sb-doped Si(100) films grown at low temperature by molecular beam epitaxy/ K.D. Hobart, D.J. Godbey, M.E. Twigg, M. Fatemi, P. E. Thompson, D.S. Simons // *Surface Science*. – 1995. – V.334. - P.29-38.
- [16] Jiang, Z.M. Strong surface segregation of Sb atoms at low temperatures during Si molecular beam epitaxy/ Z.M. Jiang, C.W. Pei, L.S. Liao, X.F. Zhou, X.J. Zhang, X. Wang, Q.J. Jia, M. Jiang, Z.H. Ma, T. Smith, I.K. Sou // *Thin Solid Films*. – 1998. – V.336. – P.236-239.

### **Список основных публикаций по теме диссертации**

- [A1] Юрасов, Д.В. Критическая толщина перехода по Странскому-Крастанову с учетом эффекта сегрегации / Д. В. Юрасов, Ю. Н. Дроздов // *ФТП*. – 2008. – Т. 42. Вып. 5. – С. 579–585.
- [A2] Дроздов, Ю.Н. Влияние упругих напряжений в подслоях на критическую толщину перехода по Странскому-Крастанову в системе GeSi/Si(001) / Ю. Н. Дроздов, Д. Н. Лобанов, А. И. Никифоров, А. В. Новиков, В. В. Ульянов, Д. В. Юрасов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2009. – Т. 7. Вып. 1. – С. 61–66.

- [A3] Yurasov, D.V. Features of two-dimensional to three-dimensional growth mode transition of Ge in SiGe/Si(001) heterostructures with strained layers / D. V. Yurasov, Yu. N. Drozdov, M. V. Shaleev, A. V. Novikov // Applied Physics Letters. – 2009. – V. 95. – P. 151902-151904.
- [A4] Дроздов, Ю.Н. Исследование перехода эпитаксиальной пленки Ge от послойного к трехмерному росту в гетероструктурах с напряженными подслоями SiGe / Ю. Н. Дроздов, А. В. Новиков, М. В. Шалеев, Д. В. Юрасов // ФТП. – 2010. – Т. 44. Вып. 4. – С. 538–543.
- [A5] Yurasov, D.V. Distinctions in the Ge wetting layer formation and self-assembled island nucleation between single- and multilayer SiGe/Si(001) structures / D. V. Yurasov, M. V. Shaleev, A. V. Novikov // Journal of Crystal Growth. – 2010. – V. 313. – P. 12–15.
- [A6] Yurasov, D.V. Usage of antimony segregation for selective doping of Si in molecular beam epitaxy / D. V. Yurasov, M. N. Drozdov, A. V. Murel, M. V. Shaleev, N. D. Zakharov, A. V. Novikov // Journal of Applied Physics. – 2011. – V. 109. – P. 113533-113539.
- [A7] Юрасов, Д.В. Метод селективного легирования кремния сегрегирующими примесями / Д. В. Юрасов, М. Н. Дроздов, А. В. Мурель, А. В. Новиков // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. Вып. 17. – С. 75–81.
- [A8] Дроздов, Ю.Н. Влияние упругих напряжений в подслоях на критическую толщину перехода по Странскому-Крастанову в системе GeSi/Si(001)/ Ю.Н. Дроздов, Д.Н. Лобанов, А.И. Никифоров, А.В. Новиков, В.В. Ульянов, Д.В. Юрасов // Материалы XII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», 10–14 марта 2008 г., Нижний Новгород, Россия, т.2, стр. 371–372.
- [A9] Дроздов, Ю.Н. Влияние напряженных SiGe слоев на критическую толщину двумерного роста Ge/ Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, Д.В. Юрасов // Материалы XIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», 16–20 марта 2009 г., Нижний Новгород, Россия, т.2, стр. 464–465.
- [A10] Novikov, A.V. 2D-3D growth mode transition of Ge film in SiGe/Si(001) heterostructures with SiGe strained layers/ A.V. Novikov, D.V. Yurasov, Yu.N. Drozdov, M.V. Shaleev // Book of extended abstracts of 1st International Workshop on Si based nano-electronics and –photonics, September 20-23, 2009, Vigo, Spain, P. 89-90.
- [A11] Дроздов, Ю.Н. Влияние напряженных SiGe слоев на критическую толщину двумерного роста Ge/ Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, Д.В. Юрасов // Тезисы IX Российской конференции по физике полупроводников «Полупроводники '09», 28 сентября – 3 октября 2009 г., Новосибирск – Томск, стр. 49.
- [A12] Дроздов, М.Н. Использование сегрегации сурьмы для управляемого легирования кремния и Si/Ge гетероструктур. М.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, А.Д. Кузнецов, М.В. Шалеев, Д.В. Юрасов // Материалы XIV Международного

- симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника», 16–19 марта 2010 г., Нижний Новгород, Россия, т.2, стр. 509-510.
- [A13] Yurasov, D.V. Features of 2D-3D growth mode transition in heterostructures with strained and relaxed sublayers/ D.V. Yurasov, Yu.N. Drozdov, M.V. Shaleev and A.V. Novikov // Abstract book of Conference “Quantum dot 2010”, 26-30 April 2010, Nottingham, UK, p.381.
- [A14] Антонов, А.В. Сегрегация Sb в SiGe гетероструктурах и ее использование для создания селективно-легированных структур/ А.В. Антонов, М.Н. Дроздов, А.Д. Кузнецов, А.В. Мурель, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, Д.В. Юрасов // Тезисы докладов VII Международной конференции "Кремний-2010", 6-9 июля 2010г., Нижний Новгород, стр. 121.
- [A15] Байдакова, Н.А. Особенности смены режима роста с двумерного на трехмерный в сложных SiGe гетероструктурах/ Н.А. Байдакова, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, Д.В. Юрасов // Тезисы докладов VII Международной конференции "Кремний-2010", Нижний Новгород, 6-9 июля 2010г., стр. 122.
- [A16] Новиков, А.В. Особенности формирования смачивающего слоя Ge и зарождения Ge(Si) самоформирующихся наностроек в многослойных структурах/ А.В. Новиков, Д.В. Юрасов, М.В. Шалеев, Н.Д. Захаров // Материалы XV Международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника», 14–18 марта 2011 г., Нижний Новгород, Россия, т.1, стр. 240-241.
- [A17] Дроздов, М.Н. Метод управляемого селективного легирования кремния и SiGe гетероструктур сегрегирующими примесями/ М.Н. Дроздов, А.В. Мурель, А.В. Новиков, Д.В. Юрасов // Материалы XV Международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника», 14–18 марта 2011 г., Нижний Новгород, Россия, т.1, стр. 242-243.
- [A18] Novikov, A.V. Features of Ge(Si)/Si(001) self-assembled island nucleation in multilayer structures/ A.V. Novikov, D.V. Yurasov, M.V. Shaleev, N.D. Zakharov, P. Werner // Proceeding of 19th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, June 20–25, 2011, Ekaterinburg, Russia, P. 195-196.
- [A19] Лобанов, Д.Н. Сегрегация сурьмы в напряженных SiGe/Si гетероструктурах/ Д.Н. Лобанов, М.Н. Дроздов, А.В. Мурель, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, В.Б. Шмагин, Д.В. Юрасов, N.D. Zakharov // Тезисы докладов VIII Международной конференции и VII Школы молодых ученых и специалистов «Кремний-2011», 05-08 июля 2011 г, Москва, с. 105.
- [A20] Дроздов, М.Н. Методика селективного легирования SiGe гетероструктур сегрегирующими примесями/ М.Н. Дроздов, А.В. Мурель, А.В. Новиков Д.В. Юрасов // Тезисы X Российской конференции по физике полупроводников, 19-23 сентября 2011 г., Нижний Новгород, стр. 183.

**ЮРАСОВ Дмитрий Владимирович**

**Особенности образования nanoостровков в многослойных SiGe  
гетероструктурах и метод селективного легирования SiGe  
структур сегрегирующими примесями**

Подписано к печати 30.10.2012 г. Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН  
603950, Нижний Новгород, ГСП-105