

Тимофеев Вячеслав Алексеевич

**МОРФОЛОГИЯ И СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ НА НАЧАЛЬНЫХ
СТАДИЯХ РОСТА ПЛЕНОК GeSi И GeSiSn НА Si(100)**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Никифоров Александр Иванович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Эрвье Юрий Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников, Томский Государственный Университет.

Буравлев Алексей Дмитриевич, кандидат физико – математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики микроструктур Российской академии наук.

Защита состоится « 10 » июня 2014 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « 10 » апреля 2014 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Погосов Артур Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В течение долгого времени во всем мире предпринимались попытки изготовления квантовых точек и приборов на их основе "традиционными способами", например, путем селективного травления структур с квантовыми ямами, роста на профилированных подложках, на сколах или конденсации в стеклянных матрицах. При этом приборно-ориентированные структуры так и не были созданы, а принципиальная возможность реализации атомоподобного спектра плотности состояний в макроскопической полупроводниковой структуре не была продемонстрирована в явном виде.

Качественный прорыв в области изготовления квантовых точек и приборов на их основе связан с использованием эффектов самоорганизации полупроводниковых наноструктур в гетероэпитаксиальных полупроводниковых системах. Интерес к данной области связан с необходимостью получения полупроводниковых наноструктур с размерами в диапазоне нескольких нанометров, чтобы обеспечить энергетические зазоры между подуровнями электронов и дырок порядка нескольких kT при комнатной температуре. А спонтанное упорядочение наноструктур позволяет получать включения узкозонных полупроводников в широкозонной матрице и тем самым создавать локализуемый потенциал для носителей тока. Явления спонтанного возникновения наноструктур создают основу для новой технологии получения упорядоченных массивов квантовых проволок и квантовых точек – базу для опто- и наноэлектроники нового поколения.

Наногетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками Ge на сегодняшний день представляют огромную значимость как с точки зрения удобной модельной системы для исследования влияния упругих деформаций, создаваемых несоответствием параметров решетки Ge и Si, на гетероэпитаксию, так и с точки зрения создания приборов опто- и наноэлектроники. В последние годы возросший интерес к фотоэлектрическим свойствам гетероструктур Ge(Si)/Si связан с расширением рабочего спектрального диапазона фотоприемников на базе Si в инфракрасную (ИК) область [1]. Очевидно, что для построения интегрально-оптических устройств необходимы не только излучатели, но и фотоприемники на базе Si. Ближний (0.74-2 мкм) и средний (2-50 мкм) ИК диапазоны – наилучший вариант для дистанционного считывания и отображения информации вследствие сниженного Рэлеевского рассеяния и вследствие окон прозрачности земной атмосферы вблизи 1.6 мкм, 3-5 мкм и 8-14 мкм. Последний диапазон представляет большую значимость для тепловидения. На основе гетероструктур с квантовыми точками Ge, встроенными в квантовые ямы Ge_xSi_{1-x} можно реализовать неохлаждаемые длинноволновые ИК детекторы (8-12 мкм) на внутризонных переходах. Для реализации структур Ge/ Ge_xSi_{1-x} в диссертационной работе

проводились исследования, направленные на построение кинетической диаграммы роста слоев $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и определение диапазона толщин пленки твердого раствора, в пределах которого слои $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ остаются псевдоморфными и бездислокационными.

Вследствие относительно высокого коэффициента межзонного поглощения при 1.3-1.55 мкм, пленки Ge представляют наилучший вариант для регистрации этого спектрального диапазона. Несмотря на большое несоответствие (4.2%), высококачественные тонкие пленки Ge успешно выращены прямо на Si, и фотоприемники Ge-на-Si высокой производительности также успешно реализованы. К сожалению, эффективность фотоприемника на основе Ge кардинально снижается в области длин волн более 1550 нм. В результате, детектор не покрывает L (1565-1625 нм) и U (1625-1675 нм) диапазоны. Сплав GeSn, другой полупроводник IV группы [2], его ширина запрещенной зоны меньше, чем у Ge и уменьшается с увеличением концентрации Sn. Даже небольших концентрацией Sn ($x \sim 0.02$) в сплаве $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ будет достаточно для того, чтобы покрыть все окна телекоммуникаций. Синтез $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ усложняется ограниченной взаимной растворимостью Ge и Sn < 1 % и поверхностной сегрегацией Sn, вследствие большего атомного размера Sn по отношению к Ge. Кроме того, получение бездислокационных сплавов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ на Si затруднено вследствие большого различия в постоянных решетки между сплавами $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и Si. Тем не менее, сделаны некоторые попытки решить эти проблемы, используя методы неравновесного роста, такие как низкотемпературная молекулярно-лучевая эпитаксия, магнетронное распыление и газофазная эпитаксия, которые создают пересыщенные твердые растворы сплавов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ [3-5]. В диссертационной работе методом низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии были исследованы начальные стадии роста $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$, а также получены псевдоморфные пленки $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и высокая плотность квантовых точек $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ в широком диапазоне температур.

Тройные сплавы $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ представляют интерес с точки зрения возможности независимой регулировки постоянной решетки и ширины запрещенной зоны. Для одного и того же значения постоянной решетки можно получить ширины запрещенных зон, которые отличаются больше чем на 0.2 эВ. Это свойство может быть использовано для создания многоцветных детекторов.

Для получения наногетероструктур с необходимыми параметрами требуется детальный анализ и изучение начальных стадий роста Ge, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$, $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ на Si во всем диапазоне составов. В литературе широко представлены исследования по росту чистого Ge на Si [9], однако, при этом не описаны движущие силы тех или иных изменений морфологии, которые управляют процессами на поверхности при разных температурах осаждения. В работах [6] и [7] предприняты попытки изучения начальных стадий формирования тонких пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ для

$x < 0.2$, а в работе [8] представлены данные по реконструкции поверхности при осаждении чистого Ge на Si. По росту слоев $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с $x > 0.2$ данные, как по реконструкции, так и по типу сверхструктуры в литературе не освещены. Монокристаллические слои $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ с высоким содержанием Sn вплоть до 20 % получены методом газофазной эпитаксии [9], однако, практически отсутствуют данные по морфологии и структуре этих пленок. Сделана попытка изучить сверхструктуры при росте чистого Sn на Si (100), тем не менее, остается не изученной реконструкция и типы сверхструктур в системе $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$. В диссертационной работе представлены исследования начальных стадий роста для целого класса материалов Ge-Si-Sn в широком диапазоне температур, толщин и составов.

Цель диссертационной работы состояла в установлении закономерностей начальных стадий роста пленок GeSi и GeSiSn на поверхности Si(100).

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние температуры подложки при росте Ge на Si (100) на критическую толщину смачивающего слоя.
2. Установить зависимость критической толщины пленки Ge для переходов 2D-3D и hut-dome от состава и толщины слоя твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ при росте гетероструктур Ge/ $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$.
3. Изучить начальные стадии роста пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, а также выявить область толщин, в которой $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ слои остаются псевдоморфными и бездислокационными.
4. Получить монокристаллические пленки $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ на Si(100).

Научная новизна работы

1. Обнаружено немонотонное изменение толщины смачивающего слоя от температуры, обусловленное изменением механизма двумерного роста: от двумерно-островкового к движению ступеней.
2. Выявлено, что при увеличении толщины слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и содержания германия в $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ наблюдается уменьшение критической толщины пленки Ge для переходов 2D-3D и hut-dome, вызванное ростом величины упругих напряжений с увеличением толщины пленки твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ или содержания Ge.
3. Впервые построена кинетическая диаграмма роста пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в зависимости от состава и температуры осаждения, на основании которой можно синтезировать многослойные структуры с квантовыми точками Ge и квантовыми ямами $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в широком диапазоне температур 300 – 700°C.
4. Исследована сверхструктура (2xN) в диапазоне составов от 20 до 100 % германия в слое твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ (x изменяется от 0.2 до 1). Период N достигает минимального

значения около 8 для чистой пленки Ge, в то время как для пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ число N возрастает от 8 до 14 с уменьшением содержания Ge.

5. При изучении гетероструктур $\text{Ge}/\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Ge}$ в верхнем слое Ge установлена промежуточная форма hut-like островков между hut- и dome-кластерами с огранкой {103}.
6. Методом анализа изменений интенсивности рефлексов картин дифракции быстрых электронов (ДБЭ) в процессе роста $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ впервые получена температурная зависимость критической толщины смачивающего слоя в диапазоне температур 150-450°C.
7. При росте тройного сплава GeSiSn, в отличие от пленок Ge, GeSi, GeSn наблюдалось затухание сверхструктуры (2x1) до полного ее исчезновения с дальнейшим изменением периодичности N в сверхструктуре (2xN) от 14 до 6 и образованием двухдоменной реконструкции (5x1).
8. Впервые построена кинетическая диаграмма роста $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$. Она аналогична полученной для чистого Ge на кремнии, при этом наблюдается смещение точки перегиба в низкотемпературную область, что объясняется влиянием олова, как сурфактанта, ускоряющего поверхностную диффузию.

Научная и практическая значимость работы

1. Установлены различные механизмы двумерного роста в зависимости от температуры осаждения пленки Ge на Si в диапазоне 300-700°C: двумерно-островковый механизм роста при низких температурах сменяется ростом за счет движения ступеней при температуре выше 500°C. Для переходов 2D-3D и hut-dome определены энергии активации, на основании которых можно судить о происходящих процессах на поверхности. При создании приборных Ge/Si структур, из соображений отсутствия бимодального распределения островков с hut и dome кластерами, целесообразно выбирать температуру роста 400-500°C.
2. Оработана технология получения псевдоморфных бездислокационных слоев $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в широком диапазоне температур и составов. Полученные данные о толщине двумерных слоев и более эффективные параметры массива квантовых точек актуальны при синтезе многослойных периодических Ge/Si структур для фотоприемников, работающих в среднем инфракрасном диапазоне.
3. Показано, что при росте $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ периодичность N, проявляемая в сверхструктуре (2xN) понижается от 14 до 8 с увеличением содержания Ge, либо температуры осаждения, либо толщины слоя твердого раствора, указывая на эффект сегрегации Ge. Вследствие сегрегации происходит ослабление деформации и уменьшение длины миграции адатомов Ge.

4. Синтезированы монокристаллические пленки $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ в диапазоне температур 150-450°C методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Полученные структуры на основе слоев $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ могут стать основой для создания инфракрасных фотоприемников.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Обнаружена немонотонная зависимость критической толщины смачивающего слоя Ge на Si(100) в диапазоне температур 300 – 700°C с точкой экстремума вблизи 500°C. Такое поведение объясняется сменой механизмов двумерного роста: от двумерно-островкового роста к росту за счет движения ступеней. Это подтверждается наблюдением осцилляций, характерных для двумерно-островкового механизма роста при низких температурах 300 – 500°C. При температурах выше 500°C происходит затухание осцилляций, что обусловлено снижением плотности двумерных островков и переходом к росту за счет движения ступеней. Влияние смены механизма роста на критическую толщину смачивающего слоя обусловлено изменением степени релаксации упругих напряжений для различной морфологии поверхности.
2. Диаграмма роста Ge на слое $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ позволяет, варьируя состав и толщину слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, управлять морфологией пленки Ge: двумерный слой, hut-островки, dome-островки. Полученная зависимость плотности и размера Ge островков от содержания Ge в слое твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ имеет диффузионный характер. Рост плотности островков при увеличении содержания Ge в $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ связан с уменьшением длины миграции адатомов Ge в сравнении с Ge на Si. В случае роста Ge на $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, поверхность которого модулируется нижележащим слоем Ge с массивом hut-островков с огранкой {105}, в диапазоне составов $x=0.25\div 0.5$, продемонстрирована промежуточная форма островков между hut- и dome-островками с огранкой {103}.
3. Экспериментально показано, что переход от двумерного к трехмерному росту для пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в диапазоне температур 300 – 700°C сильно зависит от температуры. Толщина перехода может отличаться в десять раз, что определяется различием коэффициентов диффузии Ge и Si. С повышением температуры происходит выравнивание коэффициентов и это дает более гладкую поверхность, тогда как при температурах вблизи 300°C, как показал расчет и эксперимент, поверхность шероховатая.
4. Впервые выявлено изменение сверхструктуры на поверхности $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ от содержания Ge и толщины. Исследована сверхструктура $(2 \times N)$ в диапазоне составов от 0 до 100 % (x изменяется от 0 до 1). Период N достигает минимального значения около 8 для чистой пленки Ge, в то время как для пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ число N возрастает от 8 до 14 с уменьшением

содержания Ge. Показано влияние эффекта сегрегации Ge на изменение реконструкции. Увеличение толщины слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ или повышение температуры при одном и том же составе ведет к движению периодичности N в сторону чистого германия, что говорит о накоплении поверхностной концентрации Ge, а также приводит к реконструкции поверхности с новой периодичностью.

5. Определены зависимости критических толщин переходов 2D-3D при росте пленок GeSn, GeSiSn от состава и температуры подложки. При росте тройного сплава GeSiSn, в отличие от пленок Ge, GeSi, GeSn наблюдается затухание сверхструктуры (2×1) до полного ее исчезновения с дальнейшим изменением периодичности N в сверхструктуре $(2 \times N)$ от 14 до 6 и образованием двухдоменной реконструкции (5×1) . Характер изменения критических толщин переходов 2D-3D определяется наличием Sn на растущей поверхности, которое в результате сегрегации действует как сурфактант.

Личный вклад соискателя в диссертационную работу заключался в участии постановки задач, проведении экспериментов методом ДБЭ на сверхвысоковакуумной установке МЛЭ, получении экспериментальных образцов для дальнейшего их структурного и электрофизического изучения, обработке экспериментальных данных, а также обсуждении результатов, написании статей и получении грантов.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

V Международной конференции “Кремний-2008”, Россия, Черноголовка, (2008); 15-th International Conference on Superlattices, Nanostructure and Nanodevices, Brazil, Natal, (2008); «Фотоника-2008», Россия, Новосибирск, (2008); Международный симпозиум «нанопизика и наноэлектроника», Россия, Нижний Новгород, (2009, 2011, 2013); 6-th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, USA, Los-Angeles, (2009); 18-th International Conference “Nanostructures: physics and technology”, Russia, St. Petersburg, (2010); 7 Международная конференция «Кремний 2010», Россия, Нижний Новгород, (2010); 16-th International Conference on superlattices, nanostructures and nanodevices, China, Beijing, (2010); Novosibirsk-Tohoku Global COE Conference for young scientists, Russia, Novosibirsk, (2010); X Российская конференция по физике полупроводников, Россия, Нижний Новгород, (2011); 7-th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures (ICSI-7), Belgium, Leuven, (2011); 16-th European workshop on molecular beam epitaxy (Euro-MBE 2011), France, Alpe d’Huez, (2011); Второй международный Симпозиум Нанотехнологии, Энергетика и Космос, Россия, Черноголовка (2011); 20-th International Symposium, Nanostructures: Physics and Technology, Russia, Nizhny Novgorod, (2012); 4-я Международная научно-практическая конференция Актуальные проблемы радиофизики «АПП-2012», Россия, Томск, (2012); E-MRS

2012 Fall Meeting, Poland, Warsaw, (2012); International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices, Germany, Dresden, (2012); E-MRS 2013 Spring Meeting, France, Strasburg, (2013); Третий международный Симпозиум Нанотехнологии, Энергетика и Космос, Казахстан, Алматы, (2013).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 22 работы, включая 9 статей в реферируемых журналах и 13 тезисов докладов на Международных и Российских конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 162 страницы, включая 68 рисунков. Список цитированной литературы включает 216 наименований, список основных работ автора по теме диссертации - 22 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы и основные задачи, показана научная новизна и практическая значимость диссертации, представлены сведения о структуре и содержании работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе проведен обзор работ, которые посвящены классу материалов Ge-Si-Sn. Приводятся данные об элементарных процессах, имеющих место в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии, а также механизмы роста тонких пленок. Рассмотрены основные причины перехода от двумерного к трехмерному росту и изменение морфологии поверхности в случае эпитаксии Ge на Si. Обсуждается методика определения переходов 2D-3D и hut-dome, используя профиль картины ДБЭ от времени осаждения. Описываются эффекты самоорганизации и возможности получения однородного массива островков. Исходя из литературных данных, демонстрируется возможность получения псевдоморфных слоев GeSi в качестве поверхности для формирования островков Ge. Изложены все имеющиеся данные по росту двойных и тройных сплавов на основе материалов Ge-Si-Sn. Несмотря на большое количество работ, направленных на получение монокристаллических пленок GeSn, GeSiSn, очень мало информации о морфологии и структуре поверхности. Таким образом, основной целью диссертационной работы является изучение и построение кинетических диаграмм роста, описывающие как изменение морфологии поверхности, так и структуру в системе материалов Ge, GeSi, GeSiSn.

Во **второй главе** приводится описание дифракции быстрых электронов (ДБЭ), как методики контроля за изменением морфологии поверхности в процессе роста. Сильная зависимость механизмов роста, а также параметров островков от условий проведения технологического процесса делает необходимым непрерывный мониторинг ситуации на ростовой поверхности

подложки. Использование падения с малыми углами скольжения ($1-5^\circ$) делает этот метод чувствительным к микрорельефу поверхности. Кроме того, представлена установка молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь», на которой проводились эксперименты в условиях сверхвысокого вакуума. Отдельно описана методика предэпитаксиальной очистки поверхности кремния. Перед каждым новым осаждением пленок Ge, GeSi, GeSiSn осуществлялся прогрев, охлаждение и зарощивание кремнием перед каждым экспериментом, что позволяет достичь минимального изменения исходной поверхности от эксперимента к эксперименту.

Третья глава включает в себя результаты исследований по росту Ge на Si и описывает влияние температуры и скорости роста на толщину переходов 2D-3D и hut-dome, наблюдаемых в процессе осаждения Ge на Si(100). В этом же параграфе обсуждается методика определения момента перехода 2D-3D и hut-dome. Определяя момент перехода 2D-3D при различных температурах в области $300^\circ\text{C}-700^\circ\text{C}$, получена зависимость критической толщины смачивающего

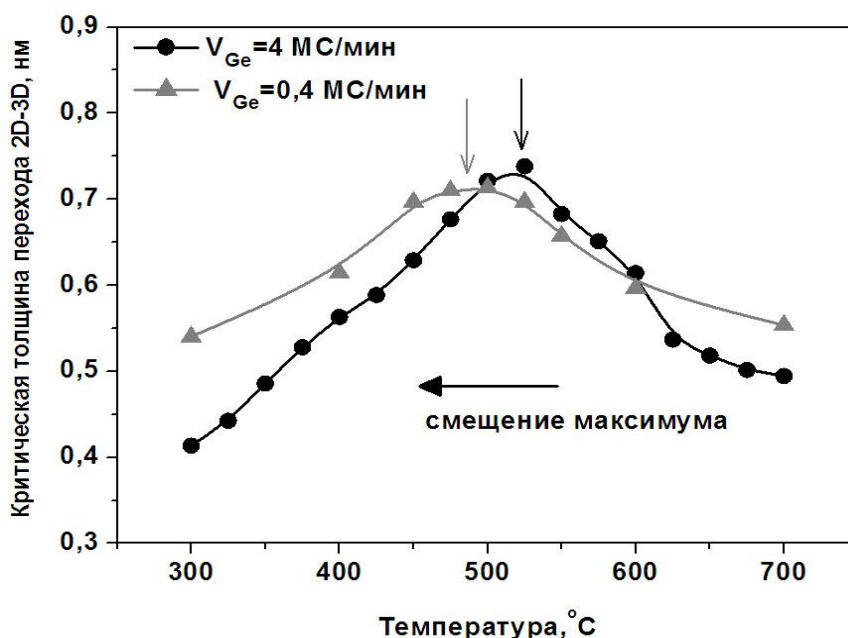


Рис. 1. Зависимость критической толщины пленки Ge для перехода 2D-3D от температуры и скорости роста.

слоя от температуры и скорости роста, представленная на рисунке 1 [A1]. В области 500°C происходит смена механизмов роста от образования двумерных островков и их разрастания к движению ступеней, это отражается затуханием осцилляций, характеризующих двумерно-островковый рост. Низкотемпературная ветвь может объясняться шероховатостью поверхности. При низких температурах подвижность адатомов низкая, поэтому часть из них не достигает краев двумерных островков и рост продолжается заполнением следующего монослоя на поверхности 2D островка. При этом может образовываться несколько уровней двумерных островков и возникает выраженная шероховатость поверхности, которая оказывает значительное влияние на увеличение имеющейся морфологической нестабильности смачивающего слоя Ge, вызванную упругими

напряжениями. В результате, переход 2D-3D становится более энергетически выгодным и происходит при меньшей толщине. С увеличением температуры подвижность адатомов возрастает и поверхностная диффузия приводит к понижению шероховатости, переход 2D-3D осуществляется при больших значениях смачивающего слоя. Часть ветви от 500°C и выше отражает корреляцию двух механизмов роста с доминирующим движением ступеней. При этом присутствие двумерных островков частично снимает упругие напряжения, что сказывается на увеличении критической толщины. Дальнейшее повышение температуры приводит к полному переходу к механизму движением ступеней. В этом случае релаксация напряжений только на краях ступеней, таким образом, переход наблюдается раньше и критическая толщина смачивающего слоя меньше. Эксперименты проводились при двух скоростях осаждения $V_{Ge} = 4$ МС/мин и 0.4 МС/мин, отличающиеся в десять раз. При этом немонотонная зависимость полностью сохраняется, а точка экстремума смещается в низкотемпературную область, для скорости $V_{Ge} = 0.4$ МС/мин. Это объясняется тем, что при низкой скорости поток молекулярного пучка меньше, следовательно, поверхностная длина диффузии больше и переход к движению ступеней смещается в низкотемпературную область от 525°C. Отметим, что точность определения критической толщины в наших экспериментах составляет 0.5 монослоя и определяется, в основном, неточностью поддержания скорости потока на поверхность и из-за нестабильности работы источника Ge. Аналогичным образом была получена температурная зависимость критической толщины осажденного Ge для перехода hut-dome.

В четвертой главе приводятся данные о морфологии и структуре в гетеросистемах Ge/Ge_xSi_{1-x}/Si, Ge_xSi_{1-x}/Si и Ge/Ge_xSi_{1-x}/Ge в широком диапазоне толщины, состава Ge_xSi_{1-x} и температуры подложки. Показано, что наличие заранее осаждённого слоя твердого раствора Ge_xSi_{1-x} несколько меняет критическую толщину Ge, растущего на поверхности Ge_xSi_{1-x} для морфологических переходов 2D-3D и hut-dome в сторону её уменьшения ввиду наличия дополнительной запасённой упругой энергии в слое твердого раствора Ge_xSi_{1-x}. Представлена диаграмма роста Ge на Ge_xSi_{1-x} при температуре роста 500°C и содержании Ge в слое Ge_xSi_{1-x} $x=0.3$ (рис. 2) [A2]. Наблюдается хорошее соответствие теории с экспериментом для переходов 2D-3D. При достижении толщины Ge_{0.3}Si_{0.7} 5 нм теория дает нулевое значение толщины пленки Ge в отличие от эксперимента. Это объясняется тем, что теоретическая модель не учитывает кинетические ограничения, связанные с преодолением барьера зародышеобразования, и изменение сверхструктуры. Кроме того, в этом же параграфе представлена диаграмма роста и при другом содержании $x=0.15$ и 0.6. Зависимость критической толщины переходов 2D-3D и hut-dome от толщины слоя Ge_xSi_{1-x} качественно сохраняется, однако, с увеличением содержания Ge наблюдается снижение критической толщины, что объясняется уменьшением барьера

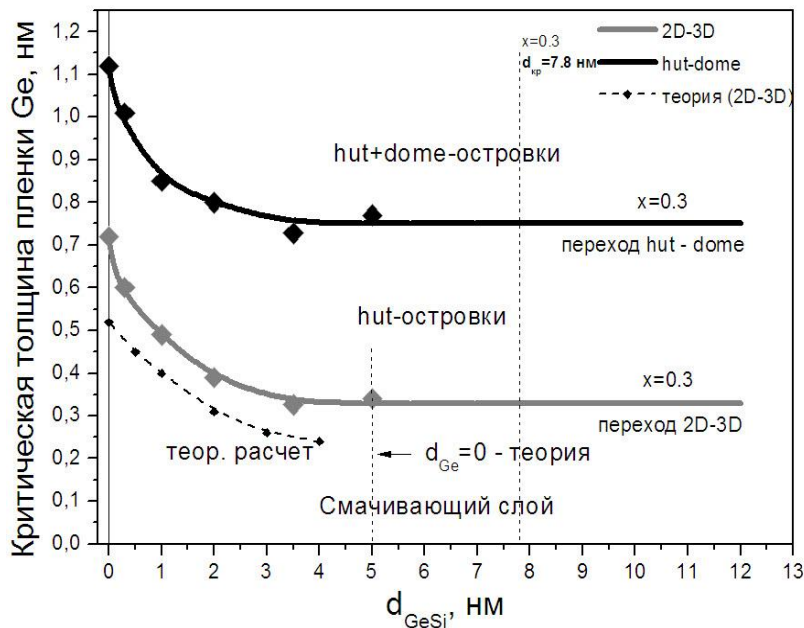


Рис. 2. Зависимости критической толщины пленки Ge для переходов 2D-3D и hut-dome от толщины слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ для состава $x=0.3$. Вертикальная пунктирная линия указывает на критическую толщину $d_{\text{кр}}=7.8$ нм, начиная с которой происходит пластическая релаксация слоя GeSi и вводятся дислокации.

зародышеобразования и уменьшением степени релаксации напряжений за счет реконструкции. Данные экспериментальных исследований и построенных зависимостей позволяют подбирать параметры роста необходимые для получения тех или иных структур: hut, dome-островков и их сосуществование на поверхности пленки. С учетом проведенных исследований роста Ge на слое $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ были выбраны толщины слоев твердого раствора для получения гетероструктур

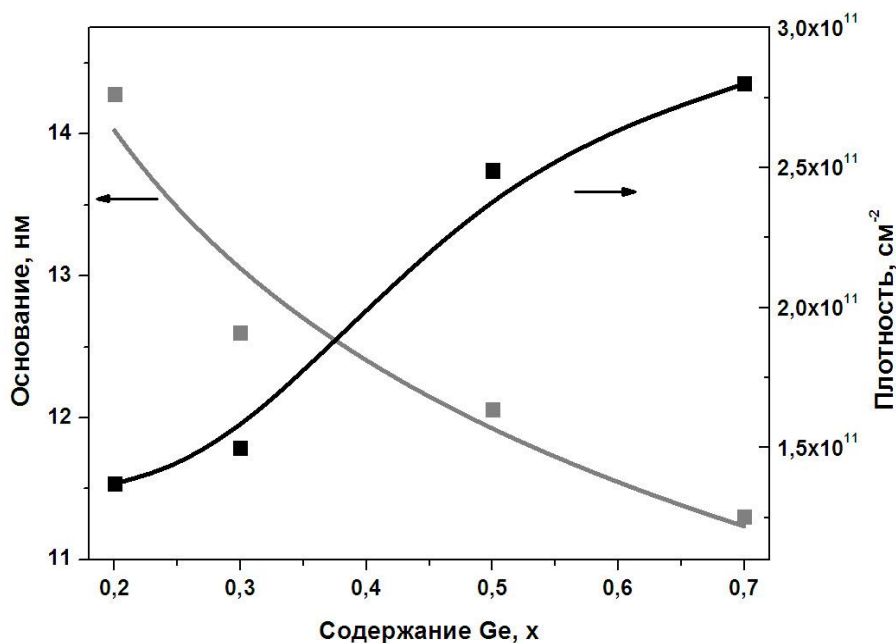


Рис. 3. Зависимости плотности островков Ge и их размеров для системы Ge/ $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ /Si от содержания Ge в слое твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ при $T=500^\circ\text{C}$.

Ge/ $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с массивом островков Ge. Для определения влияния состава твердого раствора на

свойства массива островков Ge была построена зависимость плотности и размеров островков от содержания германия от 20% до 100%, которая представлена на рисунке 3 [A3]. Анализ распределения островков методом СТМ показал, что с увеличением содержания германия в слое твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ плотность островков Ge увеличивается, а размер основания уменьшается. Такое поведение указывает на диффузионный характер зависимости, связанный с уменьшением коэффициента поверхностной диффузии германия с увеличением процентного содержания германия в слое твердого раствора. В четвертой главе диссертации можно найти более подробное рассмотрение данного вопроса.

Двумерные псевдоморфные слои $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ нашли применение также в гетероструктурах $\text{Ge}/\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Ge}$ [A4]. Верхний слой Ge осаждался на поверхность слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, который покрывал нижний слой Ge с массивом hut-островков, имеющих огранку $\{105\}$. В зависимости от содержания Ge в слое твердого раствора, рельеф, создаваемый этими островками, либо выглаживался, либо оставался в верхнем слое $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$. Во всем диапазоне составов изучена морфология как $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, так и верхней пленки Ge. При $x < 0.25$ наблюдается выглаживание нижнего слоя островков Ge и появление $(2 \times N)$ реконструкции, тогда как при $x > 0.25$ присутствует рельеф нижележащих островков. Плотность островков Ge в верхнем слое ниже, однако, увеличивается однородность островков по размерам до 10 %. Кроме этого, в определенном диапазоне составов обнаружено появление островков с огранкой $\{103\}$, которые идут вслед за hut-островками с огранкой $\{105\}$ [A5].

Также в четвертой главе представлены результаты исследований по росту псевдоморфных

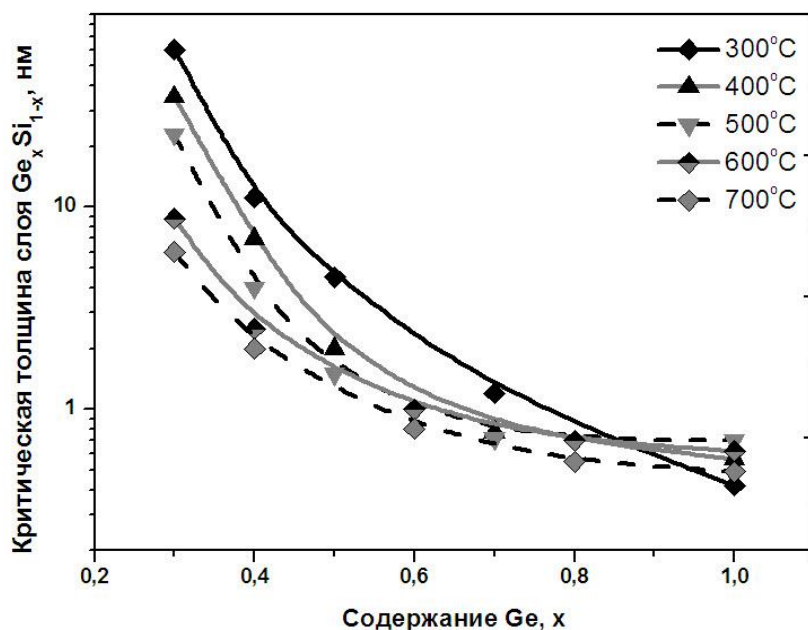


Рис. 4. Семейство кривых для критических толщин слоя твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ для перехода 2D-3D от состава и температуры подложки.

пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в широком диапазоне изменения x (процентное содержание Ge) при толщинах перехода 2D-3D заведомо меньших толщин, соответствующих пластической релаксации и введению дислокаций несоответствия. На основе данных ДБЭ строилась кинетическая диаграмма, описывающая переход 2D-3D пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в диапазоне температур 300-700°С (рис. 4) [A5]. Диапазон толщины $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ под графиком функции перехода 2D-3D определяет область толщин, в которой получают бездефектные псевдоморфные двумерные слои. Данные о диапазоне толщин, соответствующих двумерному псевдоморфному росту, дали возможность исследовать структуру и морфологию пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ на начальных стадиях роста во всем диапазоне допустимых значений толщины, состава и температуры. На картинах дифракции при росте пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ наблюдается реконструкция ($2 \times N$) также как и при росте чистого Ge с периодом N , который меняется в зависимости, как от состава, так и толщины пленки. С помощью регистрации картины дифракции быстрых электронов и последующей обработки данных исследована сверхструктура ($2 \times N$) во всем диапазоне составов. Число N достигает минимального значения около 8 для чистой пленки Ge, в то время как для пленок GeSi N возрастает от 8 до 14 с уменьшением содержания Ge. Кроме того, период зависит не только от состава пленки, но и толщины. С увеличением толщины пленки происходит снижение N до 8, как для чистого Ge. Это обстоятельство указывает на эффект сегрегации Ge.

Кристаллическое совершенство гетероструктур со слоями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, в том числе с островками Ge на поверхности пленки $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, анализировалось методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) поперечного среза, СТМ и рентгеновской дифрактометрии. В области роста псевдоморфных двумерных слоев $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, которая определена на основе кинетической диаграммы для пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, дефекты не были выявлены ни при росте слоя твердого раствора, ни при формировании островков германия.

В **пятой главе** представлены результаты исследований методом ДБЭ морфологии и структуры пленок $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ в диапазоне температур 150-450°С. Отличительной характеристикой процессов роста германия и пленок GeSn на Si(100) является то, что во время роста не наблюдаются осцилляции зеркального рефлекса. Отсутствие осцилляций интенсивности зеркального рефлекса говорит о двумерном механизме роста за счет движения ступеней. По смещению механизма двумерного роста за счет движения ступеней в низкие температуры вплоть до 150°С можно судить о влиянии Sn, которое выступает в качестве сурфактанта, ускоряющего поверхностную диффузию Ge. Для получения наглядного представления о морфологии поверхности в присутствии Sn требуется построение кинетической диаграммы роста $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ на Si(100). Определяя момент перехода 2D-3D при различных температурах в области 150-450°С, строилась зависимость критической толщины смачивающего слоя от температуры для нескольких

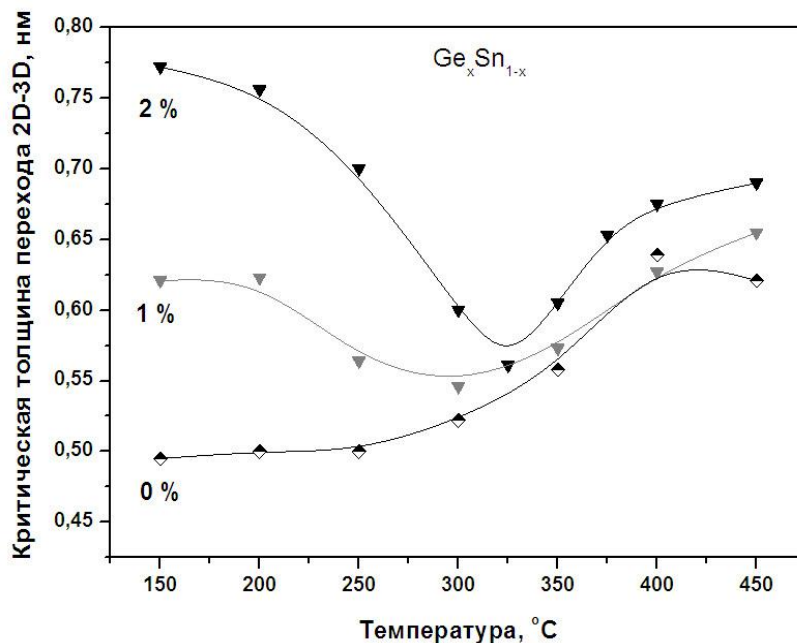


Рис. 5. Зависимости критической толщины смачивающего слоя от температуры и содержания Sn (0, 1 и 2%) при эпитаксии $Ge_{1-x}Sn_x$.

составов твердого раствора $Ge_{1-x}Sn_x$, которая представлена на рис. 5 [А6]. Температурная зависимость имеет немонотонный характер. При температурах выше $300^{\circ}C$ увеличение критической толщины перехода 2D-3D в сравнении с чистым Ge может объясняться понижением поверхностной энергии за счет Sn, которое сегрегирует, начиная с температуры около $300^{\circ}C$, что показано на примере тройных сплавов $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$. В низкотемпературной части кинетической диаграммы ниже $300^{\circ}C$ критическая толщина перехода 2D-3D существенно возрастает и это вызвано не столько понижением поверхностной энергии, сколько увеличением поверхностной диффузии германия.

В этой же главе приводятся данные о морфологии и структуре пленок $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$. Процесс роста твердого раствора $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ качественно соответствует процессу гетероэпитаксиального роста пленки германия на поверхности Si(100). Судя по характеру изменений дифракционной картины, морфология поверхности слоев твердого раствора $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ и чистого Ge качественно совпадают. Наблюдаются известные морфологические состояния пленки - гладкий смачивающий слой и трехмерные островки на нем. Количественно эти переходы отличаются по значениям температуры перехода и критическим толщинам, при которых они наблюдаются. Смачивающий слой характеризуется в обоих случаях наличием на поверхности сверхструктур (2×1) и $(2 \times N)$. Период N зависит от состава твердого раствора и его толщины. В процессе роста слоя $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ сверхструктура $(2 \times N)$ характеризуется изменением N от 14 до 6, при этом наблюдается исчезновение реконструкции (2×1) . Дальнейшее увеличение толщины пленки приводит к образованию двухдоменной сверхструктуры (5×1) на поверхности твердого раствора

непосредственно перед образованием трехмерных островков. Понижение температуры роста от 350 до 200 °С приводит к вырождению сверхструктуры (5x1) и появлению сверхструктур (2x1) и (2xN). Такое поведение структуры поверхности может говорить об уменьшении влияния сегрегации Sn с понижением температуры.

С помощью ДБЭ в процессе эпитаксиального роста была определена критическая толщина перехода от двумерного к трехмерному росту для структур $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y/\text{Si}(100)$ от температуры

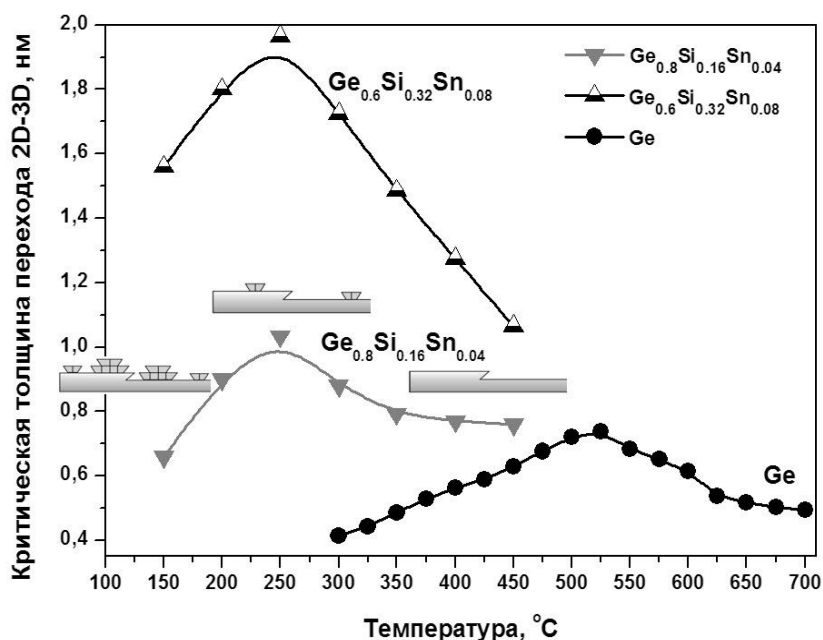


Рис. 6. Температурная зависимость критической толщины перехода 2D-3D при эпитаксии $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ на $\text{Si}(100)$. Над одним из графиков показаны схематически реализуемые механизмы двумерного роста.

осаждения (рис. 6). Температурная зависимость критической толщины смачивающего слоя имеет немонотонный характер с максимумом. Такое поведение обусловлено изменением механизма роста от двумерно-островкового роста к росту поверхности за счет движения ступеней. Для сравнения приведена зависимость перехода 2D-3D при росте чистого германия на поверхности $\text{Si}(100)$. Уменьшение температуры, при которой происходит переход между механизмами роста у тройных растворов $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ по сравнению с процессом роста чистого Ge, связано с присутствием олова, которое действует в качестве сурфактанта, ускоряющего поверхностную диффузию адатомов Ge и Si.

Основные результаты работы

1. Получена температурная зависимость критической толщины переходов 2D-3D и hut-dome в диапазоне температур 300-700 °С. Немонотонная зависимость перехода 2D-3D объясняется сменой механизма роста от двумерно-островкового к механизму движения ступеней. С уменьшением скорости в 10 раз от 0,09 Å/с до 0,009 Å/с немонотонное поведение зависимости перехода от смачивающего слоя к hut-островкам сохраняется, при этом точка перегиба смещается в

низкотемпературную область, что связано с увеличением длины миграции адатомов Ge и, таким образом, смена механизмов роста наблюдается раньше. Влияние смены механизма роста на критическую толщину смачивающего слоя обусловлено изменением степени релаксации упругих напряжений для различной морфологии поверхности.

2. Исследован рост Ge на слое твердого раствора Ge_xSi_{1-x} в широком диапазоне толщин и составов при температуре 500°C. Показано, что с увеличением толщины Ge_xSi_{1-x} критическая толщина пленки Ge для переходов 2D-3D и hut-dome уменьшается нелинейно и выходит на насыщение. Ненулевое значение критической толщины в области насыщения связано с кинетическими ограничениями, требующими преодоления барьера зародышеобразования, тогда как теоретический расчет при рассмотрении уравнения баланса дает нулевое значение критической толщины, поскольку не учитывает наличие барьера и сверхструктуры. Увеличение содержания Ge до 60% в слое Ge_xSi_{1-x} приводит к уменьшению критической толщины 2D-3D перехода до 1.5 МС (монослой). Плотность островков Ge на слое Ge_xSi_{1-x} увеличивается по сравнению с системой Ge/Si. Увеличение Ge в слое твердого раствора приводит к снижению коэффициента диффузии Ge и, таким образом, увеличению плотности островков. Однородность по размерам может достигать 10% при среднем размере островков 10 нм. Обнаружено, что в случае роста Ge на Ge_xSi_{1-x} , поверхность которого модулируется нижележащим слоем Ge с массивом hut-островков с огранкой {105}, в диапазоне составов $x=0.25\div 0.5$ появляется промежуточная форма островков между hut- и dome-островками с огранкой {103}. Диапазон состава, при котором наблюдается промежуточная форма, определялся путем построения диаграммы роста гетеросистемы Ge/ Ge_xSi_{1-x} /Ge.

3. Экспериментально установлена зависимость критической толщины 2D-3D перехода при росте пленок Ge_xSi_{1-x} от состава и температуры подложки. На основе кинетической диаграммы отработана технология синтеза псевдоморфных бездислокационных пленок Ge_xSi_{1-x} в многослойных структурах при температурах 300-700°C, в том числе с массивом квантовых точек Ge. Показано, что величина критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту для пленок Ge_xSi_{1-x} в диапазоне температур 300-700°C зависит от температуры и состава.

4. Методом ДБЭ исследована сверхструктура (2xN) в диапазоне составов от 20 до 100 % (x изменяется от 0.2 до 1). Период N достигает минимального значения около 8 для чистой пленки Ge, в то время как для пленок Ge_xSi_{1-x} число N возрастает от 8 до 14 с уменьшением содержания Ge. Понижению периода N способствует не только состав, но и толщина, а также температура роста. Кроме того, продемонстрировано явление сегрегации Ge при росте псевдоморфных пленок Ge_xSi_{1-x} по изменению сверхструктуры.

5. Установлена зависимость критической толщины 2D-3D перехода для монокристаллических пленок $Ge_{1-x}Sn_x$ при небольших концентрациях Sn. В диапазоне температур 150-450°C

наблюдается немонотонная зависимость с минимумом в области 300°С. Такое поведение носит диффузионный характер, все определяется диффузией адатомов Ge и Sn. В области высоких температур происходит накопление Sn на поверхности вследствие ее сегрегации, которая подавляет сегрегацию Ge. Впервые выявлены особенности роста слоев $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$, имеющие такой же параметр решетки, как и у Ge. При росте тройного сплава $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$, в отличие от пленок Ge, GeSi, GeSn наблюдается затухание сверхструктуры (2x1) до полного ее исчезновения с дальнейшим изменением периодичности N в сверхструктуре (2xN) от 14 до 6 и образованием двухдоменной реконструкции (5x1). Немонотонная зависимость критической толщины 2D-3D перехода при росте $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ подобна зависимости при росте чистого Ge, при этом наблюдается смещение точки перегиба в низкотемпературную область, что объясняется влиянием олова, как сурфактанта, ускоряющего поверхностную диффузию.

Список цитированной литературы

1. Paul, D. J. Si/SiGe heterostructures: From material and physics to devices and circuits / D. J. Paul // *Semiconductor Science and Technology*. – 2004. – V. 19. – P. R75 – R108.
2. Roucka, R. $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ photoconductor structures at 1.55 μm : From advanced materials to prototype devices / R. Roucka, J. Xie, J. Kouvetakis // *Journal of Vacuum Science and Technology B*. – 2008. – V. 26 – P. 1952 – 1959.
3. He, G. Interband transitions in $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$ alloys / G. He, H. A. Atwater // *Physical Review Letters*. – 1997. – V. 79 – P. 1937 – 1940.
4. Ladrón de Guevara, H. P. Determination of the optical energy gap of $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ alloys with $0 < x < 0.14$ / H. P. Ladrón de Guevara, A. G. Rodríguez, H. Navarro-Contreras, M. A. Vidal // *Applied Physics Letters*. – 2004. – V. 84 – P. 4532 – 4534.
5. Gurdal, O. Low-temperature growth and critical epitaxial thicknesses of fully strained metastable $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($x \leq 0.26$) alloys on Ge (001) 2×1 / O. Gurdal, P. Desjardins, J. R. A. Carlsson, N. Taylor, H. H. Radamson, J.-E. Sundgren, J. E. Greene // *Physical Review Letters*. – 1998. – V. 83 – P. 162 – 170.
6. Butz, R. (2xn) surface of SiGe layers deposited on Si (100) / R. Butz, S. Kampers // *Applied Physics Letters*. – 1992. – V. 61 – P. 1307 – 1309.
7. Jernigan, G. Scanning tunneling microscopy of SiGe alloy surfaces grown on Si (100) by molecular beam epitaxy / G. Jernigan, P. Thompson // *Surface Science*. – 2002. – V. 516 – P. 207 – 215.
8. Feng, L. Scanning Effect of strain on structure and morphology of ultrathin Ge films on Si (001) / L. Feng, W. Fang, M. G. Lagally // *Chemistry Review*. – 1997. – V. 97 – P. 1045 – 1061.
9. D'Costa, V. R. Tunable Optical Gap at a Fixed Lattice Constant in Group-IV Semiconductor Alloys / V. R. D'Costa, Y.-Y. Fang, J. Tolle, J. Kouvetakis, J. Menéndez // *Physical Review Letters*. – 2009. – V. 102 – P. 107403-1 – 107403-4.

Список основных работ автора по теме диссертации

Статьи

A1. Nikiforov, A.I. Wetting layer formation in superlattices with Ge quantum dots on Si(100) / A.I. Nikiforov, V.V. Ulyanov, V.A. Timofeev, O.P. Pchelyakov // *Microelectronics Journal*. – 2009. – V. 40 – P. 782 – 784.

A2. Nikiforov, A.I. Ge and $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ islands formation on $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ solid solution surface / A.I. Nikiforov, V.A. Timofeev, S.A. Teys, A.K. Gutakovsky, O.P. Pchelyakov // *Thin Solid Films*. – 2012. – V. 520 – P. 3319 – 3321.

A3. Nikiforov, A.I. Initial stage growth of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ layers and Ge quantum dot formation on $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ surface by MBE / A.I. Nikiforov, V.A. Timofeev, S.A. Teys, A.K. Gutakovsky, O.P. Pchelyakov // *Nanoscale Research Letters*. – 2012. – V. 7 – P. 561.

A4. Якимов, А.И. Антисвязывающее основное состояние дырок в двойных вертикально связанных квантовых точках Ge/Si / А.И. Якимов, В.А. Тимофеев, А.И. Никифоров, А.В. Двуреченский // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2011. – Т. 94. Вып. 10 – С. 806 – 810.

A5. Никифоров, А.И. Формирование слоев квантовых ям и квантовых точек GeSi методом МЛЭ для ИК фотоприемников / А.И. Никифоров, В.А. Тимофеев, С.А. Тийс, А.К. Гутаковский, О.П. Пчеляков, А.И. Якимов // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2012. – Т. 55 – С. 249 – 250.

A6. Mashanov, V. Formation of Ge-Sn nanodots on Si(100) surfaces by molecular beam epitaxy / V. Mashanov, V. Ulyanov, V. Timofeev, A. Nikiforov, O. Pchelyakov, Ing-Song Yu, Henry Cheng. // *Nanoscale Research Letters*. – 2011. – V. 6 – P. 85.

Тезисы и материалы конференций

A7. Ульянов, В.В. 2D-3D и “hut” - “dome” переходы при росте Ge на поверхности $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ / В.В. Ульянов, А.И. Никифоров, В.А. Тимофеев // Тезисы докладов VII Международной конференции «Кремний 2010», Нижний Новгород, 6-9 июля 2010г., стр. 193.

A8. Timofeev, V.A. 2D-3D and hut - dome transitions during Ge growth on the $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(100)$ / V.A. Timofeev // *Novosibirsk-Tohoku Global COE Conference for young scientists, 21-26 september 2010, Novosibirsk*, p. 47.

A9. Тимофеев, В.А. Критическая толщина 2D-3D перехода в процессе роста тонких пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ / В.А. Тимофеев, А.И. Никифоров, В.В. Ульянов, С.А. Тийс, О.П. Пчеляков // XV Международный симпозиум «нанопизика и нанoeлектроника», 14-18 марта 2011, Нижний Новгород, с. 248.

- A10. Никифоров, А.И. Формирование и свойства островков Ge на поверхности напряженного твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ / А.И.Никифоров, В.А. Тимофеев, С.А. Тийс, А.К. Гутаковский, О.П. Пчеляков // X Российская конференция по физике полупроводников, 19-23 сентября 2011, Нижний Новгород, с. 30.
- A11. Timofeev, V.A. Critical thickness of 2D-3D and "hut"- "dome" transitions at the growth of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ and $\text{Ge}/\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ layers on the Si(100) / V.A. Timofeev, A.I. Nikiforov, V.V. Ulyanov, O.P. Pchelyakov // 16th European workshop on molecular beam epitaxy (Euro-MBE 2011), Alpe d'Huez, France, March 20-23, 2011, p. 157.
- A12. Timofeev, V.A. Surface morphology investigation in Ge/GeSi/Ge heterosystem with alternating layers / V.A. Timofeev, A.I. Nikiforov, S.A. Teys, A.K. Gutakovsky and O.P. Pchelyakov // 20th International Symposium, Nanostructures: Physics and Technology, Nizhny Novgorod, Russia, June 24-30, 2012.
- A13. Никифоров, А.И. Формирование слоев квантовых ям и квантовых точек GeSi методом МЛЭ для ИК фотоприемников / А.И. Никифоров, В.А. Тимофеев, С.А. Тийс, А.К. Гутаковский, О.П. Пчеляков, А.И.Якимов // 4-я Международная научно-практическая конференция Актуальные проблемы радиофизики «АПП-2012», Томск, 1–7 октября, 2012.
- A14. Timofeev, V.A. Synthesis of two-dimensional pseudomorphic GeSi films under different growth conditions / V.A. Timofeev, A.I. Nikiforov, S.A. Teys, A.K. Gutakovsky, O.P. Pchelyakov // E-MRS 2012 Fall Meeting, Warsaw, 17-21 September, 2012.
- A15. Timofeev, V.A. Influence of growth parameters on superstructure type and Ge island properties in Ge/GeSi, Ge/GeSi/Ge nanoheterostructures / V.A. Timofeev, A.I. Nikiforov, S.A. Teys, A.K. Gutakovsky, O.P. Pchelyakov // E-MRS 2013 Spring Meeting, 27-31 May 2013, France, Strasburg, symposium J, p. 27.
- A16. Timofeev, V.A. Initial stages MBE growth of SiGe and SiGeSn on Si(100) / V.A. Timofeev, A.I. Nikiforov, V.I. Mashanov. Third International Symposium Nanotechnology, Energy and Space, 5-8 august 2013, Kazakhstan, Almaty, p. 91.
- A17. Никифоров, А.И. Начальная стадия роста пленок $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}$ на Si(100) / А.И. Никифоров, В.И. Машанов, В.А. Тимофеев, О.П. Пчеляков, Н.-Н. Cheng // XI Российская конференция по физике полупроводников, 16-20 сентября 2013, Санкт-Петербург, с. 169.
- A18. Тимофеев, В.А. Синтез двумерных псевдоморфных GeSi слоев при различных кинетических и термодинамических условиях осаждения / В.А. Тимофеев, А.И. Никифоров, С.А. Тийс, О.П. Пчеляков // XVII Международный симпозиум «нанопизика и наноэлектроника», 11-15 марта 2013, Нижний Новгород, с. 610.