

На правах рукописи



Дирко Владимир Владиславович

**СВЕРХСТРУКТУРНЫЕ ПЕРЕХОДЫ ПРИ СИНТЕЗЕ
ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК Ge/Si, GeSi/Si
МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ**

1.3.11. Физика полупроводников

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Коханенко Андрей Павлович

Официальные оппоненты:

Варнаков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», заместитель директора по научной работе

Никифоров Александр Иванович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория № 16, заведующий лабораторией

Панин Алексей Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики поверхностных явлений, заведующий лабораторией

Защита состоится 24 ноября 2022 года в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.1.3.01» созданного на базе физического факультета и Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 36 (главный корпус СФТИ ТГУ, аудитория 211).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/803d0033-bf94-427f-93e2-98253aea69cc>

Автореферат разослан «___» октября 2022 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Панченко Елена Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие ростовых эпитаксиальных методов существенно расширило получение полупроводниковых структур с заданными параметрами. Эпитаксиальные методы позволили создавать структуры со сложным профилем и концентрацией легирующих примесей. Важным преимуществом процессов эпитаксиального роста является возможность задавать параметры наногетероструктур. Управление гетероэпитаксиальным процессом позволило влиять на процессы протекания электрического тока, величину диэлектрической проницаемости, ширину запрещенной зоны, подвижность носителей заряда и спектр электронных состояний, благодаря чему были улучшены характеристики существующих традиционных полупроводниковых приборов и получены новые приборы на основе квантово-размерных структур. Наноструктуры с квантовыми ямами и квантовыми точками уже около десятка лет активно используются при создании фотодетекторов, солнечных элементов и светоизлучающих устройств для таких быстро развивающихся областей как наноэлектроника и нанофотоника [1–6]. Кроме того, в последнее время осознается перспективность использования подобных структур для создания приборов совершенно нового уровня, например, топологических транзисторов, твердотельных спиновых кубитов, высокочувствительных сенсоров.

Важным обстоятельством формирования эпитаксиальных гетероструктур является рассогласование параметра кристаллических решеток используемых материалов, который влияет на упругие напряжения в создаваемой системе. За счёт сложного характера поведения величины и распределения упругих напряжений в системе квантовые точки/двумерный слой, становится возможной их направленная модификация с целью создания структур для современной стрейнтроники [7–10].

Степень разработанности темы исследования. Для создания гетероструктур с двумерными слоями и квантовыми точками наилучшего качества применяется метод молекулярно-лучевой эпитаксии. При этом самоорганизация наноструктур реализуется только в системах, в которых существует рассогласование по постоянной решетки между осаждаемым материалом и подложкой.

Классическим примером эпитаксиального синтеза, при котором реализуется рост по механизму Странского–Крастанова, является осаждение германия на поверхность кремния. Для этой пары материалов характерно рассогласование по постоянной решетки величиной $\epsilon_0 = 4,2\%$ [11]. В связи с этим, до эффективной толщины осаждаемого материала около четырех монослоев (МС) германий растет послойно, а затем на поверхности этого двумерного смачивающего слоя начинается зарождение и рост трехмерных островков. Обычно причиной смены механизма роста называется изменение поверхностных энергий растущего слоя [12], а также релаксация накопленных упругих напряжений при образовании наноструктур, которые ведут к поверхностной реконструкции атомов, смене механизмов роста, появлению дефектов и проявлению кинетических процессов. Однако такое чисто термодинамическое объяснение перехода от двумерного к трехмерному росту не позволяет описать сложный характер температурной зависимости критической толщины, при которой происходит этот переход.

В материальной системе Ge-Si наиболее исследованным все еще остается диапазон ростовых температур от 400 °С и выше, а низкотемпературной эпитаксии исторически уделялось недостаточно внимания.

В частности, предметом непрекращающихся научных дискуссий до сих пор остается физический механизм, лежащий в основе перехода от двумерного к трехмерному росту [13–20]. Стало очевидно, что одних энергетических соображений недостаточно, чтобы объяснить температурную зависимость критической толщины перехода по Странскому–Крастанову, и требуются более глубокие рассмотрения кинетики процессов, протекающих при адсорбции, миграции и встраивании атомов в растущий слой.

Целью данной диссертационной работы является исследование динамики сверхструктурных реконструкций при эпитаксиальном росте Ge/Si, GeSi/Si в зависимости от параметров ростовых процессов.

Исходя из цели работы, поставлены следующие **задачи исследования**:

1. Анализ литературных источников по исследованиям морфологии поверхности в материальной системе Ge-Si.
2. Модернизация дифрактометра быстрых отражённых электронов на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100».
3. Исследование температурной зависимости перехода из сверхструктуры 7×7 в 5×5 и определить значения критической толщины двумерного слоя при эпитаксиальном росте Ge на Si(111) с помощью метода дифракции быстрых отраженных электронов.
4. Исследование динамики изменения реконструкции $2 \times N$ при эпитаксиальном росте Ge/Si(001), GeSi/Si(001) с помощью метода дифракции быстрых отраженных электронов.
5. Разработка кинетической модели роста Ge/Si(001) с учетом экспериментально полученной зависимости рассогласования решеток и поверхностных энергий от толщины двумерного слоя.

Научная новизна исследования. Постановка научных задач и их решение, в том числе исследование динамики сверхструктурных переходов при низкотемпературной эпитаксии в системах Ge/Si, GeSi/Si и учёт результатов экспериментальных исследований параметров сверхструктурной реконструкции в моделировании процессов роста, являются новыми и позволили получить результаты, соответствующие мировому уровню исследований.

Основные результаты диссертационной работы получены впервые:

1. В работе исследованы зависимости сверхструктурных переходов от температуры и смена величины параметра N при низких температурах эпитаксии в этой системе. Показано, что длина димерных рядов в такой реконструкции при росте чистого германия на кремнии может достигать величины не менее $N = 11$.
2. Получены детальные зависимости параметра периодичности N реконструкции типа $2 \times N$ от эффективной толщины осажденного материала в широком интервале ростовых температур и составов при эпитаксии чистого германия и твердого раствора германий-кремний на поверхность кремния с кристаллографической ориентацией (001).
3. Кроме того, в работе представлены результаты исследования скорости сверхструктурных переходов 7×7 в 5×5 от значения температуры при эпитаксиальном росте германия на подложке Si(111). Впервые показано, что время перехода от сверхструктуры 7×7 к сверхструктуре 5×5 зависит от температуры эпитаксиального роста.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Результаты проведенного исследования вносят существенный вклад в понимание процессов кинетики поведения сверхструктурных переходов при синтезе гетероэпитаксиальных плёнок германия/кремния и германий-кремний/кремнии методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Учет полученной нелинейной зависимости расстояния между атомами на поверхности и поверхностной энергии двумерного слоя от толщины осажденного материала в кинетической модели роста по механизму Странского–Крастанова позволяет точнее оценить характеристики массивов островков и строить модели формирования нанокластеров по механизму Странского–Крастанова в других материальных системах.

Практическая значимость работы состоит также в возможности разработки технологического процесса получения методом молекулярно-лучевой эпитаксии материала для создания приборов опто- и наноэлектроники на основе наногетероструктур Ge/Si и GeSi/Si.

Результаты диссертационного исследования использовались при выполнении ряда научно-исследовательских работ: НИР при поддержке программы повышения конкурентоспособности Томского государственного университета 2018–2019 гг., № 8.2.04.2018 «Комплексное изучение свойств фоточувствительных и светоизлучающих структур нового поколения на базе наноструктур полупроводниковых соединений A₂B₆, A₃B₆ и A₄B₄», НИР при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 2018–2020 гг., № 18-32-20082 мол_а_вед «Двумерные и нульмерные структуры на основе кремния и элементов IV группы для быстродействующих транзисторов нового поколения», НИР при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 2018–2020 гг., № 19-72-00019 «Разработка физико-математических моделей эпитаксиального формирования 2D-кристаллов силицена и германена для наноэлектроники и нанофотоники», НИР при поддержке Российского научного фонда 2019–2021 гг., № 19-12-00135 «Физико-технологические основы создания униполярных барьерных структур на основе МЛЭ n-HgCdTe для инфракрасных детекторов с пониженными темновыми токами», НИР при поддержке Министерства науки и высшего образования России 2020–2023 гг., госзадание № 0721-2020-0048 «Физические основы использования низкоразмерных полупроводниковых структур в квантовых информационных системах», НИР при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 2019–2021 гг., № 19-32-90195 Аспиранты «Исследование процессов релаксации кристаллической структуры эпитаксиальных пленок в процессе синтеза псевдоморфных и напряженных гетероэпитаксиальных пленок Ge/Si, GeSi/Si», НИР при поддержке Российского научного фонда 2021–2024 гг., № 21-72-10031 «Физико-технические основы синтеза бездефектного силицена и германена методом молекулярно-лучевой эпитаксии», НИР при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 2018–2021 гг., № 18-43-700005 «Разработка физических основ функционирования и создание гибридных органо-неорганических систем для фотопреобразователей и солнечных элементов видимого и инфракрасного диапазонов».

Методология и методы исследования. Методы исследования выбирались в соответствии с поставленными задачами. Теоретической основой работы послужила кинетическая теория роста квантовых точек, основанная на общей теории нуклеации островков. При этом использовался кинетический подход, дающий возможность проследить за динамикой зарождения и последующей эволюции островков во времени в процессе роста. Данный подход является в настоящий момент общепринятым для описания процессов, происходящих при гетероэпитаксии. Исследования сверхструктурных переходов при гетероэпитаксиальном росте плёнок Ge и GeSi на Si(001) и Si(111) проводились в установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь–100». Для исследований использовались коммерчески доступные пластины Si(001) и Si(111) с отклонением от кристаллографической плоскости < 0,5°.

Перед началом работы пластины проходили предэпитаксиальную подготовку, состоящую из химической обработки и термического отжига в сверхвысоком вакууме с последующим нанесением буферного слоя > 100 нм. Основным методом анализа сверхструктурных переходов являлся метод дифракции быстрых отраженных электронов. Анализ дифракционных картин проводился во время эпитаксиального роста с последующей компьютерной обработкой. Так, методом дифракции быстрых отраженных электронов можно определить сверхструктурные переходы, изменение параметра решетки материала, скорость напыления и процентное содержание растворов, переход к трехмерному росту, огранку образующихся эпитаксиальных квантовых точек.

Для исследования характеристик выращенных структур и верификации метода дифракции быстрых отраженных электронов использовались методы атомно-силовой микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и низкотемпературной фотолуминесценции.

В аппарат исследования включались такие общенаучные методы, как сравнение результатов расчетов с полученными экспериментальными данными, а также с результатами, представленными в научных публикациях в ведущих российских и зарубежных изданиях.

В результате выполнения поставленных в работе задач были сформулированы следующие **научные положения, выносимые на защиту**:

1. При эпитаксиальном росте германия на кремнии с кристаллографической ориентацией (001) при температуре 200–500 °С и скорости осаждения германия в диапазоне 0,2–2,0 МС/мин расстояние между атомами германия на поверхности нелинейно увеличивается с ростом толщины двумерного слоя, достигая при критическом значении близком к 4 МС максимальной величины 9–12,5 % по отношению к исходному расстоянию между атомами кремния на поверхности подложки, и затем релаксирует за счет формирования трехмерных островков к стандартной величине 4,2 % рассогласования постоянных решеток ненапряженных материалов.

2. Учёт нелинейной зависимости расстояния между атомами на поверхности и поверхностной энергии двумерного слоя от толщины осажденного материала в кинетической модели роста по механизму Странского–Крастанова позволяет получить для критической толщины перехода от двумерного к трёхмерному росту при эпитаксиальном выращивании германия на кремнии значения лучше согласующиеся с экспериментальными результатами по сравнению с результатами предыдущих моделей. В частности, при температуре 500 °С и скорости осаждения германия 0,03 МС/с разработанный подход позволяет уточнить величину критической толщины на 20 %.

3. При низкотемпературном синтезе двумерных слоев германия на кремнии с кристаллографической ориентацией (001) в диапазоне ростовых температур 200–450 °С величина параметра сверхструктурной перестройки (длина димерного ряда) N с понижением температуры возрастает от 8 до величины не менее 11, что позволяет объяснить поведение критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту в низкотемпературной области эпитаксии в этой системе.

4. При эпитаксиальном росте германия на кремнии с кристаллографической ориентацией (111) диапазон толщин осажденного двумерного слоя, при которых происходит сверхструктурный переход $7 \times 7 - 5 \times 5$, зависит от температуры роста. В частности, для скорости осаждения германия 0,04 МС/с при увеличении температуры подложки от 400 до 650 °С продолжительность этого процесса (выраженная в толщине осажденного материала) увеличивается от 0,1 до 2 МС.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность научных положений 1–3 подтверждается их физической непротиворечивостью и согласованием с имеющимися физическими представлениями о процессах изменения реконструкции поверхности при синтезе наногетероэпитаксиальных плёнок Ge/Si и GeSi/Si, а также использованием большого ряда независимых физических методов исследования.

Учет полученной нелинейной зависимости расстояния между атомами на поверхности и поверхностной энергии двумерного слоя от толщины осажденного материала в кинетической модели роста по механизму Странского–Крастанова не противоречат уже имеющимся расчетным и экспериментальным результатам.

Личный вклад автора работы. Работа по модернизации системы метода дифракции быстрых электронов, предэпитаксиальная подготовка пластин, экспериментальные исследования гетероэпитаксиального роста материалов Ge/Si, GeSi/Si и обработка результатов осуществлялись лично автором. Постановка цели и задач исследования, выбор методов их решения осуществлялись автором совместно с научным руководителем. Соискатель также принимал непосредственное участие в обсуждении результатов, полученных методами силовой атомной микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрией, фотOLUMИнесценцией, а также в проведении теоретических исследований, выполнении компьютерного моделирования, формулировке научных положений выносимых на защиту, и выработке рекомендаций по результатам диссертационной работы.

Апробация результатов исследования. Результаты научной работы представлены на следующих научных конференциях: XIV Российская конференция по физике полупроводников (г. Новосибирск, 2019 г.); Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (г. Томск, 2019 и 2021 гг.); XI Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); Школа молодых ученых «Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем» (г. Новосибирск, 2019 и 2021 гг.); Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (г. Новосибирск, 2019 и 2021 гг.); XXI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (г. Санкт - Петербург, 2019 г.); VII Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО 2020» (г. Москва, 2020 г.); XIII Международная конференция «Кремний – 2020» (г. Ялта, 2020 г.); Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника 2021» (г. Новосибирск, 2021 г.); XXVI Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2022 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 работы, в том числе 7 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 4 статьи в зарубежных научных журналах, входящих в Web of Science, 3 статьи в зарубежных научных журналах, входящих в Scopus), 1 статья в сборнике материалов конференции, представленном в издании, входящем в Scopus, 14 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций, школ, симпозиума.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы (205 наименований), всего 119 страниц, 55 рисунков, 1 таблица.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** содержится общая характеристика диссертационной работы: обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, приводятся научные положения, выносимые на защиту, показывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава «Молекулярно-лучевая эпитаксия и применение метода дифракции быстрых отраженных электронов» представляет собой аналитический обзор литературных источников, затрагивающих вопросы получения эпитаксиальных плёнок и массивов самоорганизующихся островков $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и Ge на Si в методе молекулярно-лучевой эпитаксии, а также их применения для создания компонентов микро- и наноэлектроники и фотонных устройств [1*]. Приводится обзор и особенности метода молекулярно-лучевой эпитаксии для получения разного рода эпитаксиальных структур в условиях сверхвысокого вакуума и основные возможности управления характеристиками получаемых структур за счет изменений условий синтеза. Рассматриваются основные кинетические процессы, такие как сегрегация атомов, поверхностная и объемная диффузия и десорбция атомов с поверхности, происходящие при эпитаксиальном росте $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и Ge на Si и влияющие на релаксацию упругой энергии. Проводится сравнение различных теоретических моделей роста двумерных плёнок и квантовых точек.

Проводится сравнительный анализ литературы по исследованию морфологии поверхности с помощью дифракции быстрых отраженных электронов и силовой туннельной микроскопии, показывающий возможности метода дифракции быстрых отражённых электронов как метода достоверного и непрерывного *in situ* наблюдения за эпитаксиальным ростом структур.

Показано, что проявляемые эффекты в гетероэпитаксиальной системе Ge-Si в значительной степени зависят от условий роста и для получения необходимых результатов требуется постоянный контроль поверхности. Помимо этого, сложная зависимость напряжений от эффективной толщины осажденного материала и самопроизвольный характер перехода от двумерного к трехмерному росту приводит к большим сложностям при теоретическом описании и моделировании процессов синтеза.

Сделан вывод о том, что изучение сверхструктурных переходов при синтезе гетероэпитаксиальных плёнок Ge/Si, GeSi/Si, а также критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту и факторов их определяющих, является необходимым для более глубокого понимания процессов, происходящих при формировании двумерных материалов и квантово-размерных островков по механизму Странского–Крастанова.

Во **второй главе** «Экспериментальная установка, методы исследования» приводится описание установки молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100» на которой проводились исследования по эпитаксиальному росту $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и Ge на Si. Описывается техника предэпитаксиальной подготовки кремниевых подложек.

Наличие сверхвысокого вакуума в эпитаксиальной камере позволяет интегрировать разного рода аналитическое оборудование. Важнейшим из методов контроля над процессами роста является метод дифракции быстрых отраженных электронов.

Благодаря большим ускоряющим напряжениям электроны чувствительны к сверхструктурным изменениям, которые легко регистрируются на дифракционных картинах, и благодаря этому возможно оценить механизм роста материалов. Метод дифракции быстрых отраженных электронов позволяет отслеживать изменение постоянной решётки при гетероэпитаксиальном росте и рассчитать параметры

кристаллических решёток, а также определять толщины напыляемого материала по осцилляциям интенсивности дифракционных картин и процентное значение материалов при росте структур. Немаловажным обстоятельством является возможность анализировать состояние поверхности до эпитаксиального роста.

Показана возможность определения методом дифракции быстрых отраженных электронов скорости осаждения материалов, процентного содержания осаждаемых компонент и критической толщины двумерного слоя при росте по механизму Странского–Крастанова. При формировании эпитаксиальных квантовых точек на картине дифракции проявляются соответствующие рефлексы, анализируя которые можно судить об огранке островков на поверхности. В целом можно сказать, метод дифракции быстрых отраженных электронов позволяет непрерывно анализировать процесс эпитаксиального роста.

В **третьей главе** «Особенности дифракции быстрых отраженных электронов при синтезе Ge/Si(111) и Ge/Si(001)» приведены результаты исследований динамики перехода сверхструктуры 7×7 в 5×5 и момента перехода от двумерного к трехмерному росту при напылении германия на поверхность кремния с кристаллографической ориентацией (111) в зависимости от температуры в диапазоне от 250 до 700 °C [8*]. Получены температурная зависимость критической толщины перехода 2D – 3D, а также зависимость толщины пленки германия при сверхструктурном переходе $7 \times 7 - 5 \times 5$ от температуры подложки Si(111) (рисунки 1 и 2).

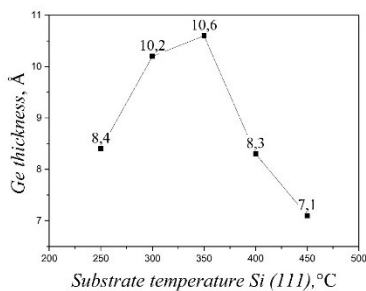


Рисунок 1 – Зависимость критической толщины Ge при переходе к 3D-росту от температуры подложки Si(111)

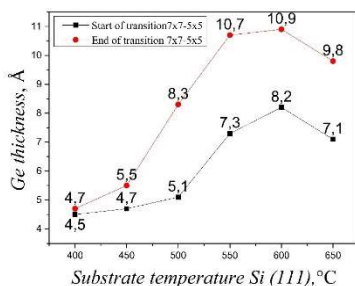


Рисунок 2 – Зависимость толщины пленки германия при переходе от сверхструктуры 7×7 к сверхструктуре 5×5 от температуры подложки Si(111)

Показано, что при низких температурах синтеза максимальная критическая толщина двумерного слоя германия составляет 10,2–10,6 Å при 300–350 °C (Рисунок 1). При повышении температуры роста напряжения в системе начинают релаксировать за счёт фазовых переходов сверхструктуры $7 \times 7 - 5 \times 5$. Метод дифракции быстрых электронов при температурах выше 450 °C не показал перехода к островковому росту. Из рисунка 2 видно, что при температуре 400 °C переход между сверхструктурами происходит достаточно быстро при толщине слоя около 4,5–4,7 Å. С повышением температуры толщина германиевого слоя, при которой происходит смена сверхструктур, увеличивается и при температуре 600 °C составляет 8,2–10,9 Å. При этом полный переход с одной сверхструктуры на другую происходит примерно за 1,5 атомных слоя германия.

Далее приведены результаты исследований по зависимости упругих напряжений на поверхности германиевой пленки от толщины осажденного материала при формировании квантовых точек по механизму Странского–Крастанова на поверхности Si(001) [5*]. На рисунке 3 представлена полученная экспериментальная зависимость положения дифракционных рефлексов $1/N$ от сверхструктуры $2xN$ от толщины при синтезе Ge на Si(001) при температуре подложки $T = 450$ °C и скорости роста германия Ge 0,03 МС/с.

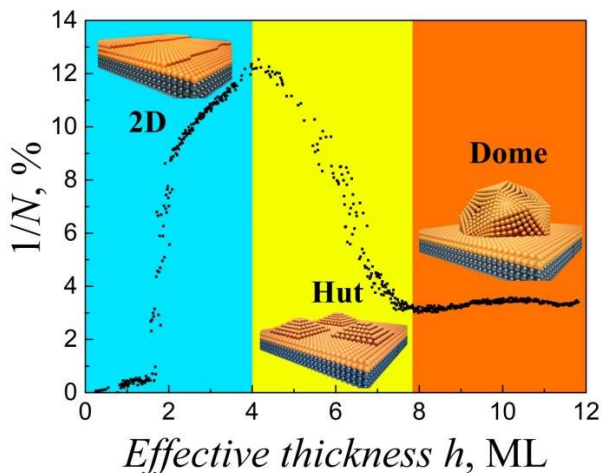


Рисунок 3 – Зависимость величины $1/N$ на поверхности осаждаемого слоя германия от эффективной толщины осажденного материала

С началом осаждения германия эффективная величина рассогласования решеток первые два монослоя растет незначительно, а затем происходит ее резкий рост до значения 12,5 %. Этот рост соответствует накоплению упругих напряжений в слое германия. По достижении двумерным слоем толщины в 4 монослоя происходит интенсивное образование трехмерных островков, которое наблюдается по характерному изменению картины дифракции и прекращению осцилляций интенсивности. Причиной смены механизма роста является накопление в системе упругих напряжений, вызванное наличием рассогласования по постоянной решетке, с их последующей релаксацией за счет энергетически более выгодного процесса образования трехмерных островков. При этом начало формирования островков примерно соответствует максимальной величине напряжений. На графике изменения постоянной решеткой процесс интенсивного формирования островков проявляется в виде резкого уменьшения рассогласования и выхода его на постоянное значение около величины 4 %, соответствующей рассогласованию ненапряженных германия и кремния.

На основе полученной экспериментальной зависимости была уточнена кинетическая модель для расчета параметров формируемых островков [2*, 3*, 6*]. Рассматривалось изменение свободной энергии при переходе атомов из смачивающего слоя в островок. Равновесная и критическая толщины смачивающего слоя, средний размер и поверхностная плотность квантовых точек были рассчитаны в предположении зависимости рассогласования решеток и поверхностной энергии двумерного слоя от толщины осажденного материала.

На рисунке 4 представлены эффективное количество осажденного материала без учета нуклеации островков h (1) и толщина смачивающего слоя германия с учетом потребления адатомов растущими островками (2). Из рисунка 4 видно, что при достижении смачивающим слоем критической толщины $h_c = 4,0$ МС начинается активное формирование островков за счет потребления атомов смачивающего слоя, что приводит к уменьшению его действительной толщины [4*].

Помимо этого, на рисунке 4 показан экспериментально полученный профиль интенсивности дифракционной картины в азимуте [110] в точке появления 3D-рефлекса (3) при $T = 500$ °С и скорости роста германия $0,03$ МС/с. Наличие на начальном этапе осцилляций интенсивности свидетельствует о протекании процессов роста на этом этапе по двумерному механизму. По достижении двумерным слоем толщины в 4 монослоя происходит интенсивное образование трехмерных островков, которое наблюдается по характерному изменению картины дифракции и прекращению осцилляций интенсивности (Рисунок 4), что подтверждает расчетную величину критической толщины $h_c = 4,0$ МС, полученную в рамках предложенной модели.

На рисунке 5 приводятся зависимости от толщины нормированной скорости зарождения островков I (1), нормированной поверхностной плотности нанокластеров N (2) и нормированного среднего размера квантовых точек L_{av} (3) для температуры роста $T = 500$ °С и скорости напыления $V = 0,03$ МС/с. Скорость зарождения островков нормирована на свое максимальное значение, равное $1,0 \cdot 10^{10}$ см⁻² с⁻¹. Поверхностная плотность нанокластеров нормирована на свое стационарное значение по окончании стадии зарождения $3,5 \cdot 10^{10}$ см⁻². Средний размер квантовых точек нормирован на свое значение по окончании стадии роста 28 нм.

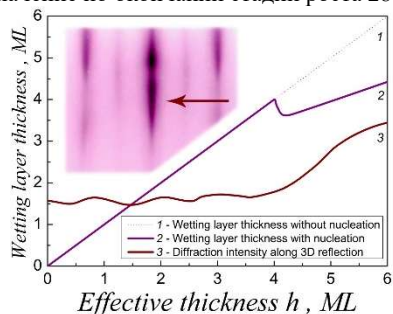


Рисунок 4 – Эффективное количество осажденного материала без учета нуклеации островков h (1), толщина смачивающего слоя Ge с учетом потребления адатомов островками (2) и профиль интенсивности дифракционной картины (усл. ед.) в точке появления 3D-рефлекса (3) для температуры $T = 500$ °С и скорости осаждения Ge $V = 0,03$ МС/с.

На вставке: дифракционная картина в азимуте [110] для эффективной толщины $h = 1,0$ МС (стрелкой обозначена область появления 3D-рефлекса)

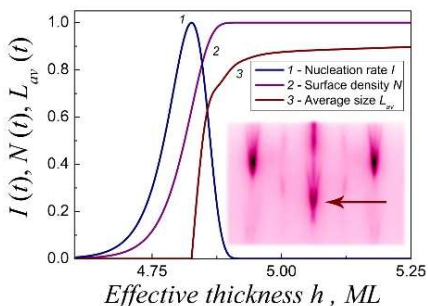


Рисунок 5 – Зависимости от толщины нормированной скорости зарождения островков I (1), нормированной поверхностной плотности нанокластеров N (2) и нормированного среднего размера квантовых точек L_{av} (3) для температуры роста $T = 500$ °С и скорости напыления $V = 0,03$ МС/с. На вставке: дифракционная картина в азимуте [110] для эффективной толщины $h = 5,0$ МС (стрелкой обозначена область 3D-рефлекса)

В соответствии с рисунком 5 островки зарождаются наиболее интенсивно в очень узком интервале эффективных толщин смачивающего слоя от 4 до 5 МС. К моменту окончания стадии зарождения поверхностная плотность островков выходит на свое максимальное стационарное значение.

На вставках к рисункам 4, 5 приводятся экспериментально полученные картины дифракции быстрых электронов при росте германия на поверхности кремния при температуре $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости напыления $V = 0,03\text{ МС/с}$ для двух эффективных толщин осажденного материала: $h = 1,0\text{ МС}$ и $h = 5,0\text{ МС}$, соответственно. Первая картина соответствует процессам формирования двумерного смачивающего слоя и имеет традиционный линейчатый вид. Вторая картина соответствует образованию пирамидальных квантовых точек с боковыми гранями (105) и на ней отчетливо видны яркие точечные рефлексы, характеризующие трехмерный режим роста.

Таким образом, экспериментальные исследования по синтезу двумерных слоев и квантовых точек германия на поверхности кремния (001) подтверждают основные выводы разработанной модели.

В **четвертой главе** «Температурные зависимости морфологии поверхности при эпитаксии Ge/Si(001) и GeSi/Si(001)» приведены результаты экспериментальных работ по исследованию морфологии поверхности при эпитаксиальном росте двумерных слоев и формировании квантовых точек по механизму Странского–Крастанова в упруго-напряженных системах Ge/Si(001) и GeSi/Si(001). Рассмотрены зависимости параметра периодичности N реконструкции типа $2 \times N$ от эффективной толщины осажденного материала в широком интервале ростовых температур и составов при эпитаксии германия-кремния на поверхность кремния с кристаллографической ориентацией (001) [7*].

Нами получены детальные зависимости параметра периодичности N реконструкции типа $2 \times N$ от эффективной толщины осажденного материала в широком интервале ростовых температур для этой системы. На рисунке 6 дается сравнение кривых зависимостей величины $1/N$ от эффективной толщины осажденного материала для температур роста $T = 210, 300$ и $470\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости роста германия $0,3\text{ МС/мин}$.

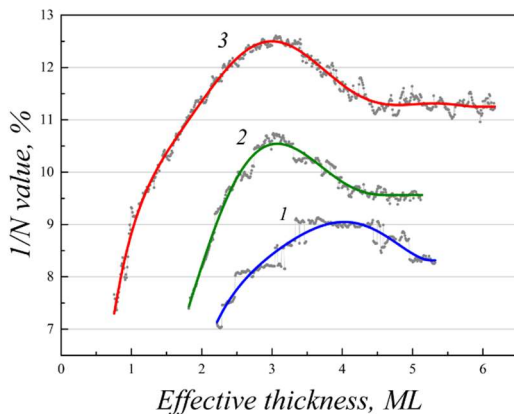


Рисунок 6 – Зависимости величины $1/N$ от эффективной толщины осажденного германия для температур роста 1 – $T = 210\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 – $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 3 – $T = 470\text{ }^{\circ}\text{C}$

В соответствии с рисунком 6 с ростом температуры подложки кривые зависимостей величины $1/N$ от эффективной толщины осажденного германия смещаются влево, что говорит о более раннем начале сверхструктурного перестроения поверхности, стимулированного более высокими подвижностями адатомов при повышенных температурах.

Помимо этого, при повышении температуры роста значения параметров N сверхструктурной перестройки $2 \times N$ уменьшаются. Результаты исследований по температурной зависимости максимального значения величины $1/N$ в диапазоне температур от 200 до 550 °C представлены на рисунке 7.

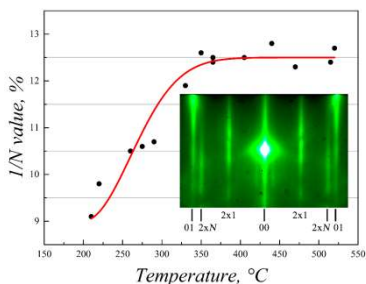


Рисунок 7 – Зависимость параметра сверхструктурной перестройки атомов германия на подложке кремния (001) от температуры. На вставке: дифракционная картина от напряженного двумерного слоя германия на кремнии в азимуте [110].

Видны рефлексы $2 \times N$, по которым определялась величина параметра $1/N$

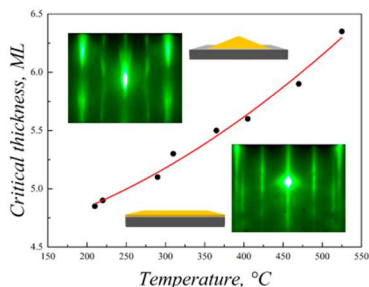


Рисунок 8 – Температурная зависимость критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту. На вставках: картины дифракции, соответствующие атомарно-гладкой поверхности кремния (001) и формированию hut-кластеров на поверхности двумерного слоя германия, а также режимы роста в каждом из интервалов толщин и температур

Из рисунка 7 следует, что максимальное значение величины N монотонно уменьшается от значения $N = 11$ при $T = 200$ °C и при температурах выше 350 °C выходит на постоянное значение $N = 8$, которое обычно и регистрировалось ранее экспериментально. При этом данные о величине параметра N более 8 для случая осаждения чистого германия на поверхность кремния в литературе отсутствуют, так как область таких низких температур эпитаксии обычно не рассматривается.

Анализ изменения интенсивности зеркально отраженного дифракционного рефлекса позволил разграничить области двумерного роста и роста трехмерных островков. На рисунке 8 показана полученная кривая зависимости критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту в зависимости от температуры.

В соответствии с рисунком 8 в интервале температур от 200 до 550 °C критическая толщина монотонно возрастает, что всегда находилось в противоречии с существующими термодинамическими и кинетическими моделями эпитаксиального формирования нанокластеров по механизму Странского–Крастанова.

На вставках к рисункам 7 и 8 представлена динамика изменения картины дифракции быстрых электронов при синтезе германия на поверхности кремния (001). На рисунке 7 показана характерная дифракционная картина от напряженного двумерного слоя германия на кремнии в азимуте [110]. Видны зеркально отраженный рефлекс 00, основные рефлексы 01, сверхструктурные рефлексы $2x1$ от кремния и рефлексы $2xN$, по которым и определялась величина параметра $1/N$.

На рисунке 8 приводятся дифракционная картина от чистой поверхности кремния (001), а также типичная дифракционная картина, соответствующая формированию hut-кластеров на поверхности двумерного слоя германия. Кроме того, на рисунке 8 схематично изображены возможные режимы роста, характерные для каждого из интервалов температур синтеза и эффективных толщин осажденного материала.

В **заключении** диссертационной работы сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе проведения исследований.

1. Проведен анализ литературных источников по эпитаксиальному росту материалов, а также анализ исследований морфологии поверхности при гетероэпитаксиальном росте Ge/Si, GeSi/Si методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Проведен анализ технической литературы по работе метода дифракции быстрых электронов.

2. Проведена модернизация дифрактометра быстрых отражённых электронов на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100».

3. Представлены результаты исследования температурной зависимости перехода из сверхструктуры $7x7$ в $5x5$ и определить значения критической толщины двумерного слоя при эпитаксиальном росте Ge на Si(111) с помощью метода дифракции быстрых отраженных электронов в широком диапазоне температур.

4. Исследованы динамики изменения реконструкции $2xN$ при эпитаксиальном росте Ge/Si(001), GeSi/Si(001) с помощью метода дифракции быстрых отраженных электронов. Показано, что длина димерных рядов в такой реконструкции при росте чистого германия на кремнии может достигать величины не менее $N = 11$.

5. Получены детальнее зависимости параметра периодичности N реконструкции типа $2xN$ от эффективной толщины осажденного материала в широком интервале ростовых температур и составов при эпитаксии чистого германия и твердого раствора германий-кремний на поверхность кремния с кристаллографической ориентацией (001).

6. Построена кинетическая модель роста Ge/Si(001) с учетом экспериментально полученной зависимости рассогласования решеток и поверхностных энергий от толщины двумерного слоя. Результаты расчетов по разработанной модели показывают хорошее согласие с результатами экспериментальных исследований.

7. Найдена связь между величиной параметра N , определяемого упругими напряжениями в системе, и величиной критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту. На основании этой связи предложен физический механизм, объясняющий характер температурной зависимости критической толщины перехода по Странскому–Крастанову.

В заключение выражаю глубокую признательность своему научному руководителю профессору Коханенко А.П., доценту кафедры квантовой электроники и фотоники Лозовому К. А. и всему коллективу кафедры за помощь в выполнении данной работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lawrie W. I. L. Quantum dot arrays in silicon and germanium / W. I. L. Lawrie, H. G. J. Eenink, N. W. Hendrickx, J. M. Boter, L. Petit, S. V. Amitonov, M. Lodari, B. Paquelet Wuetz, C. Volk, S. G. J. Philips, G. Droulers, N. Kalhor, F. van Riggelen, D. Brousse, A. Sammak, L. M. K. Vandersypen, G. Scappucci, M. Veldhorst // *Applied Physics Letters*. – 2020. – Vol. 116. – P. 080501 (1-8).
2. Izhnin I. I. Epitaxial fabrication of 2D materials of group IV elements / I. I. Izhnin, K. R. Kurbanov, K. A. Lozovoy, A. P. Kokhanenko, V. V. Dirko, A. V. Voitsekhovskii // *Applied Nanoscience*. – 2020. – Vol. 10. – P. 4375-4383.
3. Hendrickx N. W. Gate-controlled quantum dots and superconductivity in planar germanium / N. W. Hendrickx, D. P. Franke, A. Sammak, M. Kouwenhoven, D. Sabbagh, L. Yeoh, R. Li, M. L. V. Tagliaferri, M. Virgilio, G. Capellini, G. Scappucci, M. Veldhorst // *Nature Communications*. – 2018. – Vol. 9. – P. 2835.
4. Izhnin I. I. Nanostructures with Ge-Si quantum dots for infrared photodetectors / I. I. Izhnin, O. I. Fitsych, A. V. Voitsekhovskii, A. P. Kokhanenko, K. A. Lozovoy, V. V. Dirko // *Opto-Electronics Review*. – 2018. – Vol. 26. – P. 195-200.
5. Schroter M. SiGe HBT technology: Future trends and TCAD-based roadmap / M. Schroter, T. Rosenbaum, P. Chevalier, B. Heinemann, S. P. Voinescu, E. Preisler, J. Bock, A. Mukherjee // *Proceedings of the IEEE*. – 2017. – Vol. 105. – P. 1068-1086.
6. Wu J. Quantum dot optoelectronic devices: lasers, photodetectors and solar cells / J. Wu, S. Chen, A. Seeds, H. Liu // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2015. – Vol. 48. – P. 363001 (1-28).
7. Bukharaev A. A. Straintronics: a new trend in micro- and nanoelectronics and materials science / A. A. Bukharaev, A. K. Zvezdin, A. P. Pyatakov, Y. K. Fetisov // *Physics – Uspekhi*. – 2018. – Vol. 61. – P. 1175-1212.
8. Kondo Y. Strain measurement of a channel between Si/Ge stressors in a tri-gate field effect transistor utilizing moire fringes in scanning transmission microscope images / Y. Kondo, Y. Aoyama, H. Hashguchi, C. C. Lin, K. Hsu, N. Endo, K. Asayama, K.-I. Fukunaga // *Applied Physics Letters*. – 2019. – Vol. 114. – P. 172103 (2-5).
9. Assali S. Strain engineering in Ge/GeSn core/shell nanowires / S. Assali, M. Albani, R. Bergamaschini, M. A. Verheijen, A. Li, S. Kolling, L. Gagliano, E. P. A. M. Bakkers, L. Miglio // *Applied Physics Letters*. – 2019. – Vol. 115. – P. 113102 (1-4).
10. Timofeev V. A. Pseudomorphic GeSiSn, SiSn and Ge layers in strained heterostructures / V. A. Timofeev, A. I. Nikiforov, V. I. Mashanov, I. D. Loshkarev, A. A. Bloshkin, A. K. Gutakovskii // *Semiconductor Science and Technology*. – 2018. – Vol. 29. – P. 154002 (1-13).
11. Goldfarb I. Comparative STM and RHEED studies of Ge/Si(001) and Si/Ge/Si(001) surfaces / I. Goldfarb, G. A. D. Briggs // *Surface Science*. – 1999. – Vol. 433-435. – P. 449-454.
12. Shchukin V. Spontaneous ordering of arrays of coherent strained islands / V. A. Shchukin, N. N. Ledentsov, P. S. Kop'ev, D. Bimberg // *Physical Review Letters*. – 1995. – Vol. 75. – P. 2968-2971.
13. Zhang J. J. Self-organized evolution of Ge/Si(001) into intersecting bundles of horizontal nanowires during annealing / J. J. Zhang, A. Rastelli, O. G. Schmidt, D. Scopece, L. Miglio, F. Montalenti // *Applied Physics Letters*. – 2013. – Vol. 103. – P. 083109.
14. Storozhevyykh M. S. Evidence for kinetic limitations as a controlling factor of Ge pyramid formation: a study of structural features of Ge/Si(001) wetting layer formed by Ge

deposition at room temperature followed by annealing at 600 °C / M. S. Storozhevyykh, L. V. Arapkina, V. A. Yuryev // *Nanoscale Research Letters*. – 2015. – Vol. 10. – P. 295 (1-6).

15. Talochkin A. B. Super-dense array of Ge quantum dots grown on Si(100) by low-temperature molecular beam epitaxy / A. B. Talochkin, A. A. Shklyayev, V. I. Mashanov // *Journal of Applied Physics*. – 2014. – Vol. 115. – P. 144306 (1-5).

16. Lozovoy K. A. Comparison of the growth processes of germanium quantum dots on the Si(100) and Si(111) surfaces / K. A. Lozovoy, A. P. Kokhanenko, A. V. Voitsekhovskii // *Russian Physics Journal*. – 2018. – Vol. 60. – P. 1871-1879.

17. Teys S. A. Formation of Ge nanoislands before the completion of a wetting layer in the Ge/Si(111) system / S. A. Teys, A. B. Talochkin, B. Z. Olshanetsky // *Journal of Crystal Growth*. – 2009. – Vol. 311. – P. 3898-3903.

18. Teys S. A. Different growth mechanisms of Ge by Stranski–Krastanow on Si (111) and (001) surfaces: An STM study / S. A. Teys // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol. 392. – P. 1017-1025.

19. 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. Gutakovskiy, O. P. Pchelyakov // *Nanoscale Research Letters*. – 2012. – Vol. 7. – P. 561 (1-5).

20. Zhou Y. Molecular dynamics simulations of the growth of Ge on Si / Y. Zhou, A. Lloyd, R. Smith, K. A. Lozovoy, A. V. Voitsekhovskii, A. P. Kokhanenko // *Surface Science*. – 2020. – Vol. 696. – P. 121594 (1-9).

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1*. Izhnin I. I. Nanostructures with Ge-Si quantum dots for infrared photodetectors / I. I. Izhnin, O. I. Fitsych, A. V. Voitsekhovskii, A. P. Kokhanenko, K. A. Lozovoy, **V. V. Dirko** // *Opto-Electronics review*. – 2018. – Vol. 26. – P. 195–200. – DOI: 10.1016/j.opelre.2018.06.002.

2*. Lozovoy K. A. Evolution of Epitaxial Quantum Dots Formed by Volmer–Weber Growth Mechanism / K. A. Lozovoy, A. P. Kokhanenko, **V. V. Dirko**, N. Yu. Akimenko, A. V. Voitsekhovskii // *Crystal Growth & Design*. – 2019. – Vol. 19 (12). – P. 7015–7021. – DOI: 10.1021/acs.cgd.9b00820.

3*. Lozovoy K. A. Kinetics of epitaxial formation of nanostructures by Frank–van der Merwe, Volmer–Weber and Stranski–Krastanow growth modes / K. A. Lozovoy, A. G. Korotaev, A. P. Kokhanenko, **V. V. Dirko**, A. V. Voitsekhovskii // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 384. – Article number 125289. – 5 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897219312794?via%3Dihub> (access date: 30.08.2022). – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125289.

4*. Lozovoy K. A. Thickness-dependent surface energy and formation of epitaxial quantum dots / K. A. Lozovoy, Y. Zhou, R. Smith, A. Lloyd, A. P. Kokhanenko, **V. V. Dirko**, N. Yu. Akimenko, D. V. Grigoryev, A. V. Voitsekhovskii // *Thin Solid Films*. – 2020. – Vol. 713. – Article number 138363. – 5 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609020305721?via%3Dihub> (access date: 30.08.2022). – DOI: 10.1016/j.tsf.2020.138363.

5*. **Dirko V. V.** Thickness-dependent elastic strain in Stranski–Krastanow growth / V. V. Dirko, K. A. Lozovoy, A. P. Kokhanenko, A. V. Voitsekhovskii // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2020. – Vol. 22, is. 34. – P. 19318–19325. – DOI: 10.1039/d0cp03538f.

6*. Izhnin I. I. Interaction between islands in kinetic models of epitaxial growth of quantum dots / I. I. Izhnin, O. I. Fitysh, A. V. Voitsekhovskii, A. P. Kokhanenko, K. A. Lozovoy, **V. V. Dirko** // *Applied Nanoscience*. – 2020. – Vol. 10. – P. 2527–2533. – DOI: 10.1007/s13204-019-00965-y.

7*. **Dirko V. V.** High-resolution RHEED analysis of dynamics of low-temperature superstructure transitions in Ge/Si(001) epitaxial system / V. V. Dirko, K. A. Lozovoy, A. P. Kokhanenko, A. V. Voitsekhovskii // *Nanotechnology*. – 2022. – Vol. 33, is. 11. – Article number 115603. – 8 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6528/ac3f56> (access date: 30.08.2022). – DOI: 10.1088/1361-6528/ac3f56.

Статья в сборнике материалов конференций, представленных в издании, входящем в Scopus:

8*. **Dirko V. V.** Analysis of the transition of the 7 x 7 to 5 x 5 superstructure transition by RHEED in the synthesis of Ge on Si (111) in an MBE installation / V. V. Dirko, K. A. Lozovoy, A. P. Kokhanenko, O. I. Kukenov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1482 : 21st Russian Youth Conference on Physics of Semiconductors and Nanostructures, Opto- and Nanoelectronics, RYCPS 2019. St. Petersburg, Russia, November 25–29, 2019. – Article number 012010. – 4 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1482/1/012010> (access date: 30.08.2022). – DOI: 10.1088/1742-6596/1482/1/012010.

Публикации в прочих научных изданиях:

9*. Лозовой К. А. Кинетические модели роста наноструктур по механизмам Франка–ван дер Мерве, Фольмера–Вебера и Странского–Крастанова / К. А. Лозовой, А. П. Коханенко, **В. В. Дирко**, А. В. Войцеховский // Тезисы докладов XIV Российской конференции по физике полупроводников. Новосибирск, 09–13 сентября 2019 г. – Новосибирск, 2019. – Ч. 1. – С. 111. – DOI: 10.34077/Semicond2019-111. – 0.06 / 0.02 а.л.

10*. **Дирко В. В.** Анализ перехода сверхструктуры 7 x 7 в 5 x 5 методом ДБЭ при синтезе Ge на Si(111) в установке МЛЭ / В. В. Дирко, К. А. Лозовой, О. И. Куkenov, А. П. Коханенко // *Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника* : тезисы докладов 21-й Всероссийской молодежной конференции. Санкт-Петербург, 25–29 ноября 2019 г. – СПб., 2019. – С. 40. – 0.06 / 0.02 а.л.

11*. **Дирко В. В.** Дифракционный анализ поверхностных сверхструктур при осаждении Ge на Si(111) / В. В. Дирко, К. А. Лозовой // *Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем (АППН 2019)* : программа и тезисы докладов Школы молодых ученых. Новосибирск, 26–28 ноября 2019 г. – Новосибирск, 2019. – С. 67. – 0.06 / 0.03 а.л.

12*. Коханенко А. П. Зависимость упругих напряжений от толщины осажденного материала при росте германия на кремнии / А. П. Коханенко, **В. В. Дирко**, К. А. Лозовой // *Международный форум «Микроэлектроника – 2020»*. Школа молодых ученых «Микроэлектроника – 2020. XIII Международная конференция «Кремний – 2020». XII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе : сборник тезисов. Ялта, Республика Крым, 21–25 сентября 2020 г. – М., 2020. – С. 183–185. – 0.06 / 0.03 а.л.

13*. **Дирко В. В.** Анализ изменения поверхности при росте Ge, GeSi на Si(100) и Si(111) методом дифракции быстрых электронов / В. В. Дирко, К. А. Лозовой, А. П.

Коханенко, А. В. Войцеховский // Актуальные проблемы радиофизики АПР-2021 : сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. Томск, 20–22 октября 2021 г. – Томск, 2021. – С. 243. – 0.06 / 0.02 а.л.

14*. Коханенко А. П. Оптимизация режимов эпитаксиального синтеза структур с квантовыми точками для фотоприемников и солнечных элементов / А. П. Коханенко, К. А. Лозовой, Р. М. Х. Духан, **В. В. Дирко**, А. В. Войцеховский // Фотоника 2019 : тезисы докладов Российской конференции и школе молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники. Новосибирск, 27–31 мая 2019 г. – Новосибирск, 2019. – С. 107. – 0.06 / 0.02 а.л.

15*. Лозовой К. А. Рост квантовых точек Ge на окисленной поверхности Si / К. А. Лозовой, А. П. Коханенко, **В. В. Дирко**, А. В. Войцеховский // Актуальные проблемы радиофизики АПР 2019 : сборник трудов 8-й Международной научно-практической конференции. Томск, 01–04 октября 2019 г. – Томск, 2019. – С. 372. – 0.06 / 0.02 а.л.

16*. Войцеховский А. В. Параметры фотоприемников и солнечных элементов с квантовыми точками Ge/Si / А. В. Войцеховский, А. П. Коханенко, К. А. Лозовой, **В. В. Дирко**, Р. Духан // Фундаментальные проблемы оптики – 2019 : сборник трудов XI Международной конференции. Санкт Петербург, 21–25 октября 2019 г. – СПб., 2019. – С. 296–297. – 0.12 / 0.02 а.л.

17*. Лозовой К. А. Моделирование различных режимов роста эпитаксиальных наноструктур при молекулярно-лучевой эпитаксии / К. А. Лозовой, **В. В. Дирко** // Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем : программа и тезисы докладов Школы молодых ученых. Новосибирск, 26–28 ноября 2019 г. – Новосибирск, 2019. – С. 64. – 0.06 / 0.03 а.л.

18*. Войцеховский А. В. Эпитаксиальное выращивание двумерных материалов по механизму Франка–ван дер Мерве / А. В. Войцеховский, К. А. Лозовой, В. П. Винарский, **В. В. Дирко** // НАНО 2020 : сборник материалов VII Всероссийской конференции по наноматериалам. Москва, 18–22 мая 2020 г. – М., 2020. – С. 110–111. – 0.12 / 0.03 а.л.

19*. Лозовой К. А. Обобщенная кинетическая модель роста двумерных и нульмерных структур кремния и германия / К. А. Лозовой, **В. В. Дирко** // Международный форум «Микроэлектроника – 2020». Школа молодых ученых «Микроэлектроника – 2020. XIII Международная конференция «Кремний – 2020». XII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе : сборник тезисов. Ялта, Республика Крым, 21–25 сентября 2020 г. – М., 2020. – С. 158–160. – 0.12 / 0.06 а.л.

20*. Лозовой К. А. Моделирование особенностей эпитаксиального формирования 2D- и 3D-островков с учетом изменения физических параметров двумерных пленок с толщиной / К. А. Лозовой, **В. В. Дирко**, А. П. Коханенко, А. В. Войцеховский // Фотоника 2021 : тезисы докладов Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники. Новосибирск, 04–08 октября 2021 г. – Новосибирск, 2021. – С. 64. – 0.06 / 0.02 а.л.

21*. Кукунов О. И. Анализ гомоэпитаксиального роста тонких пленок кремния на сверхструктурах 1 x 2 и 2 x 1 методом дифракции быстрых электронов / О. И. Кукунов, **В. В. Дирко**, А. П. Коханенко, К. А. Лозовой // Актуальные проблемы радиофизики АПР-2021 : сборник трудов 9-й Международной научно-практической конференции. Томск, 20–22 октября 2021 г. – Томск, 2021. – С. 232–233. – 0.12 / 0.03 а.л.

22*. Лозовой К. А. Динамика сверхструктурных переходов при низкотемпературном росте наноструктур по Странскому–Крастанову / К. А. Лозовой, **В. В. Дирко**, А. П. Коханенко, О. И. Куkenov, В. П. Винарский // Нанofизика и наноэлектроника : труды XXVI Международного симпозиума. Нижний Новгород, 14–17 марта 2022 г. – Нижний Новгород, 2022. – Т. 2 : Секция 3. – С. 907. – 0.06 / 0.01 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
Заказ № 7423 от «27» сентября 2022 г. Тираж 100 экз.
г. Томск, Московский тр.8, тел. (3822) 53-15-28
publish.tsu.ru