

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу

Редькова Алексея Викторовича

“Эволюция новой фазы в многокомпонентных и гетерогенных материалах”,

представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.07 – «физика конденсированного состояния» в ученом

В диссертационной работе Редькова Алексея Викторовича рассмотрены процессы зарождения и роста новой фазы в различных многокомпонентных системах, как полупроводниковых, так и диэлектрических. Автором проанализирована эволюция случайных флуктуаций на поверхности зародышей разной формы, для чего теория морфологической устойчивости, ранее развитая для однокомпонентных систем, была расширена на многокомпонентные системы. Также в работе рассмотрен и решен ряд задач, связанных с зарождением новой фазы – металлических наночастиц в диэлектрической матрице. Ценность работы состоит в том, что теория и построенные модели применены к росту реальных материалов, применяемых в промышленности, и предложены конкретные условия их обработки.

Актуальность темы диссертации

Основной тенденцией интенсивных исследований наноматериалов, объектов с пониженной размерностью, необходимых для развития современных технологий создания электронных и оптоэлектронных устройств широкого профиля, является обеспечение возможности синтеза различных композиций с заранее заданными функциональными параметрами. Одним из таких параметров является неоднородность (шероховатость) морфологии поверхности, другим параметром – состав, как на поверхности, так и в объемной части материала. В связи с этим, определение условий, при которых формируются материалы с заданной шероховатостью и составом представляется важной задачей. Однако до настоящего времени не существовало полных моделей, которые бы позволили найти эти условия для рассмотренных в работе материалов (полупроводниковых тонких плёнок и стеклометаллических композитов) и объяснить некоторые экспериментальные результаты.

Таким образом, можно заключить, что тема представленного А.В. Редьковым диссертационного исследования является актуальной.

Содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературных источников (130) и приложения.

Во введении представлены цели и задачи исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, обоснована научная новизна, представлены научная и практическая значимость и основные результаты работы.

Личный вклад автора: апробация работы - 14 докладов на Всероссийских и Международных конференциях, 11 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, а также патент РФ на изобретение.

Изложение краткого обзора результатов исследований по теории зарождения (нуклеации) и морфологической устойчивости, конкретных методов, материалов и процессов представлено в первой главе. Использование результатов хорошо известных теоретических работ Фольмера-Вебера, Беккера-Деринга, Зельдовича, уравнения Фоккера-Планка позволили сделать вывод о зарождении новой фазы в пересыщенной среде. Приведены постановка и решение проблемы об устойчивости формы сферической частицы из однокомпонентного раствора при малых возмущениях на основании теории Маллинза и Секерки в качестве первого приближения поставленной задачи. Рассмотрено также влияние пересыщения на формирование дендритных структур, что актуально при решении практических задач для формирования структур, пригодных для гетерогенного катализа. Все результаты и подходы, рассмотренные выше с использованием основополагающих теоретических работ, использованы при рассмотрении теории морфологической устойчивости для многокомпонентных зародышей различной формы. В этой же главе обоснован выбор конкретных исследуемых методов, материалов, процессов и представлено описание особенностей роста новой фазы в многокомпонентных полупроводниковых системах. Известно, что интенсивные исследования особенностей процессов роста многокомпонентного полупроводникового материала - GaN на сапфире привели к созданию и широкому применению светоизлучающих приборов на его основе (структур с квантовыми ямами - MQW на основе GaN/InGaN). Однако имеет место появление основных дефектов выращенных слоев: пор, междоузлий, "войдов", на поверхности нитрида галлия (GaN), растущего на поверхности сапфира, вызванных особенностями роста новой фазы при наличии напряжений несоответствия, что обусловлено различиями в параметрах кристаллических решеток подложки и пленки.

Во второй главе диссертации исследован рост сферической частицы и тонкой пленки GaN при использовании методов HVPE, MBE. Анализ устойчивости роста сферической частицы GaN с численным расчетом условий сохранения формы приведен для HVPE метода. Известно, что с помощью данного метода, отличающегося возможностями осаждения пленок с высокими скоростями роста при малой концентрации дефектов, ранее были получены подложки GaN толщиной более 5 мкм для выращивания светоизлучающих структур с MQW на основе GaN/InGaN.

Кинетика роста тонкой пленки GaN рассмотрена на примере метода MBE, в котором, в отличие от других методов, можно принимать при расчетах изменение только 2-3х параметров: соотношение потоков реагирующих газов и температуру подложки. В работе оценено влияние соотношения потоков Ga и N на морфологию поверхности, без учета влияния температуры подложки на кинетику роста.

В третьей главе описана теория зарождения новой фазы в стеклокомпозитных материалах, рост наночастиц в объеме и на поверхности стекла при отжиге в водородной атмосфере при изменении времени отжига. Описаны основные уравнения роста наночастиц, а также процессы, происходящие при отжиге стекла: диффузия всех компонентов, химические реакции, нуклеация наночастиц и их рост.

На основании уравнений, включающих изменение концентрации водорода, ионов серебра, натрия, атомарного водорода, коэффициентов диффузии компонентов, величины поверхностного натяжения, отвечающих за скорость нуклеации, выполнено численное моделирование процесса отжига ионообменного стекла и получены зависимости распределений компонентов от условий отжига. Показаны возможности формирования

наночастиц: монотонное и квазислоистое, когда частицы формируются только на определенных глубинах.

Продемонстрировано практическое использование полученных результатов исследований при изменении условий отжига и начального профиля распределения ионов металла при изготовлении оптических элементов, дифракционных решеток.

С практической точки зрения данное рассмотрение процессов отжига весьма актуально при исследованиях структур на основе аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si:H}$), в частности, процессов деградации эффективности работы фотопреобразователей - эффект Стаблера- Вронского. Определение оптимального размера нано кристаллитов в аморфной фазе в зависимости от параметров отжига структур или параметров осаждения дало бы возможность решить проблему уменьшения эффективности фотопреобразователей на основе $a\text{-Si:H}$ при интенсивном освещении, что имело бы огромное практическое применение.

Исследованы процессы роста островковых пленок, начального этапа при рассмотрении кинетики образования структур с квантовыми точками в технологии получения наностержней.

На основании используемых в третьей главе уравнений построена модель роста наночастиц на поверхности стекла, определены основные зависимости конечного распределения частиц от условий обработки поверхности, что перспективно для практического использования в технологии нанесения пленок, роста наностержней с заданными параметрами.

Четвертая глава посвящена теоретическим аспектам предложенной автором методики - применению термического полинга для выращивания на поверхности стекла двумерных ансамблей частиц по заданному трафарету. Патент РФ на изобретение был получен автором за решение данной практической задачи. Рассмотрены процессы, протекающие при термическом полинге стекла, механизм структурирования на анодной стороне стекла, приведены экспериментальные и расчетные данные по росту структурированных ансамблей наночастиц.

Рассмотрены также процессы, протекающие на обратной (катодной) стороне стекла вовремя полинга. Показано, что эти процессы приводят к образованию дендритоподобных серебряных структур, при описании которых использованы теоретические приближения морфологической устойчивости Маллинза и Секерки, приведенного ранее в главе 1. Показано, что зародыш серебра разрастается при появлении небольшого возмущения на его поверхности, обусловленного какими-либо неконтролируемыми изменениями в технологических условиях. Подобного рода структуры могут быть использованы при исследованиях влияния наноразмерных частиц Ag на спектры излучения в структурах на основе широкозонных полупроводников, а также использованы в качестве подложек для поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии.

В приложении рассмотрены процессы, протекающие в стеклянной подложке при формировании структурированных ансамблей металлических наночастиц в присутствии электрического поля в зависимости от условий поляризации, формы и расположения электрода.

Основные научные результаты, полученные автором, и их новизна

Предложенные в диссертационной работе модели являются новыми. Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание процессов образования и роста новой фазы в многокомпонентных системах. Наиболее важными новыми результатами, имеющими наибольшую научную и практическую значимость, являются следующие:

- Теория морфологической устойчивости расширена на многокомпонентные системы.
- Представлены модели, описывающие образование и рост металлических частиц в диэлектрических матрицах. Результаты выполненных на основе этих моделей численных расчетов позволили объяснить ряд имеющихся экспериментальных данных.
- Предложены оригинальные методики структурирования островковых плёнок по заданному шаблону и нанопрофилирования поверхности стекол.

Степень обоснованности научных положений, результатов и выводов

Достоверность и обоснованность полученных результатов определяется использованием современных программных пакетов при проведении расчетов и высокоточного аналитического оборудования при проведении экспериментов. Достоверность полученных в работе расчетных данных также подтверждается совпадением ряда представленных в диссертации результатов с опубликованными в литературе экспериментальными результатами.

Практическая значимость полученных автором результатов

Практическая значимость полученных автором результатов обусловлена тем, что в ней рассмотрены методы и материалы, имеющие большой потенциал внедрения в промышленность, и даны рекомендации по условиям обработки с целью получения тех или иных характеристик материалов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертации могут быть использованы на предприятиях, связанных с разработкой и производством полупроводниковых тонких плёнок, оптических элементов на основе стекол, научных лабораториях соответствующего профиля и учебных организациях, осуществляющих подготовку специалистов в области физики конденсированного состояния. Результаты могут быть применены в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, ГОИ им. С.И. Вавилова, СПб ИТМО и многие др.

Оформление диссертации, публикации и апробация

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ, имеет логичное построение и написана доступным для понимания языком. По результатам работы опубликовано 11 работ в журналах из списка ВАК, а также получен патент РФ. Результаты диссертации были многократно представлены на российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Замечания по диссертации

Хотелось бы задать автору следующие вопросы:

- 1) Во второй главе диссертации кинетика роста тонкой пленки GaN рассмотрена на примере метода МВЕ. Чем был обусловлен выбор именно этого метода, а не MOCVD? Метод МВЕ, вследствие большой вероятности реализации столбчатой морфологии поверхности светоизлучающих структур и, следовательно, большой величины напряжения отсечки в $I-V$ характеристиках структур, в отличие от MOCVD метода, в настоящее время практически не используется для получения структур с MQW на основе GaN/ InGaN.
- 2) В третьей главе сформулировано уравнение, описывающее образование наночастиц, в котором присутствует коэффициент поверхностного натяжения. Не совсем понятно, какая величина поверхностного натяжения используется: только серебра или величина межфазного поверхностного натяжения на границе серебро-стекло.
- 3) В последней части диссертации приводится исследование процессов, происходящих в стеклянной подложке под действием приложенного электрического поля. Такие явления могут быть описаны, если учесть величины электропроводности (концентрации металлической примеси) стекла, частоту электрического поля, поскольку глубина проникновения поля в стекло пропорциональна корню квадратному частного от деления сопротивления материала и частоты приложенного электрического поля. Однако в тексте не приведены данные по электропроводности стекла и её зависимости от частоты.
- 4) В четвертой главе при описании метода структурирования наночастиц посредством термического полинга не указывается толщина стекла, хотя для объяснения данных процессов это может играть немаловажную роль.

Тем не менее указанные замечания не снижают ценность диссертационной работы, которая выполнена на весьма высоком уровне, и не затрагивают ее основного содержания.

Заключение

Резюмируя сказанное, можно констатировать, что диссертационная работа А.В. Редькова выполнена на высоком научном уровне и является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей новые результаты по исследованию зарождения и роста новой фазы в многокомпонентных системах. Работа имеет большое практическое значение для развития физики фазовых переходов.

Полученные в работе результаты и выводы являются достоверными и обоснованными. Автореферат диссертации и публикации автора в высокорейтинговых научных изданиях полностью отражают научную новизну и содержание работы.

Тематика выполненных А.В. Редьковым исследований соответствует паспорту специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния». Диссертационная работа А.В. Редькова по форме и содержанию соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением №842 Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. Автор диссертации Редьков Алексей Викторович заслуживает присуждения ему искомой ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,
ведущий научный сотрудник ФГБУН
«Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН»
Д.ф.-м.н.

Мездрогина Маргарита Михайловна

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Телефон: (812) 297-22-45, e-mail: margaret.m@mail.ioffe.ru

18 октября 2016 г.

Подпись руки М.М. Мездрогиной заверяю:

