

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию  
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.

Диссертация А.В. Редькова посвящена исследованию физических механизмов образования, структурной устойчивости и роста наноразмерных частиц новой фазы в многокомпонентных и гетерогенных системах. **Актуальность** такого исследования очевидна хотя бы потому, что индустрия наносистем входит в приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, а технологии получения и обработки функциональных наноматериалов включены в список критических технологий. В диссертации рассматриваются системы с пленочными структурами на поверхности полупроводников и нанокompозитные материалы на основе стекла с объемными металлическими добавками.

Диссертация А.В. Редькова (общим объемом в 122 страницы) включает введение, 4 главы, заключение, список литературы, список терминов и условных обозначений, приложение. Первая глава носит обзорный характер и служит введением к методам, используемым в последующих главах. Во второй главе исследуется устойчивость сферических и плоских зародышей новой фазы при их росте в многокомпонентных полупроводниковых системах. Как иллюстрация подхода, во второй главе рассматривается рост сферической частицы нитрида галлия методом хлорид-гидридной эпитаксии и рост пленки нитрида галлия на плоской сапфировой подложке. В третьей главе развиваются модели роста наночастиц атомарного серебра в стеклах при отжиге в атмосфере водорода. Построена система уравнений диффузии ионов серебра, натрия, атомарного водорода, нейтрального серебра и

нуклеации закритических зародышей серебра в объёме стекле. Найдены численные решения этой системы и показано, что в зависимости от условий отжига возможны два качественно различных сценария формирования наночастиц: монотонное и квазислоистое, при котором наночастицы формируются только на определенных глубинах. Проведено сравнение с экспериментом. Кроме того, в третьей главе система уравнений нуклеации и диффузионного переноса была переформулирована для описания островковой пленки на поверхности стекла, состоящей из полусферических зародышей атомарного серебра, и проведено численное моделирование функции распределения и роста островков с использованием метода конечных элементов. Результаты численного исследования дают качественное совпадение с экспериментом. В четвертой главе рассматриваются механизмы управления структурой островковой плёнки на поверхности стекла посредством локальной термической поляризации стекла по заданному шаблону и образование дендритоподобных структур серебра вглубь от поверхности стекла при приложении к нему постоянного электрического поля. В приложении автор приводит обсуждение своих экспериментальных результатов по влиянию термической поляризации на состав, структуру, и рельеф стеклянной подложки.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в том, что в диссертации успешно развиты и применены современные методы описания нуклеации, диффузионного роста и морфологической устойчивости зародышей новой фазы в многокомпонентных твердотельных системах. Впервые для таких систем предложен критерий устойчивости сферических и плоских зародышей относительно искажений их формы. Предложены модели, описывающие образование и рост наночастиц в стекле и на его поверхности при отжиге в водородной атмосфере, учитывающие диффузию компонент, химические реакции, а также нуклеацию и рост новой фазы в виде частиц металла. На основе

численных расчетов в соответствии с предложенной моделью описаны пространственные распределения всех компонентов, участвующих в процессе формирования наночастиц. Моделирование впервые позволило теоретически показать, что возможны два режима формирования наночастиц в объеме стекла: равномерный и самоорганизация наночастиц в виде квазипериодических слоев. Модели для объема и поверхности стекла позволили объяснить данные, ранее полученные в экспериментах.

**Теоретическая значимость** диссертации обусловлена тем, что ее результаты расширяют существующие теории нуклеации и теорию морфологической устойчивости, обосновывают полученные ранее экспериментальные результаты и позволяют выбрать режимы обработки стекла, при которых формируется требуемое распределение наночастиц внутри и на поверхности стекол. Это дает возможность формировать стеклометаллические нанокompозиты с заранее заданными оптическими свойствами, отдельные островки металла или их массивы, а также структуры на их основе. Очевидно, это уже обладает и **практической ценностью**. Полученные результаты и выводы диссертации могут быть использованы в научных центрах занимающихся получением и исследованием новых композитных наноструктурированных материалов, а также могут быть применены в промышленности при создании компонентов оптоэлектронных приборов. В работе были предложены конкретные рекомендации по режимам роста плёнок нитрида галлия. Эти рекомендации позволяют выбирать режимы роста, обеспечивающие минимальную дефектность полупроводниковых пленок и, соответственно, обеспечивать высокое качество и эффективность изготавливаемых на их основе элементов технических устройств.

**В целом** степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, **не вызывает сомнений**. **Достоверность** полученных результатов обусловлена использованием современных подходов и сравнением с предшественниками, соответствием

экспериментальных результатов количественным оценкам, сделанным на основе известных теоретических положений, а также соответствием оригинальных результатов данным, полученными другими авторами, использовавшими альтернативные методы.

#### **Замечания.**

1. В задачах, рассмотренных в диссертации, присутствует очень большое число параметров (таких как коэффициенты диффузии, константы скоростей реакций, поверхностное натяжение и другие). Как влияют неопределенности в знании этих параметров на полученные результаты?

2. В теории нуклеации при мгновенно созданной метастабильности скорость нуклеации острым образом зависит от пересыщения системы. В работе идет речь о нуклеации нейтрального серебра, но концентрация серебра в разных местах в стекле и на поверхности стекла определяется локальными концентрациями водорода, которые формируются за счет диффузии. Можно ли применять теорию при мгновенном создании пересыщения? Какие здесь могут быть ограничения?

3. Автор иногда в тексте диссертации допускает вольное обращение с термодинамической терминологией. Свободная энергия не раскрывается (свободная энергия Гиббса или Гельмгольца), иногда называется просто энергией, используется термин компонента вместо компонент.

Вместе с тем, сделанные замечания не влияют на **общее положительное впечатление от работы**. Диссертация А.В. Редькова представляет собой глубокое комплексное исследование, сочетающее теоретический анализ с экспериментальной проверкой. По материалам работы сделано 14 докладов на Всероссийских и Международных конференциях, опубликовано 11 работ в журналах, которые входят в перечень ВАК, а также получен патент РФ на изобретение. Автореферат соответствует тексту диссертации. Цели работы четко сформулированы и реализованы.

## Заключение.

Диссертация Редькова А.В., представленная на соискание ученой степени кандидата наук, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для физики нанокompозитов, что **соответствует требованиям** «Положения о порядке присуждения ученых степеней» № 842, утвержденного Постановлением Правительства РФ 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Редьков Алексей Викторович, **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,  
профессор, зав. кафедрой статистической физики  
д.ф.-м.н., профессор

А.К. Щёкин

16 октября 2016г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»).

Почтовый адрес: Россия, 199034, Санкт-Петербург,  
Университетская наб. д.7-9

Эл.почта: [spbu@spbu.ru](mailto:spbu@spbu.ru)

Сайт: <http://spbu.ru>

Тел: +7 (812) 328-20-00