



Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

Ульянова ул., 46, Бокс-120, Нижний Новгород, 603950

Тел. (831) 436-62-02
Факс (831) 416-06-16
E-mail: dir@ipfran.ru
http://www.ipfran.ru

ОКПО 04683326. ОГРН 1025203020193.
ИНН/ КПП 5260003387/526001001

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ИПФ РАН,
доктор физико-
математических наук,

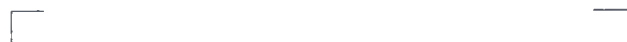
Стародубцев М. В.



17.11.2023 № 340/3273

«17» 11 2023

На № _____ от _____



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
на диссертацию Бухарова Дмитрия Николаевича
«Лазерно-индуцированные нанокластеры на твердой поверхности с
управляемыми функциональными характеристиками: динамические модели и
структуры в электропроводимости», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.19– «Лазерная физика»

Диссертационная работа Д.Н. Бухарова посвящена исследованию свойств и особенностей лазерно-индуцированных нанокластерных структур теллурида свинца на твердой поверхности. Речь идет об оригинальных исследованиях гранулированных структур фрактального типа. Рассмотрение этих вопросов позволяет целенаправленно синтезировать островковые нанопленки в лазерном эксперименте с требуемыми электрофизическими свойствами с возможностью их использования в различных приложениях с учетом требуемых параметров..
Актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Общая характеристика работы

Основное внимание в работе уделено разработке методов моделирования структурных особенностей и характеристик электропроводимости лазерно-индуцированных наноструктурированных объектов на твердой поверхности и островковых кластерных пленок в зависимости от их топологических особенностей и фрактальных размерностей, а также с учетом реализуемых граничных условий и конкретного элементного/химического состава образцов.

Конкретно, в работе исследованы возможности метода лазерного синтеза для управляемого получения образцов нанокластеров теллурида свинца. Изучены электрофизические свойства полученных образцов, проявившиеся в изменении вольт-амперных характеристик при температурах, близких к комнатным, в зависимости от геометрических особенностей образцов. Также установлен смешанный режим электропроводимости, с переключением от явления туннелирования к термоактивационному прыжковому характеру электропроводимости. Для описания геометрических/топологических особенностей полученных образцов в работе развиты модели и алгоритмы диффузионно-ограниченной агрегации, путем возможности учета тепловых параметров системы. Для описания особенностей электропроводимости, обусловленных поверхностной топологической конфигурацией образцов была предложена модель вольт-амперных характеристик с учетом туннелирования и прыжкового механизма движения электронов на основе соответствующего графа прыжков на расчетной сети Миллера-Абрахамса.

Представленная к защите диссертация оформлена согласно требованиям ВАК и имеет стандартную структуру, которая включает в себя Введение, четыре главы, Заключение, благодарности, а также список использованной литературы.

Работа изложена на 141 странице, содержит 178 библиографических ссылок и достаточно полно сопровождается графическим материалом и рисунками .

Во Введении обосновывается актуальность работы, формулируются основные цели и задачи, представляется научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

Первая глава посвящена краткому обзор научной литературы по развиваемому в диссертации направлению. Разбираются современные методы управляемого лазерного синтеза нанокластерных структур с изменяемой топологией на твердой поверхности. Обсуждаются существующие подходы и алгоритмы для математического моделирования и компьютерной симуляции рассматриваемых задач и процессов. Цитирование основных тематических работ и публикаций последних лет в ведущих международных изданиях подтверждает понимание автором основных достижений в области его исследований.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных результатов по лазерному синтезу полупроводниковых нанокластеров и их систем на поверхности эпитаксиальной пленки PbTe под действием непрерывного лазерного излучения. Исследование полученных образцов показало их фрактальную кластерную природу и позволило определить основные управляющие параметры, влияющие на структуру получающихся образцов.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям электрофизических свойств нанокластерных/островковых нанопленок теллурида свинца, реализованным через измерение их вольт-амперных характеристик и резистометрию. Были установлены особенности поведения вольт-амперных характеристик – увеличение силы тока на величину порядка 50% относительно средних значений в зависимости от геометрических особенностей образцов и смешанный режим электропроводимости – туннелирование и термоактивационный прыжковый механизм. Указанные особенности были объяснены в рамках поведения электрона в потенциальной яме и оценены в рамках модели усиления поля на системе цилиндрических нановыступов.

Четвертая глава посвящена моделированию структуры и вольт-амперных характеристик полученных образцов с учетом сравнения с полученными экспериментальными данными. Для описания структуры использовалось

приближение диффузионно-ограниченной агрегации и перколяции с возможностью учета тепловых параметров системы, обусловленных схемой лазерного синтеза. Для описания вольт-амперных характеристик применялось приближение закона Ома на сети Миллера-Абрахамса. Погрешность проведенного моделирования не превосходила 10%, что свидетельствует об удовлетворительной адекватности предложенных приближений.

В Заключении диссертации рассмотрены перспективы применения полученных образцов технических задачах, приведено общее описание полученных результатов, сформулированы выводы, выражены благодарности участникам совместных работ.

Научная новизна

Первое. Проведен анализ и классификация образцов, полученных в экспериментах по лазерно-индуцированной генерации островковых нанопленок в соответствии с их фрактальными размерностями. Показано, что существует принципиальная связь между топологией структуры и физическим механизмом реализации функциональных характеристик образцов.

Второе. На примере исследования Вольт-Амперных характеристик образцов PbTe на основе четырёхточечного метода микроконтактов, экспериментально выявлены особенности и условия реализации различных механизмов и процессов электропроводимости нанокластерных систем (туннелирование, прыжки между разными кластерами) в зависимости от их топологических особенностей и локальных полей, создаваемых в лазерном эксперименте при соответствующих граничных условиях и наличии поверхностных неоднородностей.

Третье. Разработаны динамические модели и алгоритмы для расчета характеристик нанокластерных структур/островковых нанопленок, с управляемой топологией, включая фрактальные объекты и структуры с размерными квантовыми состояниями, индуцированных при лазерном воздействии на твердую поверхность.

Среди оригинальных и новых научных результатов, полученных автором, наиболее важным представляется анализ фрактальных структур лазеро-индуцированных островковых пленок, полученных в эксперименте. Этот результат составляет основное содержание положения 1, выносимого на защиту.

Достоверность полученных результатов

Полученные результаты основываются на использовании корректного и апробированного математического аппарата, теории вероятностей, фрактальной математики, математической статистики; и продемонстрирована согласованность результатов теоретических расчетов с данными, полученными в эксперименте, как самим автором, так и другими исследователями.

Теоретическая и практическая значимость работы

Приведенный в диссертации пример фрактального анализа полученных в эксперименте островковых нанопленок представляется важным для предсказательного моделирования функциональных свойств сложных наносистем, генерируемых лазерным излучением.

Результаты работы используются в научно-образовательном процессе в ФГБОУ ВО ВлГУ, в том числе и в рамках выполнения ряда фундаментальных и научно-технических программ федерального уровня. Результаты диссертации могут быть использованы в ИПФ РАН, ИФМ РАН, ИХФ РАН и в других научных организациях, где изучаются особенности лазерного воздействия на поверхности полупроводниковых материалов.

Недостатки и замечания

1. В главе 4 предлагается рассматривать процесс формирования фрактальных структур в рамках модели диффундирующих и агрегирующих дефектов. Не совсем понятно, что это за дефекты и какая физическая причина заставляет их агрегировать. Если это вакансии, то при обсуждении, например, электропроводности, надо

рассматривать дополнительные к найденным фракталам структуры, так как вакансии, агрегируя, образуют впадины (отсутствие вещества).

2. При рассмотрении электропроводности, не понятно, о каких электронах идет речь на Рис. 3.6. PbTe – это полупроводник с шириной запрещенной зоны 0,32 эВ. При комнатной температуре в зоне проводимости имеется некоторое количество электронов. Известно, что при размерном квантовании эффективная ширина запрещенной зоны увеличивается и в достаточно маленьких кластерах при комнатной температуре электронов проводимости может практически не быть совсем. На Рис. 3.6. речь идет об электронах проводимости или о валентных электронах? Возможно эффект усиления поля, о котором идет речь в главе 3, приводит к увеличению поля в незатронутым структурированием слое PbTe, что способствует увеличению проводимости этого слоя? На это указывает и энергия активации увеличения проводимости при увеличении температуры, равная ширине запрещенной зоны объемного полупроводника.

3. На странице 86 и еще в нескольких местах текста в диссертации употребляется термин «термодиффузия». Следует пояснить, что имеется в виду. Вообще, термодиффузия – это когда поток концентрации вещества пропорционален градиенту температуры, при этом он может быть как положительным, так и отрицательным. В растворах соответствующее явление называется эффектом Соре. В диссертации об этом эффекте ничего не говорится. Вообще говоря, при рассмотрении диффузии тех или иных объектов в условиях, когда температура зависит от координат, эффект Соре надо учитывать, что в диссертации сделано не было, хотя термин «термодиффузия» употребляется.

Отмеченные недостатки и замечания не снижают в целом ценность содержательной части работы и полученные в ней оригинальные результаты.

и представляют направления на будущую работу автора. Степень достоверности результатов проведенных исследований не вызывает сомнений и их можно характеризовать как научно обоснованные разработки, обеспечивающие на перспективу решение важных прикладных задач квантовой электроники с использованием достижений нанотехнологий, нелинейной динамики и современных подходов компьютерного/ математического моделирования.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в авторитетных научных журналах и изданиях и известны научной общественности, работающей в этой области.

Диссертант вместе со своими соавторами многократно представлял свои научные достижения на многих известных научных конференциях как у нас в стране, так и за рубежом, в том числе в качестве приглашенных/ пленарных докладов.

Автореферат диссертации достаточно полно и точно отражает ее содержание.

В целом работа является законченным на определенном этапе оригинальным исследованием и выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Работа написана литературным языком, грамотно, стиль изложения доказательный. Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики, примеры. Приводятся достаточные подробности расчётов. По каждой главе и работе в целом имеются выводы.

Диссертационная работа Бухарова Дмитрия Николаевича «Лазерно-индуцированные нанокластеры на твердой поверхности с управляемыми функциональными характеристиками: динамические модели и структуры в электропроводимости» представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, которое по своей актуальности, практической значимости и научной новизне отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор,

Бухаров Дмитрий Николаевич, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19– «Лазерная физика».

Диссертационная работа Д.Н.Бухарова обсуждена на семинаре Отделения нелинейной динамики и оптики ФГБНУ ФИЦ ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук 15 ноября 2023 г, протокол № 1.

Отзыв составил заведующий лабораторией лазерной наномодификации материалов ИПФ РАН,

доктор физико-математических наук, профессор  Н. М. Битюрин

15 ноября 2022 г.

email: bit@ipfran.ru
тел. 88314164889

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ФГБНУ ФИЦ ИПФ РАН)

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46. Тел. +7 (831) 436-62-02.

Оф. сайт: <https://ipfran.ru>, e-mail: dir@ipfran.ru

Подпись Битюрин Никиты Михайловича заверяю.

Ученый секретарь ИПФ РАН

к. ф.-м.н.



И. В. Корюкин