

Бухаров Дмитрий Николаевич

**ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ НАНОКЛАСТЕРЫ НА ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ С
УПРАВЛЯЕМЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ:
ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СТРУКТУРЫ В ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТИ**

Специальность: 1.3.19 – «Лазерная физика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Владимир – 2023

Работа выполнена на кафедре Физики и прикладной математики в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Аракелян Сергей Мартиросович**, Институт прикладной математики, физики и информатики Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир

Официальные оппоненты: **Андреев Степан Николаевич**, доктор физико-математических наук, начальник отдела радиофотоники Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), г. Долгопрудный

Заботнов Станислав Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики и молекулярной электроники Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Защита состоится 06.12.2023 г. в 15 часов 00 мин на заседании диссертационного совета 24.1.245.02. на базе ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН в ИПЛИТ РАН - филиале ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН по адресу 140700, Шатура Московской обл., ул. Святоозерская, 1, ИПЛИТ РАН, Круглый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПЛИТ РАН - филиале ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН, а также на сайте www.laser.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.245.02

к.ф.-м.н.

Гришаев Р.В.

I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию электрофизических характеристик нанокластерных структур/островковых нанопленок, индуцированных при лазерном воздействии на твердые поверхности. Рассмотрены механизмы электропроводимости в таких гранулированных системах в зависимости от их топологических характеристик. Проведено сравнение результатов выполненного математического моделирования с наблюдаемыми и измеренными при различных условиях лазерного эксперимента параметрами. Это должно позволить разработать на новых физических принципах подходы к получению требуемых электрофизических характеристик в подобных тонкопленочных нанокластерных структурах, индуцированных лазерным излучением, для различных приложений квантовой электроники, оптоэлектроники и фотоники.

Актуальность темы исследования

Полупроводниковые островковые/нанокластерные структуры разного состава находят широкое применение в нанoeлектронике и оптоэлектронике, например, как новая элементная база для создания нового класса электронных устройств с высокими эксплуатационными характеристиками [1,2]). Уникальность электронных свойств кластерных наноструктур связана с тем, что их пространственные характеристики соответствуют нанометровому диапазону во всех трех измерениях. Это приводит к эффектам размерного квантования энергетических уровней электронов для таких структур и позволяет управлять их функциональными свойствами в заданном направлении в широких пределах.

В данном аспекте вызывает интерес получение и исследование наноструктур, в которых будут наблюдаться области с переменными расстояниями, позволяющими реализовать различные механизмы переноса электронов в одной структуре, включая прыжковую электропроводимость. Это имеет принципиальное значение при проектировании триггерных квантовых систем.

В настоящее время при разработке новых физических принципов для создания наноструктур с заданными управляемыми функциональными характеристиками, к которым и относятся кластерные нанопленки, используются лазерные экспериментальные схемы получения поверхностных топологических объектов [3]. Неотъемлемое условие этих методов – математические и компьютерные модели должны адекватно описывать наблюдаемые особенности и ключевые параметры для их направленного синтеза. Нахождение оптимального решения в рамках моделирования требует разработки алгоритмов и моделей с прогнозом

элементного состава, характеристик и свойств синтезируемых нанообъектов на поверхности образцов для использования в практических устройствах.

Представляемая работа соответствует этой области исследований с определением необходимых процедур для управляемого лазерного синтеза/осаждения наноразмерных кластерных структур на поверхности твердой подложки. При этом акцент сделан на изучении электрофизики подобных систем в зависимости от конкретной созданной управляемым образом топологии: плотности расположения на поверхности, размеров и формы отдельных кластеров, а также элементного состава и граничных условий.

Предмет исследования – электрофизические свойства наноструктурированных тонкопленочных кластерных структур теллурида свинца в зависимости от их топологических особенностей, сформированных под воздействием лазерного излучения.

Объект исследования – лазерно-индуцированные наноструктурированные кластерные полупроводниковые поверхностные структуры теллурида свинца и фрактальные объекты с изменяемыми и контролируемыми параметрами (латеральный размер и форма, плотность расположения и т.д.).

Целью диссертационной работы является исследование и разработка методов моделирования и оценки характеристик электропроводимости лазерно-индуцированных наноструктурированных объектов на твердой поверхности и островковых пленок в зависимости от их топологических особенностей и фрактальных размерностей, и с учетом реализуемых граничных условий и конкретного элементного состава образцов.

В соответствии с поставленной целью решались нижеперечисленные научные задачи.

1. Обоснование методов лазерно-индуцированного получения нанокластерных/островковых нанопленок, имеющих принципиальные преимущества перед другими применяемыми подходами, и получение опытных образцов перспективных для создания элементов и систем топологической фотоники и оптоэлектроники на новых физических принципах.

2. Разработка методов моделирования для управляемого получения топологических наноструктур на твердой поверхности, включая фрактальные объекты, перспективные для практических приложений в квантовой электронике.

3. Использование современных подходов математического и компьютерного моделирования для получения заданных топологических нанокластеров на твердой поверхности, включая фрактальные структуры, в различных схемах лазерного эксперимента.

4. Создание алгоритмов и процедур численных методов управления электрофизическими характеристиками в подобных структурах в зависимости от их заданной лазерно-индуцированной топологии и элементного состава.

5. Моделирование механизмов и процессов распространения заряженных носителей/электронов в таких неоднородных наноструктурированных образцах с возможностью сопоставления в принципиальных управляющих параметрах полученных теоретических результатов с экспериментальными данными по зависимостям для электропроводимости.

Методы исследования. В проведенных исследованиях применялись экспериментальные и теоретические подходы с использованием современного специализированного оборудования, а также методов и алгоритмов численных вычислений и компьютерного моделирования с анализом, допускающим сравнение с экспериментом для лазерно-индуцированных нанокластеров на твердой поверхности при различных условиях.

Личный вклад автора состоит в самостоятельной разработке и реализации математических моделей, проведении на их основе численных вычислений и компьютерного моделирования, а также участие в планировании и проведении лазерного эксперимента с необходимыми начальными заданными условиями для получения наноструктур с требуемыми характеристиками, и обсуждении их результатов совместно с соавторами научных работ. Диссертация выполнялась в научных лабораториях кафедры физики и прикладной математики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ).

Научная новизна

1. Разработаны численные методы и подходы к планированию лазерных методов управляемого получения нанокластерных структур/островковых нанопленок на примере полупроводниковых образцов теллурида свинца (PbTe) с размерами от 10 нм до 13 мкм, перспективных для создания элементов и систем топологической фотоники и оптоэлектроники на новых физических принципах.

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

3. Выявлены условия реализации различных механизмов и процессов электропроводимости в нанокластерных системах (туннелирование, прыжки между разными кластерами) на отрезке напряжений $[0.1 \div 1]$ В при температурах от 20^0 до 100^0 С в зависимости от их топологических особенностей, индуцированных в лазерном эксперименте при соответствующих граничных условиях и поверхностных неоднородностях, позволяющих получать локальное усиление электрического поля.

4. Получено на количественном уровне согласование результатов проведенного моделирования электрофизических параметров неоднородных наноструктур с измеренными экспериментальными данными в лазерном эксперименте по индуцированию поверхностных структур с управляемой топологией.

5. Совокупность проведенных исследований, как в моделях, так и в лазерном эксперименте позволяет рассмотреть перспективы создания на новых физических принципах элементов и систем топологической фотоники и оптоэлектроники нового поколения.

Практическая значимость

1. Обоснованы лазерные методы получения островковых нанопленок с перспективой их использования в различных приложениях.

2. Разработаны подходы и алгоритмы для моделирования управляемых нанокластерных/островковых наноструктур на твердой поверхности, получаемых в разных схемах лазерного эксперимента.

3. Предложены математические модели для различных механизмов электропроводимости (туннелирование и прыжковые), которые могут быть полезны для выбора методов получения и прогнозирования характеристик, разрабатываемых наноструктурированных элементов и систем с требуемыми электрофизическими характеристиками, получаемыми при лазерном воздействии на вещества с разным элементным составом в определенных схемах эксперимента.

4. Рассмотрены процессы образования фрактальных объектов и их развития на твердотельной поверхности образца в зависимости от граничных условий и расположения начальных источников возбуждения. Эти подходы имеют универсальное значение и применимы для различных направлений моделирования в разных областях.

5. Результаты работы используются в научно-образовательном процессе в ФГБОУ ВО ВлГУ, в том числе в рамках выполнения ряда научно-технических программ федерального уровня.

Среди них можно выделить такие как:

- ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы»: Лазерный синтез полупроводниковых наночастиц/квантовых точек с использованием уникальной установки упорядоченного наноструктурирования объектов фемтосекундным излучением. 20.07.2012-23.09.2013.

- Грант РФФИ: Исследование процессов формирования полупроводниковых наночастиц/квантовых точек. 19.06.2013-31.12.2015.

- Госзадание Минобр науки: Экспериментальные и теоретические исследования формирования и распространения локализованных поверхностных электромагнитных возбуждений в низкоразмерных квазипериодических структурах. 01.02.2017-31.12.2019.
- ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы»: Разработка многофункционального высокотехнологического комплекса для послойной микро- и наномодификации поверхностей ответственных деталей машиностроения с применением лазерно – гибридных технологий 06.12.2019-30.09.2020.
- Грант РФФИ: Электрофизика и оптика лазерно-индуцированных нанокластерных тонкопленочных структур с управляемой топологией на твердой поверхности – размерные эффекты, квантовая проводимость и связанные состояния электронов 25.02.2020-25.02.2023.
- Грант РФФИ: Исследование оптических свойств квазиодномерных углеродных структур для разработки модулятора интенсивности в волоконном тракте. 20.04.2023-31.12.2024.
- Госзадание Минобр науки «Алмазная долина»: Разработка методов поверхностной лазерной модификации пленок из синтетического алмаза и широкозонных композиций на его основе для управления оптическими и электрофизическими свойствами структурированных материалов 09.2023-31.12.2025.

Положения, выносимые на защиту

1. Методы управляемого непрерывного воздействия YAG:Nd³⁺-лазера с центральной длиной волны 1,06 мкм и гауссовым профилем пучка при варьировании мощности в пределах 5-10 Вт, скорости сканирования поверхности от 40 до 160 мкм/с и диаметра пучка от 30 до 100 мкм позволяют синтезировать нанокластерные поверхностные структуры теллурида свинца с изменяемой и контролируемой топологией, включая фрактальные объекты, со средними латеральными размерами 10 нм – 13 мкм.

2. Вольт-амперные характеристики полупроводниковых нанокластерных структур теллурида свинца, измеренные четырехзондовым методом в диапазоне напряжений [0÷1] В, демонстрируют локальные отклонения от омической зависимости, с амплитудой, зависящей от поверхностной плотности нанокластеров, достигающей максимальной величины в 50% относительной средней величины.

3. Модели диффузионно-ограниченной агрегации позволяют рассчитывать лазерно-индуцированные нанокластерные структуры образцов теллурида свинца, качественно соответствующие экспериментальным с относительной погрешностью фрактальных размерностей не более 10% в сравнении с экспериментальным данным.

4. Модель на основе определения оптимальных траекторий туннелирования электронов в приближении Миллера-Абрахамса позволяет оценивать омическое поведение вольт-амперных характеристик нанокластерных/островковых пленок теллурида свинца в зависимости от топологических особенностей образца, с относительной погрешностью не более 10% в сравнении с экспериментальными данными.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и рассматривались при проведении совместных работ с разными участниками на международных научно-практических конференциях: на Молодежных научных форумах «ЛОМОНОСОВ-2012», «ЛОМОНОСОВ-2019»-«ЛОМОНОСОВ-2023» (г. Москва 2012, 2019 -2023 г.), на XI конференции «Лазеры и лазерно-информационные технологии: фундаментальные проблемы и применения» (ILLA-2014) (г. Шатура, 2014 г.), на VI-VIII Международных симпозиумах по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (г. Москва-Звенигород, 2017, 2019, 2021 г.), на международных конференциях «Инновационные материалы и технологии» (г. Минск, 2020 - 2023 г.), на VII, VIII Международных молодежных научных школах-конференциях «Современные проблемы физики и технологий» (г. Москва, 2018, 2019 г.), на IV-VI междисциплинарных научных форумах с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии» (г. Москва, 2018-2020 г.), на XVIII-XXII Международных конференциях по фотонике и информационной оптике (г. Москва 2019-2023 г.), на VI-XI Международных конференциях «Математическое и компьютерное моделирование» (г. Омск, 2018 - 2023 г.), на VIII - X, XIV - XVII всероссийских конференциях молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», (г. Саратов, 2013 - 2015, 2019 - 2022 г.), на Международных конференциях «Modern Nanotechnologies and Nanophotonics for Science and Industry» (г. Владимир, 2019 - 2021 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 16 печатных работах, из которых 6 работ опубликованы в научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 10 – в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных научного цитирования WoS и Scopus. Получено 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Список всех публикаций автора по теме диссертации приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 2 таблицы, 61 рисунок. Список литературы включает 178 наименований, в число которых входит ряд ключевых работ автора по теме диссертации.

II СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи проведенных исследований, определена их методическая основа, изложена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, и дано краткое описание сути работы по главам диссертации.

В **первой главе** приводится краткий обзор научной литературы по современному состоянию результатов в исследуемой области, приведены основные понятия и проанализированы принципиальные способы 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. Делаются выводы о необходимости разработки и использовании соответствующих подходов моделирования, адекватно описывающего процессы образования лазерно-индуцированных нанокластерных поверхностных твердотельных структур для создания на новых физических принципах элементов и систем топологической фотоники и оптоэлектроники в различных приложениях.

Во **второй главе** приводятся результаты оригинальных экспериментов по получению полупроводниковых нанокластеров и их систем на поверхности эпитаксиальной пленки PbTe под действием непрерывного лазерного излучения. Исходные структуры подвергались воздействию YAG:Nd³⁺-лазера с длиной волны $\lambda_{\text{л}}=1,06$ мкм. Для получения полупроводниковых наноструктурированных тонкопленочных кластерных структур применялось управляемое воздействие на эпитаксиальные структуры PbTe толщиной 1,6 мкм на подложке из кремния (Si) со стороны имеющейся пленки непрерывного излучения с мощностью $P=5-10$ Вт, при сканировании лазерного пучка с гауссовым профилем диаметром $d_{\text{п}}=30-100$ мкм со скоростью $v_{\text{ск}}=40-160$ мкм/с по поверхности образца.. Таким образом, можно считать основными управляющими параметрами величины P , $d_{\text{п}}$, $v_{\text{ск}}$. Связь управляющих параметров определялась через соотношение времени воздействия в одной точке:

$$t_{\text{ит}}= d_{\text{п}}/v_{\text{ск}} (1).$$

На рисунке 1а приведено АСМ-изображение образца нанокластерной структуры PbTe, полученное при $P=8$ Вт, что соответствует интенсивности $I_{\text{л}}=1,1 * 10^6$ Вт/см², $d_{\text{п}}=30$ мкм, $v_{\text{ск}}=80$ мкм/с, так что время воздействия в одной точке составляло в среднем $t_{\text{ит}}\sim 0,375$ с. Рамочные ограничения мощности выбрались исходя из анализа поверхности полученных образцов, который показал, что при значениях мощности менее 5 Вт поверхность пленки не менялась (рисунок 1в), а при значениях выше 10 В – наблюдался оплавленный рельеф (рисунок 1г).

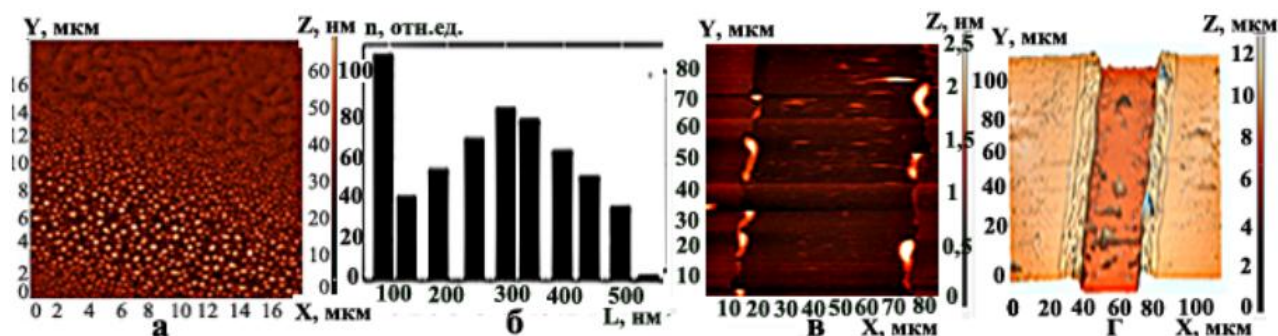


Рисунок 1 –АСМ-изображение поверхности РbТе после воздействия лазерного излучения. В левом нижнем углу – ансамбль наночастиц в пределах области облучения; в правом верхнем углу – необлученная поверхность пленки. Размер наночастиц убывает с приближением к границе облученной и необлученной зон (а). Экспериментальная нормированная гистограмма распределения латеральных размеров наночастиц – бимодальное распределение (б). Результаты оценки мощности излучения: АСМ-изображение структуры РbТе для мощностей излучения 5 Вт (в), 12 Вт (г).

Анализ тонкопленочных кластерных структур РbТе (рисунок 1а), проведенный с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Quanta 200 и 3D-зондовой нанолaborатории Интегра-Аура (АСМ-изображения) позволил сделать заключение о том, что вследствие лазерного воздействия в зоне лазерного пучка на подложке образовывался ансамбль наночастиц (рисунок 1б) с бимодальной функцией распределения по латеральным размерам, обладающей двумя ярко выраженными максимумами при размере гранул 100 и 300 нм.

Образование ансамбля нанокластеров на поверхности эпитаксиальной пленки может быть объяснено в рамках модели тепловой диффузии точечных дефектов/вакансий (дефектно-деформационная (ДД) теория) [4], имеющих повышенную подвижность в приповерхностном слое пленки РbТе вследствие воздействия лазерного излучения, создающего сильно неравновесные условия при которых будет происходить достаточно активный выход их на поверхность и как следствие формирование ансамбля нанокластеров, когда концентрация дефектов быстро подстраивается под распределение деформации в вертикальном направлении

Увеличение мощности излучения от 5 до 10 Вт и диаметра пучка при фиксированной интенсивности приводило к росту плотности числа наноточек, формирующих нанокластеры в области модификации поверхности (рисунок 2). Полученная зависимость была аппроксимирована логарифмической функцией:

$$n(P) = (0,4091 \ln(P) + 4,8069) * 10^8, (2)$$

полученной с использованием метода наименьших квадратов, реализованного в среде MATLAB.

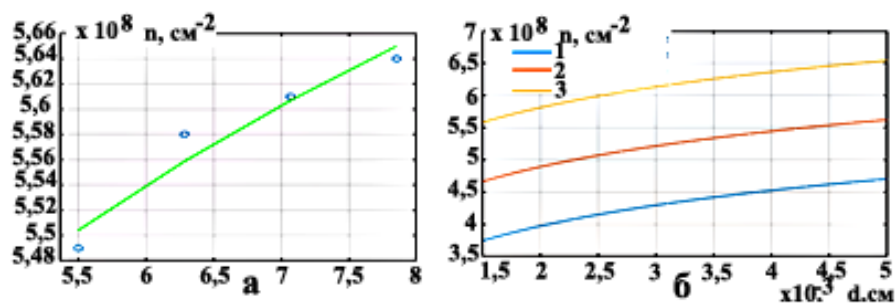


Рисунок 2 – Поверхностная плотность наночастиц в области лазерной модификации (n): зависимость от мощности лазерного излучения (P) для пучка диаметром 100 мкм: овалы – экспериментальные измерения; линия - аппроксимация по методу наименьших квадратов с максимальной погрешностью $0,24 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ (а), зависимость от диаметра пучка от 30 до 50 мкм при различных величинах интенсивности: 1 – 10^4 Вт/см^2 , 2 – 10^5 Вт/см^2 , 3 – 10^6 Вт/см^2 (б).

Детальное изучение АСМ-изображений полученных нанопленок, выполненное в среде MATLAB, позволило оценить латеральные размеры объектов от 10 нм до 13 мкм, а также продемонстрировало их фрактальную природу (рисунок 3).

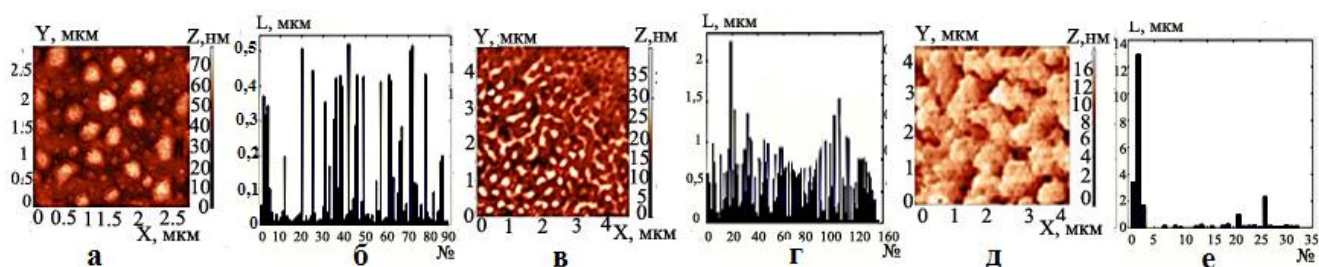


Рисунок 3 – АСМ-изображения различных модификаций осажденных на подложке с эпитаксиальной пленкой кластерных структур PbTe (сверху) и столбцовые диаграммы размеров образующих их объектов: образец со структурой, соотносимой с перколяционной (а), с размерами объектов от 9,08 нм до 0,52 мкм (б), образец со структурой, соотносимой с дендритной (в), с размерами объектов от 30 нм до 2,23 мкм (г), образец гранулированной/лабиринтной структуры (д) с размерами объектов от 25,43 нм до 12,91 мкм (е).

Расчет фрактальной размерности (D_f), проведенный в приближении клеточной размерности (boxcounting) [5], позволил соотнести образцы нанокластерных структур с известными фракталами и показал, что в основном их форма при относительно малых $t_{\text{лп}}$ имеет перколяционный характер (рисунок 3а) с $D_f=1,73$, образуя в итоге дендритную структуру (рисунок 3в) с $D_f=1,867$. Кроме фрактальных объектов были также получены лабиринтные гранулированные/островковые поверхностные пленки (рисунок 3д) с большей фрактальной размерностью $D_f=1,972$, формирующиеся за счет более длительного лазерного воздействия.

Таким образом, предложенные методы позволяют модифицировать тонкие эпитаксиальные пленки и формировать на их поверхности нанокластеры и островковые/гранулированные структуры управляемым способом, задавая диаметр, скорость движения пучка, мощность, позволяющие получать у образцов требуемые геометрическими особенностями, что открывает дополнительные возможности их применения в задачах формирования оптических изображений с помощью оптоэлектронных устройств с изменяемыми характеристиками.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований электрофизических свойств нанокластерных/островковых нанопленок, реализованные через измерение их вольт-амперных характеристик (ВАХ). При этом анализ был проведен с использованием четырехзондовой схемы с линейным расположением контактов [6] на одинаковом расстоянии друг от друга, равном 6 мм. Внутренние зонды представляли собой проводящие иглы атомно-силового микроскопа (АСМ) с радиусом закругления 100 нм

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исходной пленки и модифицированных кластерных структур РbТе показаны на рисунке 4а. Зависимость сопротивления (R) от плотности наноточек (n) изображена на рисунке 4б.

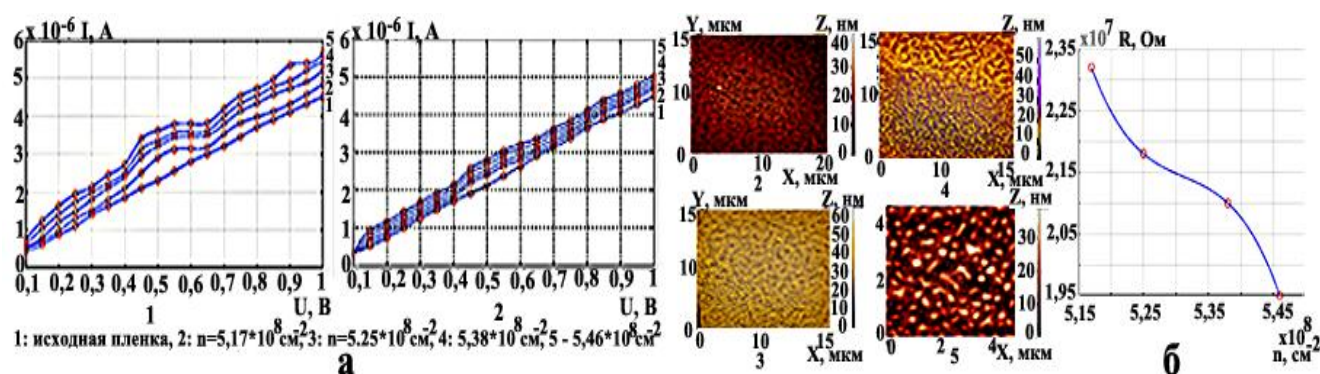


Рисунок 4 – Вольт-амперные характеристики $I(U)$ исходной (1) и модифицированных (2-5) (показаны слева) нанокластерных/островковых пленок РbТе – их поверхностная плотность показана непосредственно у приведенных кривых: 1 – измерение в продольном направлении, 2 – в поперечном (а), зависимость сопротивления от поверхностной плотности (б)

Зависимости ВАХ демонстрировали в среднем линейную зависимость на интервалах напряжения $U \sim (0,1 - 0,4)$ В и $U \sim (0,65 - 1)$ В. Для средних значений напряжения в интервале $U \sim (0,4 - 0,65)$ В наблюдался локальный максимум – резонансный всплеск силы тока (рисунок 4а (1)) величиной порядка 50% от средних значений, зависевший от плотности наночастиц на поверхности пленки. Этот всплеск может быть объяснен в рамках модели гранулы как потенциальной ямы с соответствующей глубиной и шириной.

Появление резонансного всплеска можно рассматривать как результат участия в поверхностной электропроводности слабо и сильно связанных электронов, находящихся изначально на уровнях размерного квантования в наноточках [7].

Скачок силы тока размыт из-за разброса размеров частиц, когда выход электрона из потенциальной ямы происходит при различных значениях напряжения. Относительно слабо связанные электроны освобождаются уже при малых полях, что приводит к увеличению электропроводимости и, соответственно, увеличению наклона зависимости ВАХ. Причем увеличение силы тока (G) прямо пропорционально поверхностной плотности наноточек (n).

Эта величина ($G(n)$) была оценена для образцов 2-5 из рисунка 4а(1) в рамках модели усиления локального поля внутри нанокластеров (рисунок 5), когда они рассматривались в приближении множества цилиндрических нановыступов с заданным средним радиусом $a(n) = \frac{1}{\sqrt{\pi n}}$, высотой $b=100$ нм статистической диэлектрической проницаемостью $\epsilon_s \sim 400$ при температуре 295 К:

$$G(n) = \frac{1}{1 - (\epsilon_s - 1) \left(\frac{b}{a(n)} - \frac{b}{a(n)} \arctg\left(\frac{a(n)}{b}\right) \right)}. \quad (3)$$

Погрешность расчета составила порядка 3,8%, что свидетельствует об удовлетворительной адекватности предложенной модели.

Для выяснения механизма электропроводимости была исследована резистометрия пленок от температуры в диапазоне от 200 до 100°С. На рисунке 6 приведены зависимости $\ln(R)$ от обратной температуры $1/T$.

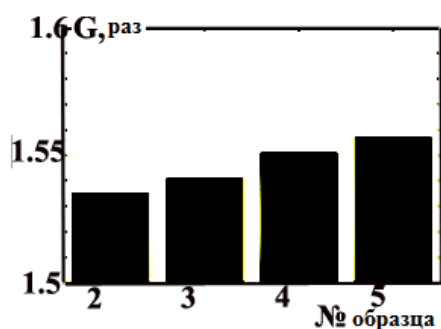


Рисунок 5 – Расчетное значение коэффициента усиления по модели системы нановыступов для образцов 2-5 из рисунка 4а.

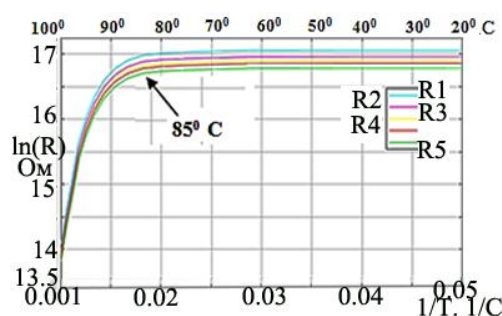


Рисунок 6 – Температурная зависимость натурального логарифма сопротивления $\ln(R)$ пленок, полученных при различных режимах осаждения с единой для всех образцов энергией активации, равной 0,3эВ.

Кривые R1 – R5 соответствуют пленкам с различной плотностью расположения точек на поверхности (в соответствии с данными 1-5 рисунок 4а). Как видно из рисунка 6 в диапазоне от

20 °С до 85 °С электропроводимость носит туннельный характер – не зависит от температуры. При температуре выше 85°С поведение электропроводимости меняется, что обуславливается проявлением эффекта термоактивации; характер электропроводимости становится преимущественно прыжковым.

Для оценки экспериментальной зависимости сопротивления R от температуры T применимо соотношение [8]:

$$R \sim R_0 + R_1 \exp\left(\frac{\varphi}{kT}\right), \quad (4)$$

где k – константа Больцмана, φ – энергия активации.

Первое слагаемое R_0 обусловлено независимым от температуры туннельным эффектом, а второе – R_1 , определяется термоактивированными прыжками электронов. Энергия термоактивации прыжков между островками оказывается существенно меньше работы выхода электрона для этого материала в объемном/монокристаллическом образце, что обуславливается влиянием гранулированной структуры на подложке.

Сравнивая ВАХ сплошной пленки PbTe (образец 1 на рисунке 4а и нанокластерной/островковой тонкой пленки PbTe (образцы 2-5 на рисунке 4а), можно заключить, что электропроводные свойства нанокластерной структуры имеют свои существенные особенности, перспективные для задач разработки термоэлектрических приборов.

В **четвертой главе** рассмотрены результаты применения аппарата математического моделирования для описания электропроводных свойств с учетом сравнения с полученными экспериментальными данными.

Исходя из данных эксперимента (см. рисунок 4), когда электропроводимость наноструктурированных тонкопленочных кластерных структур существенно зависит от их геометрических особенностей (количество кластеров, их близость друг к другу, форма и т.д.), процесс моделирования должен состоять из двух этапов: во-первых, синтез самой наноструктуры, во-вторых, оценка зависимости ее ВАХ с учетом особенностей поверхности образца.

В рамках фрактальной геометрии при моделировании дендритообразных образцов мы использовали модель диффузионно-ограниченной агрегации (DLA) [9] с учетом ряда модификаций, позволяющих учитывать физические параметры системы.

Модель DLA основывается на решении двумерного уравнения диффузии в относительных единицах:

$$\frac{\partial C(x,y,t)}{\partial t} = D \nabla^2 C(x,y,t), \quad (5)$$

где $C(x, y, t)$ – концентрация блуждающих частиц, t – время, D – коэффициент диффузии x, y – поверхностные координаты.

Приведенное уравнение решалось методом клеточного автомата в рамках окрестности Неймана для случайных блужданий модельной частицы с учетом варьирования вероятности прилипания (\bar{s}) из $(0; 1]$. Начальным условием служило начальное распределение центров агрегации, от которых начиналось формирование кластеров. Вероятность прилипания оценивалась как величина, обратная нормированному коэффициенту подвижности дефекта (\bar{B}):

$$\bar{B} \sim \frac{\bar{B}_0}{\bar{s}}, \quad \bar{s} \sim \bar{s}_0 \exp\left(\frac{A_0}{T}\right), \quad (6)$$

где $\bar{B}_0, A_0, \bar{s}_0$ – коэффициенты нормировки, T – относительная температура.

Абсолютный коэффициент подвижности дефектов может оцениваться величиной пропорциональной частоте перескоков дефектов (Γ_v):

$$B \sim \Gamma_v = \Gamma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right), \quad (7)$$

где Γ_0 – коэффициент пропорциональности, E_a – энергия активации перемещения дефекта, k_b – постоянная Больцмана.

Оценка температуры для расчетов вероятности прилипания была получена в результате моделирования поля температуры для плоского случая с теплофизическими параметрами, характерными для теллурида свинца с учетом управляющих параметров лазерного эксперимента в приближении, представленном в MatlabLaserToolbox [10] как

$$T(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} AI(x', y') W(x, y, x', y', v) dx' dy', \quad I(x, y) = \frac{8P}{\pi d_n^2} \exp\left[-\left(\frac{2\sqrt{2}}{d_n}\right)^2 (x^2 + y^2)\right] \quad (8)$$

где $W(x, y, z, x', y', v) = \frac{1}{2\pi KR} \exp\left(-\frac{v}{2a}(x - x' + R)\right)$ и $R = \sqrt{x^2 + y^2}$, где A – поглощательная способность материала, K – теплопроводность (Вт/м*К), $a = K/\rho c_p$ – температуропроводность (м²/с) материала, v – скорость сканирования (м/с). ρ – плотность (кг/м³) и c_p – удельная теплоемкость, P – мощность лазерного излучения, d_n – диаметр пучка на поверхности мишени.

Варьирование параметра вероятности прилипания оказало существенное влияние на структуру моделируемых кластеров (рисунок 7а,б) и их фрактальную размерность (рисунок 7в), которая была аппроксимирована методом наименьших квадратов в MATLAB как:

$$D_f(\bar{s}) = -0,0558 \ln(\bar{s}) + 1,7343. \quad (9)$$

Таким образом, малые значения вероятности прилипания позволяют генерировать сравнительно однородные кластеры, объединенные в связную структуру с высоким значением фрактальной размерности (рисунок 7б). В случае высоких значений вероятности прилипания моделируются несвязные системы кластеров с низкими значениями фрактальной размерности (рисунок 7а). На рисунке 7г приведена DLA модель для случая увеличения температуры с течением времени, которое характеризовалось уменьшением вероятности

прилипания от 0,6 до 0,01 с течением времени в сравнении с DLA кластером при постоянных значениях вероятности прилипания: 0,01.

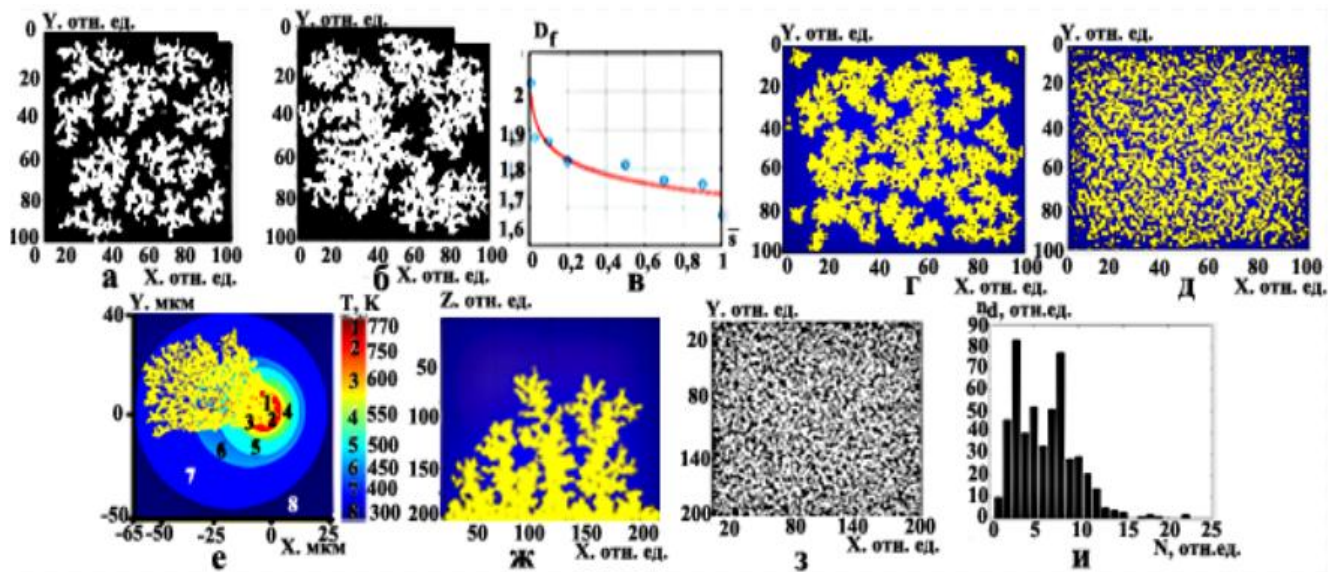


Рисунок 7 – Модель DLA: кластерная структура, построенная от 12 центров агрегации при $\bar{p} = 0,9$ (а), $\bar{p} = 0,3$ (б), зависимость фрактальной размерности от вероятности прилипания: круги – значения, линия – аппроксимация (в), кластерная структуры при динамическом изменении во времени параметра вероятности прилипания от 0,6 до 0,01 (г), кластер при постоянных значениях параметров вероятности прилипания 0,01 (д), кластерная структура с учетом анизотропии расчетной области: кластер с заданным направлением роста для изотермических областей: 1-8 для квазистационарной модели температуры (е), модель бокового сечения при уменьшении вероятности от 1 до 0,01 в случае нагревания от 300 до 774 К(ж), кластерная структура при $\bar{p} = 2 \cdot 10^{-3}$ для области с температурой 771 К (з), нормированная гистограмма размеров объектов структуры из рисунка 7з (и).

На рисунке 7е приведен случай учета анизотропии расчетной области за счет совмещения модели нагрева от движущегося источника излучения и диффузионно-ограниченной агрегации с учетом не равновероятных смещений образующих частиц во время случайного блуждания. В модели поля температуры рассматривался гауссов лазерный источник мощностью 8 Вт с гауссовым пучком диаметром 100 мкм, двигавшийся со скоростью 80 мкм/с. По предложенным алгоритмам также можно смоделировать боковое сечение нанокластерных систем на твердой поверхности (рисунок 7ж), позволяющее оценивать их высоту. Для этого в расчетной области на нижней границе, необходимо задать стартовую структуру и повторить шаги DLA алгоритма (рисунок 7ж). Представленные модели допускают сравнение с экспериментальными образцами. Так, сравнение модельной структуры ансамбля нанокластеров PbTe из рисунка 7з с экспериментальным образцом и рисунка 2в показало погрешность

фрактальной размерности порядка 6,6%, что свидетельствует об адекватности применяемой модели. Гистограмма распределения модельных объектов модели (рисунок 7и) также имела бимодальный характер, на качественном уровне соответствующий экспериментальному образцу.

Оценка влияния управляющих параметров схемы лазерного синтеза на модельные образцы была установлена через анализ их влияния на смоделированное поле температур, связанное с основным параметром модели – вероятностью прилипания (формула 6). Так в относительно сильно нагретых областях моделировались образцы с достаточно однородной, хорошо заполненной структурой с высокой фрактальной размерностью. В менее прогретых областях моделировались образцы с более разреженной неоднородной структурой с более низкой величиной фрактальной размерности с меньшей поверхностной плотностью наноточек. Анализ расчетного поля температур показал, что с увеличением P при фиксированных $v_{ск}$ и $d_{п}$ прямо пропорционально росла средняя температура расчетной области, увеличивались площади изотермических областей. При таких условиях формировались система однородных связанных друг с другом кластеров с относительно плавными границами. При фиксированных значениях $P, d_{п}$ и увеличении $v_{ск}$ изотермические области с относительно небольшой температурой вытягивались в направлении движения лазерного пучка, температура уменьшалась, формировались более вытянутые неоднородные кластеры, связанные друг с другом по направлению движения лазерного пучка. По мере удаления структура кластеров становилась несвязной. В случае увеличения $d_{п}$ при фиксированных P и $v_{ск}$ температура уменьшалась, но значительно увеличивалась прогретая область, что позволяло генерировать систему неоднородных близкорасположенных друг относительно друга кластеров различных величин, с несвязной топологией, занимающих всю расчетную область. Таким образом, подставляя аппроксимированные зависимости температуры от параметров лазерного излучения в соотношения для определения вероятности прилипания, становится возможным произвести соотношение модельных параметров и параметров экспериментальной схемы.

Таким образом, модели на основе фракталов позволяют проводить оценку и прогнозирование структурных особенностей получаемых нанопленок.

В связи со смешанным характером электропроводимости, выявленным для полученных нанокластерных/островковых пленок (рисунок 5), использование стандартных моделей электропроводимости не позволяет получать удовлетворительного совпадения теории и эксперимента.

Поэтому нами была разработана модель электропроводимости, реализующая оценку ВАХ с учетом эффекта туннелирования [11] и прыжков зарядов/электронов между кластерами/островками [12] (они показаны ниже на рисунке 6а). Система кластеров/островков

нанопленки формировала дорожку электропроводимости – линию, по которой наиболее вероятно протекание тока [13]. Тогда ВАХ нанопленки оценивалась как сумма сил токов, протекающих по кластерам/островкам и между ними, вычисленных в соответствии с законом Ома. Зависимость силы тока от поверхностной плотности образца (n) учитывалась как поправочный коэффициент (γ): $\gamma = \frac{n}{n_m}$, где n_m – минимальная поверхностная плотность. Сопротивление дорожки проводимости в нанокластере/островке рассчитывалось по классической формуле. Длина дорожки протекания электрического тока оценивалась через определение диаметра окружности минимального покрытия [14] для нанопленок с изолированными островками. Дорожка электропроводимости между островками определялась по алгоритму Дейкстры как кратчайшее расстояние с минимальным весом на сетке Миллера-Абрахамса [15] на основе случайного взвешенного графа, с сопротивлением R_h , вычисляемым как

$$R_h = \sum_{i=1}^n R_{ij}, \quad R_{ij} = R_{03} \exp\left(\frac{2w_{ij}}{a} + \frac{\varphi}{k_B T}\right), \quad (10)$$

где R_{ij} – сопротивление ребер, входящих в дорожку проводимости; R_{03} – постоянная, зависящая от радиуса и распределения центров локализации островков, w_{ij} – вес ребра, входящего в дорожку проводимости, a – радиус локализации электрона, φ – энергия активации проводимости, T – температура.

На рисунке 8 показана реализация предложенной процедуры для образца (2) нанокластерной/островковой пленки РbТе из рисунка 4.

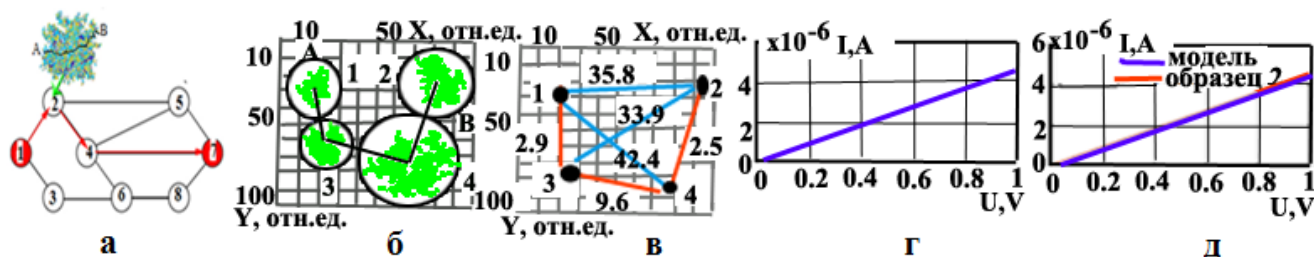


Рисунок 8– Схема модели: к кластерам/островкам 1 и 2 подведено электрическое напряжение; траектория движения тока проходит по островкам 1-3-4-2; внутри кластера/островка 2 траектория показана в виде линии АВ (а). Структура островковой пленки РbТе в рамках модели DLA с поверхностной плотность, характерной для образца 2 из рисунка 4(б): к точкам А,В подведено напряжение. Линией АВ отмечена траектория протекания тока. Соответствующий случайный граф (в) – с 4 вершинами и ребрами к достижимым вершинам с выделенным кратчайшим расстоянием между точками А, В. Расчетная ВАХ (г) при $\varphi=0,31$ эВ, $T=300$ К, $a=50$ нм, $\gamma=1$ и размере

ячейки расчетной области 10 нм. Сравнение ВАХ для образца 2, вычисленного по закону Ома с результатами моделирования из рисунка 5а(д).

Смоделированная структура была реализована в рамках DLA фрактала для КА с окрестностью фон Неймана при значении величины прилипания 0,01, соответствующей температуре порядка 750 К. Результирующая пленка состояла из 4 кластеров/островков с величиной гранулы 10 нм (рисунок 8б) и имела поверхностную плотность наноточек, соответствующую величине для образца 2 из рисунка 4. Для нее был построен соответствующий случайный граф с электрическим напряжением, подводимым к вершинам – островкам (рисунок 8в). Оцененная траектория токов позволила произвести оценку ВАХ (рисунок 8г). Анализируя погрешности путем сравнения вычисленных и измеренных значений сопротивлений и силы тока, получаем что их разница не превосходит величин порядка 0,05 МОм и 0,1 мкА, соответственно. На основании этих величин можно сделать вывод об удовлетворительном совпадении результатов экспериментальных измерений и расчета – их разница не превосходит величины 10%.

Таким образом, использование модели электропроводности на основе формирования кластера проводимости, учитывающей прыжковую проводимость между островками-кластерами, позволяет достаточно адекватно описывать экспериментально наблюдаемые явления для островковых/нанокластерных нанопленок различного элементного состава (Au, Ag и их комплексы, PbTe и др.).

Диффузионная модель структуры системы нанокластеров позволяет в первом приближении произвести оценку оптических свойств на основе фрактальных характеристик.

$$S(k) \sim k^{-D}, \quad (10)$$

где S — интенсивность рассеянного света, $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны, D - фрактальная размерность кластера. [16]

III ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В **заключении** диссертации приведено общее описание полученных результатов и выражены благодарности участникам совместных работ.

Основные выводы по диссертационной работе сводятся к следующим.

1. Разработаны подходы и условия для использования лазерных методов, позволяющие получать в эксперименте кластерные системы из теллурида свинца с управляемой топологией на твердотельной поверхности, перспективные для создания элементов и систем топологической фотоники и оптоэлектроники на новых физических принципах.

2. Созданы динамические модели и алгоритмы для оценки характеристик и методов управления нанокластерными структурами/ островковыми нанопленками с заданной

топологией, включая фрактальные объекты и размерные квантовые состояния нанокластерных структур, индуцированными при лазерном воздействии на твердую поверхность.

3. Выявлены условия реализации различных механизмов электропроводимости в нанокластерных системах (туннелирование и прыжковые процессы между разными кластерами в условиях термоактивации) и установлены зависимости электрофизических параметров от топологических особенностей таких объектов, возникающих в лазерном эксперименте при соответствующих граничных условиях и неоднородностях поверхности.

4. Проведено сравнение полученных модельных зависимостей для электрофизических параметров неоднородных наноструктур разной топологии на твердой поверхности с экспериментальными данными при предложенных подходах моделирования, обеспечивающих их разумное соответствие.

5. Рассмотрены перспективы создания на новых физических принципах управляемых тонкопленочных элементов и систем топологической фотоники и оптоэлектроники с использованием разработанных комплексных многофакторных моделей и с соответствующей их адаптацией к реально наблюдаемым в лазерном эксперименте топологическим поверхностным структурам.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях по списку ВАК

(1) Д.Н. Бухаров, С.М. Аракелян, М.П. Алёшин Моделирование структурных особенностей поверхности высокоэнтропийного сплава AlCrFeCoNiCu// Южно-Сибирский научный вестник. – 2022. – № 6 (46). – С. 61-64.

(2) С. М. Аракелян, А. О. Кучерик, Д.Н. Бухаров, Т. А. Худайберганов Динамические и квантовые эффекты в кластерных низкоразмерных многослойных твердотельных наноструктурах для элементной базы микро- и наноэлектроники// Известия РАН. Серия физическая. – 2022, Т. 86, № 4.

(3) Багаев С. Н., Аракелян С. М., Кучерик А. О., Бухаров Д. Н., Бутковский О. Я. Нанооптика тонкопленочных лазерно-индуцированных топологических структур на поверхности твердого тела: фундаментальные явления и их приложения// Известия РАН. Серия физическая. – 2020. – Т.84, №12. – С. 245-249.

(4) Кучерик А.О., Аракелян С.М., Худайберганов Т. А., Бухаров Д.Н. Моделирование макроскопических квантовых состояний в функциональных свойствах лазерно-индуцированных 4D-топологических нанокластеров в тонких пленках на твердой поверхности // Известия РАН. Серия физическая. – 2020. – Т.84, №3. – С. 332-337.

(5) Бухаров Д.Н., Антипов А. А., Аракелян С. М., Истратов А. В., Шагурина А. Ю. Перколяционная модель электропроводности биметаллической островковой пленки// Южно-Сибирский научный вестник. – 2018. – № 4 (24). –С. 55-58.

(6) Герке М.Н., Истратов А.В., Бухаров Д.Н., Новикова О.А., Скрябин И.О., Аракелян С.М. Исследование структуры и электропроводности тонких биметаллических гранулированных пленок //Известия РАН. Серия физическая. – 2017. – Т.81, №12. – С.1572-1575.

Публикации в изданиях WoS, Scopus

(7) Trifonova T., Arakelian M., Abrakhin S., Abrakhina S., Bukharov D., Arakelian S. Catastrophic Floods in Large River Basins: Surface Water and Groundwater Interaction under Dynamic Complex Natural Processes–Forecasting and Presentation of Flood Consequences/ // Water. – 2022. – 14, 1405.

(8) D N Bukharov, A S Abramov, O A Novikova, V D Samyshkin Fractal models of the PbTe nanocluster structures on a solid surface//2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2316 012013.

(9) A. Kucherik, S Kutrovskaya, D Bukharov, T Khudaiberganov Topological photonics – 4D-laser technology for nanoelectronics on new physical principles to create the element base of next generation//2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2316 012015

(10) Kucherik, A., Samyshkin, V., Prusov, E., Osipov, A., Panfilov, A., Arakelian, S., Buharov, D., Skryabin, I. Kavokin, A.V. Kutrovskaya, S. Formation of Fractal Dendrites by Laser-Induced Melting of Aluminum Alloys. Nanomaterials. – 2021. –Vol. 11,№ 4.

(11) Arakelian S.M., Kucherik A.O., Khudaberganov T.A., Bukharov D.N., Butkovsky O.Ya. Nanocluster topological engineering of thin films by laser-hybrid technologies//The International Journal of Engineering and Science (IJES). – 2020. – Vol. 9, Issue 07. – PP 62-70. DOI: 10.9790/1813-0907016270.

(12) Bukharov D.N., Arakelyan S.M., Kucherik A.O., Novikova O.A., Samyshkin V.D. Mathematical modeling of the structure and optical properties of the fractal island metal nanofilm. – 2020 // Journal of Physics: Conference Series. – 1439. 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/1439/1/012050.

(13) Bukharov D.N., Arakelyan S.M., Istratov A.V., Samyshkin V.D. PbTe island film hopping electrical conductivity model// Journal of Physics: Conference Series.–2019.–1189:012017. DOI: 10.1088/1742-6596/1189/1/012017.

(14) Antipov A., Bukharov D., Arakelyan, S., Osipov, A., Lelekova, A. Bimetallic clustered thin films with variable electro-optical properties// Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – 951(1):012013. DOI: 10.1088/1742-6596/951/1/012013.

(15) Arakelian S.M., Bucharov D.N., Emel’yanov V.I., Zimin S.P., Kutrovskaya S.V., Kucherik A.O., Makarov A.A., Osipov A.V. Bimodal ensemble of nanoparticles on the surface of epitaxial lead

telluride films under continuous laser radiation //Journal of Surface Investigation. – 2015. – 9(6):1156. – PP. 1156-1163. DOI: 10.1134/S1027451015060063.

(16) Arakelian S.M., Bukharov D.N., Emel'yanov V.I., Zimin S.P., Kutrovskaya S.V., Kucherik A.O., Makarov A.A., Osipov A.V. Laser nanostructuring of the PbX thin films for creation of the semiconductor devices with controlled properties //Physics Procedia. – 2014. – Vol.56– PP. 1115-1125. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.026>.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

- Бухаров Д.Н., Кучерик А.О., Самышкин В.Д., Осипов А.В., Кутровская С.В. Модель формирования нанодендритной структуры. Свидетельство на регистрацию программ для ЭВМ № ЭВМ № 2021660172 от 22.06.2021
- Бухаров Д.Н., Лелекова А.Ф., Кучерик А.О., Антипов А.А., Кутровская С.В. Модель прыжковой электропроводности. Свидетельство на регистрацию программ для ЭВМ № 2019663686 от 22.10.2019.
- Бухаров Д.Н., Кучерик А.О., Осипов А.В., Кутровская С.В., Новикова О.А. Перколяционная модель структуры и электропроводности биметаллической Ag/Au островковой пленки. Свидетельство на регистрацию программ для ЭВМ № 2019662653 от 23.09.2019.
- Бухаров Д.Н., Кучерик А.О., Кутровская С.В. DLA модель формирования поверхности островковой пленки PbTe. Свидетельство на регистрацию программ для ЭВМ №2018618644 от 17.07.2018.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Аракелян, С.М. Введение в фемтонанопотонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов: учеб. пособие/ С.М. Аракелян, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев, В.Г. Рау, А.Г. Сергеев – М.: Логос, 2015. – 743 с.
2. Драгунов, В. П. Основы нанoeлектроники: учеб. пособие/ В. П. Драгунов, В. А. Гридчин, И. Г. Неизвестный – М.: Логос, 2006. – 496 с.
3. Bityurin, N. Laser-induced structure formation on stretched polymer foils/ N. Bityurin, E. Arenholz, N. Arnold, D. Bäuerle// Phys. Rev. E. –2007. –Vol. 75. –№4. DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.041603>.
4. Емельянов, В. И. Дефектно-деформационная теория образования ансамбля наночастиц с бимодальным распределением по размерам при непрерывном лазерном облучении твердых тел/ В. И. Емельянов// Квантовая электроника. –2011. –Т. 41, № 8. – С. 738–741.
5. Gonzato, G. A practical implementation of the box counting algorithm/ G. Gonzato//Computers & Geosciences.–1998.–24.–PP. 95-100. DOI: 10.1016/S0098-3004(97)00137-4.

6. Бурлаков, Р.Б. К вопросу об изменении удельного сопротивления проводящих слоев четырехзондовым методом/ Р.Б. Бурлаков, В.С. Ковивчак // Вестн. Ом. ун-та. –2014. – № 2. – С. 59-68.
7. Антипов, А.А. Электропроводимость нанокластерных структур РbТе с управляемой топологией: проявление макроскопических квантовых эффектов/ А.А. Антипов, С.М. Аракелян, С.В. Кутровская, А.О. Кучерик, Д.С. Ногтев, А.В. Осипов, В.И. Емельянов, С.П. Зимин // Известия РАН. Серия физическая. – 2016. – Т.80. – №7. – С. 818 – 827.
8. Kavokin, A. The crossover between tunnel and hopping conductivity in granulated films of noble metals/ A. Kavokin S.Kutrovskaya, A. Kucherik, A. Osipov, T. Vartanyan, S. Arakelyan// Superlattices and Microstructures. – 2017. – Vol. 111. – PP. 335-339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.06.050>.
9. Mroczka, J. Algorithms and methods for analysis of the optical structure factor of fractal aggregates / J. Mroczka, M. Woźniak, F.R.A. Onofri// Metrol. Meas. Syst. – 2012. – Vol. XIX, № 3. – PP. 459-470. DOI: 10.2478/v10178-012-0039-2.
10. Römer, G.R.B.E. Matlab Laser Toolbox/ G.R.B.E. Römer, A. Huis in 't Veld // Physics Procedia. – 2010. – 5. –PP. 413-419.
11. Parthasarathy, R. Percolating through Networks of Random Thresholds: Finite Temperature Electron Tunneling in Metal Nanocrystal Arrays/ R. Parthasarathy, X. Lin, K. Elteto, T. F. Rosenbaum, H. M. Jaeger// Physical Review Letters. – 2004.– Vol. 92, № 7. DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.076801
12. Kurdak, C. Au Nanoparticle Clusters: A New System to Model Hopping Conduction/ C. Kurdak, J. Kim, L. Farina, L. Kim, B. Xiaoyong, M. Rowe, A. Matzger// Turkish Journal of Physics. – 2003. – 27(5). – PP.419 – 426.
13. Suvakov, M. Modeling collective charge transport in nanoparticle assemblies/ M. Suvakov, B. Tadic // Journal of physics. Condensed matter. – 2010. – 22(16):163201. DOI: 10.1088/0953-8984/22/16/163201.
14. Barber, C.B.The quickhull algorithm for convex hulls/ Barber, C. B., Dobkin, D.P., Huhdanpaa Hannu // ACM Transactions on Mathematical Software. – 1996. – 22 (4). – PP. 469–483.
15. Гантмахер, В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах/ В.Ф. Гантмахер.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 288 с.
16. Ferri, F. Kinetics of colloidal fractal aggregation by differential dynamic microscopy/ F. Ferri, A. D'Angelo, M. Lee, A. Lotti, M.C. Pigazzini, K. Singh, R.Cerbino //Eur. Phys. J. Special Topics. – 2011. – №199. – PP 139–148.

