

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

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 Бухарова Дмитрия Николаевича развивает ряд важных направлений, связанных с лазерным синтезом и исследованием электрофизических свойств наноматериалов с требуемыми свойствами, имеющих перспективу применения в качестве элементной базы, основанной на новых физических принципах, в устройствах квантовой электроники и нанофотоники.

Тема представленной диссертации соответствует актуальным направлениям современных лазерных методов получения поверхностных топологических структур как в фундаментальных, так и в прикладных областях.

Актуальность работы обуславливается перспективой использования лазерно-индуцированных структур исследуемого автором теллурида свинца (PbTe) с управляемыми электрофизическими характеристиками в различных приложениях. Представленные модели применимы для лазерного синтеза нанокластерных структур и оценки требуемых характеристик получаемых тонкопленочных образцов. Предложенные модельные приближения адаптированы к рассматриваемым в работе образцам как в собственных экспериментах автора, так и в экспериментах, известных из литературы. Разработанные и апробированные в диссертации модели также могут быть применимы в других областях нанофизики и носят в известной степени универсальный характер.

Диссертация содержит новые научные результаты, опубликованные в 20 статьях в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus: Nanomaterials (Q1); Water (Q1); Optical and Quantum Electronics; Physics Procedia; Известия РАН. Серия физическая; Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования; Динамика сложных систем – XXI век; Южно-Сибирский научный вестник и Journal of Physics: Conference Series. Полученные результаты прошли апробацию на профильных конференциях по лазерной физике и физике наноструктур.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 141 странице со всеми необходимыми аналитическими представлениями и графиками.

Во введении автором достаточно полно сформулирована актуальность диссертационной работы, описаны цели и задачи. В данном разделе изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов; представлены защищаемые положения, а также сведения об апробации результатов диссертационного исследования в опубликованных автором работах в научных журналах и представленных на научных конференциях.

Первая глава содержит литературный обзор по основным направлениям исследований, рассматриваемым в диссертации. Автор приводит обзор методов лазерного синтеза наноструктур на примере теллурида свинца при моделировании в нем наноструктур различной конфигурации. В финальной части обзора уделяется внимание возможностям управления особенностями электрофизических характеристик в таких структурах с необходимостью разработки и использования для этого подходов моделирования, позволяющих достаточно адекватно описывать процессы образования лазерно-индуцированных нанокластерных структур топологического типа с фрактальными объектами. Цитирование автором основных тематических работ и актуальных публикаций последних лет подтверждает понимание проблематики этих задач и существующие здесь проблемы, на решение которых и направлены проводимые автором исследования по разработке и апробации моделей, требующихся для описания процесса лазерно-индуцированного синтеза островковых пленок фрактального типа и электрофизических свойств сформированных структур.

Вторая глава посвящена лазерному синтезу кластерных структур теллурида свинца с размерами элементов от 10 нм до 13 мкм. Представлена схема синтеза образцов, формирующая нанокластеры на поверхности эпитаксиальной пленки за счет воздействия сканирующего лазерного пучка. Синтез образцов осуществлялся при варьировании основных управляющих параметров: мощности излучения, диаметра его пучка, скорости сканирования. Это позволило провести оценку влияния этих параметров на поверхностную структуру полученных образцов. Исследование их микро- и наноконфигураций методом атомно-силовой микроскопии позволило провести классификацию по степени близости полученных фрактальных размерностей, к известным фрактальным объектам.

В третьей главе приведено экспериментальное исследование электрофизических свойств нанокластерных/островковых нанопленок теллурида свинца. Измеренные в эксперименте вольт-амперные характеристики с использованием четырехзондового метода регистрации, а также значения электросопротивлений позволили автору управлять токовыми параметрами в таких образцах в зависимости от топологии лазерно-индуцированных островковых пленок. Полученные результаты свидетельствуют о смешанном характере электропроводимости при нагревании образцов, обусловленном эффектами туннелирования и прыжковыми режимами. Для оценки выявленных особенностей вольт-амперных характеристик были использованы модели, учитывающие состояния электрона в квантовой потенциальной яме. При этом рассматривалась модель усиления электрического поля в системе наведенных лазерным излучением цилиндрических нановыступов, показавших хорошее совпадение с экспериментальными результатами.

В четвертой главе развитые методы и модели электрофизических свойств образцов применены к исследованию нанокластеров на поверхности теллурида свинца. Оценка вольт-амперных характеристик производилась для модельных структур, соответствующих по фрактальным размерностям экспериментальным образцам с учетом ряда приближений в рамках формализма клеточных автоматов со случайной сеткой Миллера-Абрахамса. Эти модельные структуры рассматривались в диффузионном приближении. При этом достигнутая погрешность моделирования не превосходила величины в 10%, что свидетельствует о достаточной степени адекватности предложенных приближений. Важной частью исследования с точки зрения лазерной физики является моделирование формирования островковых пленок в условиях диффузионно-ограниченной агрегации. Выявлена связь управляющих параметров в схемах лазерного синтеза топологических структур фрактального типа и модели поля температуры.

Научная новизна диссертационной работы не вызывает сомнений, а ее результаты позволяют говорить о разработке перспективных направлений для создания элементов и систем топологической фотоники и оптоэлектроники на новых физических принципах, включая фрактальные объекты и структуры с размерными квантовыми состояниями. Определены условия реализации различных механизмов и процессов электропроводимости в нанокластерных системах (туннелирование, прыжки между разными кластерами) в диапазоне напряжений  $[0.1 \div 1]$  В при температурах от 20 до 100 °С с учетом роли возникающих локальных электрических полей, превышающих значение приложенного внешнего напряжения. Важным является полученное на количественном

уровне согласование результатов проведенного моделирования электрофизических параметров неоднородных наноструктур с измеренными экспериментальными данными в эксперименте по созданию поверхностных структур с управляемой за счет изменения мощности и скорости движения структурирующего лазерного луча топологией.

Достоверность и обоснованность экспериментальных и модельных результатов обеспечена применением адекватных измерительных процедур с последующей обработкой большого количества полученных данных и сравнением результатов моделирования с экспериментальными результатами.

Базовое содержание диссертационного исследования в достаточно полной мере отражено в представленном автореферате.

По диссертации имеется ряд замечаний:

1. Имеются небрежности в оформлении текста и рисунков:
  - местами встречаются опечатки, например, на странице 39 мощность лазерного излучения наряду с ваттами указывается в вольтах, а на странице 95 написано про «полученные величины погрешностей»;
  - значительное число рисунков трудно для восприятия из-за их малого размера и поясняющих подписей на них с низким разрешением;
  - на фрагментах рисунка 4.33 *в, г* должны были быть изображены, судя по тексту и подписи к рисунку, экспериментальные и расчетные вольт-амперные характеристики с зарегистрированной разницей между значениями не более 10%, однако на обоих фрагментах представлены только идентичные зависимости; на фрагментах рисунка 4.34 *б, в* представлены уже оба типа вольт-амперных характеристик, однако создается впечатление об избыточности фрагмента *б* из-за наличия точно такой же зависимости на фрагменте *в*.
2. В тексте описываются бимодальные распределения на рисунках 2.4 и 2.6, полученные на основании данных атомно-силовой микроскопии с погрешностью порядка 10 нм. Однако сами гистограммы распределения по размерам построены с шагом 50 нм. Не понятен данный выбор шага и отсутствие данных для значения 50 нм. Наличие первого пика на значении 100 нм подразумевает отображение на гистограмме данных для меньших размеров, а заявленная точность вполне позволяет выбрать шаг по оси абсцисс 20 нм.
3. Точность рассчитанных фрактальных размерностей на страницах 52 и 54 до тысячных долей не выглядит обоснованной для анализируемых изображений облученных

поверхностей, где характерные размеры структурных неоднородностей рельефа имеют явно полидисперсное распределение по размерам и характеризуются более высокой погрешностью метода атомно-силовой микроскопии. В любом случае обоснование заявленной точности расчета фрактальной размерной в тексте не приводится.

4. Раздел 3.2 написан достаточно лаконично: отсутствие деталей эксперимента и расчетов затрудняет восприятие материала. В методике измерения удельного сопротивления следовало написать наименования моделей используемых приборов, определения продольного и поперечного направлений измерений. Из рисунка 3.4 и соответствующего текста не понятно, как конкретно оценивались «резонансный всплеск силы тока» для «ярко выраженного локального максимума» вольт-амперных характеристик и их наклон: данный максимум на рисунке, безусловно, наблюдается, но заявленные значения 50% и 20% для измерений в продольном и поперечном направлениях визуально не выглядят столь внушительными; увеличение наклона на фрагменте *a* воспринимается глазом как достаточно слабое, а на фрагменте *б* практически не видно.
5. На странице 88 автор пишет, что «максимальная температура в центре пятна составляет  $776 \pm 0,2$  К, что значительно меньше температуры плавления теллурида свинца (1190 К)». Как данное утверждение согласуется с рассматриваемой моделью роста фрактальных кластеров в поле лазерного излучения при диффузионно-ограниченной агрегации? Ведь такой механизм базируется на броуновском движении частиц. Такое движение реализуется, как правило, в жидкости, а в случае лазерно-индуцированного синтеза островковых пленок – в расплаве. В тексте диссертации нет необходимых разъяснений по данному вопросу.
6. В целом не очень понятно сравнение модельных результатов, полученных автором, с другими моделями. Например, можно было бы сравнить результаты расчетов сопротивления фрактальных структур из раздела 4.3 с расчетами по относительно простой формуле (3.2).

Тем не менее, отмеченные недостатки не снижают научную и практическую значимость проведенного диссертационного исследования.

В целом представленная диссертация «Лазерно-индуцированные нанокластеры на твердой поверхности с управляемыми функциональными характеристиками: динамические модели и структуры в электропроводимости» представляет собой законченное на данном этапе научно-квалификационное исследование, которое отвечает

требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Бухаров Дмитрий Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19– «Лазерная физика».

Официальный оппонент:

Доцент кафедры общей физики и молекулярной электроники

физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

кандидат физико-математических наук по специальности

01.04.21 – Лазерная физика

Заботнов Станислав Васильевич

08.11.2023г.

Даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Адрес места работы: 119991 г. Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 2,

физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Тел.: +7(495) 939-46-57

E-mail: zaboltnov@physics.msu.ru

Подпись Заботнова Станислава Васильевича удостоверяю:

И. о. декана физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

доктор физико-математических наук

профессор

Белокуров Владимир Викторович

