

## **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 Д.Н. Бухарова посвящена исследованию характеристик и особенностей лазерно-индуцированных нанокластерных структур теллурида свинца на твердой поверхности как в модельных, так и в реальных условиях. Тема представленной диссертации соответствует приоритетным направлениям развития наукоемких сегментов и представляется актуальной как в фундаментальных, так и в прикладных аспектах для разработки элементов в лазерных схемах и систем микро-наноэлектроники на новых физических принципах.

Речь идет об универсальных исследованиях гранулированных структур кластерного типа, которые в настоящее время определяют отдельное направление современных исследований топологических конфигураций с фрактальными объектами. Практическая значимость работы обуславливается перспективой использования лазерно-индуцированных структур теллурида свинца с управляемыми электрофизическими характеристиками в различных приложениях.

Предложенные подходы и модели могут быть полезны для выбора методов получения и прогнозирования характеристик, разрабатываемых наноструктурированных образцов с возможностью их использования в различных приложениях с учетом необходимых параметров эффективности и технологичности в относительно простых лазерных экспериментах. Реализованные в работе схемы расчетов имеют универсальное значение и применимы для различных направлений предсказательного и имитационного моделирования в различных областях физики.

Таким образом, несомненными являются актуальность проведенного исследования и его практическая значимость.

Работа содержит введение, четыре главы, заключение и список цитируемой литературы. Она изложена на 141 странице и включает в себя 61 рисунок и график.

Среди наиболее важных результатов работы считаю необходимым отметить следующие.

Проведен квалифицированный анализ современных методов и подходов к лазерному синтезу наноструктур теллурида свинца заданной конфигурации с учетом возникновения фракталоподобных объектов. Акцент сделан на исследовании особенностей электрофизических характеристик таких структур. Эти результаты имеют универсальное значение при разработке элементов и систем с индуцированными нанокластерными структурами топологической фотоники.

Разработаны лазерные методы синтеза микро-нанокластерных структур теллурида свинца с масштабами элементов от 10 нм до 13 мкм при соответствующих режимах сканирования лазерного пучка по поверхности эпитаксиальной пленки теллурида свинца. Варьирование параметров лазерного излучения (мощность, диаметр пучка, скорость и траектория сканирования) позволило получить образцы с различной топологической структурой. Автор делает акцент на их кластерном фрактальном характере, что позволяет соотнести подобные конфигурации с известными фрактальными объектами, а также определить ключевые управляющие параметры для их трансформации.

Проведены оригинальные экспериментальные исследования электрофизических характеристик нанокластерных/островковых нанопленок теллурида свинца, а именно, измерение их вольт-амперных характеристик в четырехточечных схемах измерения и их резистометрических параметров.

Здесь автором получены новые данные по особенностям токовых режимов в зависимости от топологии полученных образцов. Резистометрия показала наличие переключения электропроводимости от туннельного режима к прыжковому. Для описания наблюдаемых явлений предложены квантовые модели поведения электрона в потенциальной яме, а также проанализированы эффекты локального поля, приводящие к усилению электрического поля в системе цилиндрических нано -выступов.

При моделировании электрофизических свойств образцов нанокластеров теллурида свинца, рассмотрение их вольт-амперных характеристик производилось для модельных структур, соответствующих по фрактальным размерностям экспериментальным образцам. Оценки электросопротивлений проводились в приближении кратчайшего расстояния случайной расчетной сети Миллера-Абрахамса в диффузионном приближении. Погрешность моделирования не превосходила 10%, что свидетельствует об адекватности используемых приближений. Приведена связь управляющих параметров схемы лазерного синтеза таких структур с параметрами модели с учетом возникающего поля температуры.

#### Замечания.

1. Автор уделяет много внимания подробностям описания используемых им расчетных схем и алгоритмов без их привязки к реальным физическим процессам, происходящим при воздействии лазерного излучения на поверхность различных материалов. Здесь необходимо было произвести сопоставление с другими методами получения топологических структур тонкопленочного типа, например, методом лазерной абляции.
2. Во второй главе не прояснена причина твердофазной модификации, а также роль твердотельной подложки в процессе лазерного нагревания.

3. В третьей главе в модели, используемой для оценки коэффициента усиления электрического тока не обоснованы причины выбора цилиндрической формы нановыступа и не оценены значения локальных полей в этом случае.
4. В четвертой главе в формулах 4.2 и 4.4 не обосновано, каким образом выбирался коэффициент нормировки, а также какова принципиальная роль разных конфигураций фрактального типа.

Отмеченные недостатки не снижают общую значимость представленной работы. Диссертационная работа обладает научной новизной в части обоснования методов твердофазного лазерного синтеза нанокластеров теллурида свинца, разработки численных методов и подходов к планированию лазерных методов управляемого получения нанокластерных структур/островковых нанопленок, перспективных для создания элементов и систем топологической фотоники. В рамках разработанных динамических моделей и алгоритмов проведены оригинальные расчеты характеристик островковых нанопленок с управляемой топологией, включая фрактальные объекты и структуры с размерными квантовыми состояниями и реализацией различных механизмов электропроводимости..

Представленные в диссертации результаты опубликованы в виде 16 статей в авторитетных рецензируемых научных изданиях и прошли апробацию на международных конференциях. Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание работы.

Представленная диссертация «Лазерно-индуцированные нанокластеры на твердой поверхности с управляемыми функциональными характеристиками: динамические модели и структуры в электропроводимости» представляет собой законченное на определенном 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

доктор физико-математических наук,

начальник отдела радиопотоники МФТИ,

Андреев Степан Николаевич

дата 01.11.2023 г.

Адрес места работы: Институтский пер., 9, г. Долгопрудный, 141701

Т. +7 (498) 744-64-91

e-mail: andreev.sn@mipt.ru

Подпись Андреева Степана Николаевича заверяю:

Подпись руки  
ЗАВЕРЯЮ:  
Администратор канцелярии  
Административного отдела  
О. А. КОРАБЛЕВА

