

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Лотина Андрея Анатольевича на тему «Светоуправляемые функциональные материалы и наноструктуры для фотонных устройств», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

Диссертационная работа А.А. Лотина на тему «Светоуправляемые функциональные материалы и наноструктуры для фотонных устройств» посвящена развитию новых научных направлений и подходов к разработке светоуправляемых материалов и наноструктур на основе оксидов переходных металлов и теллуридов, перспективных для использования в фотонике. Соискателем реализован комплексный подход к экспериментально-теоретическому исследованию новых функциональных материалов, который дает возможность изучить динамику их оптических свойств при лазерно-индуцированных быстропротекающих процессах. Понимание механизмов таких процессов на фундаментальном уровне открывает возможность управления фотофизическими характеристиками для разработки и создания принципиально новую «фотонную» элементную базу, значительно превосходящую по производительности существующую «электронную» платформу на основе кремния.

Актуальность темы диссертации обусловлена достижением предела возможностей традиционной полупроводниковой электроники и необходимостью перехода к фотонным технологиям, где обработка, передача и хранение информации будут осуществляться посредством фотонов. Ожидается, что переход к фотонным технологиям должен привести к увеличению быстродействия, энергоэффективности, пропускной способности и помехозащищенности разрабатываемых устройств по сравнению с существующими полупроводниковыми аналогами.

Диссертационная работа является междисциплинарным исследованием и включает в себя такие перспективные направления как материаловедение и фотоника. Исследование выполнено на высоком научном уровне, обладает значительной научной новизной.

Достоверность полученных результатов подтверждается и обеспечивается комплексным экспериментально-теоретическим подходом к исследованию образцов и анализу полученных данных. Все результаты, изложенные в диссертации, получены с использованием современного

сертифицированного технологического и исследовательского оборудования. Защищаемые положения и основные результаты диссертационной работы полностью опубликованы в ведущих научных журналах и получили положительные отзывы от рецензентов.

Основное содержание диссертационной работы отражено в полном объеме в 30 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus, Chemical Abstracts, GeoRef, более чем в 60 тезисах докладов на российских и международных научных конференциях, в 4 патентах РФ на полезную модель и 1 патенте РФ на изобретение.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 375 наименований и 1 приложения. Текст работы изложен на 317 страницах, содержит 133 рисунка и 7 таблиц.

В главе 1 приведен обзор актуальных исследований в области синтеза и изучения физических свойств фазоизменяемых материалов, широкозонных магнитных полупроводников, низкоразмерных и плазмонных наноструктур, а также разработок на их основе фотонных и спинтронных устройств нового поколения.

В главе 2 описана процедура пробоподготовки исследуемых образцов: тонких пленок сложного химического состава с толщиной от единиц до сотен нанометров; низкоразмерных гетероструктур (множественные квантовые ямы и наностержни на основе оксида цинка); плазмонных наночастиц Au и Ag и наноструктур на их основе; мемристоров на основе разбавленных магнитных полупроводников и оптических синапсов на основе полимерного волновода, покрытого оптически активной пленкой из фазоизменяемого материала. Развита оригинальные методы получения образцов с использованием запатентованных технических решений. Описаны экспериментальные методы исследования статических физических свойств образцов, а также экспериментальная установка для исследования динамики изменения коэффициентов оптического отражения и пропускания тонких пленок теллуридов при фазовых переходах, индуцированных лазерными импульсами нано- и фемтосекундной длительности. Разработаны расчетные модели, позволяющие моделировать процессы лазерного нагрева и радиационного остывания тонких пленок, поверхностного плазмонного резонанса на границе «люминесцентная пленка/плазмонные наночастицы» и модуляции оптического излучения в синапсодобной структуре.

В главе 3 представлены экспериментальные исследования структурных, оптических, транспортных и магнитных свойств тонких пленок $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$ в зависимости от концентрации легирующей магнитной примеси в широком диапазоне, а также от наличия дефектов типа кислородных вакансий. В пленке $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ толщиной $d=60$ нм выявлена сильная гистерезисная зависимость продольного сопротивления R_{xx} от поля B , ориентированного перпендикулярно пленки. В образцах толщиной $d>100$ нм гистерезис в зависимости $R_{xx}(B)$ практически отсутствует. Такое поведение магнетосопротивления (МС) автор связывает с наличием кластеров металлического кобальта, ориентированных перпендикулярно плоскости пленки.

Для образцов тонких плёнок $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$, демонстрирующих наиболее сильные магнитные сигналы, был изучен экваториальный эффект Керра (ЭЭК). Экспериментальные данные качественно совпадают с результатами численного моделирования из первых принципов, которые показали, что большие значения величины ЭЭК, наблюдаемые в $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$ объясняются комбинацией диагональных и недиагональных компонент тензора проводимости, возникновением неосновных 3d-состояний Co внутри запрещенной зоны и сильной спин-орбитальной связью.

В ходе работы над диссертацией были созданы мемристоры на основе магнитного полупроводника ZnCoO с двухслойной активной областью, демонстрирующие мемристивный эффект при комнатной температуре. Впервые была изучена температурная зависимость вольтамперной характеристики таких структур.

В главе 4 приведены результаты исследований люминесценции тонких пленок $\text{Cd}_y\text{Zn}_{1-y}\text{O}$ в зависимости от концентрации кадмия. Показано, что увеличение содержания кадмия в диапазоне от 0 до 30 ат. % приводит к монотонному сдвигу экситонного пика фотолюминесценции (ФЛ) пленок $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ в красную область спектра от 369,36 нм (3,357 эВ) до 540,86 нм (2,293 эВ), что свидетельствует о смещении фундаментального края поглощения.

С помощью запатентованного устройства получены двумерные периодические гетероструктуры $\text{Mg}_{0.27}\text{Zn}_{0.73}\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{O}$ и $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{O}$. В таких структурах продемонстрированы квантоворазмерные эффекты и оптически возбужденное стимулированное экситонное излучение. В спектрах ФЛ гетероструктур $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{O}$ ($L_w=6$ нм), возбужденных субнаносекундным импульсно-периодическим YAG:Nd³⁺-лазером ($\lambda=355$ нм) при температуре $T=10$ К, вблизи порога возбуждения стимулированного излучения на

длинноволновом крыле спектра спонтанного излучения $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{O}$ наблюдалась генерация двух конкурирующих экситонных пиков. При увеличении плотности возбуждения пики сливались в один, что объясняется размытием энергетических уровней из-за резкого увеличения концентрации экситонов. Определены времена жизни двумерных экситонов в таких структурах. Показано, что излучательное время жизни τ_r двумерных экситонов в квантовых ямах немонотонно зависит от ширины квантовой ямы L_w . Минимальное значение времени жизни для МКЯ $\text{Mg}_{0.27}\text{Zn}_{0.73}\text{O}/\text{ZnO}$ составило $\tau_r=355$ пс при $L_w=2,6$ нм, а для $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{O}$ достигает рекордно минимального значения $\tau_r=144$ пс при $L_w=10$ нм.

Автором разработан метод синтеза наночастиц золота и серебра с контролируемыми размерами и плотностью на сапфировых и кремниевых подложках, демонстрирующие плазмонное поглощение в видимой области. Получены наночастицы с размерами от единиц до сотен нанометров. В спектрах ФЛ тонких пленок и наностержней на основе оксида цинка, покрытых наночастицами Ag размером несколько нм, наблюдалось усиление (в 3-5 раз) экситонной полосы излучения за счет поверхностно-плазмонного резонанса.

В главе 5 представлены результаты исследования статических физических свойств, а также динамики изменения оптических коэффициентов пропускания и отражения, электрической проводимости тонких пленок GeTe, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) и Ga_2Te_3 при обратимых фазовых переходах, индуцированных фемто- и наносекундными лазерными импульсами. При возбуждении фазовых переходов фемтосекундными лазерными импульсами продемонстрировано субнаносекундное (длительность фронта 300-500 пс) изменения оптических коэффициентов пропускания и отражения. Методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии показано, что характер кристаллизации в тонких пленках GST, индуцированной как нанотак и фемтосекундными лазерными импульсами носит гетерогенный характер, выраженный наличием поликристаллического слоя из плотно упакованных вертикально-ориентированных кристаллитов кубической фазы.

Автором впервые разработан и создан модулятор оптического телекоммуникационного сигнала (1,55 мкм) на основе полимерного волновода, покрытого оптически активной тонкой пленкой GST, имитирующий работу биологического синапса. В таком модуляторе достигнута практически 50% модуляция оптического сигнала при изменении фазового состояния тонкой пленкой GST.

Полученные соискателем результаты значимы для развития технологий фотоники, а также для создания новых наноразмерных материалов для широкого спектра фотонных устройств.

Вопросы и замечания по диссертации

В автореферате и диссертации допущена ошибка: утверждается, что «величина тока и площадь кривой ВАХ, определяющие величину мемристивного эффекта, значительно увеличиваются при повышении температуры», хотя на графике на рис. 3в в автореферате и на рис. 67в в диссертации эти величины уменьшаются с ростом температуры.

1. В главе 3 утверждается, что ферромагнетизм обусловлен нанокластерами металлического кобальта, что подтверждается рентгеноструктурным анализом и аномальным эффектом Холла. Однако это объяснение противоречит современной парадигме разбавленных магнитных полупроводников, где исключаются из рассмотрения вторые фазы. Автор не проводит достаточно убедительной дискриминации между вкладом кластеров и возможным вкладом одиночных ионов Co^{2+} в матрице ZnO . Отсутствуют прямые доказательства (например, данные EXAFS или HRTEM с элементным картографированием), однозначно подтверждающие наличие именно металлических, а не оксидных нанокластеров.

2. Автором заявлено о разработке термокинетической модели лазерного нагрева (глава 5.1), однако при этом используются параметры модели (теплопроводность, теплоёмкость и другие), известные для объёмных материалов, что некорректно для нанометровых пленок, где размерные эффекты являются определяющими.

3. Описываемый в главе 4 синтез наночастиц Ag/Au осуществляется методом постростового отжига, который даёт широкое распределение по размерам (см. гистограммы на рис. 89, 92). Каким образом выполняется количественная интерпретация спектров ППР в данном случае?

4. Диссертация содержит ряд орфографических ошибок и неточностей. Подписи к некоторым рисункам являются не полными. Имеются мало информативные рисунки (например, рис. 36а). Подпись к рис. 125 не соответствует его содержанию.

Указанные замечания не затрагивают защищаемых положений и основных выводов диссертации и не влияют на общую положительную оценку работы.

Теоретическая и практическая значимость результатов

Модель динамики температурного поля фазоизменяемого материала при лазерном облучении, разработанная соискателем, имеет теоретическую значимость с точки зрения моделирования лазерно-индуцированных процессов в полупроводниковых материалах, обладающих свойством фотоиндуцированных фазовых переходов.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в получении новых результатов, на основе которых могут быть разработаны фотонные устройства нового поколения, такие как:

- Адаптивные зеркала и перестраиваемые интерференционные фильтры для систем оптической коррекции и спектроскопии;
- Оптические синапсы, имитирующие работу биологических нейронных сетей, для нейроморфных вычислительных систем и энергоэффективных устройств памяти нового поколения;
- Магнитоуправляемые оптические устройства для систем обработки информации и спинтроники;
- Лазерные источники УФ-синего диапазона на основе низкоразмерных гетероструктур.

Соответствие диссертации научной специальности

По тематике, научной новизне, методам исследования, полученным результатам и защищаемым положениям диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы:

- П.3.1. Экспериментальные исследования процессов получения и технологии наноматериалов, формирования наноструктур на подложках, синтеза порошков наноразмерных простых и сложных оксидов, солей и других соединений, металлов и сплавов, в том числе редких и платиновых металлов.
- П.3.2. Выявление влияния размерного фактора на функциональные свойства и качества наноматериалов.
- П.3.3. Исследование фазовых равновесий и поверхностных явлений в наноматериалах.
- П.3.4. Моделирование структуры, свойств и процессов получения наноматериалов.
- П.3.7. Исследование структуры, свойств и технологии композиционных наноструктурированных материалов.

Заключение по диссертации

Диссертационная работа «Светоправляемые функциональные материалы и наноструктуры для фотонных устройств» является законченным научным трудом, выполненным на высоком уровне, имеет важное значение для развития научных направлений фотоники, нанотехнологий и наноматериалов и соответствует всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденного приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103 ОД, а её автор Лотин Андрей Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.

Официальный оппонент



Наумов Андрей Витальевич

25.09.2025

Доктор физико-математических наук, доцент, член-корреспондент Российской академии наук, главный научный сотрудник, руководитель ТОП ФИАН.

Троицкое обособленное подразделение, включающее «Троицкий Технопарк ФИАН», Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ТОП ФИАН)

Адрес: Российская Федерация, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 11, стр. 1.

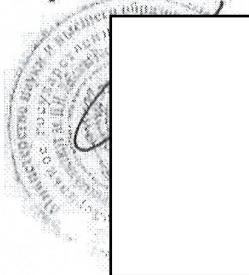
Телефон: +7 (

e-mail: a_v_na



Подпись А.В. Наумова заверяю.

Заместитель директора
по научной работе



В.А. Рябов