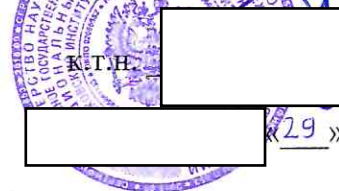


УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный
исследовательский университет
«Московский институт электронной
техники», г. Москва



А.А. Дронов

«29» сентября 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» 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»

Актуальность темы диссертационной работы

Разработка и создание светоуправляемых функциональных материалов и наноструктур является исключительно важным направлением в рамках дальнейшего развития современных технологий, в том числе разработки инновационных полупроводниковых электронных и фотонных устройств, развития скоростной оптоэлектроники и создания архитектур новых систем, обеспечивающих хранение и обработку информации. Одним из перспективных подходов в данной области является применение наноразмерных структур и материалов с возможностью локальной структурной модификации.

Основное внимание в диссертационной работе Лотина А.А. уделено комплексному исследованию изменения свойств различных материалов при воздействии света. В диссертационной работе демонстрируются возможности измерения и использования быстропротекающих процессов, происходящих при изменении структуры, а также изменения концентрации носителей заряда при воздействии когерентного импульсного излучения, что позволяет создать более эффективную и скоростную компонентную базу для фотонных и оптоэлектронных устройств.

Исходя из этого, решаемые в представленной работе задачи являются актуальными, научно значимыми и имеют большую ценность как с точки зрения фундаментальных исследований, так и с точки зрения практической значимости.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Определен размер нанокластеров металлического кобальта гексагональной структуры и их ориентация вдоль оси роста пленок, позволяющие достичь наибольшей намагниченности в пленках $Zn_{1-x}Co_xO_y$. Показано, что увеличение концентрации Co в пленках выше $x=0,24$ приводит к окислению Co и развитию парамагнитной фазы Co_3O_4 и, как следствие, к снижению ферромагнитного сигнала. Исследован поперечный эффект

Керра в тонких пленках $Zn_{1-x}Co_xO_y$ с разным содержанием магнитной примеси. Продemonстрирована сильная амплитудная и спектральная зависимость магнитооптического сигнала от концентрации кобальта и толщины образцов, что хорошо коррелирует с величиной их намагниченности. Определена немонотонная температурная зависимость спектрального положения экситонной полосы излучения в спектрах фотолуминесценции пленок $Cd_xZn_{1-x}O$, связанная с эффектом локализации носителей заряда. Установлено, что порог возбуждения стимулированного излучения и время жизни двумерных экситонов в квантовых ямах $Mg_xZn_{1-x}O/Cd_yZn_{1-y}O$ при накачке импульсным лазерным излучением немонотонно зависит от ширины квантовой ямы вследствие их пространственной и энергетической локализации.

Разработан метод управляемого синтеза наночастиц золота и серебра с размерами в диапазоне от 7 до 120 нм. Показано, что спектральное положение резонансной плазмонной частоты существенно сдвигается в красную область с увеличением размеров наночастиц Au и Ag на сапфировой подложке. Продemonстрировано более чем трехкратное усиление экситонной полосы в тонких пленках оксида цинка, покрытых наночастицами серебра за счет эффекта поверхностно-плазмонного резонанса.

Обнаружен эффект временной задержки начала изменения коэффициента пропускания по отношению к коэффициенту отражения в тонкой пленке GeTe, сформированной на подложке SiO_2 при лазерно-индуцированной реаморфизации.

Исследовано изменение электрической проводимости в тонких пленках $Ge_2Sb_2Te_5$ в результате кристаллизации, индуцированной фемтосекундным лазерным излучением. Показано, что вклад в переключение электрической проводимости на временном масштабе в несколько наносекунд вносят фотоиндуцированные носители заряда, термоиндуцированные носители заряда и процесс кристаллизации. Продemonстрирована модуляция оптического сигнала телекоммуникационного диапазона (1,55 мкм), проходящего через полимерный волновод, покрытый тонкой (50 нм) пленкой $Ge_2Sb_2Te_5$, в результате фазовых переключений (аморфное/кристаллическое), индуцированных наносекундным лазерным излучением.

Данные результаты важны как для теоретического понимания физических процессов, играющих роль при изменении оптических свойств материалов, так и для решения прикладных инженерных задач при создании фотонных и оптоэлектронных устройств нового поколения.

Теоретическая и практическая значимость результатов и выводов диссертационной работы

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования и выводов заключается в детализации механизмов лазерной кристаллизации и аморфизации, а также разработанной теоретической модели, обеспечивающей возможность разработки, создания и совершенствования новых устройств интегральной фотоники, оптики и оптоэлектроники (адаптивные зеркала, перестраиваемые интерференционные фильтры, магнитоуправляемые устройства, лазерные источники УФ-синего диапазона, интегральные фотонные модуляторы, устройства оптической обработки и записи информации).

Степень обоснованности и достоверности результатов, научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертации обеспечивается использованием комплексного экспериментально-теоретического подхода, применением взаимодополняющих методов анализа структуры лазерно-модифицированных материалов. Все результаты, изложенные в диссертации, получены

на современном технологическом и исследовательском оборудовании мирового уровня. Апробация результатов работы проведена на большом количестве всероссийских и международных конференциях. Все защищаемые положения и основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих научных журналах и прошли критическую оценку рецензентов.

Оценка содержания

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

Во введении описаны цели и задачи, обоснована актуальность исследования и значимость полученных результатов.

В Главе 1 приведен обзор литературы по современному состоянию в области синтеза и исследования физических свойств фазоизменяемых материалов, широкозонных магнитных полупроводников, низкоразмерных и плазмонных наноструктур, а также разработке на их основе фотонных и спинтронных устройств нового поколения.

В Главе 2 описаны исследуемые образцы - тонкие пленки с различным элементным составом и варьируемыми в диапазоне от единиц до сотен нанометров толщинами, низкоразмерные гетероструктуры, в том числе множественные квантовые ямы и наностержни на основе оксида цинка, плазмонные наночастицы Au и Ag, наноструктуры на их основе, мемристоры на основе магнитных полупроводников и оптические синапсы на основе полимерного волновода, покрытого фазоизменяемым материалом. Описаны оригинальные методы получения образцов с использованием запатентованных технических решений. Описаны экспериментальные методы исследования физических свойств образцов, а также экспериментальная установка по исследованию 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 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 ZnO:Co в зависимости от концентрации легирующей магнитной примеси в широком диапазоне, а также от наличия дефектов типа кислородных вакансий. Для анализа особенностей магнитного упорядочения кислород обеднённых пленок $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$ был изучен вклад аномальной компоненты в холловское сопротивление, который, как известно, указывает на наличие спиновой поляризации носителей заряда. Выявлен гистерезис в зависимости продольного сопротивления тонких пленок $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ толщиной $d=60$ нм от величины поля, ориентированного перпендикулярно пленки. Определено, что в образцах толщиной $d>100$ нм гистерезис данной зависимости практически отсутствует. Показано, что магнетосопротивление является отрицательным. Представлены результаты измерения экваториального эффекта Керра для тонких плёнок $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$, имеющих наиболее сильные магнитные сигналы. Определено, что полевые зависимости ЭЭК образцов, полученные при комнатной температуре, имеют линейный вид. Также были получены спектральные зависимости ЭЭК для тонких плёнок $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$ при комнатной температуре и постоянной напряжённости магнитного поля ($H = 0,3$ Тл). Наибольший магнитооптический (МО) отклик демонстрирует $\text{Zn}_{0,87}\text{Co}_{0,13}\text{O}_y$, что согласуется с данными магнитных исследований. Продемонстрировано, что форма спектральной

кривой ЭЭК для плёнки $\text{Zn}_{0,76}\text{Co}_{0,24}\text{O}_y$ значительно отличается от формы спектров других легированных плёнок как в инфракрасном, так и в ультрафиолетовом диапазонах длин волн. Методом численного моделирования из первых принципов было показано, что большие значения величины ЭЭК, наблюдаемые в $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$, можно объяснить комбинацией диагональных и недиагональных компонент тензора оптической проводимости, возникновением неосновных 3d-состояний Co внутри запрещенной зоны и большой спин-орбитальной связью. Методом импульсного лазерного осаждения были созданы мемристоры на основе магнитного полупроводника ZnCoO , а также продемонстрирован мемристивный эффект на вольт-амперной характеристике такой структуры при комнатной температуре.

В Главе 4 приведены результаты исследований люминесценции тонких пленок $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$, экситонная полоса излучения которых спектрально зависит от содержания 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 369,4 до 540,9 нм, что свидетельствует о смещении фундаментального края поглощения. При исследовании температурной зависимости спектров фотолюминесценции тонких пленок $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ было обнаружено, что положение экситонного пика ФЛ имеет немонотонную зависимость от температуры в диапазоне от 50 до 150 К. С помощью запатентованного устройства методом импульсного лазерного осаждения на сапфировых подложках *c*-среза с предварительно выращенным буферным слоем $\text{Mg}_{0,27}\text{Zn}_{0,73}\text{O}$ толщиной 150 нм были выращены множественные квантовые ямы $\text{Mg}_{0,27}\text{Zn}_{0,73}\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Mg}_{0,15}\text{Zn}_{0,85}\text{O}/\text{Cd}_{0,2}\text{Zn}_{0,8}\text{O}$ и $\text{Mg}_{0,15}\text{Zn}_{0,85}\text{O}/\text{Cd}_{0,05}\text{Zn}_{0,95}\text{O}$ со ступенчатым изменением толщины активного слоя. Продemonстрированы квантоворазмерные эффекты и оптически возбужденное стимулированное экситонное излучение в двумерных периодических гетероструктурах $\text{Mg}_{0,27}\text{Zn}_{0,73}\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Mg}_{0,15}\text{Zn}_{0,85}\text{O}/\text{Cd}_{0,2}\text{Zn}_{0,8}\text{O}$ и $\text{Mg}_{0,15}\text{Zn}_{0,85}\text{O}/\text{Cd}_{0,05}\text{Zn}_{0,95}\text{O}$. Вблизи порога возбуждения стимулированного излучения на длинноволновом крыле спонтанного излучения в спектрах ФЛ $\text{Mg}_{0,15}\text{Zn}_{0,85}\text{O}/\text{Cd}_{0,05}\text{Zn}_{0,95}\text{O}$ наблюдалась генерация двух пиков с максимумами при 376 и 378 нм. Определены времена жизни двумерных экситонов в таких структурах. Разработан метод синтеза плазмонных наночастиц на основе благородных металлов с заданными размерами. Показано усиление экситонной люминесценции в тонких пленках и наностержнях ZnO , покрытых наночастицами серебра за счет поверхностного плазмонного резонанса. Методом импульсного лазерного осаждения с помощью запатентованного устройства были получены ступенчатые тонкие пленки золота и серебра на *c*-сапфировых и *p*-Si (100) эпитопированных подложках. В спектрах фотолюминесценции наностержней ZnO , покрытых наночастицами серебра, наблюдалось увеличение интенсивности экситонной полосы с увеличением размера наночастиц Ag. Максимальные значения интенсивности (относительно непокрытых наностержней) были зафиксированы для наностержней ZnO , покрытых наночастицами Ag размером 3 нм.

В Главе 5 представлены результаты исследования физических свойств, а также изменения оптических коэффициентов пропускания и отражения, электрической проводимости тонких пленок GeTe , $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и Ga_2Te_3 при обратимых фазовых переходах, индуцированных фемто- и наносекундными лазерными импульсами. Методами просвечивающей микроскопии и рентгеновской дифракции исследованы структурные свойства тонких пленок GeTe и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в кристаллическом и аморфном состояниях. Показано, что характер кристаллизации в тонких пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, индуцированной как нано- так и фемтосекундными лазерными импульсами, носит гетерогенный характер. Проведен анализ данных экспериментальных исследований изменения коэффициентов оптического отражения и пропускания в результате фазовых

переходов, индуцированных двумя последовательными фемтосекундными лазерными импульсами. Показано, что изменение контраста оптических коэффициентов имеет два временных участка: резкий субнаносекундный (300-500 пс) скачок контраста отражения/пропускания и его медленную (10-100 нс) релаксацию. Резкий скачок связан, в первую очередь, с резким увеличением концентрации фотоиндуцированных носителей заряда, а более длительная релаксация характерна для классических тепловых процессов зародышеобразования и роста кристаллитов. Разработан и создан модулятор телекоммуникационного сигнала на основе полимерного волновода, покрытого пленкой $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, имитирующий работу биологического синапса. Продемонстрировано, что пропусканием в волноводе можно управлять за счет изменения фазового состояния пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Определено, что в используемой геометрии полной кристаллизации ячейки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ можно достичь за несколько импульсов. Восстановление уровня сигнала в элементе можно достичь воздействуя на ячейку энергией, достаточной для достижения энергии плавления и последующего быстрого стеклования.

В заключении сформулированы основные результаты и приведены обобщения в соответствии с поставленными целями и задачами диссертационной работы.

Степень завершенности диссертации

Диссертация Лотина А.А. представляет собой завершенную научно-квалификационную работу по актуальной теме. Все поставленные цели достигнуты, а задачи выполнены в полном объеме. Результаты имеют приоритетный характер и важны как для теоретического понимания физических процессов, играющих важную роль при изменении оптических свойств материалов, так и для решения прикладных инженерных задач при создании фотонных и оптоэлектронных устройств нового поколения.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат отражает основные научные и практические положения диссертации. В автореферате диссертации изложены основные идеи и выводы диссертации, указан личный вклад автора в проведенные разработки и исследования, степень новизны и практическая значимость приведенных результатов исследований. Представленные в автореферате материалы соответствуют результатам и выводам, сделанным в диссертации.

Публикация основных результатов

Основное содержание диссертационной работы отражено в 30 статьях, опубликованных в рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, более 60 тезисах докладов на Российских и международных конференциях, в 4 патентах РФ на полезную модель и 1 патенте РФ на изобретение.

Соответствие паспорту научной специальности

Содержание диссертации соответствует следующим пунктам направлений исследований паспорта научной специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (технические науки):

- 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.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертации рекомендуются к использованию в научно-исследовательских лабораториях организаций, специализирующихся на разработке и производстве электронных устройств и фотонных интегральных схем, а также в учебно-исследовательских целях для подготовки специалистов.

Замечания по диссертации

Отмечая достоинства диссертационной работы, ее практическую значимость и научную новизну, следует указать на некоторые спорные положения и высказать замечания.

1. Природу анизотропии продольного сопротивления тонкой (60 нм) пленки $Zn_{1-x}Co_xO_y$ в магнитном поле, приложенном перпендикулярно плоскости образца, автор объясняет наличием кластеров кобальта, ориентированных вдоль роста пленки. Наличие кластеров кобальта подтверждается данными рентгеновской дифрактометрии, хотя более убедительны были бы данные просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения.
2. В работе рассматриваются известные исследователям фазоизменяемые материалы, в частности $GeTe$ и $Ge_2Sb_2Te_5$. Подробно описаны фазовые превращения при воздействии импульсным лазерным излучением, теоретически и экспериментально проанализированы изменения оптических, электрофизических и структурных свойств. Дополнительно в работе приводятся результаты исследования относительно нового материала Ga_2Te_3 , в том числе демонстрируется возможность изменения его свойств при фазовых переходах. Однако в работе не представлена информация о стабильности структурных фаз Ga_2Te_3 , а также отсутствуют результаты анализа, которые позволили бы сделать вывод о недостатках и преимуществах применения Ga_2Te_3 по сравнению с $GeTe$ и $Ge_2Sb_2Te_5$.
3. В диссертационной работе отсутствуют результаты исследования возможности переключения тонкой пленки $Ge_2Sb_2Te_5$, сформированной на поверхности волноводной структуры, за счет импульсного излучения, проходящего через волновод. Подход, основанный на переключении области $Ge_2Sb_2Te_5$ из свободного пространства, в значительной степени ограничивает возможности масштабирования.
4. Полимерные волноводы обладают большими оптическими потерями по сравнению с волноводами, изготовленными из ниобата лития или нитрида кремния, а также значительно более низкой термической стабильностью, что при изготовлении устройств на их основе значительно ограничивает возможность применения целого ряда технологических процессов, а также может оказать существенное влияние на стабильность и воспроизводимость процессов переключения элементов из кристаллического состояния в аморфное состояние.
5. При том, что язык изложения материала в целом грамотный и ясный, в тексте диссертации имеются отдельные грамматические и стилистические ошибки. В качестве десятичного знака, наряду с запятой в некоторых случаях используется точка. В некоторых случаях используется английское обозначение осей на графиках.

Заключение по диссертации

Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу на актуальную тему. Замечания не затрагивают положений и выводов диссертации. Объём и качество представленных результатов свидетельствуют о глубоком понимании сложных физических процессов и подтверждают высокую научную квалификацию диссертанта.

Диссертационная работа на тему «Светуправляемые функциональные материалы и наноструктуры для фотонных устройств» является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне, в которой изложены новые научно-обоснованные решения по разработке и созданию светуправляемых функциональных материалов и наноструктур, имеющие важное значение для развития исследований в области фотоники и оптоэлектроники, и, соответственно, развития отечественной оптоэлектронной компонентной базы в Российской Федерации 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 ее автор, Лотин Андрей Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.6. «Нанотехнологии и наноматериалы».

Доклад по диссертационной работе Лотина Андрея Анатольевича на тему: «Светуправляемые функциональные материалы и наноструктуры для фотонных устройств» был заслушан, обсуждён и одобрен на заседании Учёного совета института ПМТ (Протокол № 1 от 17.09.2025).

Отзыв подготовил:

к.т.н., зам. директора института ПМТ,
начальник лаборатории «Материалы и
устройства активной фотоники»
НИУ МИЭТ



Лазаренко Петр Иванович
«17» сентября 2025 г.

Сведения о составителе отзыва

Тел: 8 (499) 710-14-98

E-mail: lpi@org.miet.ru

Сведения о ведущей организации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (НИУ МИЭТ).

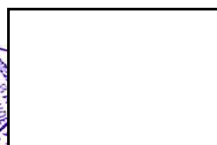
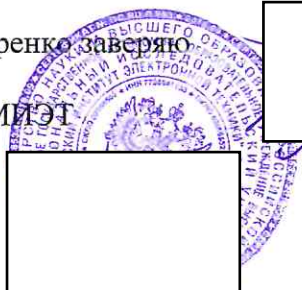
Адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

Электронная почта: netadm@miec.ru.

Веб-сайт организации: <https://www.miet.ru>

Подпись П.И. Лазаренко заверяю

Уч. секретарь УС МИЭТ



Козлов А.В.