

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева**

На правах рукописи



Лотин Андрей Анатольевич

**Светоуправляемые функциональные материалы
и наноструктуры для фотонных устройств**

2.6.6 - Нанотехнологии и наноматериалы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Отделении Института проблем лазерных и информационных технологий – Шатура Курчатовского комплекса Кристаллографии и фотоники, Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт»

Научный консультант: Олег Алексеевич Новодворский - доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Наумов Андрей Витальевич	Троицкое обособленное подразделение, включающее «Троицкий Технопарк ФИАН» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, руководитель
---	--

Доктор физико-математических наук, профессор, Михеев Геннадий Михайлович	ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН, Лаборатория лазерных методов исследований (Институт механики УдмФИЦ УрО РАН), главный научный сотрудник
--	---

Доктор физико-математических наук, профессор, Соколов Николай Семёнович	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, главный научный сотрудник
---	---

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Защита состоится 14 октября 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.03 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, г. Москва, Миусская пл., 9)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета РХТУ.2.6.03

к.х.н.



Мурадова Айтан Галандар кызы

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Сегодня человечество живет в эпоху информационных технологий и потребность в хранении и обработке данных растет в геометрической прогрессии. Проблема обработки и хранения данных в первую очередь вызвана тем, что существующая полупроводниковая электроника достигла своего фундаментального физического и, как следствие, технологического предела, а самые современные суперкомпьютеры, основанные на архитектуре Джона фон Неймана, до сих пор даже не приблизились по энергоэффективности к возможностям человеческого мозга, состоящего из нейронов и синапсов, каждый из которых выступает как вычислительная ячейка, так и ячейка памяти.

Альтернативой полупроводниковой электронике, в которой носителем информации является «медленный» электрон может стать фотоника, где обработку, передачу и хранение информации будет осуществлять «быстрый» фотон. Преимущества оптических устройств по сравнению с устройствами полупроводниковой электроники очевидны - это высокие быстродействие (менее 100 фс), скорость передачи больших массивов информации (10-50 Гб/с, в перспективе до 1 Тб/с), помехозащищенность и низкий затраты энергии, необходимой для управления сигналами.

Другой уникальной функциональной особенностью фотонных материалов является существенное отличие оптических свойств объектов наноразмерного масштаба от свойств объемных материалов. Так, например, в наноразмерных структурах возникают квантово-размерные эффекты, плазмонные резонансы, люминесценция и др. Изменение размера и формы таких объектов позволяет управлять их оптическими свойствами. Исследование фотоиндуцированных процессов в наноструктурах и создание устройств на их основе привело к развитию новых направлений фотоники – нанофотоники и наноплазмоники.

Основной задачей нанофотоники является разработка функциональных наноматериалов с принципиально новыми оптическими и электрооптическими свойствами, на основе которых можно создать фотонные устройства нового поколения. Среди множества таких устройств можно выделить наиболее перспективные: источники когерентного и некогерентного излучения с управляемыми характеристиками и высоким квантовым выходом; приемники излучения и детекторы нового поколения; фотонная (оптическая) память и вычислительные устройства; оптические переключатели и

коммутаторы и многие другие. К новым перспективным функциональным фотонным наноматериалам относятся следующие: полупроводниковые квантово-размерные материалы (квантовые ямы, нити, точки); метаматериалы и плазмонные структуры.

Еще одной важной задачей нанофотоники является разработка и создание вычислительных и запоминающих устройств, имитирующих работу человеческого мозга – так называемые нейроморфные устройства. Наибольшие успехи в разработке нейроморфных устройств за последнее десятилетие были достигнуты на основе резистивных элементов – мемристоров. Однако, огромный интерес представляют фотонные нейроморфные системы на основе интегральной оптики как база для создания широкополосных искусственных нейронов, во многом идентичных своим биологическим аналогам.

Роль простейшего элемента нейроморфной системы - синапса может играть интерфейс между оптическим волноводом и оптически активной областью, в качестве которой могут быть использованы фазоизменяемые материалы (ФИМ) на основе халькогенидов переходных металлов. Отличительной особенностью этого класса материалов является высокий контраст в первую очередь оптических и электрических свойств между их аморфным и кристаллическим состояниями. Помимо этого, к новым ФИМ предъявляются высокие требования к количеству циклов и скорости фазовых переключений, что во многом определяется их структурными свойствами.

Данная диссертационная работа посвящена развитию новых научных направлений и подходов в разработке светоправляемых материалов и наноструктур на основе оксидов переходных металлов и теллуридов как компонентная база для фотонных приложений. В работе реализован комплексный подход в экспериментально-теоретическом исследовании тонких пленок таких материалов, позволяющий изучить закономерности динамики изменения оптических характеристик таких материалов при лазерно-индуцированных быстропротекающих процессах. Понимание этих процессов открывает возможность управлять ими, что в дальнейшем позволит разработать и создать принципиально новую фотонную компонентную платформу, существенно превосходящую по производительности существующую «электронную» на основе кремния.

Степень разработанности темы. Тема светоправляемых функциональных материалов и наноструктур активно развивается в последние десятилетия поскольку

данные материалы перспективны для применения в фотонных устройствах нового поколения. Основные направления исследований данной работы:

- Фазоизменяемые материалы на основе халькогенидов (GeTe , $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, Ga_2Te_3), демонстрирующие субнаносекундные изменения оптических и электрических свойств при переходах между аморфным и кристаллическим состояниями. Эти материалы являются перспективными для создания оптической памяти и перестраиваемых фотонных устройств.
- Низкоразмерные гетероструктуры $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{Cd}_y\text{Zn}_{1-y}\text{O}$, демонстрирующие квантово-размерные эффекты и стимулированное излучение в УФ-синем диапазоне.
- Плазмонные наноструктуры на основе наночастиц Ag , усиливающие люминесценцию и позволяющие управлять оптическими свойствами в наноразмерном масштабе.
- Магнитные полупроводники $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$, обладающие спиновой поляризацией и магнитооптическими эффектами, перспективные для спинтроники.

Ранее в работах Zhang et al. (Nature Materials, 2019) и Wuttig et al. (Nature Reviews Materials, 2017) были рассмотрены фундаментальные механизмы фазовых переходов, но динамика лазерно-индуцированных процессов требует дальнейшего изучения.

В работах Ohtomo et al. (Appl. Phys. Lett., 1998) и Tsukazaki et al. (Nature Materials, 2005) впервые продемонстрировано экситонное излучение и квантование энергетических уровней при комнатной температуре в квантовых ямах (КЯ) на основе ZnO/MgZnO . Однако, генерация стимулированного излучения и зависимость порога его возбуждения от размеров КЯ и плотности оптической накачки в таких структурах все еще недостаточно исследованы.

В работах Pompa et al. (Nature Nanotech., 2006) и Lakowicz et al. (J. Phys. Chem. B, 2006) было показано, что близость металлических наночастиц к люминофорам увеличивает скорость спонтанного излучения в 10–100 раз. При этом спектральное положение поверхностно-плазмонного резонанса (ППР) зависит от размера, формы и окружения наночастиц (El-Sayed, Acc. Chem. Res., 2001). Тем не менее остаются нерешенными вопросы контролируемого синтеза наночастиц с заданными параметрами (размер, форма, плотность) и создания гибридных структур «наностержни ZnO/Ag ».

Тонкие пленки $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ рассматривались как перспективный материал для спиновой электроники. В работах Dietl et al. (Nature Materials, 2010) и Sato et al. (Rev. Mod. Phys., 2014) обсуждаются возможные источники ферромагнетизма в разбавленных

магнитных полупроводниках, однако механизмы магнитного упорядочения и роль кислородных вакансий все еще недостаточно изучены.

Тема диссертации находится на переднем крае современных исследований в области нанофотоники и материаловедения. Проведенные исследования вносят значительный вклад в понимание физических процессов в светоправляемых материалах и открывают новые возможности для создания фотонных устройств следующего поколения.

Целью работы является разработка и создание светоправляемых функциональных материалов и наноструктур на основе оксидов переходных металлов и теллуридов, а также определение закономерностей динамики изменения оптических характеристик таких материалов при лазерно-индуцированных быстропротекающих процессах.

Для достижения поставленной цели были сформулированы **задачи**, потребовавшие следующих разработок:

1. Разработка экспериментальных методов синтеза тонких пленок и наноструктур на основе оксидов переходных металлов и теллуридов, а также методов исследования оптических характеристик люминесцентных и фазоизменяемых материалов с временным разрешением;
2. Разработка широкозонных полупроводников с высоким магнитным моментом и создание на их основе магнитоуправляемых низкоразмерных структур, перспективных для создания устройств спинтроники;
3. Разработка и создание низкоразмерных гетероструктур на основе широкозонных полупроводников $Mg_xZn_{1-x}O/Cd_yZn_{1-y}O$ и плазмонных наноструктур типа «металлические наночастицы/люминесцентная пленка» как активная среда для лазерных источников УФ-синего спектрального диапазона;
4. Исследование динамики изменения физических характеристик тонких пленок $GeTe$, $Ge_2Sb_2Te_5$ и Ga_2Te_3 при фазовых переходах, индуцированных лазерными импульсами нано- и фемтосекундной длительности.
5. Разработка, создание и исследование прототипа синапса на основе интегрального оптического устройства - полимерный волновод с активной областью на основе $Ge_2Sb_2Te_5$.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Впервые показано, что наибольшей намагниченностью обладают пленки $Zn_{1-x}Co_xO_y$, содержащие нанокластеры металлического кобальта размером 5-15 нм гексагональной структуры, строго ориентированные с осью c роста пленок. Кластерная природа намагниченности является причиной положительного знака аномального эффекта Холла (АЭХ) в пленках - противоположным знаком нормального эффекта Холла. Максимальная намагниченность насыщения $J_s=54,5 \text{ emu/cm}^2$ (54,5 кА/м) наблюдалась для образца с концентрацией Co $x=0.24$. Впервые исследован поперечный эффект Керра в тонких пленках $Zn_{1-x}Co_xO_y$ с разным содержанием магнитной примеси. Продемонстрирована существенная амплитудная и спектральная зависимость магнитооптического сигнала от концентрации кобальта и толщины образцов, что хорошо коррелируют с величиной их намагниченности. Это позволило разработать новый класс мемристоров на основе магнитных тонких пленок $Zn_{1-x}Co_xO$ перспективных для создания нейроморфных систем обработки информации и спинтронных устройств.
2. На примере квантовых ям $Mg_xZn_{1-x}O/Cd_yZn_{1-y}O$ впервые показано, что порог возбуждения стимулированного излучения и время жизни двумерных экситонов при накачке импульсным лазерным излучением немонотонно зависит от ширины квантовой ямы вследствие их пространственной и энергетической локализации. Минимальное значение времени жизни для МКЯ $Mg_{0.27}Zn_{0.73}O/ZnO$ составило $\tau_r=355$ пс при $L_w=2.6$ нм, а для $Mg_{0.15}Zn_{0.85}O/Cd_{0.05}Zn_{0.95}O$ достигает рекордно минимального значения $\tau_r=144$ пс при $L_w=10$ нм, что открывает путь для создания импульсных УФ лазерных источников излучения пикосекундной длительности.
3. Разработан метод синтеза наночастиц золота и серебра с контролируемыми размерами в диапазоне от 3 до 20 нм. Показано, что спектральное положение резонансной плазмонной частоты ω_p существенно сдвигается в красную область с увеличением размеров наночастиц Au и Ag на сапфировой подложке. Продемонстрировано существенное усиление экситонной полосы (3-5 раз) в тонких пленках и наностержнях оксида цинка, покрытых наночастицами серебра за счет эффекта поверхностно-плазмонного резонанса, что позволит создавать усилители УФ-фиолетовых лазерных источников излучения.

4. Впервые обнаружен и изучен эффект временной задержки начала изменения коэффициента пропускания по отношению к коэффициенту отражения в тонкой пленке GeTe на подложке SiO₂ при лазерно-индуцированной реаморфизации. Данная задержка объясняется быстрым изменением коэффициента отражения, связанным с относительно быстрым уменьшением концентрации свободных носителей заряда в приповерхностном слое тонкой пленки GeTe, в то время как для начала изменения пропускания требуется больший объем реаморфизованной пленки. На основе этого эффекта могут быть реализованы сверхкомпактные линии оптической задержки с временным диапазоном от субнано- до сотен наносекунд.
5. Впервые исследована динамика изменения удельного сопротивления в тонких пленках Ge₂Sb₂Te₅, в результате кристаллизации, индуцированной фемтосекундным лазерным излучением. Показано, что вклад в переключение электрической проводимости на временном масштабе в несколько наносекунд вносят три основных процесса: фотоиндуцированные носители заряда, температурная зависимость коэффициента сопротивления и процесс кристаллизации. Результаты исследования могут послужить базой для создания нового класса элементов гибридных нейроморфных систем – оптоемристоров.
6. Впервые продемонстрирована 50-% модуляция оптического сигнала С-телекоммуникационного диапазона (1,55 мкм), проходящего через синаптический интерфейс на основе полимерного волновода, покрытого оптически активной пленкой Ge₂Sb₂Te₅ толщиной 50 нм, в результате фазовых переключений (аморфное/кристаллическое), индуцированных наносекундным лазерным излучением. Такие структуры станут элементами интегральной оптики для фотонных интегральных схем нового поколения.
7. Впервые наблюдалась немонотонная температурная зависимость спектрального положения экситонной полосы излучения в спектрах ФЛ пленок Cd_xZn_{1-x}O, связанная с эффектом локализации носителей заряда на донорных уровнях.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанная теоретическая модель динамики температурного поля при импульсном лазерном нагреве и радиационном остывании тонких пленок ФИМ позволяет моделировать лазерно-индуцированные процессы фазовых переходов. Практическая значимость работы

заключается в возможности применения разработанных материалов и наноструктур для создания фотонных устройств нового поколения, таких как:

- Адаптивные зеркала и перестраиваемые интерференционные фильтры, которые могут быть использованы в системах оптической коррекции и спектроскопии;
- Оптические синапсы, имитирующие работу биологических нейронных сетей, что открывает новые перспективы для разработки нейроморфных вычислительных систем и энергоэффективных устройств памяти нового поколения;
- Магнитоуправляемые оптические устройства, которые могут быть применены в системах обработки информации и спинтронике;
- Лазерные источники УФ-синего диапазона, созданные на основе низкоразмерных гетероструктур.

Методология и методы исследования

В диссертационной работе использован комплексный экспериментально-теоретический подход, сочетающий методы синтеза и диагностики функциональных материалов и наноструктур с численным моделированием физических процессов в них.

Применение многомасштабной методологии от атомного до макроскопического уровня позволило:

1. Установить взаимосвязь между структурой, составом и функциональными свойствами материалов.
2. Разработать новые подходы к управлению оптическими и электрическими характеристиками функциональных материалов и наноструктур.
3. Создать прототипы фотонных устройств с рекордными параметрами.

Основные положения работы, выносимые на защиту:

1. Высокая коэрцитивная сила $H_C=0,24$ Т в магнетосопротивлении тонких пленок $Zn_{1-x}Co_xO$ ($x=0.2$) толщиной $d=60$ нм для поля, ориентированного перпендикулярно плоскости пленок, обусловлена их перпендикулярной магнитной анизотропией, вызванной «вытянутостью» кластеров металлического кобальта вдоль оси роста пленок.
2. Немонотонная температурная зависимость спектрального положения экситонного пика фотолюминесценции в тонких пленках $Cd_xZn_{1-x}O$ вызвана эффектом локализации носителей заряда на донорных уровнях с максимальной величиной 23,5 мэВ для значения концентрации атомов Cd $x=0,1$.

3. Порог возбуждения стимулированного излучения и время жизни двумерных экситонов в квантовых ямах $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{Cd}_y\text{Zn}_{1-y}\text{O}$ при накачке импульсным лазерным излучением немонотонно зависит от ширины квантовой ямы вследствие пространственной и энергетической локализации экситонов.
4. Эффект поверхностно-плазмонного резонанса позволяет достигать более чем трехкратное усиление интенсивности экситонной полосы люминесценции в тонких пленках и наностержнях оксида цинка, покрытых наночастицами серебра.
5. Плавление приповерхностного слоя тонкой кристаллической пленки GeTe на подложке SiO_2 при аморфизации, индуцированной наносекундными лазерными импульсами приводит к временной задержке начала изменения коэффициента оптического пропускания по отношению к коэффициенту оптического отражения, величина которой пропорциональна толщине пленки и плотности энергии лазерного импульса.
6. Субнаносекундное (300-500 пс) время изменения оптических коэффициентов пропускания и отражения пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 100 нм после воздействия фемтосекундного лазерного излучением обусловлено высокой скоростью изменения концентрации фотовозбужденных носителей заряда.
7. Многоимпульсное фемтосекундное лазерное возбуждение позволяет управлять размером и глубиной залегания поликристаллического слоя в толщине аморфной тонкой пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, что обеспечивает стабильные многоуровневые переключения оптических коэффициентов пропускания и отражения.

Апробация результатов работы. Материалы диссертационной работы докладывались на российских и международных научных конференциях:

- 2024 г.:** International Conference “Functional Chalcogenides: Physics, Technology and Applications”, 23-28 июня, Зеленоград (приглашенный доклад);
- 2023 г.:** International Conference “Functional Materials” ICFM-2023, Крым, Конференция «Невская Фотоника – 2023», Санкт-Петербург, 30th International Conference on Advanced Laser Technologies, Самара (приглашенный доклад).
- 2022 г.:** 29th International Conference on Advanced Laser Technologies, 11-16 September, Москва (приглашенный доклад); XXVI Международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, Россия, 14-17 марта;

- 2021 г.:** Advances in Functional Materials International Conference, South Korea; 7-я научная конференция Российского форума «Микроэлектроника 2021», Алушта, 6-7 октября; 29-я Всероссийская научно-техническая конференция «Микроэлектроника и информатика-2022», Зеленоград/Россия, 21-22 апреля;
- 2020 г.:** 19th International Conference Laser Optics, Санкт-Петербург, Россия
- 2019 г.:** 20th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures – PLMCN, Moscow & Suzdal, Russia, 2 - 6 July
- 2018 г.:** The VII International conference «Modern nanotechnology and nanophotonics for science and industry»: сб. труд. конференции (г. Суздаль, Россия, 08-12 ноября)
- 2017 г.:** Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017) (23-25.04); XIII Российская конференция по физике полупроводников, Екатеринбург, Россия (02-06.10);
- 2016 г.:** International Conference on Coherent and Nonlinear Optics and International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO LAT), Minsk, Belarus (16.09); Первый Российский Кристаллографический Конгресс, Москва, Россия;
- 2015 г.:** The 23th International Conference on Advanced Laser Technologies, Lisbon, Portugal (6-10.10); XII Российская конференция по физике полупроводников, Ершово, Россия, (09);
- 2014 г.:** Moscow International Symposium on Magnetism, MISM, Moscow, Russia (29.06-3.07); Международная конференция «Лазеры и лазерно-информационные технологии: фундаментальные проблемы и применения» (ILLA). Шатура, Россия (29.09-03.10);
- 2013 г.:** WorkShop IH MTU Dresden. Dresden, Germany; International Conference on Coherent and Nonlinear Optics and International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO LAT), Moscow, Russia; International Conference «Nanomaterials: Applications and Properties», Moscow, Russia;
- 2012 г.:** SPIE Symposium on NanoScience+Engineering, Optics and Photonics. San-Diego, USA; 22 Международная конференция «Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах» Астрахань, Россия;

Работа выполнена в соответствии с планами работ по программе фундаментальных исследований в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН; субсидий Министерства науки и высшего

образования № 075-15-2019-1950 (Мегагрант), № 075-15-2023-324 (синхротронная программа); гранта Президента РФ № МК-5538.2013.2; грантов РФФИ 16-07-00842, 15-32-50690, 15-29-01171, 15-07-03331, 12-02-33022; гранта РНФ № 16-13-10528.

Достоверность полученных результатов подтверждается и обеспечивается комплексным экспериментально-теоретическим подходом исследования образцов и анализа полученных данных. Все результаты, изложенные в диссертации, получены на современном технологическом и исследовательском оборудовании мирового уровня. Все защищаемые положения и основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих научных журналах и прошли критическую оценку рецензентов.

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в получении перечисленных выше результатов – от постановки задач, планирования и проведения ключевых экспериментов до обсуждения и оформления публикаций. В серии ранних статей автор выполнял основную экспериментальную работу, проводил анализ результатов и готовил статьи к публикации. Часть экспериментальных результатов была получена сотрудниками лаборатории Нанопотоники и наноплазмоники, возглавляемой соискателем. Вклад соискателя в этом случае являлся концептуализацией основных идей, руководство в текущих работах и значительное участие в написании статей. Некоторые разработки были защищены патентами.

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

Структура и объем работы. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В Главе 1 приведен обзор литературы по современному состоянию дел 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 сложного химического состава в диапазоне толщин от единиц до сотен нанометров, низкоразмерные гетероструктуры, такие как множественные квантовые ямы и наностержни на основе оксида цинка, плазмонные наночастицы Au и Ag и наноструктуры на их основе; мемристоры на основе разбавленных магнитных полупроводников и оптические синапсы на основе полимерного волновода, покрытого оптически активной пленкой фазоизменяемого материала. Описаны оригинальные методы получения образцов с использованием запатентованных технических решений. Описаны экспериментальные методы исследования статических физических свойств образцов, а также экспериментальная установка по исследованию 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 $Zn_{1-x}Co_xO_y$ 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 $Zn_{1-x}Co_xO_y$ наряду с исследованиями намагниченности был изучен вклад аномальной компоненты в холловское сопротивление, который, как известно, указывает на наличие спиновой поляризации носителей заряда. Известно, что в магнитных материалах холловское сопротивление R_H определяется суммой нормальной и аномальной компонент эффекта Холла:

$$R_H d = \rho_H = R_0 B + R_S M, \quad (1)$$

где d – толщина слоя магнитного материала, R_0 – константа нормального эффекта Холла, обусловленного силой Лоренца, пропорционального магнитной индукции B , а $R_S \propto (\rho_{xx})^\alpha$

– константа аномального эффекта Холла (АЭХ), определяемая спиновой поляризацией носителей и пропорциональная намагниченности M .

Неожиданным оказалось поведение транспортных свойств тонких пленок $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ толщиной $d=60$ нм, в которых наблюдалась 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 отсутствовал). Полевая зависимость продольного сопротивления $R_{xx}(B)$ для пленки $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ ($x=0.2$) толщиной $d=60$ нм представлена на рисунке 1а. Видно, что магнетосопротивление является отрицательным. Такое поведение магнетосопротивления (МС) присуще гранулярным металлам в условиях спин-зависящего рассеяния носителей заряда, когда величина МС пропорциональна M^2 . Сопротивление в этом случае уменьшается при параллельной ориентации магнитных моментов гранул и максимально при $M=0$, т.е. в поле $H=H_C$.

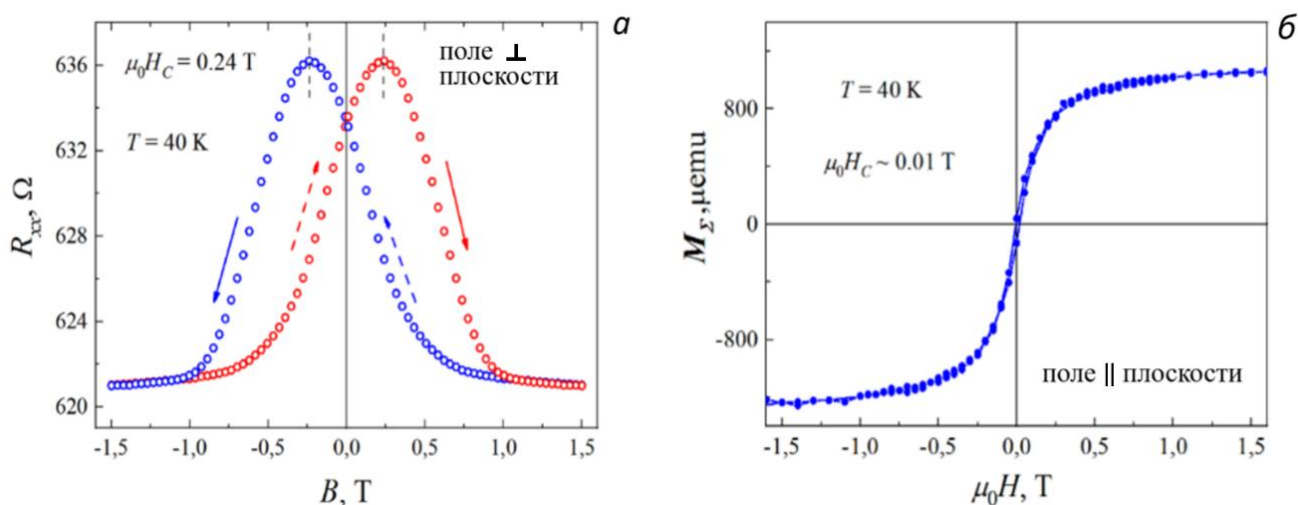


Рисунок 1 – Магнитополевые зависимости - продольного R_{xx} сопротивления в поле (а), перпендикулярном пленке и (б) - магнитного момента M_s в поле, параллельном пленке, для образца $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ ($x = 0.2$, $P = 4 \cdot 10^{-6}$ Торр) толщиной $d = 60$ нм. Температура измерений $T = 40$ K

Магнитооптический эффект Керра в тонких пленках $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$

Измерения экваториального эффекта Керра (ЭЭК) проводились для тонких плёнок $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$, имеющих наиболее сильные магнитные сигналы. Полевые зависимости ЭЭК образцов, полученные при комнатной температуре, имеют линейный вид.

Также были получены спектральные зависимости ЭЭК для тонких плёнок $Zn_{1-x}Co_xO_y$ при комнатной температуре и постоянной напряжённости магнитного поля ($H = 0,3$ Тл). Наибольший магнитооптический (МО) отклик имеет образец $Zn_{0,87}Co_{0,13}O_y$, что согласуется с данными магнитных исследований, при этом характер спектральных зависимостей этих образцов схож, что свидетельствует о схожести их фазового состава и структуры ($ZnO_{(вюрц)}$; $Co_{(гекс)}$). Тонкие плёнки $Zn_{0,76}Co_{0,24}O_y$ ($d = 170$ нм) и $Zn_{0,7}Co_{0,3}O_y$ имеют меньшие МО сигналы по сравнению с сигналом образца $Zn_{0,87}Co_{0,13}O_y$. Синий сдвиг МО спектра образца $Zn_{0,7}Co_{0,3}O_y$ относительно спектра $Zn_{0,87}Co_{0,13}O_y$ обусловлен изменением фазового состава плёнки ($Co_{(гекс)} \rightarrow Co_3O_4_{(куб)}$). Форма спектральной кривой ЭЭК для плёнки $Zn_{0,76}Co_{0,24}O_y$ значительно отличается от формы спектров других легированных плёнок как в инфракрасном, так и в ультрафиолетовом диапазонах длин волн. Это может быть связано с её меньшей толщиной ($d = 170$ нм).

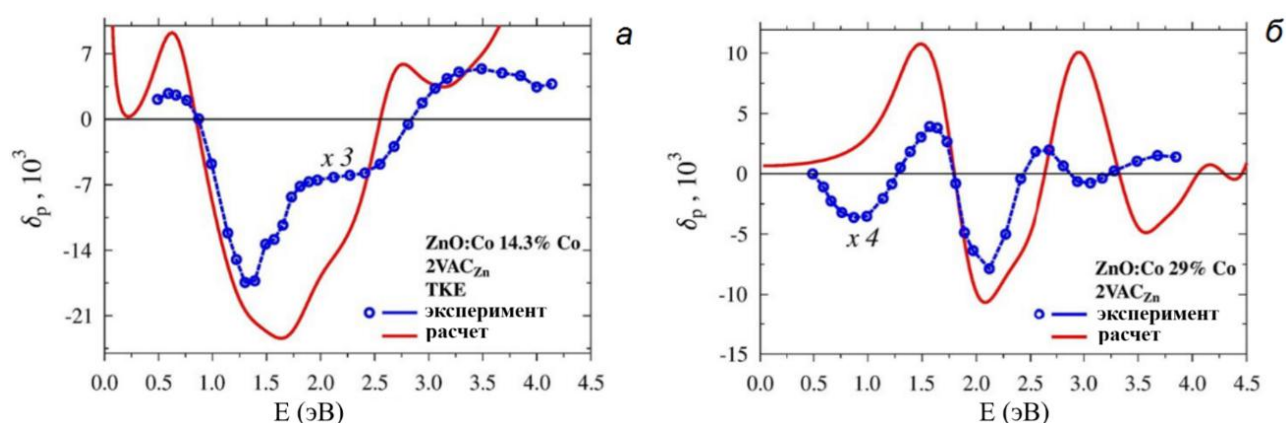


Рисунок 2 – Расчетный (красная линия) и экспериментальный (синие круги + ломаная линия) ПЭК в $Zn_{1-x}Co_xO$ для двух концентраций Co – 14 ат. % (а) и 28 ат. % (б)

Позже в работе методом численного моделирования из первых принципов было показано, что большие значения величины ЭЭК, наблюдаемые в $Zn_{1-x}Co_xO_y$, можно объяснить комбинацией диагональных и недиагональных компонент тензора проводимости, возникновением неосновных 3d-состояний Co внутри запрещенной зоны и большой спин-орбитальной связью. На рисунке 2 приведены расчетные и экспериментальные значения ЭЭК в ячейках $Zn_{1-x}Co_xO$ для двух концентраций Co – 14 ат. % (а) и 28 ат. % (б)

Методом импульсного лазерного осаждения были созданы мемристоры на основе магнитного полупроводника $ZnCoO$, и впервые была изучена температурная зависимость

вольт-амперной характеристики этих структур. Активная область мемристора толщиной ~ 50 нм состоит из двух равных по толщине слоев – изолирующего стехиометрического по составу $\text{Zn}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}$ и проводящего $\text{Zn}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_y$, синтезированных в атмосфере кислорода и условиях высокого вакуума, соответственно (рисунок 3а,б). Вольт-амперная характеристика такой структуры продемонстрировала мемристивный эффект при комнатной температуре. Было установлено, что величина тока и площадь кривой ВАХ, определяющие величину мемристивного эффекта значительно увеличиваются при повышении температуры.

Следует отметить, что такое температурное поведение проводимости характерно для металлов и в данном случае обусловлено нанокластерами металлического кобальта в обеднённых кислородом пленках $\text{Zn}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_y$. При достаточно высокой концентрации Co ($> 16\%$) нанокластеры могут образовывать проводящие нити, которые обеспечивают металлическую проводимость в температурной зависимости от ВАХ. Разрывающиеся химические связи нанокластеров металлов под воздействием внешнего электрического поля образуют лавины, и этот эффект сильнее проявляется при низкой температуре.

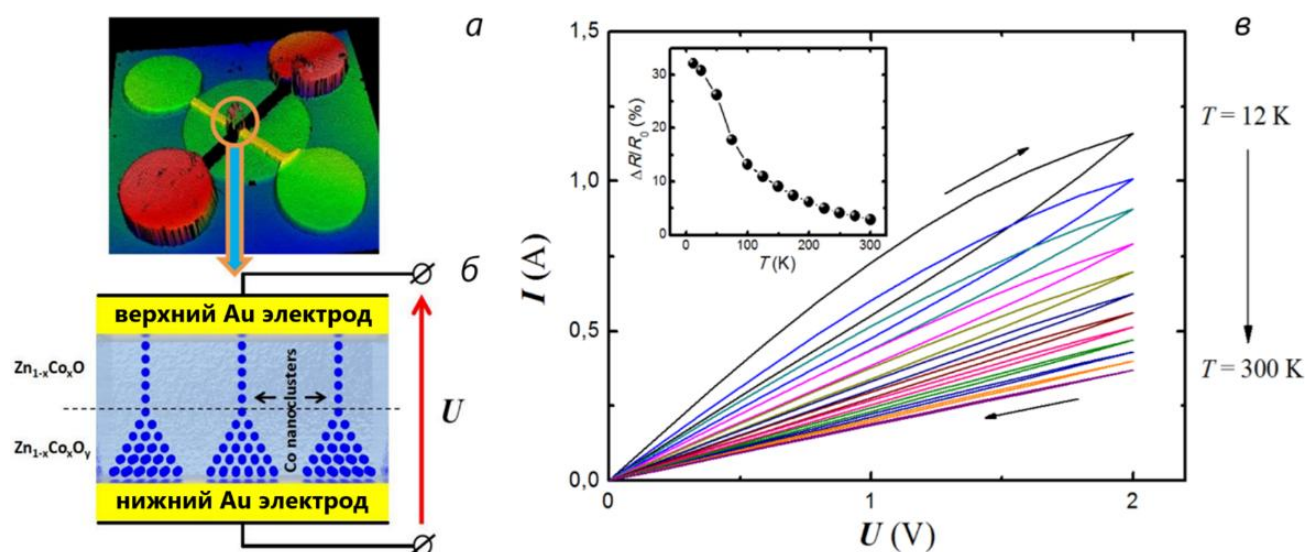


Рисунок 3 – 3d-изображение (а), профиль поперечного сечения (б) и вольтамперная характеристика в зависимости от температуры (в) двухслойного мемристора на основе $\text{Zn}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}$. Вставка – изменение сопротивления в зависимости от температуры

В Главе 4 приведены результаты исследований люминесценции тонких пленок $\text{Cd}_y\text{Zn}_{1-y}\text{O}$, экситонная полоса излучения которых спектрально зависит от содержания кадмия. Как видно из рисунка 4 увеличение содержания кадмия в диапазоне от 0 ат. % до

30 ат. % приводит к монотонному сдвигу экситонного пика 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.

При исследовании температурозависимых 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 К до 150 К (рисунок 4в).

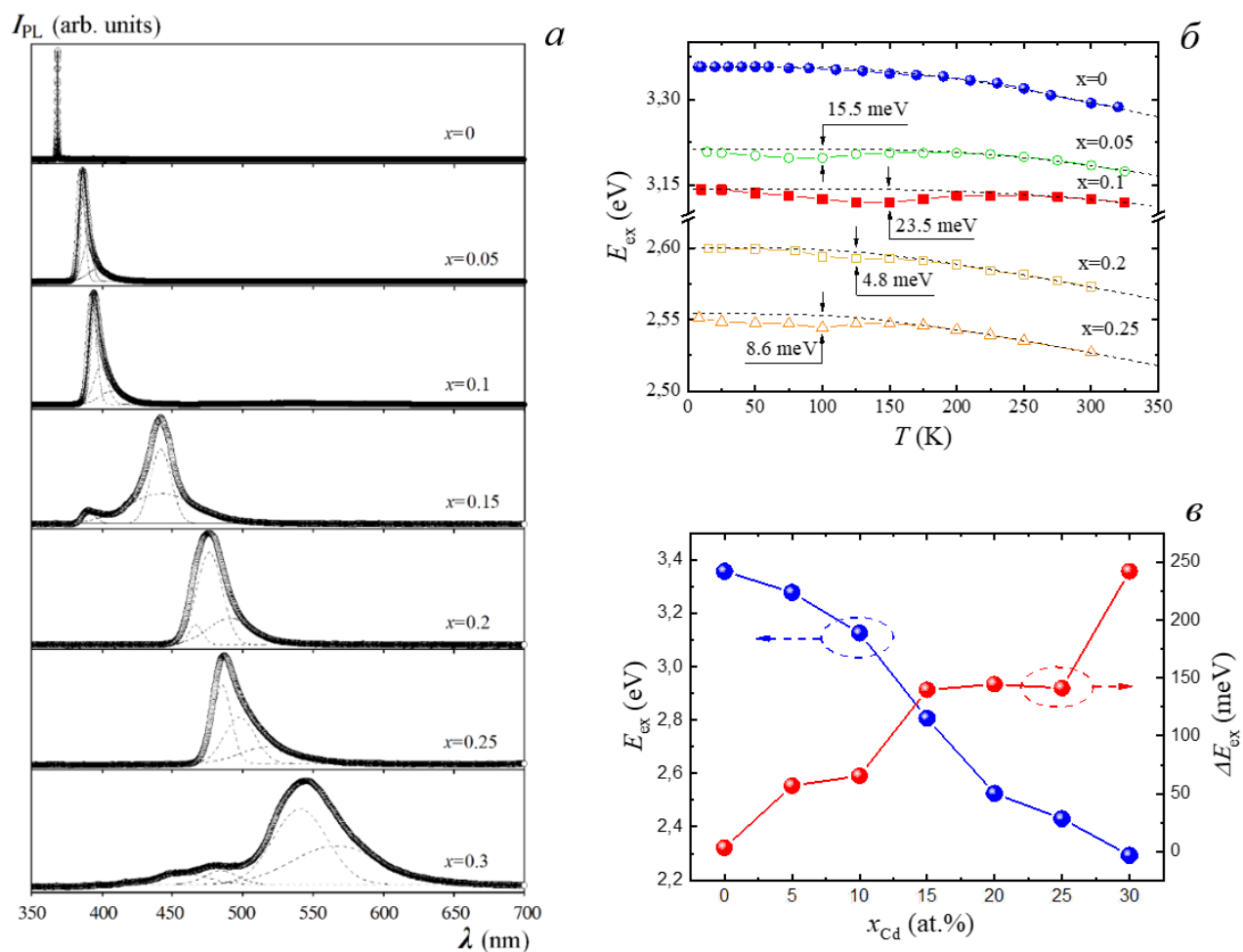


Рисунок 4 – Спектры фотолюминесценции (а), температурные зависимости спектрального положения E_{ex} экситонного пика (б), зависимости спектрального положения E_{ex} и полуширины ΔE_{ex} экситонного пика (в) пленок $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ ($x=0-0,3$).

Пунктирными линиями обозначены теоретические аппроксимации, полученные с помощью уравнения Варшни

Такое температурное поведение экситонного пика вызвано эффектом локализации носителей заряда. Красный сдвиг экситонного пика в области низких температур ранее был обнаружен в спектрах люминесценции InGaN [P.G. Eliseev, et al. Appl. Phys. Lett., 71,

569, 1997], схожего по характеристикам с исследуемым материалом $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$. Авторы этой работы предложили следующую модель на основе модифицированного уравнения Варшни для описания S-образной зависимости спектрального положения пика ФЛ:

$$E_{\text{ex}}(T) = E_0 - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} - \frac{\sigma^2}{k_B T}, \quad (2)$$

где β – характеристическая температура, связанная с температурой Дебая Θ_D . Позднее теми же авторами было показано, что стоксов сдвиг между Гауссовским пиком поглощения и квазиравновесным низкоинтенсивным пиком ФЛ равен $\sigma^2 \cdot k^{-1} \cdot T^{-1}$ [P.G. Eliseev. *J. Appl. Phys.*, 93, 5404, 2003]. Подобная зависимость определяется Кулоновски связанными флуктуациями в сильно легированных полупроводниках, либо в полупроводниках с изменяемым химическим составом.

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 (МКЯ) $\text{Mg}_{0.27}\text{Zn}_{0.73}\text{O}/\text{ZnO}$, $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{O}$ 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, отличающиеся энергетическими диаграммами.

Продемонстрированы 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 $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{O}$. На рисунке 5 представлены спектры ФЛ МКЯ $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{O}$ ($L_w=6$ нм), возбужденные импульсно-периодическим YAG:Nd³⁺-лазером при температуре $T=10$ К.

Вблизи порога возбуждения стимулированного излучения на длинноволновом крыле спонтанного излучения в спектрах ФЛ МКЯ $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{O}$ наблюдалась генерация двух конкурирующих пиков с максимумами при $\lambda_1=376,12$ нм (3,297 эВ) и $\lambda_2=378,1$ нм (3,28 эВ) (рисунок 5б). Спектральные положения наблюдаемых пиков соответствуют экситонам *P*-диапазона на энергетических уровнях *P* и *P*₂. При увеличении плотности возбуждения выше $I_{\text{exc}}=70$ кВт/см² пики сливались в один с максимумом при 376,21 нм (3,296 эВ), что вызвано размытием энергетических уровней из-за резкого увеличения концентрации экситонов. Показано, что порог возбуждения стимулированного излучения в МКЯ $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{O}$ ($P_{\text{th}} \approx 30$ кВт/см²) ниже, чем структурах с другим содержанием Mg и Cd.

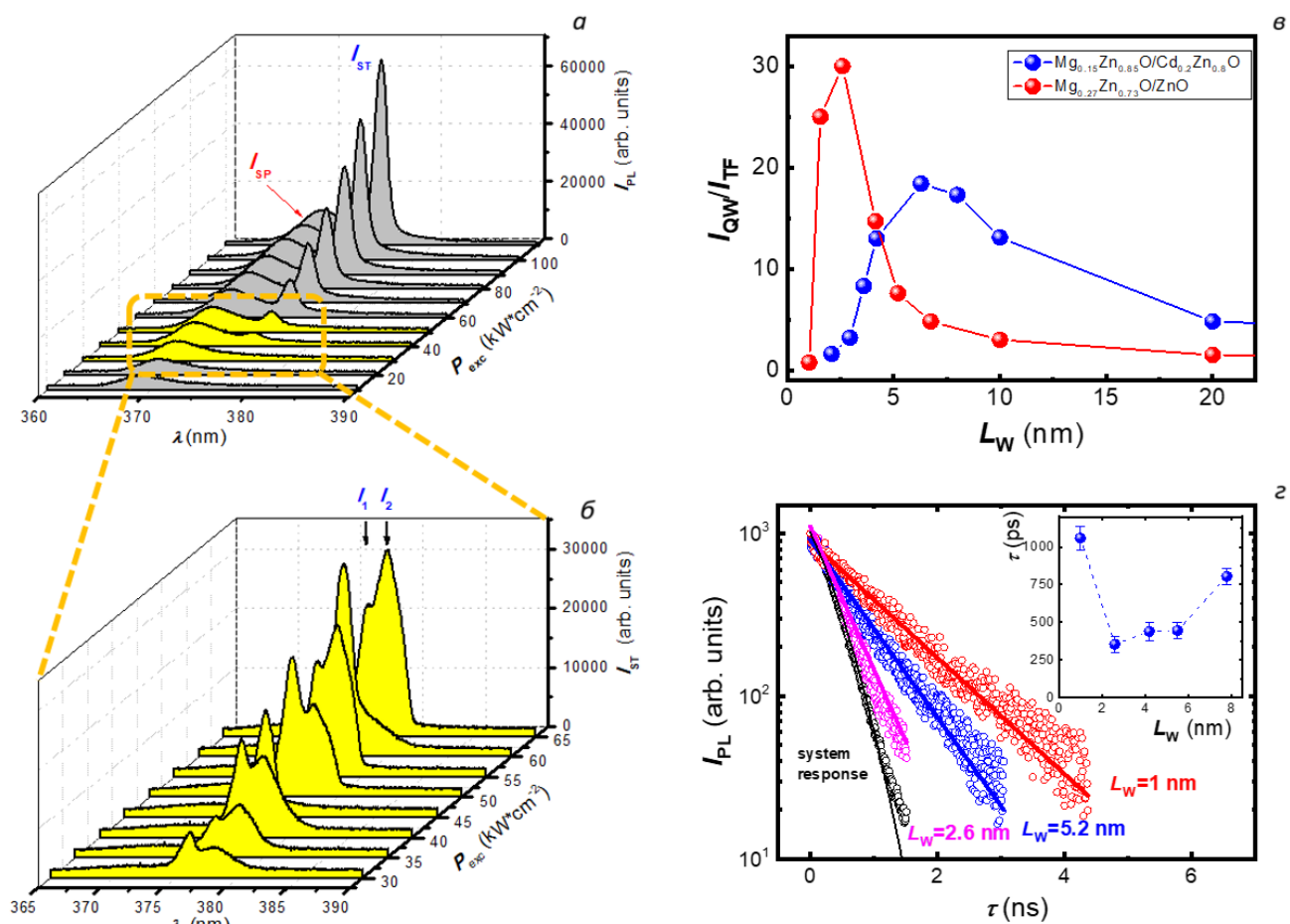


Рисунок 5 – Низкотемпературные ($T=10$ K) спектры ФЛ МКЯ $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{O}$ ($L_w=6$ нм) как функция интенсивности излучения накачки I_{exc} (а,б), зависимости отношений интенсивностей экситонных пиков I_{QW} в МКЯ $\text{Mg}_{0.27}\text{Zn}_{0.73}\text{O}/\text{ZnO}$ и $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{O}$ к интенсивности ФЛ тонкой пленки ZnO (300 нм) от ширины КЯ L_w (в), кривые затухания ФЛ (г) и время жизни экситонов (вставка) МКЯ $\text{Mg}_{0.27}\text{Zn}_{0.73}\text{O}/\text{ZnO}$ в зависимости от L_w

На рисунке 5в представлены отношения интегральных интенсивностей пика экситонной люминесценции I_{QW} в спектрах ФЛ для МКЯ $\text{Mg}_{0.27}\text{Zn}_{0.73}\text{O}/\text{ZnO}$ и $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{O}$ к экситонной люминесценции I_{TF} тонкой пленки ZnO (300 нм) в зависимости от ширины КЯ L_w . Немонотонный характер зависимостей отношения $I_{\text{QW}}/I_{\text{TF}}$ с экстремумами вблизи значения $L_w=2,6$ нм для двумерных гетероструктур $\text{Mg}_{0.27}\text{Zn}_{0.73}\text{O}/\text{ZnO}$ и $L_w=6,7$ нм для $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{O}$, соответственно, говорит о существенном увеличении внутренней квантовой эффективности из-за локализации экситонов.

Были определены времена жизни двумерных экситонов в таких структурах. Зависимость излучательного времени жизни τ_r от ширины квантовой ямы представлена на рисунке 5г. Излучательное время жизни τ_r двумерных экситонов в квантовых ямах немонотонно зависит от ширины квантовой ямы L_w . Минимальное значение было получено для МКЯ $\text{Mg}_{0.27}\text{Zn}_{0.73}\text{O}/\text{ZnO}$ с шириной ямы $L_w=2.6$ нм и составило $\tau_r=355$ пс, что ниже значений, полученных для множественных квантовых ям, и совпадает со значением времени жизни, полученным для одиночных КЯ шириной 2-3 нм. Максимум интенсивности спонтанной фотолюминесценции наблюдался при ширине ямы $L_w=3.2$ нм для серии МКЯ с содержанием магния в барьерных слоях $x=0.18$ и при $L_w=2.6$ нм для серии с $x=0.27$. Излучательное время жизни экситонов, полученное для монокристаллической пленки оксида цинка, составило $\tau_r=2.52$ нс.

Усиление экситонной люминесценции в тонких пленках и наностержнях ZnO за счет поверхностно-плазмонного резонанса

Методом импульсного лазерного осаждения были получены ступенчатые тонкие пленки золота и серебра на *c*-сапфировых и *p*-Si (100) эпитопированных подложках. Рост пленок Au и Ag осуществлялся при комнатной температуре. Ширина s каждой ступени составляла $1 \div 1.5$ мм, а толщина d отдельной ступени составляла n нм. В общей сложности на одной подложке размером 8×16 мм формировалось от 8 до 10 ступеней с $n=(1 \div 10)$ нм. После осаждения пленки подвергались нагреву до температуры $(700 \pm 2)^\circ\text{C}$, в результате переконденсации на поверхности подложки формировались наночастицы серебра. Последовательность процесса формирования наночастиц с помощью постростового отжига приведена на рисунке 6.

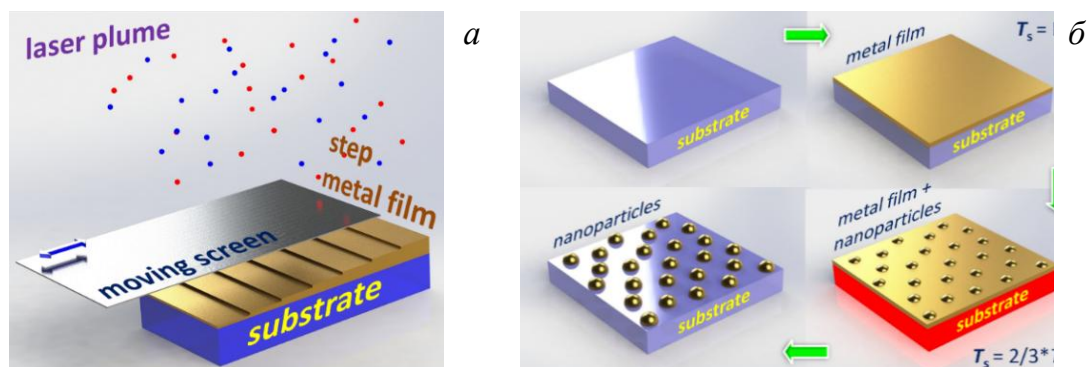


Рисунок 6 – Процесс формирования ступенчатой пленки (а) и схематическое изображение этапов формирования наночастиц (б)

На рисунке 7 представлены АСМ-изображения наночастиц серебра, синтезированных на поверхности сапфировой подложки при толщине d исходной пленки Ag – 1 нм (a) и 10 нм (b). Средний поперечный размер серебряных наночастиц R_0 увеличивался, а их плотность N уменьшалась с увеличением толщины исходной пленки Ag. Как можно видеть из рисунка 7б наночастицы Ag очень плотно упакованы, однако электрический ток между ними не протекает, что, вероятно, обусловлено их окислением. На вставке рисунка 7 приведена гистограмма распределения наночастиц Ag по размерам, аппроксимированная функцией Гаусса. Максимум распределения составил $R_0=46,1$ нм, а его дисперсия $w=31,6$ нм.

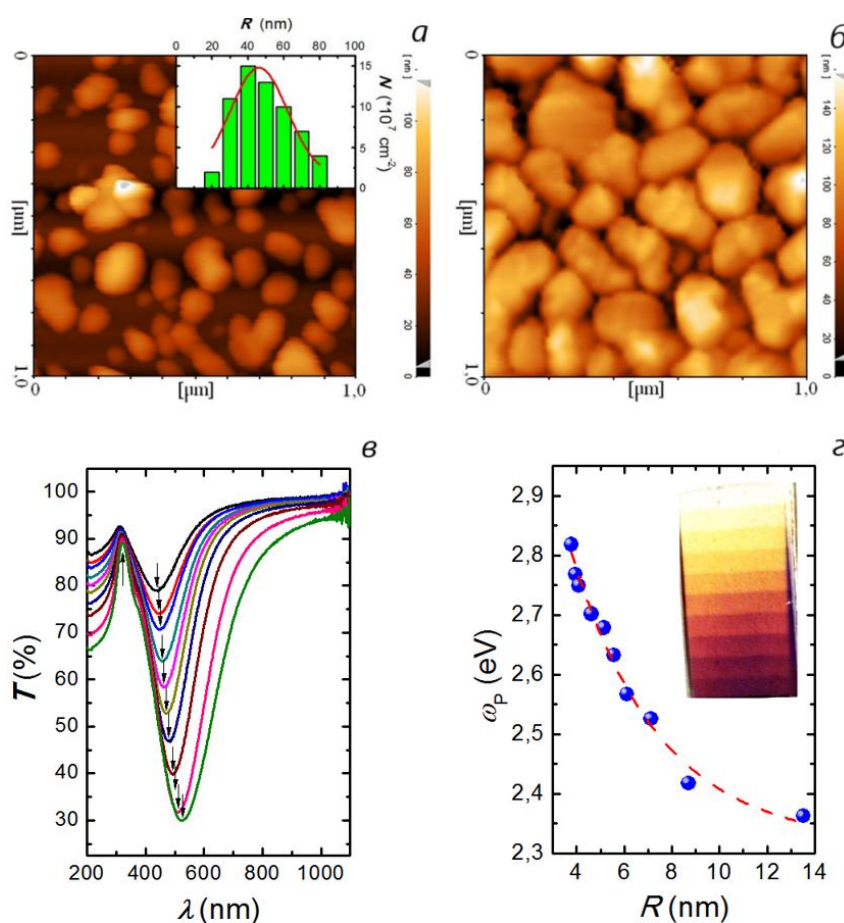


Рисунок 7 – АСМ-изображения наночастиц Ag на поверхности сапфировой подложки с-среза. Толщина d исходной пленки Ag: a – 1 нм и b – 10 нм. На вставке приведена гистограмма распределения наночастиц Ag по размерам. Спектры пропускания наночастиц серебра ($в$) и спектральное положение плазмонного пика ($г$) в зависимости от толщины d исходной пленки Ag, полученной на с-сапфировой подложке. Фото ступенчатой структуры наночастиц Ag

Для серебряных наночастиц положение полосы ППП сдвигалось в красную область от $\omega_p=460$ нм (2.7 эВ) до $\omega_p=532$ нм (2.33 эВ) с увеличением толщины d исходной пленки Ag (следовательно, среднего размера наночастиц R_0) от 1 нм до 10 нм (рисунок 7в, з).

Далее подобным образом наночастицы Ag наносились на наностержни и тонкие пленки ZnO. На рисунке 8 приведены СЭМ изображения непокрытых наностержней ZnO (а) и покрытых наночастицами Ag (б). Наностержни ZnO были получены методом термического осаждения.

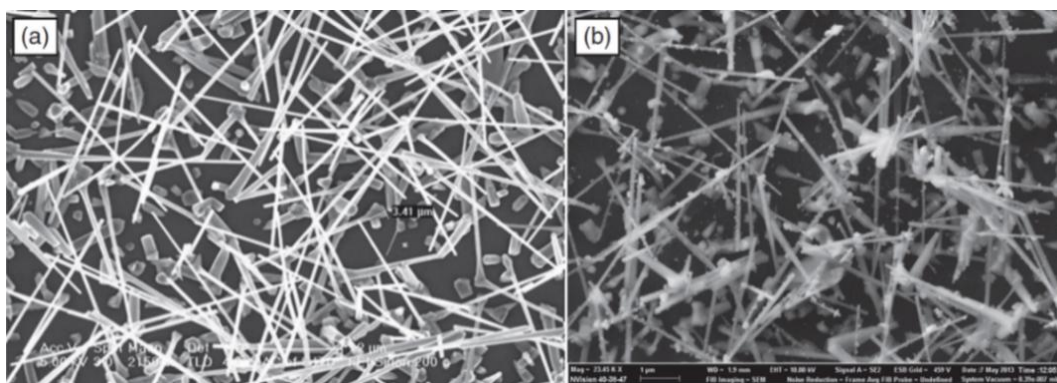


Рисунок 8 – Наностержни ZnO непокрытые (а) и покрытые наночастицами Ag (б)

В спектрах фотолюминесценции наностержней ZnO, покрытых наночастицами серебра наблюдалось увеличение интенсивности экситонной полосы с увеличением размера наночастиц Ag (рисунок 9). Максимальное увеличение значения интенсивности более чем в три раза было зафиксировано для наностержней ZnO, покрытых наночастицами Ag размером 3 нм по отношению к непокрытым наностержням.

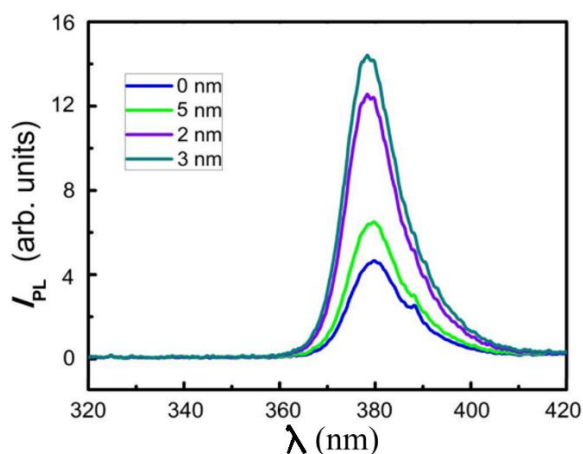


Рисунок 9 – Спектры фотолюминесценции наностержней ZnO, в зависимости от размеров наночастиц серебра

В Главе 5 представлены результаты исследования статических физических свойств, а также динамики изменения оптических коэффициентов пропускания и отражения, электрической проводимости тонких пленок GeTe, Ge₂Sb₂Te₅ (GST) и Ga₂Te₃ при обратимых фазовых переходах, индуцированных фемто- и наносекундными лазерными импульсами. Методами просвечивающей микроскопии и рентгеновской дифракции исследованы структурные свойства тонких пленок GeTe и GST в кристаллическом и аморфном состояниях. Показано, что характер кристаллизации в тонких пленках GST, индуцированной как нано- так и фемтосекундными лазерными импульсами носит гетерогенный характер. Так, например, на рисунке 10 представлено ПЭМ-изображение поперечного среза тонкой пленки GST, облученной импульсом с плотностью энергии $E=35$ мДж/см². Из рисунка видно, что граница раздела между кристаллической и аморфной фазами резкая, а нижний слой состоит из плотно упакованных ориентированных вертикально кристаллитов кубической фазы GST. Кристаллический слой, толщиной около 55 нм, имеет столбчатую зернистую структуру с характерным поперечным размером зёрен 15-40 нм. Кубическая сингония кристаллической фазы подтверждается также электронограммой, полученной с помощью обработки изображений ПЭМ методом Фурье.

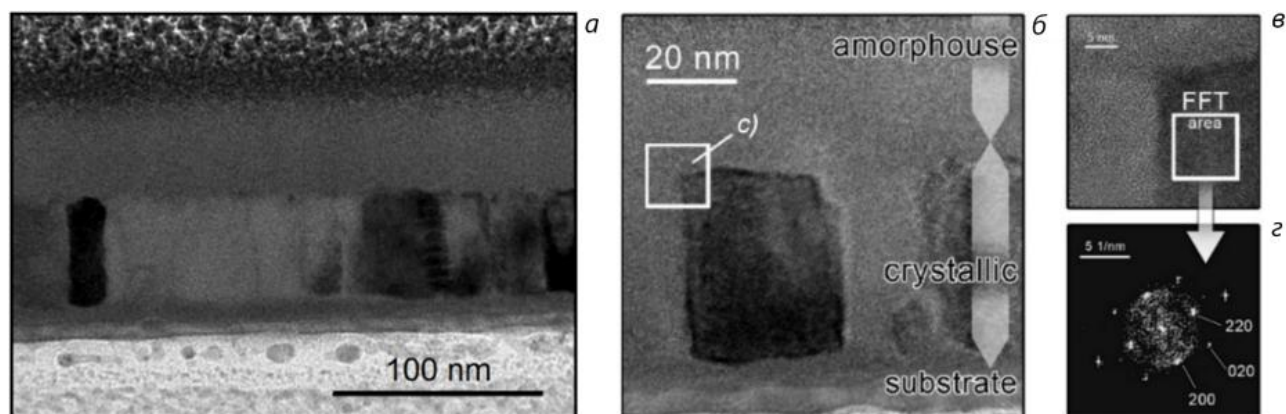


Рисунок 10 – ПЭМ-изображения закристаллизованной плёнки GST на кварцевой подложке после воздействия лазерным излучением с плотностью энергии 35 мДж/см²: *а* – панорамное изображение; *б* – увеличенное изображение участка границы между аморфной и кристаллической фазами; *в* – ВРЭМ-изображение зерна плёнки; *г* – Фурье-электронограмма отмеченного участка

Проведен анализ данных экспериментальных исследований динамики изменения коэффициентов оптического отражения и пропускания в результате фазовых переходов, индуцированных двумя последовательными фемтосекундными лазерными импульсами. Осциллограммы изменения коэффициентов оптического отражения и пропускания представлены на рисунке 11. Из графиков видно, что динамика изменения 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.

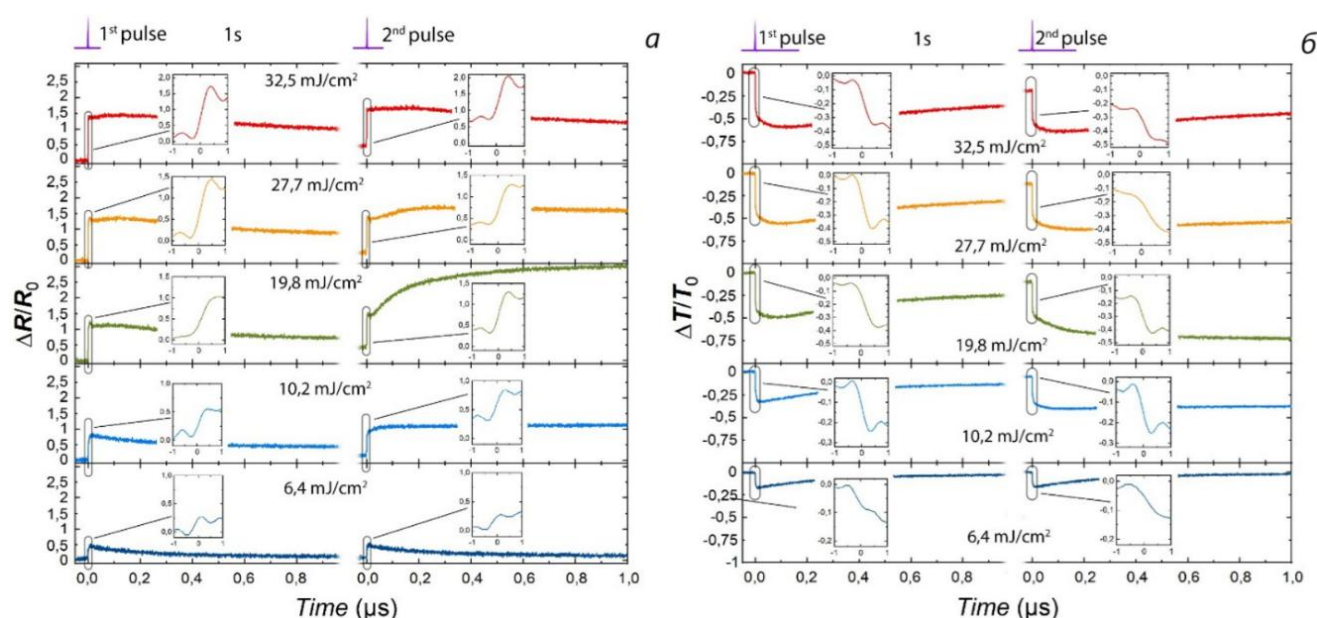


Рисунок 11 – Динамика изменения контраста коэффициентов оптического отражения (а) и пропускания (б) тонкой пленки GST при кристаллизации, индуцированной двухимпульсным воздействием фемтосекундного лазерного излучения с разной плотностью энергии

Впервые разработан и создан модулятор оптического телекоммуникационного сигнала на основе полимерного волновода, покрытого оптически активной пленкой GST, имитирующий работу биологического синапса. Модель и фотография такого модулятора представлена на рисунке 12.

В качестве источника зондирующего излучения использовался перестраиваемый источник с волоконным выводом Suntec TSL-550 с установленными параметрами

выходного излучения: CW, 5 мВт, 1550 нм. В качестве приемника излучения использовался InGaAs фотодетектор с волоконным вводом. Для обоих приборов в качестве оптического транспорта использовалось одномодовое оптическое волокно диаметром сердечника 9 мкм. Источником иницирующего (модулирующего) излучения служил твердотельный лазер 532 нм, с длительностью импульса 15 нс и профилем распределения интенсивности на поверхности образца близким к цилиндрическому.

На рисунке 13а представлена осциллограмма выходного сигнала на выходе исследуемой синапс-подобной структуры после воздействия одиночного импульса плотностью энергии 33 мДж/см². На осциллограмме мы можем наблюдать уменьшение интенсивности на 47%, что связано с изменением оптических характеристик покрывного активного слоя, в свою очередь связанных с лазерно-инициированным изменением фазового состояния. Рисунок 13б иллюстрирует модуляцию выходного сигнала при периодическом воздействии на активный покрывной РСМ слой импульсного излучения плотностью энергии 19 мДж/см².

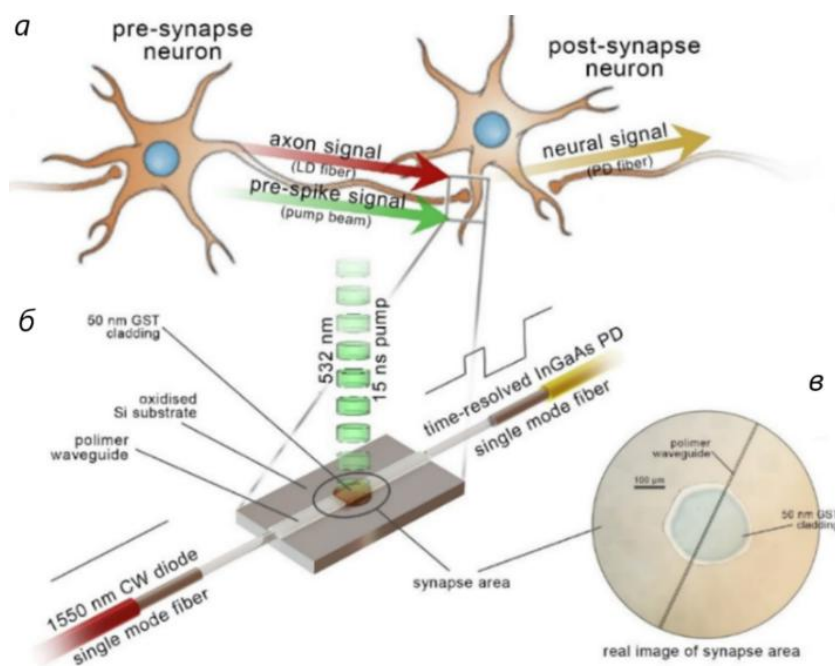


Рисунок 12 – Модель волноводного оптического синапса: *а* – принцип работы биологического синапса, *б* – 3d-модель экспериментальной схемы, *в* – изображение в оптическом микроскопе оптического синапса на основе полимерного волновода, покрытого GST

В аморфном состоянии ячейка GST обеспечивает большее пропускание в волноводе, соответственно, с кристаллизацией материала пропускание падает. Как показано на рисунке 13б, полной кристаллизации ячейки GST можно достичь за несколько импульсов. В этом случае пропускание падает ступенчато, по мере того как большее количество материала переходит в кристаллическое состояние. Восстановление уровня сигнала в синапсе можно достичь, воздействуя на ячейку энергией, достаточной для достижения энергии плавления и последующего быстрого стеклования (рисунок 13в).

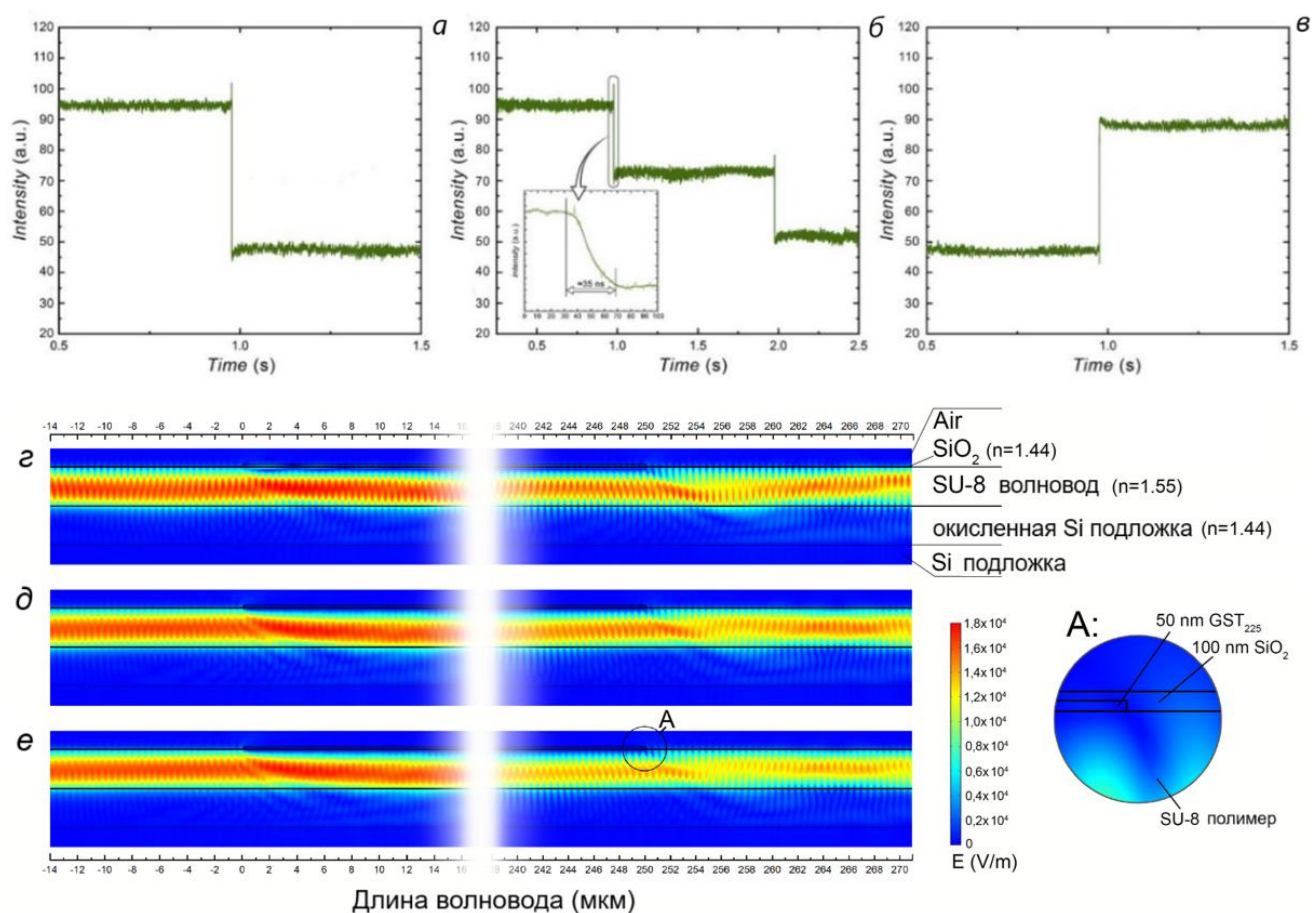


Рисунок 13 – Осциллограммы модуляции зондирующего излучения в оптическом синапсе на основе полимерного волновода, покрытого GST пленкой при различных значениях плотности лазерной энергии на оптическом активном GST-интерфейсе: *a* – 33 мДж/см², *b* – 19 мДж/см², *c* – 35 мДж/см² Результаты численного моделирования распространения излучения в полимерном волноводе при различных структурных состояниях области покрытия GST: *a* – исходное аморфное ($n = 4$, $k = 0$), *b* – промежуточное ($n = 6,5$, $k = 1$) и *c* – конечное кристаллическое ($n = 6,5$, $k = 2$)

На рисунке 13 $_{г,д,е}$ приведены результаты численного моделирования распространения зондирующего излучения (1,55 мкм) в полимерном оптическом волноводе, покрытом оптически активной тонкой пленкой GST в трёх различных фазовых состояниях, аморфное ($n=4$, $k=0$), кристаллическое ($n=6,5$, $k=2$), среднее ($n=6,5$, $k=1$). Из рисунка видно, что при увеличении n от 4 до 6,5 и k от 0 до 2 интенсивность пучка, прошедшего оптически активную область существенно снижается. Таким образом, результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке тонких пленок и наноструктур на основе оксидов переходных металлов и теллуридов для фотонных устройств. В ходе выполнения работы были разработаны и верифицированы численные модели, позволяющие рассчитывать динамику температурного поля в тонких пленках и модуляцию оптического сигнала в синапсодобной структуре. Разработано и запатентовано экспериментальное устройство, позволяющее получать ступенчатые, клиновидные и более сложного вида тонкие пленки и наноструктуры. Разработаны тонкие пленки $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ с высоким магнитным моментом и сильным магнитооптическим откликом, а также мемристивные структуры на их основе, перспективные для спинтронных устройств. Получены 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 $\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}/\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{O}$, демонстрирующие высокую квантовую эффективность в диапазоне ширин ям L_w от 2,5 нм до 6 нм. При накачке импульсным лазерным источником в спектрах фотолюминесценции наблюдалось стимулированное излучение. Разработан метод управляемого синтеза наночастиц золота и серебра с размерами в диапазоне от 2 нм до 120 нм. Продемонстрирована принципиальная возможность управления оптическим сигналом в С-телекоммуникационном диапазоне, проходящего через синаптический интерфейс на основе полимерного волновода, покрытого оптически активной тонкой пленкой $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, посредством внешнего лазерного воздействия на оптически активную область.

На основании полученных результатов сделаны следующие **выводы**:

1. Экспериментальное устройство, позволяющее получать ступенчатые и клиновидные тонкие пленки и наноструктуры, открывает широкие возможности в изучении

квантово-размерных эффектов и зависимостей различных физических свойств материалов от их размеров.

2. Разработанная экспериментальная установка по исследованию динамики фазовых переходов позволяет регистрировать изменения коэффициентов оптического отражения / пропускания и удельного электрического сопротивления тонких пленок теллуридов при лазерно-индуцированных фазовых переходах с субнано- и наносекундным разрешением.
3. В тонких пленках $Zn_{1-x}Co_xO$ ($x=0.2$) толщиной $d=60$ нм выявлен сильный гистерезис в магнетосопротивлении для поля, ориентированного перпендикулярно плоскости пленок, что указывает на их перпендикулярную магнитную анизотропию. Разработанные мемристивные структуры на основе магнитных тонких пленок $Zn_{1-x}Co_xO$ перспективны для создания нейроморфных систем обработки информации и спинтронных устройств.
4. Установлено, что порог возбуждения стимулированного излучения, интенсивность экситонной люминесценции и время жизни двумерных экситонов в квантовых ямах $Mg_xZn_{1-x}O/Cd_yZn_{1-y}O$ немонотонно зависит от ширины ямы. Низкоразмерные гетероструктуры $Mg_xZn_{1-x}O/Cd_yZn_{1-y}O$ с высокой квантовой эффективностью являются перспективными как активные элементы лазерных источников УФ-синего спектрального диапазона.
5. Показано, что интенсивность экситонного пика в структурах «наночастицы Ag/тонкая пленка ZnO» и «наночастицы Ag/наностержни ZnO» немонотонно зависит от при увеличении размеров наночастиц серебра. Такие плазмонные структуры могут быть применены как усилители УФ-синего спектрального диапазона в оптоэлектронных устройствах.
6. На основе принципа модуляции оптического сигнала в полимерном волноводе, покрытого оптически активной тонкой пленкой $Ge_2Sb_2Te_5$, могут быть разработаны полностью оптические запоминающие и вычислительные устройства следующего поколения, имитирующие работу биологических синапсов и нейронов.

Полученные автором результаты являются оригинальными. Работа вносит существенный вклад в области разработки низкоразмерных гетероструктур и плазмонных систем как высокоэффективные активные элементы лазерных источников ближнего УФ спектрального диапазона. Диссертационное исследование открывает новые перспективы

для изучения динамики лазерно-индуцированных фазовых переходов в фазоизменяемых материалах и созданию на их основе элементов интегральной оптики для фотонных интегральных схем.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

1. **Lotin A.A.** Influence of growth temperature on physical properties of ZnO films produced by pulsed laser deposition method / A.A. Lotin, O.A. Novodvorsky, O.D. Khramova, L.S. Parshina, D.A. Zuev, F.V. Lebedev, J.W. Bartha, C. Wenzel // *Optical Materials*. – 2013. – V. 35. – Is. 8. – P. 1564-1570. DOI: 10.1016/j.optmat.2013.03.027 (**Scopus**)
2. **Lotin A.A.** Room temperature stimulated emission in two-dimensional $Mg_xZn_{1-x}O/ZnO$ heterostructures at optical pumping / A.A. Lotin, O.A. Novodvorsky, D.A. Zuev // *Laser Physics Letters*. – 2013. – V. 10. – Is. 5. – P. 055902-056000. DOI: 10.1088/1612-2011/12/9/095901 (**Scopus**)
3. **Лотин А.А.** Свойства пленок $Zn_{1-x}Co_xO$, полученных методом импульсного лазерного осаждения с использованием скоростной сепарации осаждаемых частиц / А.А. Лотин, О.А. Новодворский, Д.А. Зуев, О.Д. Храмова, М.А. Панков, Б.А. Аронзон, В.В. Рыльков, А.С. Семисалова, Н.С. Перов, A. Lashkul, E. Lahderanta, В.Я. Панченко // *Физика и Техника Полупроводников*. – 2014. – Т. 48. – Вып. 4. – С. 556-563. (**Scopus**)
4. **Lotin A.A.** Dimensional effects in exciton and defect-related luminescence of ZnO-based step quantum wells / A.A. Lotin, O.A. Novodvorsky // *Laser Physics Letters*. – 2015. – V. 12. – Is. 9. – P. 095901. DOI: 10.1088/1612-2011/12/9/095901 (**Scopus**)
5. Rumyantsev S. Using of radiation intensity dependence on excitation level for the analysis of surface plasmon resonance effect on ZnO luminescence / S. Rumyantsev, A. Tarasov, C. Briskina, M. Ryzhkov, V. Markushev, **A. Lotin**, // *Journal of Nanophotonics*. – 2016. – V. 10. – Is. 1. – P. 016001. DOI: 10.1117/1.JNP.10.016001 (**Scopus**)
6. **Lotin A.A.** Optical properties of ZnO-based step quantum wells / A.A. Lotin, O.A. Novodvorsky, L.S. Parshina, O.D. Khramova, V.A. Mikhalevsky, E.A. Cherebilo // *Optical and Quantum Electronics*. – 2013. – V. 48. – Is. 6. – P. 318. DOI: 10.1007/s11082-016-0587-x (**Scopus**)
7. Tarasov A. Interpretation of the dielectric spacer influence on ZnO/Ag luminescence / A. Tarasov, V. Markushev, C. Briskina, S. Rumyantsev, **A. Lotin** // *Journal of Luminescence*. – 2017. – V. 184. – P. 217–220. DOI: 10.1016/j.jlumin.2016.12.036 (**Scopus**)

8. Kuz'mina A.S. Magnetism and magnetooptics features of $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$ thin films grown by pulsed laser deposition / A.S. Kuz'mina, **A.A. Lotin**, O.A. Novodvorsky, N.S. Perov, E.A. Gan'shina, L.A. Makarova, A.S. Semisalova, A.G. Shneider, M.P. Kuz'min, S.S. Kolesnikov // Materials Chemistry and Physics. – 2017. – V. 198. – P. 291-296. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2017.06.015 (**Scopus**)
9. **Лотин А.А.** Люминесцентные свойства тонких пленок $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ / **А.А. Лотин**, О.А. Новодворский, Л.С. Паршина, О.Д. Храмова, Е.А. Черобыло, В.А. Михалевский // Физика и Техника Полупроводников. – 2018. – Т. 52. – Вып. 2. – С. 274-277. (**Scopus**)
10. **Лотин А.А.** Влияние кислородных вакансий на магнитные свойства пленок $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$ / А.А. Лотин, А.С. Кузьмина, О.А. Новодворский, Л.С. Паршина, В.А. Михалевский, О.Д. Храмова, Е.А. Черобыло, Н.С. Перов, Л.А. Макарова, А.Г. Шнейдер, М.П. Кузьмин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – Т. 4. – С. 37-41. (**Scopus, Chemical Abstracts**)
11. Kuz'mina A.S. Stabilization of the hole conductivity of $\text{Zn}_{1-x}\text{Li}_x\text{O}_y$ thin films fabricated by pulsed laser deposition / A.S. Kuz'mina, **A.A. Lotin**, N.A. Strokin, M.P. Kuz'min and A.V. Kazantsev // Materials Research Express. – 2019. – V. 6. – P. 086523. DOI: 10.1088/2053-1591/ab1c29 (**Scopus**)
12. Kuz'mina A.S. Composition, structure and morphology of $\text{ZnO-Co}_3\text{O}_4$ ceramic targets in the process of pulsed laser thin film deposition / A.S. Kuz'mina, **A.A. Lotin**, N.A. Strokin, M.P. Kuz'min, A.V. Kazantsev // Journal of Crystal Growth. – 2020. – V. 535. – P. 125506. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2020.125506 (**Scopus**)
13. Ionin V.V. Multilevel reversible laser-induced phase transitions in GeTe thin films / V.V. Ionin, A.V. Kiselev, N.N. Eliseev, V.A. Mikhalevsky, M.A. Pankov, **A.A. Lotin** // Applied Physics Letters. – 2020. – V. 117. – P. 011901. DOI: 10.1063/5.0014375 (**Scopus**)
14. Eliseev N.N. Wide range optical and electrical contrast modulation by laser-induced phase transitions in GeTe thin films / N.N. Eliseev, A.V. Kiselev, V.V. Ionin, V.A. Mikhalevsky, A.A. Burtsev, M.A. Pankov, D.N. Karimov, **A.A. Lotin** // Results in Physics. – 2020. – V. 19. – P. 103466. DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103466 (**Scopus**)
15. Kiselev A.V. Transmissivity to reflectivity change delay phenomenon observed in GeTe thin films at laser-induced reamorphization / A.V. Kiselev, V.A. Mikhalevsky, A.A. Burtsev, V.V. Ionin, N.N. Eliseev, **A.A. Lotin** // Optics and Laser Technology. – 2021. – V. 143. – P. 107305. DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107305 (**Scopus**)

16. Ionin V.V. Optical synapse based on polymer waveguide with GST₂₂₅ active layer / V.V. Ionin, A.V. Kiselev, A.A. Burtsev, N.N. Eliseev, I.M. Asharchuk, V.I. Sokolov, **A.A. Lotin** // Applied Physics Letters. – 2021. – V. 119. – Is. 8. – P. 081105. DOI: 10.1063/5.0063349 (**Scopus**)
17. Tverjanovich A. Atypical phase-change alloy Ga₂Te₃: atomic structure, incipient nanotectonic nuclei, multilevel writing / A. Tverjanovich, M. Khomenko, C.J. Benmore, S. Bereznev, A. Sokolov, D. Fontanari, A. Kiselev, **A. Lotin**, E. Bychkov // Journal of Materials Chemistry C. – 2021. – V. 9. – Is. 47. – P. 17019-17032. DOI: 10.1039/D1TC03850H (**Scopus**)
18. Kiselev A.V. Dynamics of reversible optical properties switching of Ge₂Sb₂Te₅ thin films at laser-induced phase transitions / A.V. Kiselev, V.V. Ionin, A.A. Burtsev, N.N. Eliseev, V.A. Mikhalevsky, N.A. Arkharova, D.N. Khmelenin, **A.A. Lotin** // Optics and Laser Technology. – 2022. – V. 147. – P. 107701. DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107701(**Scopus**)
19. Burtsev A.A. Physical properties' temperature dynamics of GeTe, Ge₂Sb₂Te₅ и Ge₂Sb₂Se₄Te₁ phase change materials / A.A. Burtsev, N.N. Eliseev, V.A. Mikhalevsky, A.V. Kiselev, V.V. Ionin, V.V. Grebenev, D.N. Karimov and **A.A. Lotin** // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2022. – V. 150. – P. 106907. DOI: 10.1016/j.mssp.2022.106907 (**Scopus**)
20. Nevzorov A.A. Two-stage conductivity switching of GST thin films induced by femtosecond laser irradiation / A.A. Nevzorov, V.A. Mikhalevsky, N.N. Eliseev, A.V. Kiselev, A.A. Burtsev, V.V. Ionin, A.M. Maliutin, D.N. Khmelenin, V.N. Glebov, **A.A. Lotin** // Optics and Laser Technology. – 2023. – V. 157. – P. 108773. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108773 (**Scopus**)
21. Nevzorov A.A. The GST thin films' optical properties controlling by ultrashort laser pulses series impact / A.A. Nevzorov, V.A. Mikhalevsky, A.V. Kiselev, A.A. Burtsev, N.N. Eliseev, V.V. Ionin, **A.A. Lotin** // Optical materials. – 2023. – V. 141. – P. 113925. DOI: 10.1016/j.optmat.2023.113925 (**Scopus**)
22. Асеев С.А. Сверхтонкий кристалл теллурида германия в сильном фемтосекундном лазерном поле: проявление квантоворазмерного эффекта / С.А. Асеев, Б.Н. Миронов, И.В. Кочкиков, **А.А. Лотин**, А.А. Ищенко, Е.А. Рябов // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 117. – Вып. 11. – С. 814-818. (**GeoRef**)

23. Nevzorov A.A. The GST thin films' optical properties controlling by ultrashort laser pulses series impact / A.A. Nevzorov, V.A. Mikhalevsky, A.V. Kiselev, A.A. Burtsev, N.N. Eliseev, V.V. Ionin, **A.A. Lotin** // Optical materials. – 2023. – V. 141. – P. 113925. DOI: 10.1016/j.optmat.2023.113925 (**Scopus**)
24. Елисеев Н.Н. Переключение электрических свойств тонкопленочных мемристивных элементов на основе GeTe последовательностями сверхкоротких лазерных импульсов / Н.Н. Елисеев, А.А. Невзоров, В.А. Михалевский, А.В. Киселев, А.А. Бурцев, В.В. Ионин, **А.А. Лотин** // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т. 23. – Вып. 5. – С. 911-919. (**Scopus**)
25. Burtsev A.A. Controlled Optical Contrast Caused by Reversible Laser-Induced Phase Transitions in GeTe and Ge₂Sb₂Te₅ Thin Films in the Spectral Range from 500 to 20,000 nm / A.A. Burtsev, A.V. Kiselev, V.V. Ionin, N.N. Eliseev, M.E. Fedyanina, V.A. Mikhalevsky, A.A. Nevzorov, O.A. Novodvorsky, **A.A. Lotin** // Journal of Russian Laser Research. – 2023. – V. 44. – Is. 6. – P. 700-706. DOI 10.1007/s10946-023-10180-4 (**Scopus**)
26. Burtsev A.A. Low-loss Se-based phase change materials for IR photonics application / A.A. Burtsev, A.V. Kiselev, N.N. Eliseev, M.E. Fedyanina, V.A. Mikhalevsky, A.A. Nevzorov, V.V. Ionin, V.V. Grebenev, A.M. Maliutin, V.N. Glebov, O.A. Novodvorsky and **A.A. Lotin** // Optical Materials. – 2024. – V. 157. – P. 116117 DOI: 10.1016/j.optmat.2024.116117 (**Scopus**)
27. Nevzorov A.A., Chaotic computing cell based on nanostructured phase-change materials / A.A. Nevzorov, A.A. Burtsev, A.V. Kiselev, V.A. Mikhalevsky, V.V. Ionin, N.N. Eliseev, **A.A. Lotin** // Journal of Computational Electronics. – 2024. – V. 23. – P. 1448–1454. DOI: 10.1007/s10825-024-02221-1 (**Scopus**)
28. Kiselev A.V. Optically controlled fine-tuning phase shift cell based on thin-film Ge₂Sb₂Te₅ for light beam phase modulation / A.V. Kiselev, A.A. Nevzorov, A.A. Burtsev, V.A. Mikhalevsky, N.N. Eliseev, V.V. Ionin, **A.A. Lotin** // JETP Letters. – 2024. – V. 120. – Is. 6. P. 440-444. DOI: 10.1134/S0021364024602598 (**Scopus**)
29. Kiselev A.V. Multi-bit subnanosecond optical switching of GST₂₂₅ for photonic memory and computing / A.A. Burtsev, V.A. Mikhalevsky, A.A. Nevzorov, N.N. Eliseev, V.V. Ionin, and **A.A. Lotin** // Journal of Russian Laser Research. – 2024. – V. 4. – P. DOI: 10.1007/s10946-024-10224-3 (**Scopus**)

30. Бурцев А.А. Особенности кинетики лазерной кристаллизации тонких пленок халькогенидных фазоизменяемых материалов GeTe и Ge₂Sb₂Te₅ / А.А. Бурцев, А.В. Киселев, В.А. Михалевский, В.В. Ионин, А.А. Невзоров, Н.Н. Елисеев, **А.А. Лотин** // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Т. 16. – С. 603 – 611. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.603 (**Chemical Abstracts**)

Патенты

1. Пат. № 135638, Российская Федерация, Устройство импульсного лазерного осаждения наноструктурированных материалов, **Лотин А.А.**, Зуев Д.А., Новодворский О.А.; заявитель и патентообладатель Учреждение Рос. Акад. наук Ин-т проблем лазерных и информационных технологий. № 2013120679/28, заявл. 06.05.2013; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35.
2. Пат. № 203240, Российская Федерация, Адаптивное зеркало на основе фазоизменяемых материалов, Ионин В.В., Киселев А.В., **Лотин А.А.**, Панков М.А., Притоцкий Е.М., заявитель и патентообладатель: ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН, Заявка № 2020137320 Приоритет ПМ от 13 ноября 2020 г., Дата госрегистрации 29 марта 2021 г.
3. Пат. № 203242, Российская Федерация, Составной интерференционный фильтр, Панков М.А., Притоцкий Е.М., Киселев А.В., **Лотин А.А.**; заявитель и патентообладатель: ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН; Заявка № 2020139813, Приоритет ПМ от 04 декабря 2020 г.; Дата госрегистрации 29 марта 2021 г.
4. Пат. № 2788438, Российская Федерация, Оптический синапс, Минаев Н.А., Киселев А.В., Бурцев А.А., Ионин В.В., **Лотин А.А.**; заявитель и патентообладатель: ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН; Заявка № 2021133121/28.
5. Пат. № 232291, Российская Федерация, Элемент памяти на основе фазоизменяемого халькогенидного полупроводникового материала, А.А. Бурцев, А.А. Невзоров, В.В. Ионин, А.В. Киселев, **А.А. Лотин**; заявитель и патентообладатель: НИЦ "Курчатовский институт"; Заявка № 2024133407 от 07.11.2024