



На правах рукописи

Михайлова Татьяна Владиславовна

**СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ,
ОПТИЧЕСКИЕ И МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В
НАНОФОТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ И СТРУКТУРАХ**

Специальность 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Симферополь – 2023

Работа выполнена в Федеральном автономном образовательном учреждении высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»).

Научный консультант: Белотелов Владимир Игоревич,
доктор физико-математических наук, профессор РАН,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
доцент кафедры фотоники и физики микроволн физического
факультета

Официальные оппоненты: Любчанский Игорь Леонидович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение «Донецкий физико-технический институт
им. А.А. Галкина», старший научный сотрудник отдела
теории электронных и кинетических свойств нелинейных
систем

Павлов Виктор Владимирович,
доктор физико-математических наук, старший научный
сотрудник, Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, главный
научный сотрудник, заведующий лабораторией оптических
явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах
отделения физики диэлектриков и полупроводников

Юрасов Алексей Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования "МИРЭА – Российский
технологический университет", профессор кафедры
наноэлектроники Института перспективных технологий и
индустриального программирования

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Челябинский
государственный университет»

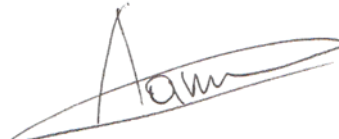
Защита состоится «22» декабря 2023 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета
24.2.318.06 на базе ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского» по адресу: 295007,
Республика Крым, г. Симферополь, ул. Ялтинская, 20, зал для защиты диссертаций
(аудитория 301).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «КФУ
им. В.И. Вернадского» по адресу: 295007, г. Симферополь, просп. Академика
Вернадского, д. 4, корпус А, или на сайте <http://science.cfuv.ru/mixajlova-tatyana-vladislavovna>.

Телефон учёного секретаря: +7 (978) 772-19-86.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.318.06, канд. физ.-мат. наук



Лапин Б.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Среди современных быстроразвивающихся научных отраслей и приложений нанофотоники следует выделить фотонику магнитоактивных сред, которая рассматривает взаимное действие магнитного состояния среды и распространяющихся электромагнитных волн оптического диапазона. К выдающимся достижениям в данной области можно отнести, с одной стороны, исследования, направленные на преобразование исходных спектральных зависимостей эффектов в магнитных материалах за счет наноструктурирования [1 – 3], и, с другой стороны, прогрессивные экспериментальные результаты по возбуждению динамики или изменению стационарного распределения намагниченности фемтосекундными лазерными импульсами [4, 5]. Магнитооптические (МО) и оптомагнитные свойства структур открывают для исследователя дополнительные возможности управления состоянием системы (стационарной намагниченностью, спиновой или оптической волнами) с целью применения в качестве быстродействующих (до ТГц) компонент информационных устройств (логических элементов, переключателей, волноводов, памяти) и чувствительных сенсоров технического и медико-биологического назначения.

Кроме этого, научно значимой проблемой современной фотоники магнитоактивных сред является интегрирование МО активных и плазмонных компонент с целью формирования наноструктур, в которых возможны усиление МО эффектов и управление возбуждаемыми поверхностными (ППП) и объемными плазмон-поляритонами [2]. Создание и исследование особенностей взаимодействия оптического излучения с такими комплексными наноструктурами и элементами актуально с целью построения микроразмерных нанофотонных интегрированных устройств для быстрого многорежимного и многонаправленного управления световым потоком, управляемых магнитным полем элементов плазмонной схемотехники. Комплексные свойства подобных наноструктур показывают эффективность их применения в качестве чувствительных элементов умных систем и приборов, например, газовых сенсоров [6], сенсоров для детектирования биомолекулярных реакций [7], сенсоров биомагнитных полей [8].

Данная диссертационная работа посвящена исследованию оптических и МО эффектов в наноструктурах, сформированных на основе магнитоактивных V_i -замещенных ферритов-гранатов (ВЗФГ). Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности МО активных наноструктур посредством применения новых МО эффектов, создания новых конфигураций с необходимыми зависимостями эффектов и совершенствования технологии синтеза.

С целью оптимизации свойств наноструктур рассматривается зависимость структурных и МО свойств ВЗФГ от условий синтеза – режима кристаллизационного отжига и последовательности нанесения и кристаллизации слоев в наноструктурах. Наноструктуры с ВЗФГ чаще всего синтезируют методами вакуумного осаждения [9 – 14]. При этом, одним из доступных методов кристаллизации ВЗФГ является метод, при котором слои ВЗФГ сначала осаждают, а затем кристаллизуют термическим отжигом на воздухе. Такие слои ВЗФГ являются поликристаллическими. Исследования, изложенные в диссертации, базируются на оптимальных условиях синтеза, которые были получены ранее в работах [12, 13]. Под оптимальными условиями синтеза понимают условия, которые позволяют достичь наиболее выгодной совокупности параметров: шероховатости, размеров кристаллитов и удельного угла фарадеевского вращения. Стоит отметить, что оптимальные условия синтеза были найдены ранее при варьировании температуры и при одинаковой длительности кристаллизационного отжига [13] или при одинаковой температуре и разной длительности кристаллизационного отжига [14]. В данной работе исследовано влияние одновременного изменения длительности и температуры кристаллизационного отжига, а также кристаллизация ВЗФГ под слоем SiO_2 . Кроме этого, в работах [12, 13] для формирования микрорезонаторных магнитофотонных кристаллов была предложена двухэтапная технология синтеза ВЗФГ, которая позволила значительно повысить МО добротность структур. Однако, не было показано, как данная технология повлияет на характеристики других МО активных наноструктур, например, таммовских структур. Данные структуры позволяют сформировать поверхностное локализованное состояние, оптическое таммовское состояние (ОТС) или таммовский плазмон-поляритон (ТПП), на границе фотонного кристалла и слоя Au или композита (SiO_2 -Au). Таммовские наноструктуры нашли широкое применение в качестве биологических сенсоров [15, 16], термических сенсоров [17, 18], сенсоров изменений показателя преломления внешней среды [19], светодиодов и органических солнечных элементов [20]. Основными детектируемыми параметрами сенсоров являются резонансные особенности спектров. Уменьшить ширину резонансов и повысить на порядок чувствительность сенсоров позволяет использование спектральных зависимостей МО эффектов или наличие гибридных состояний ТПП [7]. Несмотря на активные исследования в этой области, нераскрытыми остались вопросы влияния параметров металлического (или композитного) функционального слоя на формирование МО эффектов и МО добротности структур. Интерес представляет модификация МО эффектов при возбуждении гибридного состояния мод ТПП и Фабри-Перо.

Достичь изменения МО эффектов возможно не только варьируя условия синтеза и конфигурации наноструктур, но и рассмотрев новые

геометрии наблюдения, например, наклонное падение s - и p -поляризованных волн [21] или наклонное падение волн с произвольной линейной ($s + p$) поляризацией [22]. Так в диссертации продемонстрировано возникновение двух новых МО эффектов, не наблюдаемых ранее в МО микрорезонаторных фотонных наноструктурах. Обнаруженные эффекты могут быть использованы в МО визуализации, МО модуляторах и переключателях, магноники и оптомагнетизме.

Цели и задачи исследования.

Целью настоящей работы является установление закономерностей изменений известных и появления новых оптических и МО эффектов в фотонных наноструктурах и слоях магнитоактивных ВЗФГ в зависимости от условий синтеза, структурных параметров и геометрии наблюдения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Предложить модели оригинальных и эффективных для фотонных устройств магнитоактивных таммовских наноструктур.
2. Выявить зависимости оптических и МО эффектов (эффекта Фарадея) в магнитоактивных таммовских наноструктурах от параметров функционального металлического или металл-диэлектрического слоя.
3. Исследовать влияние формирования гибридного состояния мод ТПП и Фабри-Перо на оптические и МО характеристики.
4. Рассмотреть влияние наклонного падения на формирование оптических и МО спектров фотонных наноструктур.
5. Рассмотреть возможность использования таммовских наноструктур с двухслойными пленками ВЗФГ и гибридным состоянием ТПП и ППП для создания сенсоров технического и медико-биологического применения.
6. Выявить влияние различных условий синтеза на структурные и МО свойства слоев магнитоактивных ВЗФГ, а именно влияние «быстрого высокотемпературного» и «закрытого» кристаллизационных отжигов.

Научная новизна.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Впервые предложены модели МО активных таммовских наноструктур с двухслойными пленками ВЗФГ, демонстрирующие формирование ТПП на заданных длинах волн. Показано, что использование двухслойных пленок, как и в рассмотренном ранее случае микрорезонаторного магнитофотонного кристалла [12], позволяет добиться высоких значений МО добротности. Часть предложенных наноструктур была синтезирована и их свойства были исследованы в зависимости от структурных параметров.
2. Впервые с использованием численных расчетов и экспериментальной реализации определены наиболее оптимальные для МО применений конфигурации таммовских наноструктур с единичным резонансом ТПП

по центру фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) – наноструктуры с толщиной слоя Au от 30 до 50 нм. Установлены закономерности изменения резонансных длин волн и резонансных значений коэффициента пропускания и угла фарадеевского вращения при увеличении толщины слоя Au.

3. Впервые рассмотрены МО свойства таммовских наноструктур с ОТС, формируемом благодаря композитному слою ($\text{SiO}_2\text{-Au}$). Продемонстрированы изменения спектров эффекта Фарадея в зависимости от объемной доли наночастиц в композитном слое.
4. Впервые с использованием численных расчетов и экспериментально для разных конфигураций таммовской наноструктуры с двухслойной пленкой ВЗФГ и слоем Au исследовано формирование гибридного состояния мод ТПП и Фабри-Перо. Анализ спектров оптических и МО эффектов позволил выявить влияние параметров наноструктуры (толщин слоя Au и буферного слоя SiO_2) на гибридизацию мод.
5. Впервые продемонстрировано влияние наклонного падения и состояния поляризации световой волны на формирование оптических и МО спектров наноструктур. Установлены спектральные зависимости эффектов для таммовских наноструктур с ТПП и гибридным состоянием мод ТПП и Фабри-Перо. Установлено, что наличие гибридного состояния мод ТПП и Фабри-Перо приводит к разному спектральному смещению резонансов s- и p- поляризованных компонент световой волны, а также к несоответствию резонансных длин волн мод на оптических и МО спектрах. Впервые предсказаны и продемонстрированы МО эффекты, возникающие в микрорезонаторных наноструктурах при падении волны с произвольной линейной (s + p) поляризацией.
6. Впервые предложено использование таммовской наноструктуры с двухслойной пленкой ВЗФГ для сенсоров технического и медико-биологического применения. Проведено сравнение характеристик таммовских наноструктур с гибридными состояниями мод: ТПП и ППП; ТПП, Фабри-Перо и ППП.
7. Впервые экспериментально установлена оптимальная температура «быстрого высокотемпературного» кристаллизационного отжига, при которой достигается компромисс между параметрами МО активных слоев ВЗФГ: размерами кристаллитов и удельным углом фарадеевского вращения. Показано, что последовательное использование «длительного низкотемпературного» отжига подслоя с меньшим содержанием V_i и «быстрого высокотемпературного» отжига основного слоя с большим содержанием V_i при формировании двухслойных пленок МО активных наноструктур на негранатových слоях приводит к формированию двухслойной пленки с большими значениями удельного угла

фарадеевского вращения ($2,95^\circ/\text{мкм}$ на длине волны 655 нм для пленки состава $\text{Bi}_{1,0}\text{Y}_{0,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{4,2}\text{Al}_{0,8}\text{O}_{12}$ / $\text{Bi}_{1,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{4,5}\text{Al}_{0,5}\text{O}_{12}$).

8. Впервые предложена и апробирована методика «закрытой» кристаллизации слоев ВЗФГ.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Все результаты диссертационной работы представляют фундаментальный и практический интерес в области проектирования устройств на основе МО активных фотонных наноструктур: компонент информационных устройств интегральной оптики (логических элементов, переключателей, волноводов, памяти) и чувствительных сенсоров технического и медико-биологического применения.

В Главах 2, 3 и 4 предложены оригинальные таммовские наноструктуры, параметры которых были оптимизированы с целью достижения высоких значений МО добротности. Как показано в Главе 4, подобные структуры могут быть эффективно использованы в качестве оптических сенсоров. Кроме этого, продемонстрированные зависимости МО эффектов, оптической и МО добротностей от параметров таммовских наноструктур позволяют создавать перестраиваемые устройства, благодаря технологиям нанесения слоев переменной толщины. Таммовские наноструктуры с композитным слоем ($\text{SiO}_2\text{-Au}$) могут быть использованы для создания устройств, функционирующих в более коротковолновом диапазоне (≤ 600 нм): многоцветных оптических фильтров / модуляторов дисплеев.

Описанные в Главе 4 результаты для случаев наклонного падения света являются новыми и вносят вклад в понимание формирования МО эффектов в наноструктурах. Эффекты, возникающие для случая произвольной линейной ($s + p$) поляризации, потенциально могут позволить проводить наблюдения МО вращения плоскости поляризации в материалах с неоднородным распределением намагниченности или даже с нулевой результирующей намагниченностью и создать эффективные МО модуляторы.

Методики синтеза, предложенные в Главе 5, позволят улучшить функциональные характеристики наноструктур, осаждаемых методами ионно-лучевого и магнетронного распыления, за счет достижения более высоких значений угла фарадеевского вращения используемых двухслойных пленок ВЗФГ и уменьшения шероховатости границ разделов слоев. Методика «закрытой» кристаллизации слоев ВЗФГ может быть эффективно использована для формирования полностью гранатовых наноструктур с целью снижения влияния многократных последовательных отжигов на структуру ВЗФГ.

Ценность научных работ автора косвенно подтверждается финансовой поддержкой в виде грантов и проектов ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», РНФ и Министерства науки и высшего образования РФ,

руководителем или исполнителем которых он являлся: № 2015/701 «Разработка наноразмерных магнитооптических сенсорных сред»; № 14-32-00010 «Сверхчувствительные сенсоры магнитного поля для магнитокардиографии»; № 3.7126.2017/БЧ «Нано- и мезоструктурированные функциональные материалы: синтез и исследование»; № ВГ13/2018 «Проектирование фотонно-кристаллических сред для устройств нанофотоники и сенсорики»; № ВГ22/2018 «Синтез и исследование перспективных наноматериалов и нанокompозитов на их основе»; № 19-72-20154 «Поверхностные и объемные плазмон-поляритоны в металл-диэлектрических наноразмерных элементах и структурах»; № 075-15-2019-1934, № 075-15-2022-1108 «Нанофотоника феррит-гранатовых пленок и структур для нового поколения квантовых устройств».

Методология и методы исследования.

В работе использованы теоретические, численные и экспериментальные методы исследований.

Наноструктуры и отдельные слои были синтезированы методами реактивного ионно-лучевого распыления, электронно-лучевого распыления и термического испарения. С целью кристаллизации ВЗФГ применялся термический отжиг. Двумерные и трехмерные изображения поверхности образцов и ее параметры (среднеквадратичная шероховатость RMS и размах высот R_{max}) были получены с использованием методов атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полуконтактном режиме. Средний размер кристаллитов у их основания AGS был определен по АСМ-изображениям с использованием алгоритма водораздела для определения границ кристаллитов. Доменная структура слоев ВЗФГ исследована методами магнитно-силовой (МСМ) и сканирующей ближнепольной оптической (СБОМ) микроскопии в полуконтактном режиме. Толщина отдельных слоев была определена с использованием оптической интерферометрии и АСМ. Для измерения МО петель гистерезиса и спектров эффекта Фарадея использованы компенсационные методы магнитополяриметрии, для получения спектров коэффициента пропускания – методы спектрофотометрии.

Для расчета оптических и МО спектров, распределения интенсивностей световой волны внутри наноструктур и слоев применялся численный алгоритм, построенный на обобщенном матричном методе 4×4 .

Положения, выносимые на защиту.

1. Модели МО активных таммовских наноструктур на основе фотонных кристаллов, однослойной или двухслойной пленки ВЗФГ и слоя Au и на основе МО активного или МО неактивного микрорезонаторов с двухслойными пленками ВЗФГ и слоя Au. Предложенные модели наноструктур демонстрируют значения МО добротности выше известных аналогов таммовских наноструктур. Максимальное значение МО добротности потенциально возможное для наноструктуры с

двухслойной пленкой ВЗФГ составляет $Q_{MO} = 8,01^\circ$. Наибольшая экспериментально продемонстрированная МО добротность – $Q_{MO} = 5,01^\circ$.

2. Для таммовских наноструктур на основе фотонных кристаллов, однослойной или двухслойной пленки ВЗФГ и слоя Au максимум коэффициента пропускания моды ТПП наблюдается для толщины слоя Au около 30 нм. Конфигурации наноструктур с данной толщиной оптимальны для формирования наибольшей интенсивности световой волны в окрестности магнитных слоев. При увеличении толщины слоя Au до 70 нм происходит увеличение значений углов фарадеевского вращения вследствие увеличения оптической добротности моды ТПП. Для таммовской наноструктуры с однослойной и двухслойной пленками ВЗФГ экспериментально были продемонстрированы максимальные резонансные значения угла фарадеевского вращения $-2,1^\circ$ на 664 нм и $-12,3^\circ$ на 645 нм, соответственно.
3. В наноструктурах с композитным слоем (SiO_2 -Au) наибольшие значения угла фарадеевского вращения могут быть достигнуты в коротковолновой спектральной области, в которой дисперсия компонент тензора диэлектрической проницаемости композитного слоя имеет резонансный характер.
4. Спектральное положение и амплитуды резонансов мод ТПП и Фабри-Перо в случае их гибридизации существенно видоизменены по сравнению со случаем их независимого возбуждения. Гибридное состояние мод ТПП и Фабри-Перо демонстрирует спектральное расталкивание резонансов, которое зависит от толщины слоя Au. Расталкивания не происходит в случае, когда толщина слоя Au не обеспечивает формирование оптически добротного ТПП резонанса (при толщине Au менее 25 нм). В случае пересечения резонансов и образования наиболее сильного связанного состояния мод, возникает спектральный сдвиг длины волны резонанса Фабри-Перо (максимальный сдвиг составляет 14 нм при толщине слоя Au более 30 нм). Коэффициент пропускания K_t гибридной моды выше в 4–6 раз по сравнению со значениями K_t конфигураций со слабой степенью гибридизации. При этом угол фарадеевского вращения резонанса Фабри-Перо уменьшается в 1,5-2 раза. В рассматриваемой структуре, эффект Фарадея возможно использовать для оценки степени гибридизации мод.
5. Наличие гибридного состояния мод ТПП и Фабри-Перо приводит к разному спектральному смещению резонанса ТПП для s- и р-поляризованных волн при изменении угла падения света от 0 до 60° . Это приводит к различию резонансных длин волн мод ТПП и Фабри-Перо на спектрах коэффициента пропускания и угла фарадеевского вращения при значительных углах падения. При угле падения 60° спектральные положения моды ТПП s- и р-поляризованных волн отличаются на 20 нм.

6. В результате гибридизации мод ТПП и ППП в геометрии Кречмана резонансные значения коэффициента отражения моды ТПП изменяются (на 0,45) в зависимости от угла падения или показателя преломления окружающей среды, что может быть использовано для сенсоров технического и медико-биологического применения. Наличие моды Фабри-Перо приводит к увеличению чувствительности резонанса ТПП к изменению показателя преломления среды.
7. В случае наклонного падения света с произвольной линейной (s + p) поляризацией на микрорезонаторную наноструктуру в области резонансной длины волны возникают два МО эффекта – асимметричный и интенсивностный эффекты Фарадея. Эффекты проявляются в конфигурации эффекта Фарадея при переключении намагниченности между двумя противоположными ориентациями. Асимметричный эффект Фарадея заключается в изменении абсолютного значения угла фарадеевского вращения, а интенсивностный эффект Фарадея – в модуляции интенсивности проходящего света.
8. Кристаллизация слоев ВЗФГ на различных подложках происходит с образованием наноразмерных кристаллитов с характерным средним размером кристаллитов от 45 до 350 нм, зависящим от используемого режима кристаллизационного отжига и состава ВЗФГ. Применение «быстрого высокотемпературного отжига» приводит к увеличению среднего размера кристаллитов и формированию более развитой поверхности. «Быстрый высокотемпературный отжиг» может быть использован для эффективной кристаллизации двухслойных пленок ВЗФГ.
9. Методика «закрытой» кристаллизации ВЗФГ под напыленным сверху слоем SiO₂ приводит к формированию более гладких границ разделов. Параметр среднеквадратичной шероховатости может быть уменьшен в 2 – 5 раз по сравнению с параметром среднеквадратичной шероховатости слоя ВЗФГ или двухслойной пленки ВЗФГ / SiO₂, синтезированных «открытым» отжигом слоя ВЗФГ.

Достоверность результатов.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов определяется: корректностью постановки решаемых задач; применением апробированных и широко известных методов моделирования наноструктур; воспроизводимостью экспериментальных данных; хорошим согласием численных расчетов и экспериментальных зависимостей; соответствием результатов теоретическим расчетам и экспериментальным данным, полученным ведущими зарубежными и российскими научными группами в данной области.

Личный вклад автора.

В постановке задач исследований, в анализе, описании и представлении результатов исследований в печати вклад автора определяющий.

В Главах 2 и 3 автором осуществлялись выбор направления исследования, разработка численных подходов, проектирование и оптимизация параметров таммовских наноструктур перед их созданием, постановка экспериментов. Синтез наноструктур выполнен А.Н. Шапошниковым, А.В. Каравайниковым, А.Р. Прокоповым, С.В. Томилиным. Измерения спектральных зависимостей коэффициента пропускания и эффекта Фарадея выполнены С.Д. Ляшко.

Результаты расчетов свойств таммовских наноструктур при наклонном падении, изложенные в Главе 4, получены автором самостоятельно или соавтором-студенткой А.П. Боковой под руководством автора. В исследованиях микрорезонаторной наноструктуры при наклонном падении автором проведены постановка целей и задач исследований, разработка численных подходов и постановка экспериментов. Общая концепция асимметричного эффекта Фарадея предложена Д.О. Игнатъевой. Автором велась ее доработка и определение оптимальной конфигурации наблюдения эффекта. Измерения спектральных зависимостей асимметричного и интенсивностного эффектов Фарадея выполнены С.Д. Ляшко и П.О. Капраловым.

В Главе 5 автором были выполнены исследования свойств образцов методами АСМ, МСМ и СБОМ. Проведен анализ результатов. Автор принимал непосредственное участие в выборе методик синтеза и МО измерениях. Методики синтеза были предложены и апробированы совместно с В.Н. Бержанским, А.Н. Шапошниковым и А.Р. Прокоповым. Синтез образцов осуществлялся А.В. Каравайниковым и А.Р. Прокоповым. МО измерения выполнены А.Н. Шапошниковым и С.Д. Ляшко.

Апробация основных результатов.

Результаты работы были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях, семинарах и симпозиумах: XXII Международной конференции “Взаимодействие ионов с поверхностью” (ВИП-2015, Москва, Россия, 2015); VII Байкальской международной конференции “Магнитные Материалы. Новые технологии” (ВМСММ-2016, пос. Листвянка Иркутской обл., Россия, 2016); 7th Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2017, Москва, Россия, 2017); XXIII международной конференции “Новое в магнетизме и магнитных материалах” (НМММ-XXIII, Москва, Россия, 2018); Двадцать пятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ–25, Ласпи, Крым, Россия, 2019); International conference “Scanning Probe Microscopy” (SPM, Екатеринбург, Россия, 2017, 2019); VI, VII Euro-Asian Symposium “Trends in MAGnetism” (EASTMAG-2016,

Красноярск, Россия, 2016; EASTMAG-2019, Екатеринбург, Россия, 2019); Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2019, Рим, Италия, 2019); Конференции-семинаре “Методы и средства научных исследований” (Москва, Россия, 2020); IV, V International Baltic Conference on Magnetism (IBCM-2021, Светлогорск, Россия, 2021; IBCM-2023, Светлогорск, Россия, 2023); International Conference “Functional Materials” (ICFM-2021, Алушта, Крым, Россия, 2021); XVI Международной научно-технической конференции “Оптические методы исследования потоков” (Москва, Россия, 2021); XIV международной конференции “Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации” (ARMIMP-2021, Астрахань, Россия, 2021); XXIII, XXIV, XXV, XXVI Международных симпозиумах “Нанозифика и наноэлектроника” (Нижний Новгород, 2019; 2020; 2021; 2022), Sixth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials (ASCO NANOMAT 2022, Владивосток, Россия, 2022); 3th, 4th, 5th, 6th, 8th, 9th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures “Saint Petersburg OPEN” (Санкт-Петербург, Россия, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021, 2022); XVI, XVII, XIX Международных конференциях “Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты” (МКЭЭЭ, Алушта, Крым, Россия, 2016, 2018, 2022).

Результаты работы также обсуждались на семинарах кафедры экспериментальной физики и научно-исследовательского центра функциональных материалов и нанотехнологий Физико-технического института ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского» и научных конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых учёных «Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского».

По материалам выступлений опубликовано 53 тезиса.

Публикации.

По теме диссертации опубликованы 26 статей в российских и зарубежных журналах, входящих в БД Scopus, Web of Science, RCSI и Перечень ВАК [A1 – A26], а также 4 патента на полезную модель [A27 – A30]. Результаты работы автора частично изложены в монографии [A31] в соавторстве с И.В. Дзедоликом и С.В. Томилиным, а также в главе книги [A32]. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, благодарностей и списков использованных источников, основных и дополнительных публикаций по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 216 страниц, включая 100 рисунков и 6 таблиц. Список использованных источников содержит 158 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении приведено обоснование актуальности диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «Фотонные наноструктуры: проектирование, синтез, исследование и применение» содержит краткий обзор научных результатов в области создания МО активных наноструктур, в которых возникновение МО эффектов обусловлено наличием слоев ВЗФГ. Показано влияние структурирования на формирование спектральных особенностей оптических и МО эффектов и приведены области использования наноструктур и ВЗФГ. В **параграфах 1.2, 1.3 и 1.4** приведено описание обобщенного матричного метода 4×4 и параметры слоев, используемые для расчета свойств наноструктур, описание экспериментальных методик синтеза и исследований структурно-морфологических, оптических и МО свойств.

В **Главе 2 «Наноструктуры с оптическим таммовским состоянием»** представлены оригинальные таммовские наноструктуры, сформированные на основе фотонного кристалла, однослойной или двухслойной пленки ВЗФГ и слоя Au или композитного слоя ($\text{SiO}_2\text{-Au}$). В таких структурах происходит возбуждение резонансов ОТС (или ТПП) внутри ФЗЗ. ТПП, связанная мода стоячих поверхностных электромагнитных волн и поверхностных плазмонных колебаний, в случае сплошного слоя Au может формироваться на любой длине волны внутри ФЗЗ. При этом длина волны моды ТПП зависит от толщины слоя, смежного со слоем Au. Свойства наноструктур со сплошным слоем Au описаны в **параграфе 2.2**:

$$\text{ГГГ} / [\text{TiO}_2 / \text{SiO}_2]^m / \text{M1} / \text{SiO}_2 / \text{Au}, \quad (1)$$

$$\text{ГГГ} / [\text{TiO}_2 / \text{SiO}_2]^m / \text{M1} / \text{M2} / \text{SiO}_2 / \text{Au}, \quad (2)$$

где M1 – слой ВЗФГ состава $\text{Bi}_{1,0}\text{Y}_{0,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{4,2}\text{Al}_{0,8}\text{O}_{12}$, M2 – слой ВЗФГ состава $\text{Bi}_{1,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{4,5}\text{Al}_{0,5}\text{O}_{12}$, SiO_2 – буферный слой SiO_2 , необходимый для сглаживания шероховатости границы раздела со слоем Au. В зависимости от числа пар слоев m и толщины слоя Au $h(\text{Au})$ МО добротность структур на резонансной длине волны моды ТПП $\lambda_{\text{ТРР}}$ будет различна. МО добротность определяется по формуле

$$Q_{\text{МО}} = -2 |\Theta_{\text{F}}| / \ln(K_{\text{t}}) [^\circ], \quad (3)$$

где Θ_{F} – угол фарадеевского вращения наноструктуры, K_{t} – коэффициент пропускания. МО добротность характеризует наноструктуру с точки зрения ее более эффективного применения. Наноструктуры с высокой $Q_{\text{МО}}$ обладают наиболее оптимальным соотношением реализуемых значений Θ_{F} и K_{t} . Как показывают расчеты (рис. 1), наноструктура (2) с двухслойной

пленкой оптической толщины $l(M1/M2) = (\lambda_{\text{ТРР}})$ является наиболее эффективной. Аналогичный результат был получен ранее для микрорезонаторных наноструктур [12]. С целью выявления особенностей моды ТПП и зависимости $Q_{\text{МО}}$ наноструктур от $h(\text{Au})$, было предложено рассмотреть свойства наноструктур (1) и (2) с $m = 7$ и со слоем Au градиентной толщины (рис. 2). Расчетные и экспериментальные зависимости спектров K_t и Θ_F от $h(\text{Au})$ для синтезированной наноструктуры (2) приведены на рис. 3 и 4. Аналогичные по характеру спектральные зависимости были получены для наноструктуры (1).

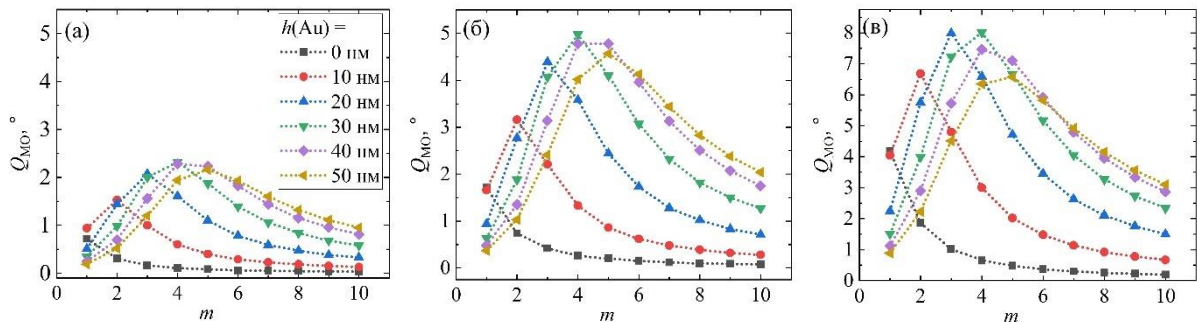


Рис. 1. Зависимости $Q_{\text{МО}}$ моды ТПП наноструктуры (1) с однослойной пленкой оптической толщины $l(M1) = \lambda_{\text{ТРР}}/2$ (а) и наноструктуры (2) с двухслойной пленкой $l(M1/M2) = \lambda_{\text{ТРР}}/2$ (б) и $l(M1/M2) = \lambda_{\text{ТРР}}$ (в). Расчетная резонансная длина волны $\lambda_{\text{ТРР}} = 655$ нм. Легенда одинакова для всех рисунков.

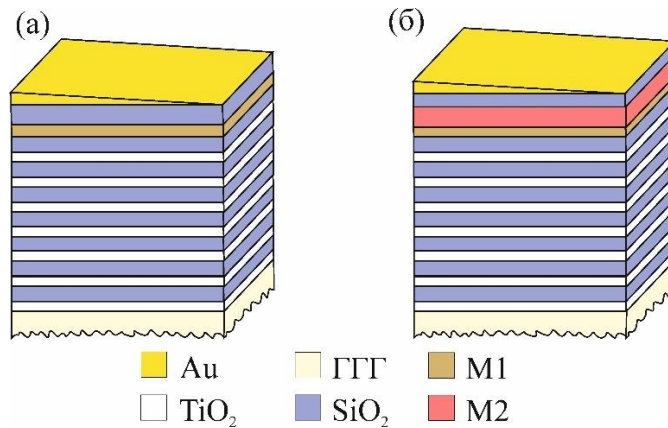


Рис. 2. Схематическое изображение синтезированных и исследованных наноструктур (1) (а) и (2) (б). Параметры структур: $m = 7$; толщины слоев оксида титана и оксида кремния $h(\text{TiO}_2) = 73$ нм и $h(\text{SiO}_2) = 115$ нм, соответственно; толщины однослойной магнитной пленки M1 в структуре (1) $h(M1) = 108$ нм и двухслойной магнитной пленки M1 / M2 в структуре (2) $h(M1/M2) = 233$ нм; толщины буферного слоя SiO_2 в структуре (1) $h_b(\text{SiO}_2) = 140$ нм и в структуре (2) $h_b(\text{SiO}_2) = 80$ нм. Градиент толщины слоя Au $h(\text{Au})$ – от 0 до 70 нм. Центр ФЗЗ – $\lambda_0 = 665$ нм.

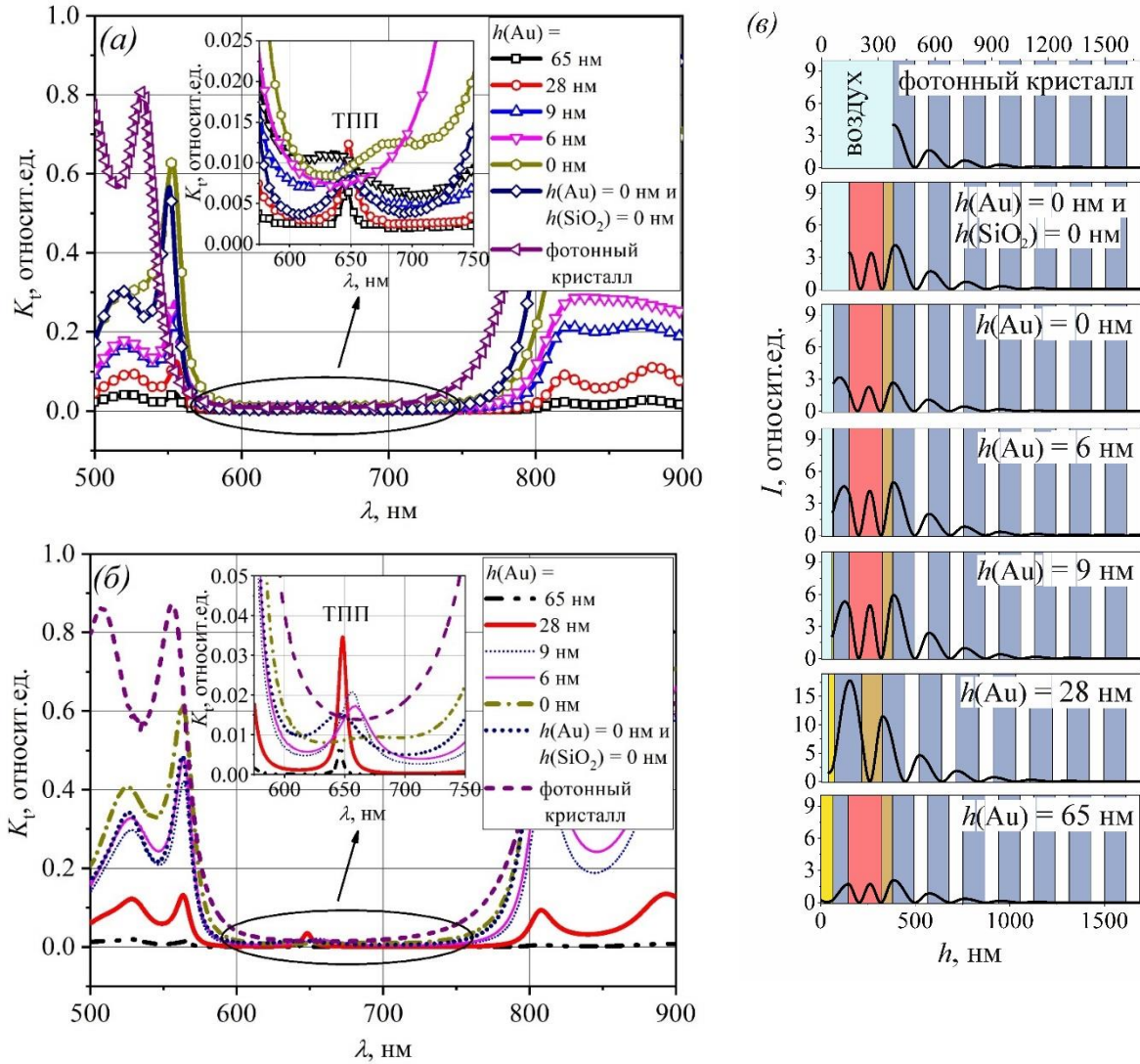


Рис. 3 Экспериментальные (а) и расчетные (б) спектры K_t наноструктур: фотонного кристалла $[\text{TiO}_2/\text{SiO}_2]^7$, фотонного кристалла со слоями M1 /M2 ($h(\text{Au}) = 0$ нм и $h(\text{SiO}_2) = 0$ нм) и таммовской наноструктуры (2) с разной $h(\text{Au})$ (0, 6, 9, 28 и 65 нм). (в) Рассчитанное пространственное распределение I внутри наноструктуры (2) со слоем Au разной толщины на $\lambda_{\text{ТПП}}$; фотонного кристалла $[\text{TiO}_2/\text{SiO}_2]^7$ с верхними слоями M1 / M2 и фотонного кристалла на λ_0 .

Максимальные значения K_t наблюдаются для конфигураций наноструктур с $h(\text{Au}) = 30$ нм. При данной толщине (рис. 3, в) максимальная интенсивность световой волны формируется в окрестности границ слоя Au и слоев M1 / SiO_2 или M1 / M2/ SiO_2 . Дополнительно данная $h(\text{Au})$ показала наиболее высокие значения $Q_{\text{МО}}$ структур с меньшим числом пар слоев фотонного кристалла (рис. 1, в). В связи с этим данную толщину можно считать оптимальной для формирования ТПП.

Для рассчитанных спектров K_t с увеличением $h(\text{Au})$ наблюдается «синий сдвиг» $\lambda_{\text{ТПП}}$, связанный с изменением оптической добротности резонанса ТПП. Однако, в эксперименте присутствуют, как и «красный»,

так и «синий» сдвиги ТПП резонанса в зависимости от $h(\text{Au})$. «Красный сдвиг» в экспериментальных спектрах связан с изменением оптических свойств слоя Au, вызванных происходящих с ростом толщины структурными изменениями: изменениями зернистости, шероховатости и несплошности. Кроме этого, данные факторы приводят к увеличению полуширины резонансного пика и уменьшению его амплитуды.

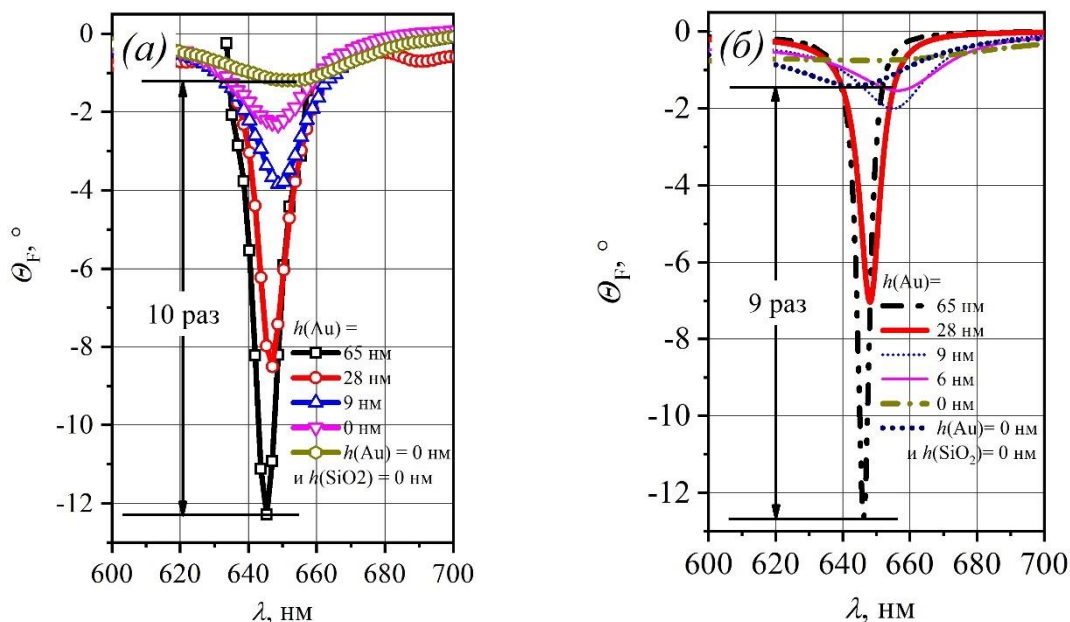


Рис. 4. Экспериментальные (а) и расчетные (б) спектры Θ_F наноструктур: фотонного кристалла со слоями M1 /M2 ($h(\text{Au}) = 0$ нм и $h(\text{SiO}_2) = 0$ нм) и таммовской наноструктуры (2) с разной $h(\text{Au})$ (0, 6, 9, 28 и 65 нм).

Угол Θ_F увеличивается с изменением $h(\text{Au})$ от 0 до 65 нм. Максимальные значения Θ_F таммовских наноструктур (1) и (2) были достигнуты для конфигураций с $h(\text{Au}) = 65$ нм на $\lambda_{\text{ТРР}} = 664$ нм $\Theta_F = -2,1^\circ$ и на $\lambda_{\text{ТРР}} = 645$ нм $\Theta_F = -12,3^\circ$, соответственно. Эксперимент и расчет показывают, что МО добротность резонансов $Q_{\text{МО}}$ растёт с увеличением $h(\text{Au})$ и наиболее оптимальными являются конфигурации структур с толщиной $h(\text{Au}) = 65$ нм. При этом наиболее выгодной является структура с двухслойной магнитной пленкой M1 / M2, так как она демонстрирует самую высокую $Q_{\text{МО}} = 5,01^\circ$, несмотря на низкие значения K_i , благодаря значительному усилению МО активности. Предложенные наноструктуры потенциально обладают наилучшими характеристиками в сравнении с таммовскими наноструктурами, предложенными и синтезированными ранее [7] ($[\text{SiO}_2/\text{ВЗФГ}]^5/\text{Au}$, $Q_{\text{МО}} = 0,58^\circ$).

Параграф 2.3 посвящен исследованию МО свойств наноструктур с композитным слоем ($\text{SiO}_2\text{-Au}$):

$$\text{КУ-1} / [\text{TiO}_2/\text{SiO}_2]^4 / \text{M1} / \text{M4} / (\text{SiO}_2\text{-Au}), \quad (4)$$

где KU-1 – подложка плавного кварца, $[\text{TiO}_2/\text{SiO}_2]^4$ – фотонный кристалл, M4 – слой ВЗФГ состава $\text{Bi}_{2,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_{4,2}\text{Ga}_{0,8}\text{O}_{12}$.

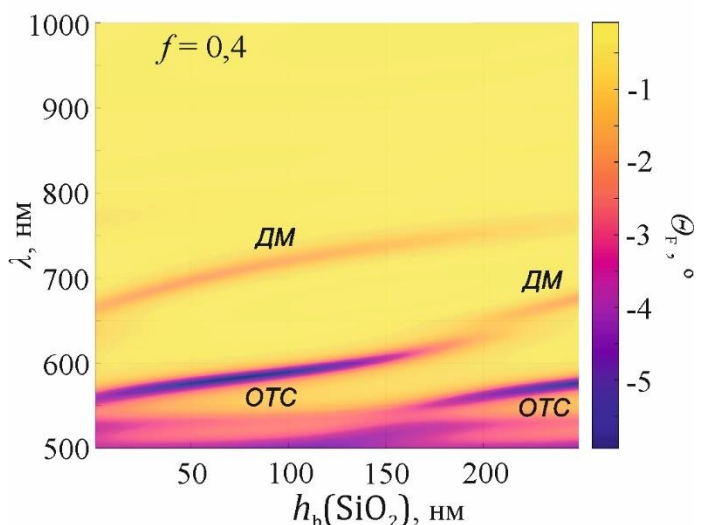


Рис. 5. Зависимости спектров Θ_F наноструктуры (4) от толщины верхнего буферного слоя SiO_2 $h_b(\text{SiO}_2)$ при $f = 0,4$.

В спектрах структуры в зависимости от объемной доли наночастиц в композитном слое f могут наблюдаться резонаторные дефектные моды (ДМ) или ОТС переходящие в резонаторные дефектные моды (рис. 5). При этом наибольшие значения Θ_F наблюдаются для резонансов в коротковолновом диапазоне.

Результаты Главы 2 представлены в работах [A2, A3, A27, A28, A31, A32].

Глава 3 «Гибридное состояние мод таммовского плазмон-поляритона и Фабри-Перо в наноструктурах на основе двухслойных пленок ферритов-гранатов» посвящена исследованию оригинальных таммовских наноструктур, демонстрирующих формирование в спектрах двух резонансных особенностей, соответствующих модам ТПП и Фабри-Перо. В параграфе 3.2 описаны характеристики микрорезонаторов Фабри-Перо, используемых для формирования таммовских наноструктур. Оптимизация наноструктур показала, что несмотря на поликристалличность двухслойной пленки, потенциально такие наноструктуры могут демонстрировать усиление эффекта Фарадея относительно используемой пленки 20-50 раз при значениях K_t от 14 до 40%. Для экспериментов были выбраны структуры с оптической толщиной магнитного слоя M1/M3 λ_R (M3 – слой ВЗФГ $\text{Bi}_{2,8}\text{Y}_{0,2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$). Предполагалось, что формирование таммовской наноструктуры на основе микрорезонатора позволит использовать достоинства микрорезонаторной структуры с целью повышения K_t и Q_{MO} таммовских наноструктур в целом.

В параграфе 3.3 изложены результаты исследований таммовской наноструктуры с градиентным по толщине слоем Au:

$$\text{ГТГ} / [\text{TiO}_2/\text{SiO}_2]^4 / \text{M1} / \text{M3} / [\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]^4 / \text{Au}. \quad (5)$$

Данная наноструктура представляет интерес, так как позволяет исследовать слабосвязанное состояние мод Фабри-Перо и ТПП, расположенных в разных областях спектра. Отличительным являлось то, что с увеличением $h(\text{Au})$ происходит усиление Θ_F мод Фабри-Перо и ТПП одновременно.

В параграфе 3.4 приведены результаты исследований таммовской наноструктуры

$$\text{ГГГ} / [\text{TiO}_2/\text{SiO}_2]^m / \text{M1} / \text{M3} / [\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]^m / \text{SiO}_2 / \text{Au}. \quad (6)$$

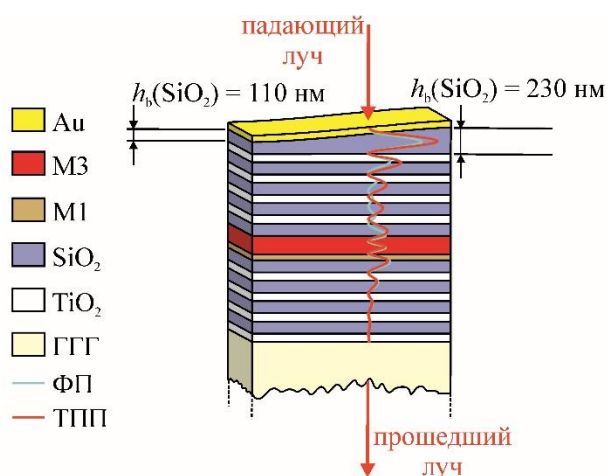


Рис. 6. Схематическое изображение синтезированной и исследованной наноструктуры (6) с диаграммами хода лучей, иллюстрирующими возбуждение мод Фабри-Перо (ФП) и ТПП (ТПП). Параметры наноструктуры: $h(\text{TiO}_2) = 73$ нм и $h(\text{SiO}_2) = 115$ нм; $h(\text{M1}) = 66$ нм и $h(\text{M3}) = 166$ нм; градиент $h_b(\text{SiO}_2)$ – от 120 до 230 нм; $h(\text{Au}) = 40$ нм.

В отличие от наноструктуры (5) в конфигурации (6) присутствует буферный слой SiO₂, изменением толщины которого возможно управлять положением моды ТПП внутри ФЗЗ. Как показывают эксперимент и расчет, моды ТПП и Фабри-Перо не совмещаются на одной длине волны, их резонансы расталкиваются.

Для экспериментальной реализации была выбрана конфигурация с $m = 4$ и $h(\text{Au}) = 40$ нм. МО активная наноструктура была синтезирована с градиентом толщины слоя SiO₂ (рис. 6) на основе микрорезонатора с $\lambda_0 = \lambda_R = 657$ нм. Результаты предварительного

моделирования свойств наноструктуры в зависимости от толщин верхних слоев – $h_b(\text{SiO}_2)$ и $h(\text{Au})$ представлены на рис. 7 и 8. С изменением $h_b(\text{SiO}_2)$ происходит сдвиг моды ТПП с коротковолнового на длинноволновый край ФЗЗ. Спектральное положение и амплитуды резонансов мод существенно видоизменены по сравнению со случаем их независимого возбуждения. Так, при пересечении мод в спектрах присутствует сдвиг резонанса Фабри-Перо, обусловленный связью с ТПП, а при $20 \text{ нм} \leq h(\text{Au}) \leq 30 \text{ нм}$ моды начинают расталкиваться на величину $\Delta\lambda = \lambda_R - \lambda_{\text{ТПП}}$ и в спектрах формируются два резонанса. Последнее связано с ростом оптической добротности моды ТПП с увеличением $h(\text{Au})$. Наиболее сильная гибридизация наблюдается для конфигураций с ближайшим спектральным расположением резонансов при $h_b(\text{SiO}_2) = 155$ нм ($h(\text{Au}) = 10$ нм) и $h_b(\text{SiO}_2) = 185$ нм ($h(\text{Au}) = 70$ нм). Следует отметить две особенности гибридного состояния. Во-первых, резонансное значение K_t гибридного состояния при пересечении резонансов значительно выше резонансных значений K_t мод ТПП или ФП без пересечения резонансов при той же $h(\text{Au})$. Во-вторых, значение Θ_F гибридного состояния

в случае, когда мода ТПП «совмещается» с модой Фабри-Перо, в два раза меньше по сравнению со значениями Θ_F в других случаях.

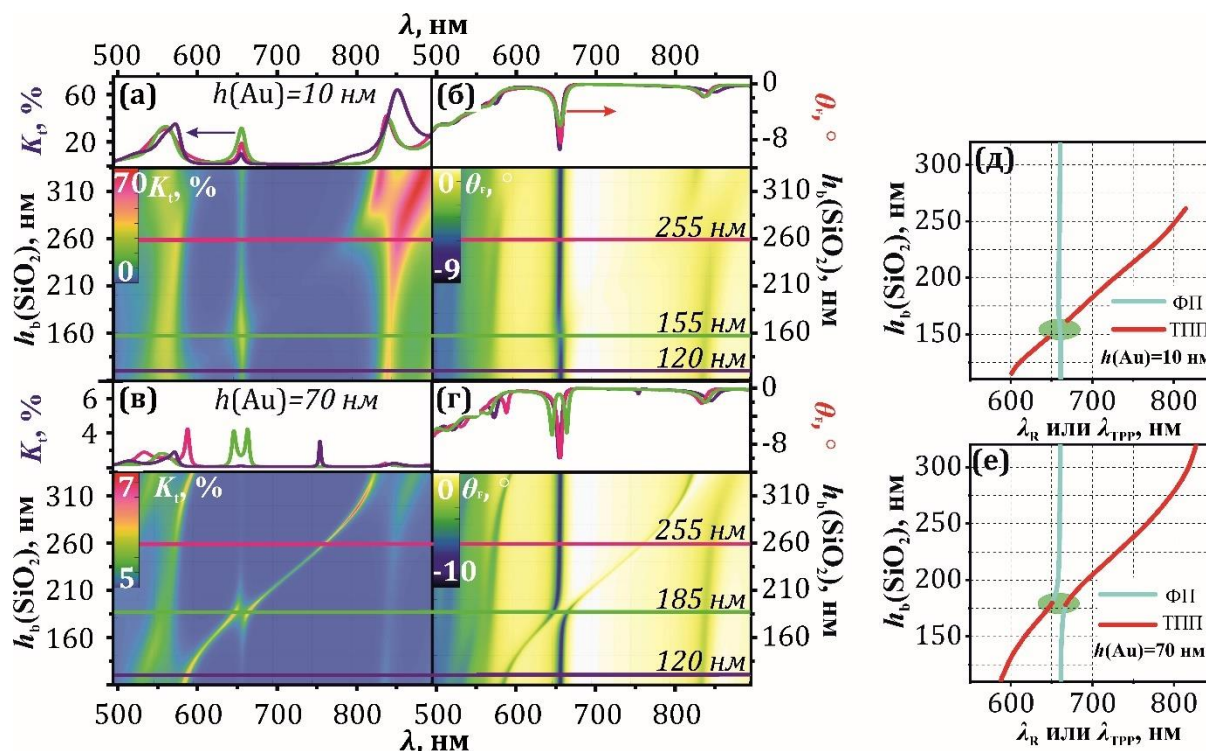


Рис. 7. Спектры K_t (а, в) и Θ_F (б, г) таммовской наноструктуры (б) с $h(\text{Au})$ 10 нм (а, б) и 70 нм (в, г) в зависимости от $h_b(\text{SiO}_2)$. Верхние графики представляют спектры, соответствующие сечениям того же цвета. Зависимости λ_R и $\lambda_{\text{ТПП}}$ от $h_b(\text{SiO}_2)$ (д, е).

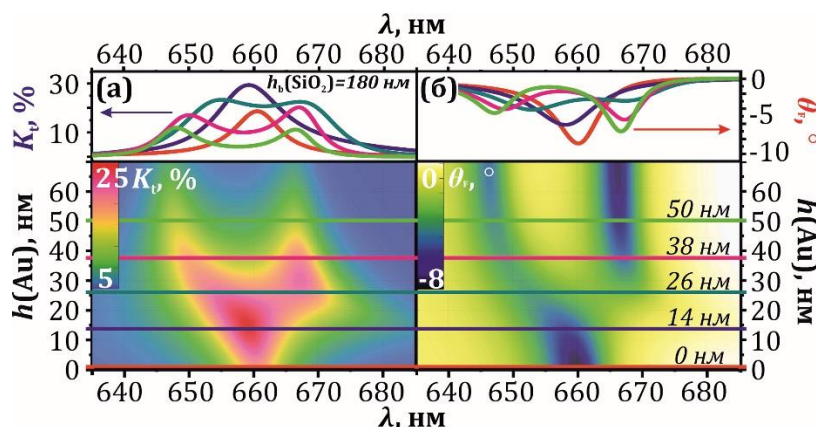


Рис. 8. Спектры K_t (а) и Θ_F (б) таммовской наноструктуры (б) с $h_b(\text{SiO}_2) = 180$ нм в зависимости от $h(\text{Au})$. Верхние графики представляют спектры, соответствующие сечениям того же цвета.

Спектры синтезированной наноструктуры в зависимости от $h_b(\text{SiO}_2)$ представлены на рис. 9.

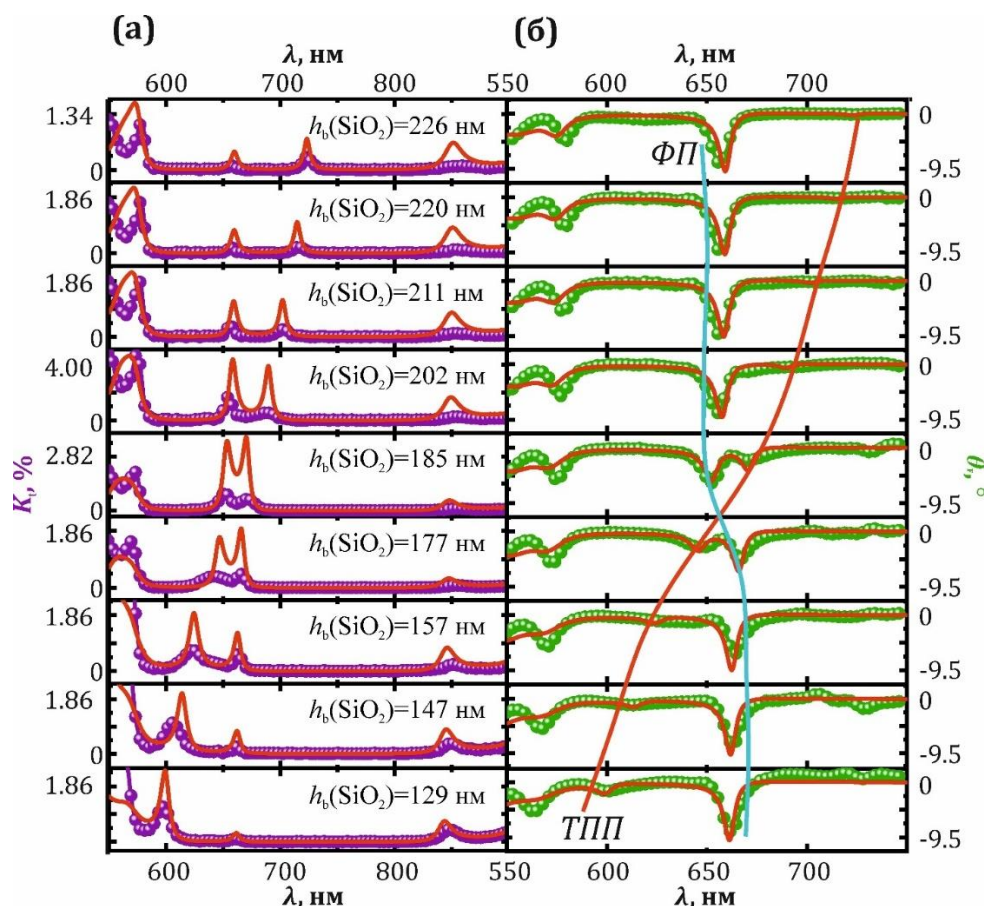


Рис. 9. Измеренные (символы) и рассчитанные (линии) спектры K_t (а) и Θ_F (б) синтезированной таммовской наноструктуры (б) в зависимости от $h_b(\text{SiO}_2)$. Значения K_t для расчетных спектров уменьшены в 5 раз. Значения $h_b(\text{SiO}_2)$ одинаковы для графиков (а) и (б). ФП и ТПП обозначают резонансы мод Фабри-Перо и ТПП, соответственно.

В экспериментальных спектрах заметно уширение резонансных пиков, а коэффициент пропускания мод ТПП и Фабри-Перо значительно меньше по отношению к модельным значениям (более чем в 5 раз). Частично несовпадение экспериментальных и модельных спектров могут быть связаны с зернистостью, шероховатостью, аномальной дисперсией оптических констант слоев ВЗФГ в коротковолновой области спектра и наличием градиента $h_b(\text{SiO}_2)$ в апертуре пучка при измерениях. Тем не менее, изменения резонансных значений K_t и Θ_F и спектрального положения мод подтверждаются экспериментальными данными. Усиление эффекта Фарадея порядка 8 – 17,5 раз в зависимости от $h_b(\text{SiO}_2)$ имеет место по отношению к случаю отдельной двухслойной пленки М1 / М3.

Чтобы прояснить поведение гибридной моды было проведено численное моделирование распределения интенсивности света внутри структуры для резонансных длин волн мод Фабри-Перо и ТПП (рис. 10).

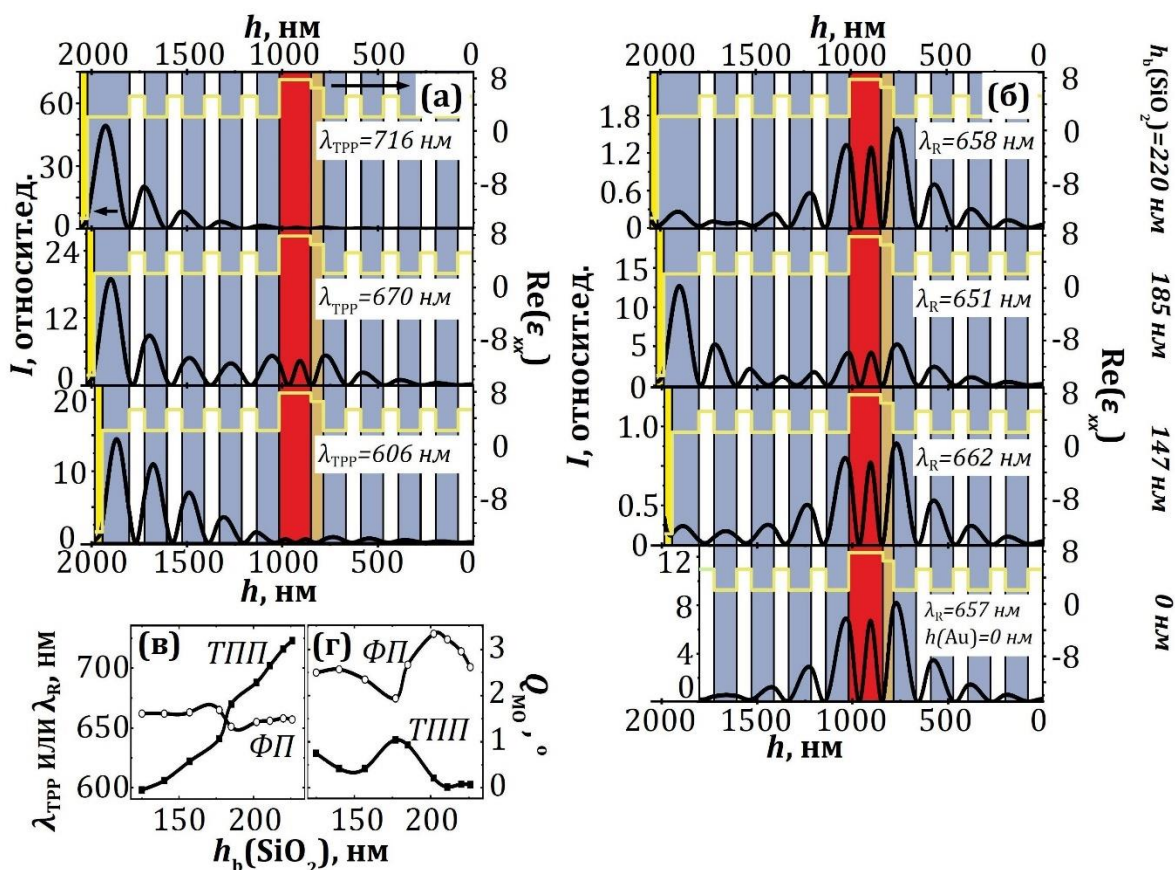


Рис. 10. Расчетное пространственное распределение I на резонансных длинах волн мод ТПП (а) и Фабри-Перо (б) внутри таммовской наноструктуры (б) с $h_b(\text{SiO}_2) = 220$ нм; 185 нм и 147 нм. На нижнем графике рисунка (б) показано распределение внутри микрорезонаторной наноструктуры. Значения $h_b(\text{SiO}_2)$ одинаковы для рисунков (а) и (б), расположенных на одном и том же уровне. Распределение действительной части диагональной компоненты тензора диэлектрической проницаемости внутри структуры также представлено сверху каждого графика. Предполагалось, что свет падает перпендикулярно поверхности структуры со стороны слоя Au. Подложка при расчете не учитывалась. Резонансные длины волн (в) и МО добротность (г) резонансов мод ТПП (ТПП) и Фабри-Перо (ФП) для структуры в зависимости от $h_b(\text{SiO}_2)$.

Гибридизация двух разных состояний предполагает образование смешанного состояния, обладающего одновременно характеристиками, присущими каждому из состояний в отдельности. Интенсивность для моды ТПП резко возрастает к границе раздела «верхний буферный слой SiO_2 — слой Au» и достигает максимума внутри слоя SiO_2 (Рис. 10, а; $h_b(\text{SiO}_2) = 220$ нм). Мода Фабри-Перо характеризуется локализацией электрического поля вблизи границ раздела или внутри магнитных слоев (Рис. 10, б; $h_b(\text{SiO}_2) = 220$ нм). Для конфигурации с $h_b(\text{SiO}_2) = 185$ нм распределение интенсивности для двух мод похоже и свидетельствует о наиболее сильной гибридизации (Рис. 10, а и б). Электромагнитная волна

локализована в двух разных областях кристалла одновременно. Поэтому, в спектрах резонансы проявляют «отталкивающее» поведение (рис. 7 – 9). Следует отметить, что отличительной чертой обсуждаемой структуры является изменение значений Θ_F резонансов, отношение которых можно рассматривать (только в нашем случае) как меру гибридизации:

$$r = \frac{\Theta_F(TПП)}{\Theta_F(ФП)}, \quad (7)$$

где $\Theta_F(TПП)$ и $\Theta_F(ФП)$ – углы фарадеевского вращения мод ТПП и Фабри-Перо, соответственно. Так, для конфигураций с $h_b(\text{SiO}_2) = 185$ нм и $h_b(\text{SiO}_2) = 220$ нм коэффициент гибридизации r составляет 0,68 и 0,025, соответственно. Гибридизация также влияет на значения Q_{MO} резонансов (рис. 10, в, г). Полученные значения Q_{MO} выше, чем у первой магнитофотонной таммовской структуры $[\text{SiO}_2/\text{ВЗФГ}]^5/\text{Au}$ [7]. Однако, значения Q_{MO} ниже Q_{MO} таммовской наноструктуры (2).

Следует отметить, что уникальные свойства структуры не ограничиваются преобразованием спектральных зависимостей эффекта Фарадея. Так, при моделировании свойств наноструктур (5) и (6) в зависимости от $h(\text{Au})$ и количества пар слоев m на подложке КУ-1 на отражение при нормальном падении были выявлены эффекты инверсии пиков угла полярного вращения Керра.

Результаты Главы 3 представлены в работах [А1, А4 – А13, А31, А32].

Глава 4 «Оптические и магнитооптические эффекты в наноструктурах при наклонном падении» посвящена исследованию свойств наноструктур при наклонном падении света или в геометрии Кречмана. **Параграф 4.2** описывает результаты моделирования свойств структур (1) и (2) с параметрами слоев соответствующим параметрам слоев синтезированных конфигураций при $h(\text{Au}) = 28$ нм. Показано, что при нормальном падении спектры зависимостей s- и p-поляризаций совпадают, а при наклонном падении становятся различными. Для p-поляризации происходит увеличение K_t и уменьшение Θ_F , а для s-поляризации – наоборот. Такое поведение полностью аналогично изменениям, происходящим для микрорезонаторных наноструктур. Стоит отметить, что изменения Θ_F очень значительны для s-поляризации. Так для наноструктуры (2) при угле падения $\theta = 60^\circ$ $\Theta_F = -51,5^\circ$ при $K_t = 0,2\%$, что соответствует $Q_{MO} = 14,2^\circ$.

В **параграфе 4.3** приведены результаты моделирования свойств конфигураций структуры (6) с $h_b(\text{SiO}_2) = 185$ нм и $h_b(\text{SiO}_2) = 220$ нм. Показано, что наличие гибридизации мод ТПП и Фабри-Перо влияет на угловые зависимости резонансных значений и спектральных положений резонансов. Рассмотрим угловые изменения спектров в диапазоне углов падения от 0 до 60° для конфигурации с $h_b(\text{SiO}_2) = 220$ нм (рис. 11).

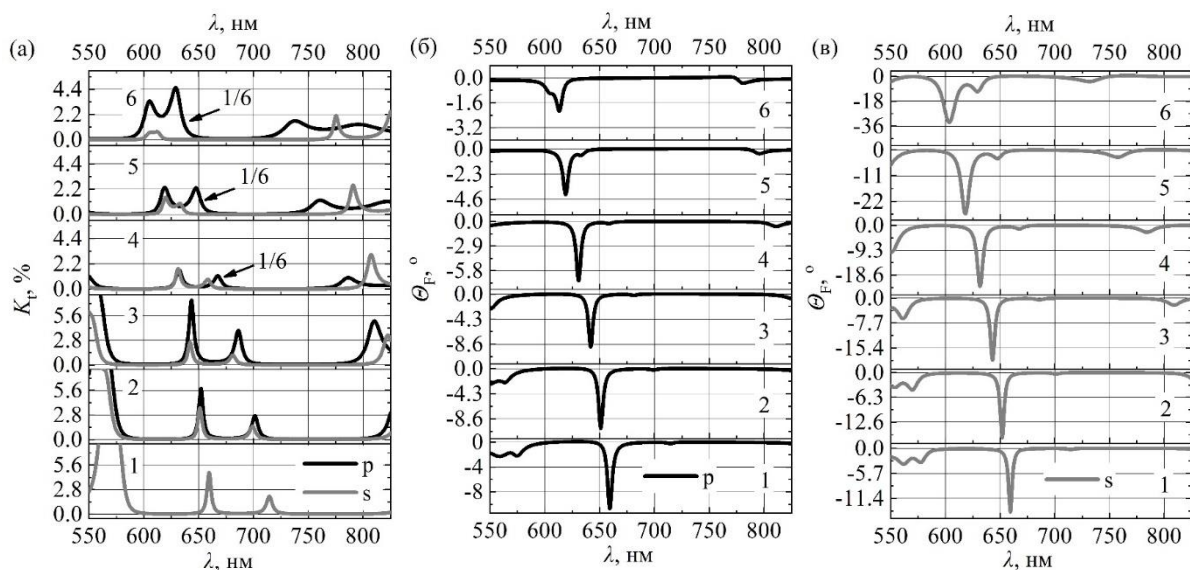


Рис. 11. Расчетные зависимости спектров K_t (б) и Θ_F (в, г) наноструктуры (б) с $h_b(\text{SiO}_2) = 220$ нм от угла падения и поляризации световой волны: 1 – $\theta = 0^\circ$; 2 – $\theta = 20^\circ$; 3 – $\theta = 30^\circ$; 4 – $\theta = 40^\circ$; 5 – $\theta = 50^\circ$; 6 – $\theta = 60^\circ$.

Такая конфигурация интересна с той точки зрения, что сдвиг резонансных длин волн мод $\lambda_{\text{ТРР}}$ и λ_R с увеличением угла падения происходит по-разному для р- и s-поляризованного света. Для s-поляризации при θ более 50° происходит пересечение $\lambda_{\text{ТРР}}$ и λ_R (рис. 11, а). Данный феномен связан с тем, что добротности мод ТПП и Фабри-Перо различны для р- и s-поляризованного света. Добротность моды Фабри-Перо выше для s-поляризации, при этом она остается высокой и по сравнению с добротностью моды ТПП – в результате, они пересекаются и расталкиваются на более меньшее расстояние, чем в случае с р-поляризацией. В результате различия $\lambda_{\text{ТРР}}$ и λ_R для р- и s-поляризованного света длины волн мод в спектрах Θ_F отличаются от длин волн мод в спектрах K_t (рис. 11, б, в).

В параграфе 4.4 рассмотрены таммовские наноструктуры с точки зрения их применения в качестве чувствительных сенсоров технического и медико-биологического применения. Приведено сравнение двух наноструктур с ТПП и с гибридным состоянием мод ТПП и Фабри-Перо:

$$[\text{SiO}_2 / \text{TiO}_2]^m / [\text{SiO}_2]^2 / [\text{TiO}_2 / \text{SiO}_2]^m / \text{M1} / \text{M3} / \text{SiO}_2 / \text{Au} \quad (8)$$

$$[\text{SiO}_2 / \text{TiO}_2]^{2m} / \text{SiO}_2 / \text{M1} / \text{M3} / \text{SiO}_2 / \text{Au}, \quad (9)$$

Показано, что гибридизация мод и введение в структуру немагнитного дефектного слоя $[\text{SiO}_2]^2$ (структура (8)) приводит к увеличению $Q_{\text{МО}}$ конфигураций с m в диапазоне от 3 до 6. Функциональные свойства структуры с гибридным состоянием лучше за счёт увеличения K_t резонансов мод.

Результаты расчета спектров структур в конфигурации Кречмана показаны на рис. 12. Видно, что в результате гибридизации мод ТПП и ППП резонанс ТПП испытывает сильные изменения амплитуды, которые можно использовать для регистрации изменений показателя преломления среды. Наличие моды Фабри-Перо приводит к увеличению чувствительности резонанса ТПП к изменению показателя преломления среды.

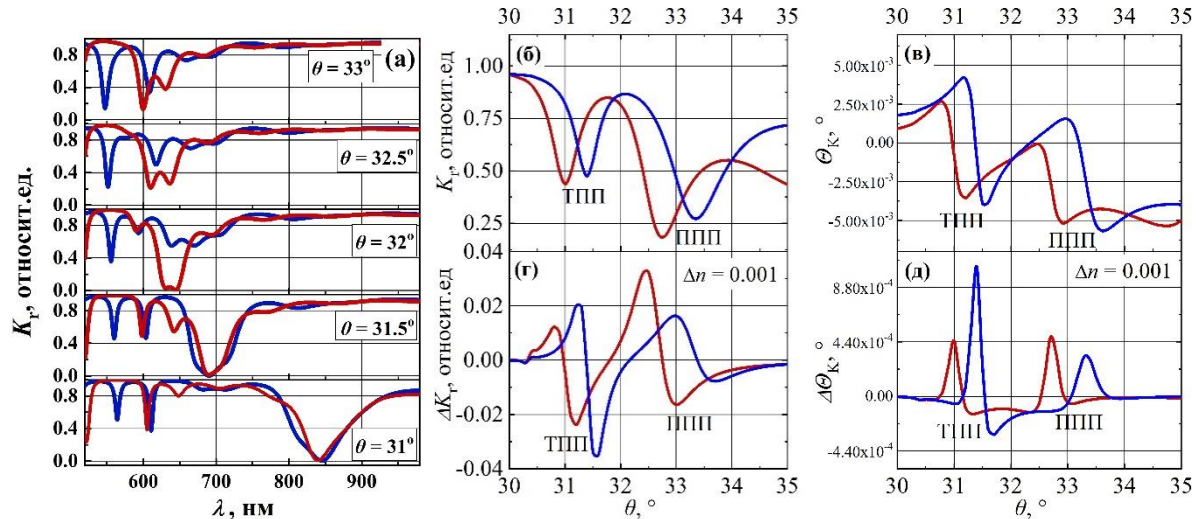


Рис. 12. Сравнение спектров коэффициента отражения K_r р-поляризованной электромагнитной волны наноструктур (8) и (9) при разных значениях угла θ (а). Угловые зависимости K_r (б) и угла вращения при полярном эффекте Керра θ_K (в) наноструктур (8) (синие линии) и (9) (красные линии) при $\lambda = 605$ нм и их изменения ΔK_r (г) и $\Delta \theta_K$ (д) при $\Delta n = 10^{-3}$.

Параграф 4.5 описывает результаты исследований двух МО эффектов, возникающих при наклонном падении света с произвольной (s + p) поляризацией в микрорезонаторной наноструктуре, сформированной из слоев $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (СГГ) и $\text{Bi}_{2,97}\text{Er}_{0,03}\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{O}_{12}$ (М5):

$$\text{ГГГ} / [\text{М5} / \text{СГГ}]^6 / 2\text{М5} / [\text{СГГ} / \text{М5}]^6. \quad (10)$$

Для обнаружения эффектов были использованы две конфигурации с разным направлением намагничивания (рис. 13).

Широко известно, что эффект Фарадея заключается в повороте плоскости поляризации линейно-поляризованного света при прохождении через материал, находящийся во внешнем магнитном поле. Эффект является линейным по намагниченности, поэтому θ_F для состояний с противоположными направлениями намагниченностей имеют противоположный знак и равны по модулю. В случае же асимметричного эффекта Фарадея θ_F для противоположных магнитных состояний различаются не только по знаку, но и по абсолютной величине.

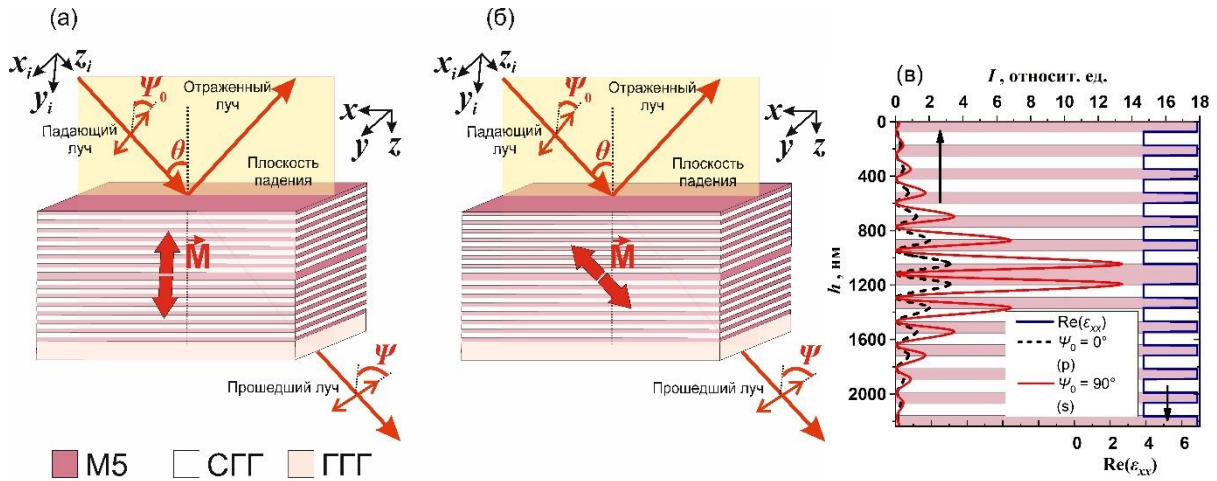


Рис. 13. Схематическое изображение исследуемой наноструктуры (10) в двух геометриях наблюдения эффектов: асимметричный эффект Фарадея, $\theta = 63^\circ$ (а) и интенсивный эффект Фарадея, $\theta = 60^\circ$ (б). Ψ_0 – угол между плоскостью падения и вектором поляризации. Параметры наноструктуры: $\lambda_0 = \lambda_R = 775$ нм; $h(\text{M5}) = 75$ нм и $h(\text{СГГ}) = 100$ нм. (в) Распределение I р- и s-поляризованного света внутри наноструктуры на $\lambda_R = 721$ нм, $\theta = 60^\circ$.

Эффект может быть охарактеризован углом асимметричного фарадеевского вращения:

$$\Delta\Theta_F = \Theta_{F(+M_z)} - (-\Theta_{F(-M_z)}), \quad (11)$$

где $\Theta_{F(+M_z)}$ и $\Theta_{F(-M_z)}$ – углы фарадеевского вращения для противоположных направлений намагниченности относительно оси z . При расчете значений Θ_F оптическое вращение было исключено вычетом из значений углов вращения в присутствии намагниченности $\Theta(+M_z)$ и $\Theta(-M_z)$ значений углов вращения при отсутствии намагниченности $\Theta(M_z=0)$. Для реализации экспериментального наблюдения асимметричного эффекта Фарадея был выбран угол падения $\theta = 63^\circ$. При данном угле падения мода Фабри-Перо наблюдается на $\lambda_R = 716$ нм (рис. 14, а). Мода Фабри-Перо для фиксированной поляризации с $\Psi_0 = 70^\circ$ сопровождается ярко выраженным пиком в спектрах Θ_F с максимальным резонансным значением $\Theta_F \sim 20^\circ$ (рис. 14, б), которое обеспечивает высокое значение $Q_{\text{МО}} = 42,6^\circ$. Именно для данной поляризации наблюдалось значение $\Delta\Theta_F = 5,5^\circ$, которое составляет 30% от абсолютного значения Θ_F . Как показали расчеты и эксперимент (рис. 15), значения $\Delta\Theta_F$ существенно зависят от поляризации Ψ_0 и наибольший эффект для данного угла падения будет наблюдаться при $\Psi_0 = 80^\circ$ $\Delta\Theta_F = 7,5^\circ$. Такое необычное асимметричное поведение фарадеевского вращения можно интерпретировать как появление четных по намагниченности членов, описывающих значения Θ_F наноструктуры.

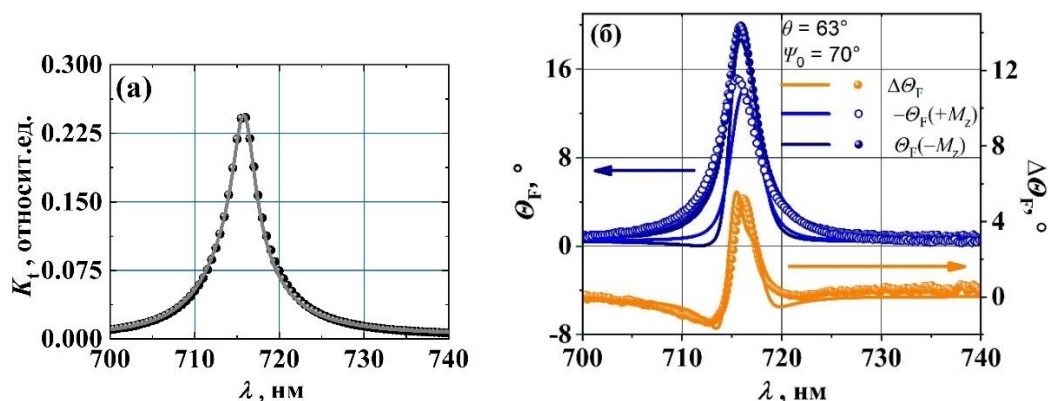


Рис. 14. Спектры K_t (а) и Θ_F и $\Delta\Theta_F$ (б) микрорезонаторной наноструктуры (10) при $\theta = 63^\circ$ и $\Psi_0 = 70^\circ$. Экспериментальные данные представлены символами, расчетные – линией.

Кроме асимметричного эффекта Фарадея при наклонном падении света с произвольной (s + p) поляризацией возникает интенсивный МО эффект, который может быть описан величиной:

$$\delta_T = \frac{2 \cdot (K_t(+M_{z_i}) - K_t(-M_{z_i}))}{K_t(+M_{z_i}) + K_t(-M_{z_i})} \cdot 100\%, \quad (12)$$

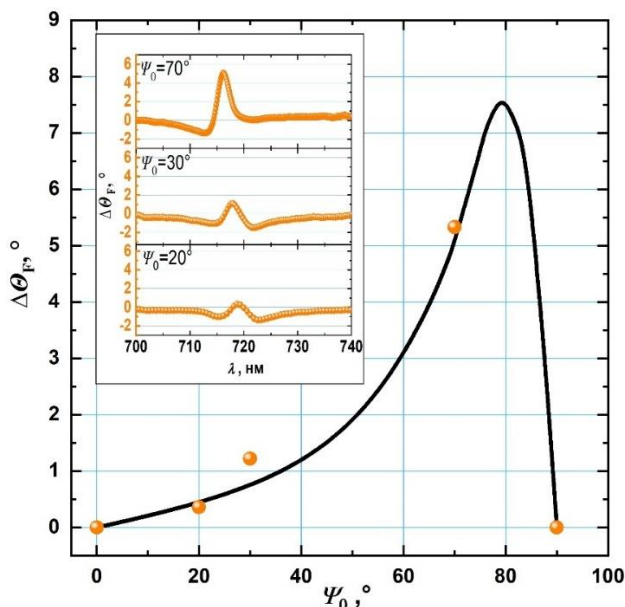


Рис. 15. Поляризационная зависимость резонансного значения $\Delta\Theta_F$ для $\theta = 63^\circ$. Экспериментальные данные представлены символами, расчетные – линией.

Фарадея достигает 6% для поляризаций $\Psi_0 = 60^\circ$ и $\Psi_0 = 120^\circ$ и обращается в нуль для $\Psi_0 = 0^\circ$ и $\Psi_0 = 90^\circ$ (рис. 16). Интенсивный эффект Фарадея демонстрирует линейную зависимость от намагниченности.

где $K_t(+M_{z_i})$ и $K_t(-M_{z_i})$ – коэффициенты пропускания наноструктуры для двух противоположных ориентаций вектора намагниченности, параллельных волновому вектору света.

Эффект был рассчитан и экспериментально исследован при $\theta = 60^\circ$. Для данного угла падения мода Фабри-Перо наблюдается на $\lambda_R = 721$ нм. Резонансное значение K_t существенно зависит от поляризации и плавно изменяется в 4 раза от $K_t \sim 82\%$ при $\Psi_0 = 0^\circ$ до $K_t \sim 17\%$ при $\Psi_0 = 90^\circ$. Модуль интенсивного эффекта

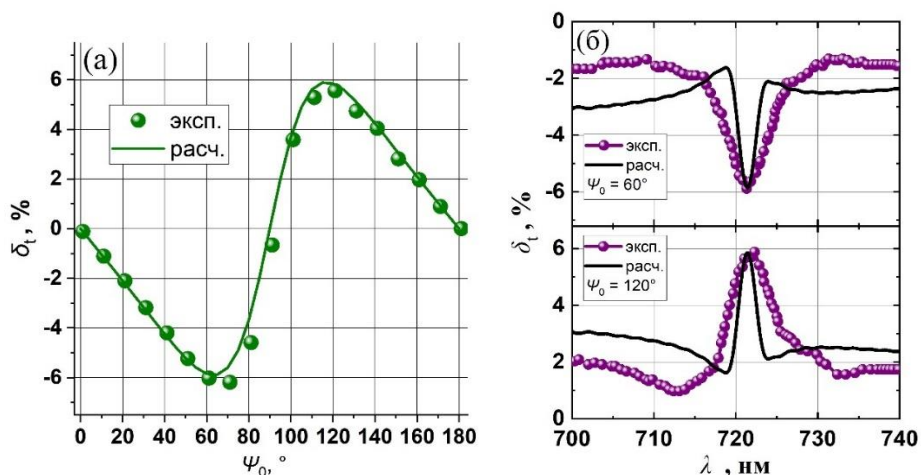


Рис. 16. Экспериментальные (символы) и расчетные (линии) зависимости δ_T наноструктуры (10): (а) на $\lambda_R = 721$ нм для разных Ψ_0 ; (б) в окрестности резонанса моды Фабри-Перо при разных Ψ_0 : 60° и 120° . $\theta = 60^\circ$.

Основным механизмом эффектов является различие коэффициентов отражения зеркал Брэгга микрорезонаторной наноструктуры для р- и s-поляризованного света. S-поляризация захватывается и локализуется внутри наноструктуры сильнее, чем р-поляризация (рис. 13, в). Наличие разницы приводит к поляризационной зависимости добротности моды Фабри-Перо и резонансных значений K_t и Θ_F . Для р-поляризованного света по мере того, как увеличивается угол падения и зеркала, окружающие резонатор, становятся более прозрачными, резонансный пик в спектрах уширяется, и его оптическая добротность уменьшается. При этом резонансное значение K_t увеличивается. Для s-поляризации, наоборот, с увеличением угла падения резонанс сужается, и K_t уменьшается, резонансные значения Θ_F увеличиваются. Поскольку величина Θ_F пропорциональна добротности резонанса, то угол поворота Θ_F для s-поляризованного света значительно больше угла поворота Θ_F для р-поляризованного света. Поэтому, если плоскость поляризации света с промежуточной начальной поляризацией Ψ_0 испытывает МО поворот в сторону s-поляризованного состояния, то Θ_F дополнительно усиливается и K_t уменьшается за счет увеличения добротности моды Фабри-Перо, а МО вращение в противоположном направлении (в сторону р-поляризованного состояния) приводит к уменьшению Θ_F и увеличению K_t за счет уменьшения добротности моды Фабри-Перо.

Результаты Главы 4 представлены в работах [A2, A4, A9, A14, A15, A29 – A31].

Глава 5 «Структурно-морфологические особенности магнитооптически активных диэлектрических слоев наноструктур»

посвящена экспериментальным исследованиям свойств слоев и двухслойных пленок ВЗФГ в зависимости от условий синтеза.

Пленки ВЗФГ были получены методом реактивного ионно-лучевого распыления. Мишени для распыления были изготовлены по традиционной керамической технологии. Процесс осаждения слоев происходил в смеси аргона и кислорода на холодные подложки гадолиний галлиевого граната (ГГГ), кальций-магний-цирконий-гадолиний-галлиевого граната (КМЦГГГ), кальций-ниобий-галлиевого граната (КНГГ) кристаллографической ориентации (111) и плавленого кварца КУ-1. Осажденные слои были аморфными и с целью их кристаллизации применялся отжиг на воздухе при атмосферном давлении и температурах T_a более 600°C . Использование исследуемых двухслойных пленок ВЗФГ позволяет преодолеть технологические ограничения осаждения и кристаллизации слоев граната с высоким содержанием Вi на негранатовых слоях, например, SiO_2 , что приводит к улучшению характеристик наноструктур в целом. В работах [12, 13] была предложена следующая методика синтеза двухслойной пленки. На негранатовый слой осаждают ВЗФГ с низким содержанием Вi (до 1 ат./ф.е.) и отжигают при оптимальной температуре. Затем уже на сформированный первый слой напыляют второй слой с высоким содержанием Вi (выше 1,5 ат./ф.е.) и подвергают отжигу уже двухслойную пленку при другой оптимальной температуре с целью кристаллизации второго слоя. Стоит отметить, что формирования гранатовой фазы не происходит, если слой ВЗФГ с высоким содержанием Вi напылять и отжигать на поверхности негранатового слоя, например, SiO_2 . Аналогично, было получено, что слой ВЗФГ с низким содержанием Вi (до 1 ат./ф.е.) на поверхности негранатового слоя кристаллизуется только при толщинах $h > 60$ нм. В связи с этим, стало актуально исследование слоев ВЗФГ с $h < 60$ нм. В **параграфе 5.2.1** с использованием методов РЭМ и АСМ представлен механизм формирования слоев ВЗФГ на гранатовых (ГГГ) и негранатовых (КУ-1) подложках. Рассмотрены две серии образцов: состава $\text{Vi}_{1,0}\text{Y}_{0,5}\text{Gd}_{1,5}\text{Fe}_{4,2}\text{Al}_{0,8}\text{O}_{12}$ (M1) h от 18 до 110 нм на КУ-1 и состава $\text{Vi}_{2,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_{4,2}\text{Ga}_{0,8}\text{O}_{12}$ (M4) h от 30 до 110 нм на ГГГ. Слой M1 на КУ-1 формируется круглыми областями-островками, которые представляют собой срастающиеся агрегаты и агломераты наноразмерных кристаллитов (средний размер $\text{AGS} = 54$ нм, рис. 17, а). При $h \leq 20$ нм такие области в слое отсутствуют и слой является даже после кристаллизации аморфным. При $20 \text{ нм} \leq h \leq 55$ нм области начинают зарождаться и расти в размерах, но остаются изолированными друг от друга. При этом появляется ненулевое фарадеевское вращение. При $h > 55$ нм островки начинают перекрываться и срастаются, формируя сплошную пленку. На границах островков появляются более крупные кристаллиты. В этом диапазоне толщин удельный угол фарадеевского вращения α_F возрастает на 50% (рис. 17, б).

Формирование слоев M4 (как и ВЗФГ других составов) на поверхности подложек со структурой граната происходит по-другому. Наноразмерные кристаллиты равномерно распределяются по поверхности

даже в случае наноразмерных толщин слоев (рис. 18). С утолщением слоя происходит рост AGS от 45 до 75 нм. Значение α_F увеличивается на 40% при изменении толщины слоя от 30 до 110 нм.

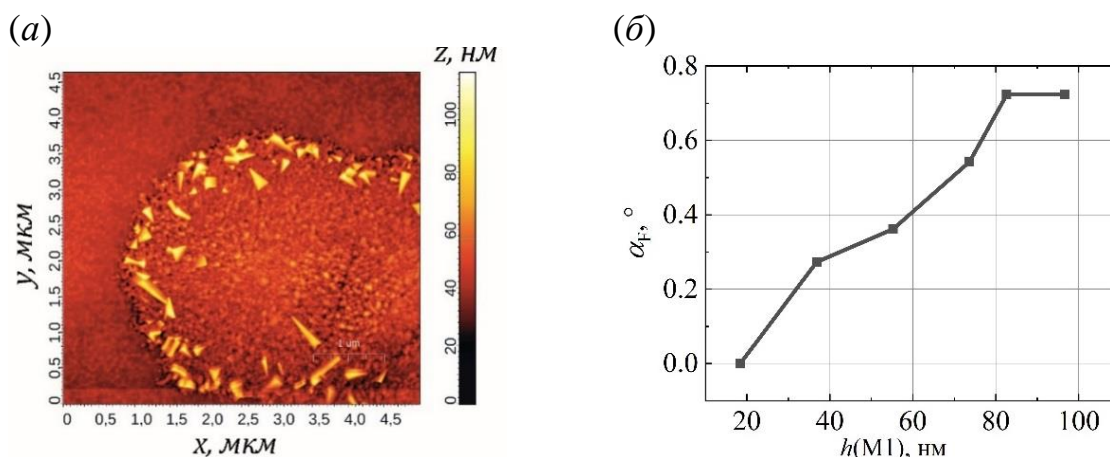


Рис. 17. АСМ-изображения поверхности слоя М1 на КУ-1, $h(M1) = 55$ нм (а). Зависимость абсолютного значения удельного угла фарадеевского вращения α_F пленок М1 от толщины $h(M1)$ на КУ-1 при $\lambda = 655$ нм (б).

Согласно предыдущим исследованиям [12 – 14], при длительности отжига $\tau_a = 20$ мин оптимальная T_a для слоев ВЗФГ М4, М1 и $Bi_{1,5}Gd_{1,5}Fe_{4,5}Al_{0,5}O_{12}$ (М2) находится в диапазоне от 650 до 700°C. Режим отжига с T_a в диапазоне от 650 до 700°C и $\tau_a = 20$ мин будем называть «длительным низкотемпературным» отжигом (ДНО).

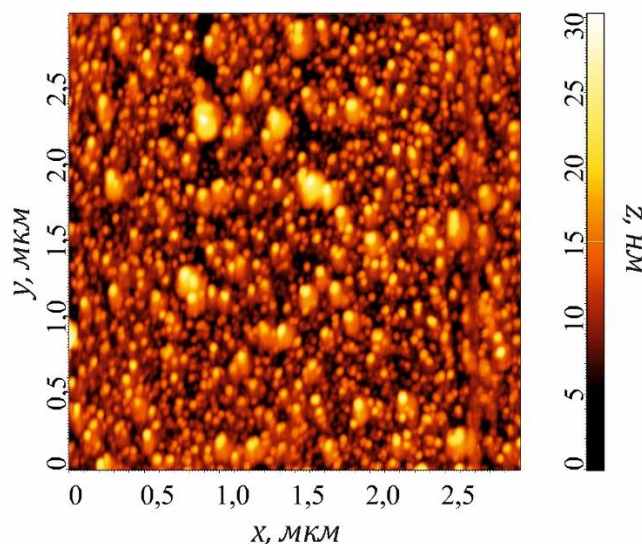


Рис. 18. АСМ-изображение слоя М4 на ГГГ, $h(M4) = 35$ нм.

доменной структуры, а оптимальная T_a БВО составляет 800°C. Исследование двухслойных пленок М1 / М2 на подложке ГГГ показало также увеличение размеров кристаллитов и более развитую поверхность для

В параграфе 5.2.2 представлены результаты исследований влияния на свойства слоев и двухслойных пленок ВЗФГ режима отжига с T_a более 750°C и $\tau_a = 3$ мин, который далее будем называть «быстрым высокотемпературным» отжигом (БВО). На примере исследования слоев М4 на ГГГ и КМЦГГ показано (таблица 1), что повышение T_a БВО от 750 до 850°C приводит к увеличению размеров кристаллитов и периода

слоев, подвергнутых БВО, по сравнению со слоями, подвергнутых ДНО, что свидетельствует о быстром росте кристаллитов при БВО.

Таблица 1. Параметры слоев М4, синтезированных на подложках ГГГ и КМЦГГГ при разных температурах БВО

Подложка	Шифр образца	T_a , °C	θ_F , °	α_F , °/мкм	$2W$, мкм	H_C , Э	RMS , нм	R_{max} , нм	AGS , нм
КМЦГГГ	М4–750(С)	750	0,39	3,25	2,09	548	6,7	46,5	85
	М4–800(С)	800	0,44	3,67	2,61	487	8,8	68,9	105
	М4–850(С)	850	0,34	2,83	2,66	383	15,4	93,0	150
ГГГ	М4–750(Г)	750	0,40	3,33	2,52	682	5,6	36,8	95
	М4–800(Г)	800	0,43	3,58	2,66	609	7,6	59,8	110
	М4–850(Г)	850	0,35	2,92	3,29	557	13,5	86,7	175

Примечание: θ_F – угол фарадеевского вращения, $2W$ – ширина доменной структуры, H_C – коэрцитивная сила; RMS – среднеквадратичная шероховатость; R_{max} – размах высот на АСМ-изображении.

С целью эффективной кристаллизации пленки М1 / М2 на слоях SiO₂ или кварцевых подложках КУ-1, было предложено использовать ДНО для первого слоя М1 и БВО для второго слоя М2. Кристаллизация с применением БВО второго слоя М2 приводит к росту α_F в сравнении с образцами М1 / М2 на ГГГ, подвергнутых только ДНО или БВО.

В параграфе 5.3 рассматриваются свойства слоя состава $Bi_{2,8}Y_{0,2}Fe_5O_{12}$ (М3), синтезированного на ГГГ, КНГГ и пленке ГГГ / М1. Использование подслоя М1 приводит к уменьшению RMS (с 7,6 до 4 нм). При этом происходит рост AGS (с 90 до 150 нм). Исследования методом МСМ и СБОМ показали, что слой М3 обладает лабиринтной доменной структурой с $2W = 0,5$ мкм и образцы состоят из кристаллитов, способных перемагничиваться МСМ-зондом.

В параграфе 5.4 с целью снижения шероховатости МО активных наноструктур и исключения деградации ВЗФГ при повторных отжигах предложена методика «закрытой» кристаллизации ВЗФГ. Для исследований были синтезированы слой М2 и двухслойная плёнка М2 / SiO₂ на подложках ГГГ. Толщины слоев составили $h(M2) = 140$ нм и $h(SiO_2) = 100$ нм. Режим отжига – ДНО. Характер морфологии поверхности образцов (рис. 19) указывает на образование агломератов кристаллитов в слоях ВЗФГ. В

случае применения совместного кристаллизационного отжига слоя ВЗФГ и расположенного над ним слоя SiO_2 значения параметров шероховатости слоя SiO_2 меньше в 3–5 раз, чем значения тех же параметров для слоя ВЗФГ (таблица 2).

Таблица 2. Характеристики слоя M2 и двухслойной пленки M2 / SiO_2 на подложке ГГГ

Шифр образца	$\Theta_F, ^\circ$	$\alpha_F, ^\circ/\text{мкм}$	K_P , относит.ед	H_C , Э	RMS , нм
M2	0,43	3,07	0,73	199	7,6
M2 / SiO_2	0,32	2,29	0,6	210	1,4

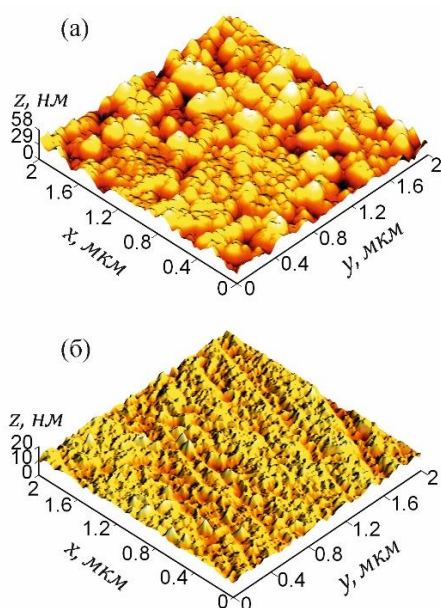


Рис. 19. АСМ-изображения поверхности слоя M2 (а) и двухслойной пленки M2 / SiO_2 (б) на ГГГ.

В случае сравнения поверхности слоя SiO_2 на слоях ВЗФГ, кристаллизованных отдельно на воздухе и совместно под SiO_2 , RMS снижается только в 2–3 раза. Удельное фарадеевское вращение α_F граната при закрытой кристаллизации без доступа кислорода снижается на 25% по сравнению с кристаллизацией на воздухе, что обусловлено изменением интерференционных условий на толщине двухслойной пленки по сравнению с единичным слоем.

Результаты Главы 5 представлены в работах [A16 – A26].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В данной диссертации установлены закономерности изменений известных и появления новых оптических и МО эффектов в фотонных наноструктурах и слоях магнитоактивных ВЗФГ в зависимости от условий синтеза, структурных параметров и геометрии наблюдения. Впервые получены следующие результаты:

1. Предложены модели оригинальных и эффективных для фотонных устройств магнитоактивных таммовских наноструктур:

- наноструктур, сформированных на основе однослойной или двухслойной пленок ВЗФГ, размещенных между фотонным кристаллом и слоем Au;

- наноструктур, сформированных на основе микрорезонаторной наноструктуры с двухслойной пленкой ВЗФГ и слоя Au;

- наноструктуры, сформированных на основе двухслойной пленки ВЗФГ, размещенной между микрорезонаторной не МО активной наноструктуры и слоя Au.

Предложенные модели наноструктур демонстрируют значения МО добротности выше известных аналогов таммовских наноструктур.

2. Выявлены зависимости оптических и МО эффектов (эффекта Фарадея) в оригинальных магнитоактивных таммовских наноструктурах от параметров функционального металлического или металл-диэлектрического слоя.

На примере наноструктур, сформированных на основе однослойной или двухслойной пленок ВЗФГ, размещенных между фотонным кристаллом и слоем Au, показано, что при толщине слоя Au около 30 нм наблюдается максимум резонансного значения коэффициента пропускания наноструктур, а резонансные значения угла фарадеевского вращения увеличиваются с ростом толщины слоя Au до 65-80 нм. Наиболее оптимальные для МО применений – конфигурации с толщиной слоя Au 30-40 нм. Экспериментально продемонстрирована максимальная МО добротность для наноструктуры с двухслойной пленкой ВЗФГ $Q_{MO} = 5,01^\circ$. Оптимизировав параметры структуры, возможно добиться МО добротности $Q_{MO} = 8,01^\circ$.

3. Исследовано влияние формирования гибридного состояния мод ТПП и Фабри-Перо на оптические и МО характеристики.

На примере наноструктур, сформированных на основе микрорезонаторной наноструктуры с двухслойной пленкой ВЗФГ и слоя Au, показано, что спектральное положение и амплитуды резонансов мод ТПП и Фабри-Перо в случае их гибридизации существенно видоизменены по сравнению со случаем их независимого возбуждения. Гибридное состояние мод ТПП и Фабри-Перо демонстрирует спектральное расталкивание резонансов, которое зависит от толщины слоя Au. Образование гибридного состояния мод при сформированном и добротном ТПП резонансе (при толщинах слоя Au более 25 нм) приводит к смещению резонанса Фабри-Перо, повышению значений коэффициентов пропускания мод, уменьшению значений угла фарадеевского вращения моды Фабри-Перо и росту значений угла фарадеевского вращения моды ТПП. В рассматриваемой структуре, эффект Фарадея возможно использовать для оценки степени гибридизации мод.

4. Рассмотрено влияние наклонного падения и поляризации света на формирование оптических и МО спектров микрорезонаторных и таммовских наноструктур. Рассмотрена возможность использования таммовских наноструктур с двухслойными пленками ВЗФГ и гибридным состоянием ТПП и ППП для создания сенсоров технического и медико-биологического применения.

В результате расчетов показано, что наличие гибридного состояния мод ТПП и Фабри-Перо приводит к разному спектральному смещению резонансов s- и р- поляризованных световых волн при изменении угла падения света от 0 до 60°, а также к несоответствию резонансных длин волн мод на спектрах коэффициента пропускания и угла фарадеевского вращения. Эффект обусловлен различием добротностей s- и р- поляризованных мод. Гибридизация мод ТПП и ППП позволяет использовать резонанс ТПП для создания сенсоров изменений показателя преломления среды. На примере наноструктуры, сформированной на основе двухслойной пленки ВЗФГ, размещенной между микрорезонаторной не МО активной наноструктуры и слоя Au, показано, что наличие моды Фабри-Перо приводит к увеличению чувствительности резонанса ТПП к изменению показателя преломления среды. Обнаружены и показаны асимметричный и интенсивностный эффекты Фарадея, наблюдаемые в геометрии эффекта Фарадея на резонансной длине волны при перемагничивании микрорезонаторной структуры. Асимметричный эффект Фарадея заключается в изменении абсолютных значений углов фарадеевского вращения, а интенсивностный эффект – в изменении коэффициентов пропускания.

5. Выявлено влияние различных условий синтеза на структурные и МО свойства слоев магнитоактивных ВЗФГ, а именно влияние «быстрого высокотемпературного» (БВО) и «закрытого» кристаллизационных отжигов.

Кристаллизация слоев ВЗФГ на различных подложках происходит по островковому механизму с образованием наноразмерных кристаллитов со средними размерами кристаллитов в диапазоне от 45 до 350 нм. Повышение температуры БВО T_a от 750 до 850°С при длительности отжига $\tau_a = 3$ мин (БВО) приводит к увеличению размеров кристаллитов и периода доменной структуры слоев ВЗФГ, а оптимальная T_a БВО составляет 800°С. БВО приводит к формированию более развитого рельефа поверхности по сравнению с традиционным режимом отжига при T_a в диапазоне от 650 до 700°С и $\tau_a = 20$ мин. БВО может быть использован для эффективной кристаллизации двухслойных пленок ВЗФГ с высокими значениями угла фарадеевского вращения в фотонных наноструктурах.

«Закрытый» кристаллизационный отжиг ВЗФГ может быть использован для кристаллизации ВЗФГ в фотонных наноструктурах с целью снижения шероховатости границ разделов слоев и уменьшения влияния повторных отжигов на ВЗФГ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи:

- A1.** Nano- and micro-scale Bi-substituted iron garnet films for photonics and magneto-optic eddy current defectoscopy / V. N. Berzhansky, A. V. Karavainikov, **T. V. Mikhailova**, A. R. Prokopov, A. N. Shaposhnikov, A. G. Shumilov, N. V. Lugovskoy, E. Y. Semuk, M. F. Kharchenko, I. M. Lukienko, Yu. M. Kharchenko, V. I. Belotelov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – Vol. 440. – P. 175–178.
- A2.** Tamm plasmon-polaritons structures with Bi-substituted garnet layers / **T. Mikhailova**, A. Shaposhnikov, A. Prokopov, A. Karavainikov, S. Tomilin, S. Lyashko, and V. Berzhansky // EPJ Web of Conferences. – 2018. – Vol. 185 – Art. N 02016.
- A3.** Magneto-Optical Spectra of Magnetic Photonic Crystal with Composite (SiO₂-Au) Layer / **T. V. Mikhailova**, S. V. Osmanov and V. O. Boyko // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2086. – Art. N 012156.
- A4.** Tamm plasmon-polaritons and Fabry-Perot excitation in a magnetophotonic structure / **T. Mikhailova**, S. Tomilin, S. Lyashko, M. Kozhaev, A. Shaposhnikov, A. Karavainikov, V. Berzhansky, and V. Belotelov // Opt. Mater. Express. – 2022. – Vol. 12(2). – P. 685–696.
- A5.** One-dimensional optomagnonic microcavities for selective excitation of perpendicular standing spin waves / V. A. Ozerov, D. A. Sylgacheva, M. A. Kozhaev, **T. Mikhailova**, V. N. Berzhansky, Mehri Hamidi, A. K. Zvezdin, V. I. Belotelov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Vol. 543. – Art. N 168167.
- A6.** Вертикальное смещение магнитооптической петли гистерезиса в магнитоплазмонном нанокompозите / С. В. Томилин, В. Н. Бержанский, А. Н. Шапошников, А. Р. Прокопов, А. В. Каравайников, Е. Т. Милюкова, **Т. В. Михайлова**, О. А. Томилина // Физика твердого тела. – 2020. – том 62, вып. 1. – С. 101–109.
- A7.** Spectral Properties of Magneto-plasmonic Nanocomposite. Vertical Shift of Magneto-Optical Hysteresis Loop / S. V. Tomilin, V. N. Berzhansky, A. N. Shaposhnikov, S. D. Lyashko, **T. V. Mikhailova**, O. A. Tomilina // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1410. – Art. N 012122.
- A8.** Hybrid states of Tamm plasmon polaritons in nanostructures with Bi-substituted iron garnets / **T. V. Mikhailova**, S. D. Lyashko, S. V. Tomilin, A. N. Shaposhnikov, A. V. Karavainikov, V. N. Berzhansky // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1389. – Art. N 012103.
- A9.** Optimization of one-dimensional photonic crystals with double layer magneto-active defect / **T. V. Mikhailova**, V. N. Berzhansky, A. N. Shaposhnikov, A. V. Karavainikov, A. R. Prokopov, Yu. M. Kharchenko, I. M. Lukienko, O. V. Miloslavskaya, M. F. Kharchenko // Opt. Mater. – 2018. – Vol. 78. – P. 521–530.
- A10.** Magneto-optical microcavity with Au plasmonic layer / **T. V. Mikhailova**, S. D. Lyashko, S. V. Tomilin, A. V. Karavainikov, A. R. Prokopov, A. N. Shaposhnikov and V. N. Berzhansky // J. Phys.: Conf. Ser. – 2017. – Vol. 917. – Art. N 062053.

- A11.** One-dimensional magnetophotonic crystals with magneto-optical double layers / V. N. Berzhansky, A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, A. V. Karavainikov, **T. V. Mikhailova**, I. N. Lukienko, Yu. N. Kharchenko, V. O. Golub, O. Yu. Salyuk, V. I. Belotelov // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2016. – Vol. 123, Issue 5. – P. 744–751.
- A12.** One-dimensional photonic crystals with highly Bi-substituted iron garnet defect in reflection polar geometry / **T. V. Mikhailova**, V. N. Berzhansky, A. V. Karavainikov, A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov and S. D. Lyashko // *J. Phys. : Conf. Ser.* – 2016. – Vol. 741. – Art. N 012121.
- A13.** Magneto-optics of single and microresonator iron-garnet films at low temperatures / A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, V. N. Berzhansky, **T. V. Mikhailova**, A. V. Karavainikov, M. F. Kharchenko, V. I. Belotelov, I. M. Lukienko, O. V. Miloslavskaya, Yu. M. Kharchenko // *Optical Materials*. – 2016. – Vol. 52. – P. 21–25.
- A14.** Nanostructures with magneto-optical and plasmonic response for optical sensors and nanophotonic devices / **T. V. Mikhailova**, A. N. Shaposhnikov, S. V. Tomilin, D. V. Alentiev // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019. – Vol. 1410. – Art. N 012163.
- A15.** Tamm magnetophotonic structures with Bi-substituted iron garnet layers at oblique incidence / **T. V. Mikhailova**, S. Tomilin, S. Lyashko, A. Shaposhnikov, A. Prokopov, A. Karavainikov, A. Bokova, V. Berzhansky // *J. Phys. : Conf. Ser.* – 2018. – Vol. 1124. – Art. N 051062.
- A16.** Crystallization Double-Layer Magneto-Active Films for Magnetophotonics / **T. V. Mikhailova**, Yu. E. Vysokikh, A. N. Shaposhnikov, V. N. Berzhansky, S. Yu. Krasnoborodko, M. F. Bulatov, D. V. Churikov, A. Karavainikov and V. I. Belotelov // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 2091. – Art. N 012049.
- A17.** Crystallization of Bi-substituted iron garnet bi-layers / **T. V. Mikhailova**, Yu. E. Vysokikh, A. N. Shaposhnikov, V. N. Berzhansky, S. Yu. Krasnoborodko, A. S. Lutovinov, M. F. Bulatov and D. V. Churikov // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 2086. – Art. N 012044.
- A18.** Carbon tip Aperture Cantilevers: Fabrication & Features in Near-Field Magneto-Optical Imaging / Yu. E. Vysokikh, **T. V. Mikhailova**, S. Yu. Krasnoborodko, A. S. Kolomiitsev, O. I. Ilin, A. N. Shaposhnikov, V. N. Berzhansky, M. F. Bulatov, D. V. Churikov, V. I. Shevyakov // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2021. – Vol. 529. – Art. N 167837.
- A19.** Magnetic-force microscopy of thin Bi:IG films for thermomagnetic recording / Yu. E. Vysokikh, S. Yu. Krasnoborodko, Y. V. Danishevskaya, **T. V. Mikhailova**, A. S. Nedviga, V. N. Berzhansky, M. F. Bulatov, D. V. Churikov // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019. – Vol. 1410. – Art. N 012224.
- A20.** Light polarization and intensity behaviour in aperture cantilevers with carbon tip created by focused ion beam / **T. V. Mikhailova**, Yu. E. Vysokikh, S. Yu. Krasnoborodko, A. S. Kolomiitsev, A. A. Fedotov // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2019. – Vol. 699. – Art. N 012030.
- A21.** Scanning probe microscopy investigation of iron garnet films for magnetoplasmonics / A. N. Shaposhnikov, S. D. Lyashko, A. S. Nedviga, A. V. Karavainikov, E. Yu. Semuk, Yu. E. Vysokikh, **T. V. Mikhailova** // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2019. – Vol. 699. – Art. N 012043.

- A22.** Bi-Substituted Iron Garnet Films for Thermomagnetic Recording, Photonics, and Plasmonics: Optimization of Synthesis Conditions Using Scanning Probe Microscopy / A. R. Prokopov, **T. V. Mikhailova**, E. V. Danishevskaya, A. N. Shaposhnikov, V. N. Berzhansky, A. V. Karavainikov, A. S. Nedviga, I. A. Nauhatsky, and E. T. Milyukova // Technical Physics. – 2019. – Vol. 64, No. 11. – P. 1709–1715.
- A23.** Magneto-optical properties of easy-plane and easy-axis garnet ferrite films for eddy current testing / N. V. Lugovskoy, V. N. Berzhansky, E. Yu. Semuk, S. D. Lyashko, A. N. Shaposhnikov, E. A. Evtukhova and **T. V. Mikhailova** // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1410. – Art. N 012190.
- A24.** High Resolution Magneto-optical Microscopy of Bi:YIG-thin Films with Both Domains and Topography Characterization / Y. E. Vysokikh, S. Y. Krasnoborodko, M. F. Bulatov, D. V. Churikov, **T. V. Mikhailova** and A. N. Shaposhnikov // 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS-Spring). – Rome, Italy, 2019. – P. 1607–1611.
- A25.** Магнитно-силовая микроскопия доменной структуры феррит-гранатовых пленок-носителей термомагнитной записи / Ю. Е. Высоких, С. Ю. Краснобородько, В. И. Шевяков, В. Н. Бержанский, **Т. В. Михайлова**, А. Н. Шапошников, А. Р. Прокопов, А. С. Недвига // Известия вузов. Электроника. – 2017. – Том 22, № 6. – С. 596-601.
- A26.** Scanning probe microscopy of high-coercive iron garnet films / Y. V. Danishevskaya, A. S. Krikun, A. S. Nedviga, **T. V. Mikhailova** and V. N. Berzhansky // J. Phys. : Conf. Ser. – 2017. – Vol. 917. – Art. N 072004.

Патенты:

- A27.** Патент на полезную модель 179135 РФ, МПК G02F1/09 (2006.01). Плазмонный магнитофотонный кристалл / Шапошников А.Н., Прокопов А.Р., Каравайников А.В., Томилин С.В., **Михайлова Т.В.**, Бержанский В.Н., Бокова А.П. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского. – № 2017128601 ; заявл. 10.08.2017 ; опубл. 28.04.2018, Бюл. № 13.
- A28.** Патент на полезную модель 158802 РФ, МПК G02F 1/09, B82B 1/00, B82Y 20/00. Плазмонный магнитофотонный кристалл / Шапошников А.Н., Прокопов А.Р., Каравайников А.В., **Михайлова Т.В.**, Бержанский В.Н. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУВО Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского. – № 2015135428/05 ; заявл. 20.08.2015 ; опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2.
- A29.** Патент на полезную модель 169415 РФ, МПК G02F 1/09, B82B 1/00, B82Y 20/00. Магнитоплазмонный сенсор / Шапошников А.Н., Прокопов А.Р., Каравайников А.В., Бержанский В.Н., **Михайлова Т.В.** ; заявитель и патентообладатель ФГАОУВО Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского. – № 2016117864 ; заявл. 05.05.2016 ; опубл. 16.03.2017 ; Бюл. № 8.
- A30.** Патент на полезную модель 173144 РФ, МПК G02F 1/09. Магнитоплазмонный сенсор / Шапошников А.Н., Прокопов А.Р., Каравайников А.В., Бержанский В.Н., **Михайлова Т.В.** ; заявитель и патентообладатель ФГАОУВО Крымский федеральный университет им.

В.И. Вернадского. – № 2016147603 ; заявл. 05.12.2016 ; опубли. 14.08.2017 ;
Бюл. № 23.

Другие публикации:

- A31.** Дзедолик И. В., **Михайлова Т. В.**, Томилин С. В. Плазмоника микро- и наноструктур. От теории к эксперименту. – Симферополь: ПОЛИПРИНТ, 2022. – 284 с. ISBN 978-5-6048939-1-3.
- A32.** Bismuth-Substituted Iron Garnet Films for Magnetophotonics: Part A–Fabrication Methods and Microstructure Property Study / A. A. Voronov, **T. Mikhailova**, O. V. Borovkova, A. N. Shaposhnikov, V. N. Berzhansky, V. I. Belotelov // *Inorganic and Organic Thin Films: Fundamentals, Fabrication and Applications.* – 2021. – Vol. 1. – P. 125–159.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Inoue M. Magnetophotonic Crystals: Experimental Realization and Applications / M. Inoue, A. V. Baryshev, T. Goto [et al.] ; M. Inoue et al. (eds.) // *Magnetophotonics.* – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2013. – P. 163.
2. Magnetoplasmonics: Combining Magnetic and Plasmonic Functionalities / G. Armelles, A. Cebollada, A. García-Martín, and M. U. González // *Adv. Optical Mater.* – 2013. – Vol. 1. – P. 10–35.
3. Nanophotonic devices based on magneto-optical materials: recent developments and applications / J. Qin, S. Xia, W. Yang, H. Wang, W. Yan, Y. Yang, Z. Wei, W. Liu, Y. Luo, L. Deng, and L. Bi // *Nanophotonics.* – 2022. – Vol. 11, No. 11. – P. 2639.
4. Optical excitation of spin waves in epitaxial iron garnet films: MSSW vs BVMSW / A. I. Chernov, M. A. Kozhaev, I. V. Savochkin, D. V. Dodonov, P. M. Vetoshko, A. K. Zvezdin, and V. I. Belotelov // *Opt. Lett.* – 2017. – Vol. 42. – P. 279.
5. Nanoscale magnetophotonics / N. Maccaferri; I. Zubritskaya; I. Razdolski; I.-A. Chioar; V. Belotelov; V. Kapaklis; P. M. Oppeneer; A. Dmitriev // *Journal of Applied Physics.* – 2020. – Vol. 127. – Art. N 080903.
6. High-Q Surface Modes in Photonic Crystal/Iron Garnet Film Heterostructures for Sensor Applications / D. O. Ignatyeva, P. O. Kapralov, G. A. Knyazev, S. K. Sekatskii, G. Dietler, M. Nur-E-Alam, M. Vasiliev, K. Alameh, and V. I. Belotelov // *JETP Letters.* – 2016. – Vol. 104, No. 10. – P. 679.
7. Барышев А.В. Магнитооптические эффекты в магнитных и плазмонных наноструктурах / Диссертация на соиск. уч. ст. доктора физ.-мат. наук, спец. 01.04.07 – физика конденсированного состояния. – СПб. – 2016. – 194 с.
8. Magnetoplasmonic Crystals for Highly Sensitive Magnetometry / G. A. Knyazev, P. O. Kapralov, N. A. Gusev, A. N. Kalish, P. M. Vetoshko, S. A. Dagesyan, A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, V. N. Berzhansky, A. K. Zvezdin, and V. I. Belotelov // *ACS Photonics.* – 2018. – Vol. 5, Is. 12. – P. 4951.
9. Faraday rotation in highly Bi-substituted yttrium iron garnet films prepared by ion beam sputtering / T. Okuda; N. Koshizuka; K. Hayashi; T. Takahashi; H. Kotani; H. Yamamoto // *IEEE Trans. Magn.* – 1987. – Vol. 23, No 5. – P. 3491.

10. Gomi M. RF sputtering of highly Bi-substituted garnet films on glass substrates for magneto-optic memory / M. Gomi, T. Tanida, M. Abe // *J. Appl. Phys.* – 1985. – Vol. 51, No 1. – P. 3888.

11. Grishin A. M. Waveguiding in all-garnet heteroepitaxial magneto-optical photonic crystals / A. M. Grishin and S. Khartsev // *JETP Letters.* – 2019. – Vol. 109. – P. 83.

12. Microcavity One-Dimensional Magnetophotonic Crystals with Double Layer Iron Garnet / V. N. Berzhansky, T. V. Mikhailova, A. V. Karavainikov, A. R. Prokopov, A. N. Shaposhnikov, I. N. Lukienko, Yu. N. Kharchenko, O. V. Miloslavskaya, N. F. Kharchenko // *J. Magn. Soc. Jpn.* – 2012. – Vol. 36, No 1_2. – P. 42.

13. One-dimensional magnetophotonic crystals based on double-layer Bi-substituted iron garnet films / V. N. Berzhansky, A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, A. V. Karavainikov, T. V. Mikhailova, E. Y. Semuk, M. I. Sharipova, T. V. Dolgova, A. A. Fedyanin, V. A. Kotov, V. O. Golub // *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* – 2011. – Vol. 42, No 1. – P. 19.

14. Magneto-optical, Structural and Surface Properties of RIB Sputtered (Bi,Ga)- substituted DyIG films / Y. E. Vysokikh, A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, V. N. Berzhansky, A. V. Karavainikov, N. N. Gerasimenko, D. I. Smirnov // *Materials Research Bulletin.* – 2017. – Vol. 95. – P. 115.

15. A practical Tamm plasmon sensor based on porous Si / A. Juneau-Fecteau, R. Savin, A. Boucherif, L.G. Fréchette // *AIP Advances.* – 2021. – Vol. 11. – Art. N 065305.

16. Hybrid Tamm-surface plasmon polariton mode for highly sensitive detection of protein interactions / E. Buzavaite-Verteliene, I. Plikusiene, T. Tolenis, A. Valavicius, J. Anulyte, A. Ramanavicius, and Z. Balevicius // *Optics Express.* – 2020. – Vol. 28. – P. 29033.

17. Maji P.S. Polarization modal analysis of Tamm plasmon at the metal-DBR interface for temperature sensing / P.S. Maji, A.R. Maity // *Optical and Quantum Electronics.* – 2022. – Vol. 54. – Art. N 349.

18. Ahmed A. M. Novel design of wide temperature ranges sensor based on Tamm state in a pyroelectric photonic crystal with high sensitivity / A. M. Ahmed, A. Mehaney // *Physica E : Low-dimensional Systems and Nanostructures.* – 2021. – Vol. 125. – Art. N 114387.

19. Refractive index gas sensor based on the Tamm state in a one-dimensional photonic crystal: Theoretical optimization / Z. A. Zaky, A. M. Ahmed, A. S. Shalaby, A. H. Aly // *Scientific Reports.* – 2020. – Vol. 10. – Art. N 9736.

20. Tamm plasmon polariton in planar structures: A brief overview and applications / C. Kar, S. Jena, D. V. Udupa, K. D. Rao // *Optics & Laser Technology.* – 2023 – Vol. 159. – Art. N 108928.

21. Ignatyeva D. O. Bound states in the continuum enable modulation of light intensity in the Faraday configuration / D. O. Ignatyeva and V. I. Belotelov // *Opt. Lett.* – 2020. – Vol. 45. – P. 6422.

22. Krinchik G. Magneto-optical intensity effects in ferromagnetic metals and dielectrics / G. Krinchik, E. Chepurova, S. V. Ehgamov // *Zh. Eksp. Teor. Fiz. (USSR).* – 1978. – Vol. 74 – P. 714.