

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «ЧелГУ», доктор
физико-математических наук,
профессор



И.В. Бычков

27 » октября 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ЧелГУ») на диссертационную работу Михайловой Татьяны Владиславовны

«Структурно-морфологические особенности, оптические и магнитооптические эффекты в нанофотонных элементах и структурах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации

Исследование оптических и магнитооптических эффектов, открытых еще в прошлом и позапрошлом веках, остается актуальным и в настоящее время. Множество различных оптоэлектронных и фотонных устройств функционирует на данных эффектах: различные телекоммуникационные устройства, устройства записи и считывания информации, устройства визуализации магнитных полей, био- и хемосенсоры и др. Использование подхода структурирования значительно расширило возможности в нахождении способов повышения эффективности устройств. Различные оптические моды, возникающие в структурах в результате интерференции и дифракции, в каждом новом случае (для каждой новой конфигурации) по-разному влияют на формирование спектров оптических и магнитооптических эффектов. В связи с этим тематика исследований, описанных в диссертационной работе, является актуальной.

Структура и основное содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня условных сокращений, благодарностей, списков использованных источников, основных и дополнительных публикаций по теме диссертации. Объем диссертации – 216 страниц,

включая 100 рисунков и 6 таблиц. Список использованных источников содержит 158 наименований.

Во **введении** соискатель обозначил актуальность, цели и задачи проводимых исследований. Сформулировал основные положения, выносимые на защиту, их новизну, теоретическую и практическую значимость. Отметил личный вклад и вклад соавторов в получении научных результатов. Привел список апробации основных результатов.

Глава 1 содержит обзор литературы, кратко описывающий свойства рассматриваемых магнитооптических материалов – пленок ферритов-гранатов и магнитооптических структур. Соискатель предоставил все необходимые ссылки на авторов и источники заимствованной информации и результатов. Кроме этого, в Главе описаны методы расчета оптических и магнитооптических свойств структур, методы синтеза структур, методы исследования топологии поверхности структур и пленок.

В **Главе 2** рассматриваются особенности возбуждения оптического таммовского состояния или таммовского плазмон-поляритона в магнитооптических структурах, конфигурация которых включает диэлектрическое немагнитное зеркало Брэгга $(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)^m$, магнитооптическую пленку из одного либо двух слоев ферритов-гранатов, буферный слой SiO_2 и слой Au. Принципиально новым решением в данной конфигурации является использование двухслойной пленки феррита-граната. Первый слой с низкой концентрацией висмута необходим для успешной кристаллизации второго слоя с высокой концентрацией висмута. Технология была использована ранее для синтеза и увеличения магнитооптической добротности микрорезонаторных структур. Соискатель продемонстрировал, что ее использование аналогично приводит к увеличению магнитооптической добротности структур с таммовским плазмон-поляритоном. В данной Главе проведена и оптимизация толщины слоя Au, необходимой для наблюдения наиболее добротного резонанса моды таммовского плазмон-поляритона.

Глава 3 содержит результаты исследований оптических и магнитооптических эффектов (моделирование и эксперимент) в случае формирования двух оптических мод в структуре – таммовского плазмон-поляритона и Фабри-Перо. Структуры состоят из магнитооптического микрорезонатора, буферного слоя SiO_2 и слоя Au. Показано, что гибридное состояние мод проявляется в виде двух резонансов, которые спектрально разделяются при увеличении толщины слоя Au. При этом оба резонанса характеризуются почти аналогичными величинами коэффициента пропускания и фарадеевского вращения. Установлено, что наличие гибридного состояния мод таммовского плазмон-поляритона и Фабри-Перо позволяет управлять магнитооптической добротностью и другими параметрами резонансов толщиной буферного слоя SiO_2 . Эти особенности предлагаемой структуры могут

быть учтены при разработке перестраиваемых магнитооптических устройств и оптических датчиков.

Глава 4 состоит из двух тематических частей и посвящена исследованию свойств структур при наклонном падении света или в геометрии Кречмана. В первой части рассмотрены магнитооптические структуры с модой таммовского плазмон-поляритона. В параграфе 4.2 для структуры с единичным таммовским плазмон-поляритоном показано, что в зависимости от типа поляризации падающей волны резонансные значения коэффициента пропускания и угла фарадеевского вращения моды ведут себя по-разному с увеличением угла падения света, но при этом резонансное значение длины волны сохраняется. В параграфе 4.3 для структуры с гибридным состоянием мод таммовского плазмон-поляритона и Фабри-Перо показано, что в зависимости от типа поляризации падающей волны с увеличением угла падения света происходят не только изменения резонансных значений коэффициента пропускания и угла фарадеевского вращения мод, но и изменяются резонансные значения длин волн. Данный эффект является уникальным и возникает в результате различия добротностей мод таммовского плазмон-поляритона и Фабри-Перо для *p*- и *s*- поляризованного света. Также данный эффект приводит к тому, что длины волн мод в спектрах коэффициента пропускания и фарадеевского вращения отличаются для одной выбранной (*p*- или *s*-) поляризации. В параграфе 4.4 приводятся результаты оптимизации магнитооптических структур с таммовским плазмон-поляритоном в качестве сенсоров технического и медико-биологического применения. С использованием модельных расчетов продемонстрировано, что моду таммовского плазмон-поляритона возможно использовать для регистрации изменений показателя преломления среды с использованием как оптического, так и магнитооптического отклика. При этом наличие моды Фабри-Перо приводит к увеличению чувствительности моды таммовского-плазмон поляритона. Во второй части (параграф 4.5) рассмотрены поляризационный асимметричный и интенсивностный эффекты Фарадея, которые были впервые показаны на примере микрорезонаторной фотонной структуры. Асимметричный эффект Фарадея заключается в асимметрии спектров углов фарадеевского вращения для противоположно направленных магнитных полей. Интенсивностный эффект Фарадея проявляется как магнитооптическая модуляция коэффициента пропускания при перемагничивании наноструктуры. Эффекты являются результатом сильной зависимости добротности моды Фабри-Перо от состояния поляризации падающего света.

Глава 5 посвящена экспериментальным исследованиям свойств магнитооптических слоев, используемых в структурах, в зависимости от условий синтеза. Предложены способы проведения кристаллического отжига слоев, которые позволят уменьшить шероховатость

границ разделов в многослойных структурах и увеличить магнитооптическую активность слоев за счет достижения более стехиометричного состава.

Оценивая работу в целом, можно отметить существенный личный вклад автора на всех этапах исследования, а также большой объем обработанного материала. Диссертация хорошо структурирована и качественно иллюстрирована, обсуждаемые материалы изложены грамотно и компетентно. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации и предъявляемым требованиям; достаточно полно отражает положения, выносимые на защиту.

Научная новизна результатов диссертационной работы

Можно выделить следующие новые и наиболее важные результаты диссертационной работы:

1. Впервые предложены модели магнитооптических структур с двухслойными пленками висмут-замещенных ферритов-гранатов, демонстрирующие формирование моды таммовского плазмон-поляритона на заданных длинах волн и ее гибридных состояний с микрорезонаторной модой Фабри-Перо и/или поверхностным плазмон-поляритоном. Определены оптимальные параметры структур с максимальной магнитооптической добротностью.

2. Впервые предложено использование магнитооптических структур с двухслойными пленками висмут-замещенных ферритов-гранатов, демонстрирующие формирование моды таммовского плазмон-поляритона, для био- и хемосенсоров.

3. Впервые исследованы закономерности изменений оптических и магнитооптических эффектов при формировании гибридного состояния мод таммовских плазмон-поляритонов и Фабри-Перо в магнитооптических структурах.

4. Впервые предсказаны и продемонстрированы поляризационный асимметричный и интенсивностный эффекты Фарадея, возникающие в микрорезонаторных структурах при наклонном падении волны с произвольной линейной ($s + p$) поляризацией.

5. Впервые экспериментально установлена оптимальная температура «быстрого высокотемпературного» кристаллизационного отжига, при которой достигается компромисс между основными функциональными параметрами магнитооптически активных слоев висмут-замещенных ферритов-гранатов.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и заключения основываются на научных результатах, полученных с использованием корректных и обоснованных теоретических моделей, методов и алгоритмов расчета и на базе современного экспериментального оборудования. Достоверность результатов работы подтверждается их

внутренней непротиворечивостью, воспроизводимостью, а также согласием с экспериментальными и теоретическими данными других авторов. Результаты, представленные в диссертации, были апробированы на таких крупных и известных международных симпозиумах, как Moscow International Symposium on Magnetism, Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism", Photonics & Electromagnetics Research Symposium, Международный симпозиум "Нанопфизика и наноэлектроника". В том числе соискатель являлся участником более десятка научных конференций всероссийского и международного уровня.

Результаты диссертационной работы достаточно полно отражены в 32 основных публикациях соискателя, среди которых научные статьи в ведущих российских («Физика твердого тела», Journal of Experimental and Theoretical Physics, Technical Physics, «Известия вузов. Электроника») и зарубежных журналах (Journal of Magnetism and Magnetic Materials, EPJ Web of Conferences, Journal of Physics: Conference Series, Optical Materials Express, Optical Materials, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering), одна глава в монографии и одна монография. Четыре публикации из списка входят в RSCI. Среди 26 работ, индексируемых международной БД Scopus, семь статей входит в Q2 и две в Q3 (согласно SJR). Основные положения диссертационной работы о проектировании, синтезе и исследовании различных магнитооптических структур, об оптимизации условий синтеза магнитооптических слоев структур представлены в данных работах. Новизна предложенных в диссертации решений по повышению эффективности магнитооптических структур для сенсоров подтверждена 4 патентами на полезную модель. Публикационные показатели соискателя соответствуют критериям ВАК.

Практическая значимость полученных результатов

Практическая ценность диссертационной работы определяется тем, что на основании численного моделирования и экспериментальных исследований различных конфигураций магнитооптических структур были сформулированы подходы, позволяющие в дальнейшем достичь наиболее оптимальных технических характеристик магнитооптических устройств: переключателей, модуляторов, изоляторов и фильтров для волоконно-оптических линий связи; датчиков магнитных полей; газовых сенсоров; био- и хемосенсоров. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научных организациях и на предприятиях, занимающихся разработкой элементов устройств фотоники, электронной компонентной базы, лазерной техники и устройств твердотельной электроники: МГУ им. М.В. Ломоносова, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Российский квантовый центр, Южный федеральный университет, Национальный исследовательский университет «МИЭТ» и др. Кроме этого, результаты представляют и фундаментальный интерес для специалистов-

исследователей в области синтеза тонкопленочных покрытий, плазмоники и оптомагноники. Отдельные достижения соискателя, в частности которые легли в основу монографии «Плазмоника микро- и наноструктур. От теории к эксперименту», написанной в соавторстве с проф. Дзедоликом И.В. и Томилиным С.В., используются и в дальнейшем могут быть использованы с целью преподавания дисциплин в области нанотехнологий, фотоники и плазмоники в Крымском федеральном университете имени В.И. Вернадского.

Замечания по диссертационной работе

В ходе ознакомления с материалами диссертационной работы возникли следующие вопросы и замечания:

1. В работе приведен ряд результатов по измерению магнитооптических эффектов в геометрии эффекта Фарадея. При этом по данным параграфа 1.3.3 для магнитооптических измерений использовано намагничивающее поле величиной $H = 2$ кЭ, которое превышает поля насыщения используемых пленок или слоев ферритов-гранатов. Здесь же указана величина поля насыщения феррита-граната состава $\text{Vi}_{2,8}\text{Y}_{0,2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (сокращенно по тексту МЗ) $H_S = 1,6$ кЭ. Было бы желательно указать поля насыщения всех используемых в работе составов. Дополнительно, в тексте работы не обсуждаются поля насыщения самих магнитооптических структур и влияние режимов синтеза, например, рассматриваемых в Главе 5, на значения полей насыщения. Также не понятно, при каких условиях были выполнены экспериментальные исследования асимметричного эффекта Фарадея, изложенные в параграфах 4.5.1 и 4.5.2.
2. В Главе 2 соискатель приводит результаты моделирования пространственного распределения интенсивности света внутри магнитооптических структур в зависимости от толщины слоя Au (рис. 2.12; положение 2, выносимое на защиту). Электромагнитная волна проникает в металлы только на глубину скин-слоя. Хотелось бы понимать, как толщина слоя Au в исследованиях соотносится с толщиной скин-слоя в Au а рассматриваемых частотах? Как поведет себя зависимость распределения интенсивности, если будет рассмотрена магнитооптическая структура с толщиной слоя Au $h_{\text{Au}} = 200$ нм (такая толщина использована в моделях в параграфе 3.4.5)?
3. В Главе 4 в параграфе 4.3 показано, что при значительном угле падения света на магнитооптическую структуру две оптические моды, микрорезонаторная мода Фабри-Перо и мода таммовского плазмон-поляритона, изменяют свои резонансные длины волн и значения коэффициентов пропускания при смене поляризации с p на s (рис. 4.5, а; положение 5, выносимое на защиту). Однако, в тексте не рассматривается, какие параметры структуры влияют на формирование данной спектральной особенности (кроме толщины буферного

слоя SiO_2 , смежного со слоем Au) и как это может быть использовано в дальнейшем. Например, возможно ли эту особенность использовать для магнитооптической модуляции?

4. В Главе 3 рассматривается магнитооптическая структура с гибридным состоянием микрорезонаторной моды Фабри-Перо и таммовского плазмон-поляритона (рис. 3.20). Конфигурация структуры основана на симметричном микрорезонаторе с четырьмя парами слоев $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ в зеркалах Брэгга. Что произойдет, если в зеркале Брэгга, расположенном между слоями феррита-граната и Au, уменьшить количество пар слоев $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$? Ведь можно ожидать, что электромагнитное поле волны будет концентрироваться сильнее в слое феррита-граната?

5. В работе в тексте и на иллюстрациях присутствует ряд опечаток. Так на стр. 60 на свободной строке вставлен знак «°»; на стр. 66 на уже отмеченном ранее рис. 2.12 для толщины слоя Au $h_{\text{Au}} = 28$ нм представлено одинаковое распределение интенсивности света для двух разных структур, а на стр. 140 при расшифровке состава феррита-граната M5 явно упущено «Fe₄» и др. При этом указанные данные корректно представлены в публикациях соискателя.

Изложенные замечания не затрагивают основных выводов и результатов диссертационной работы, не снижают их ценности и не ставят под сомнение значимость работы, а возникшие дополнительные вопросы помогут соискателю лучшим образом раскрыть содержание выполненного исследования и развить его в новых направлениях.

Заключение

На основании вышеизложенного ведущая организация считает, что диссертационная работа Михайловой Татьяны Владиславовны «Структурно-морфологические особенности, оптические и магнитооптические эффекты в нанофотонных элементах и структурах» представляет собой завершённый научный труд, совокупность результатов которого можно квалифицировать как научное достижение, состоящее в выявлении новых закономерностей и эффектов в нанофотонных элементах и структурах, обладающих практической значимостью для разработки высокоэффективных устройств фотоники, микро- и оптоэлектроники нового поколения. Положения, выносимые на защиту, достаточно обоснованы в тексте диссертации.

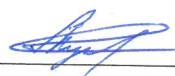
Тема диссертационной работы Михайловой Татьяны Владиславовны, ее содержание, цель, постановка задач и методы их решения, а также полученные автором научные результаты и их анализ соответствуют паспорту специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния (физико-математические науки): пункт 2 «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности».

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям пп. 9 – 14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями), а ее автор, Михайлова Татьяна Владиславовна, заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором кафедры радиофизики и электроники Кузьминым Дмитрием Александровичем (специальность докторской диссертации 1.3.8 – физика конденсированного состояния) на основе изучения текста диссертации, автореферата и основных публикаций, в которых представлены результаты работы.

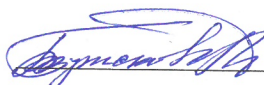
Диссертационная работа и отзыв были заслушаны и обсуждены на заседании научного семинара кафедры радиофизики и электроники ФГБОУ ВО «ЧелГУ» (Протокол №1 от 25 октября 2023 г.).

Кузьмин Дмитрий Александрович
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры радиофизики и электроники,
тел. 799-71-81, kuzminda89@gmail.com



Д.А. Кузьмин

Бутаков Анатолий Владимирович
кандидат физико-математических наук,
и.о. заведующего кафедрой,
тел. 799-71-81, 799-71-62, anatol912@bk.ru



А.В. Бутаков

« 27 » октября 2023 г.

Подпись Кузьмина Д.А. и Бутакова А.В. заверяю:


Специалист по кадрам
В.И.Акутина



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Челябинский государственный университет"

Почтовый адрес: 454001, Челябинская обл., г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, д.129

Тел.: +7 (351) 799-71-01, E-mail: odou@csu.ru, Сайт: <https://www.csu.ru/>