

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Диссертационная работа Татьяны Владиславовны Михайловой «Структурно-морфологические особенности, оптические и магнитооптические эффекты в нанофотонных элементах и структурах» посвящена экспериментальным исследованиям на стыке перспективных направлений в современной магнитооптике комплексных гранатовых структур и нанофотонике.

Актуальность темы диссертации

Актуальность исследований, результаты которых составляют содержание диссертации, не вызывает сомнений. Нанофотонные структуры, в которых используются магнитооптические материалы, находят широкое применение при создании устройств хранения, обработки и передачи информации, датчиков магнитных полей, хемо- и биосенсоров. Магнитные поля и намагниченность структурных элементов соответствующих устройств позволяют контролировать интенсивность и состояние поляризации света вследствие магнитооптических эффектов. Формирование элементов и структур с определенными геометрическими параметрами позволяет реализовывать различные оптические резонансы (или оптические моды структур), что как раз и используют для задания спектральных форм-линий или параметрических зависимостей магнитооптических эффектов. В данном случае под параметрами понимаются реальные геометрические размеры элементов и структур и характеристики материалов, обусловленные кристаллическим строением.

Структура и основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня условных сокращений, списков научных работ соискателя и цитируемых публикаций. Работа содержит 216 страниц, 100 иллюстраций и 6 таблиц. Список научных работ соискателя содержит 26 статей в российских и зарубежных журналах, а также в трудах конференций. Список цитируемых публикаций состоит из 158 наименований.

Во *введении* приведено обоснование актуальности диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор литературы по тематике исследований, описание теоретических и экспериментальных методов исследования. Соискатель приводит ссылки при цитировании материалов работ других авторов. В диссертационной работе использовались: метод матрицы переноса размерности 4×4 при проведении теоретического и численного исследования, различные методы сканирующей зондовой микроскопии при проведении экспериментов. Также в работе приводится описание методов магнитополяриметрии и синтеза структур, с помощью которых были получены экспериментальные данные, сопоставляемые соискателем с модельными расчётами.

Во *второй главе* описаны структуры, в которых реализуются моды оптического таммовского состояния (или таммовского плазмон-поляритона). Особенностью таких структур является наличие однослойной или двухслойной феррит-гранатовой пленки, расположенной между немагнитными зеркалами Брэгга $[\text{TiO}_2/\text{SiO}_2]^m$ и двумя верхними слоями – буферным слоем SiO_2 и слоем Au . Показано, что такая конфигурация позволяет достичь значительного усиления электромагнитного поля внутри феррит-гранатовой пленки на проектируемой длине волны, что приводит к увеличению угла фарадеевского вращения. При этом коэффициент увеличения угла фарадеевского вращения зависит от оптической добротности моды. Проведена оптимизация структур с целью достижения наибольших значений магнитооптической добротности. Расчетные данные, полученные соискателем, подтверждены результатами соответствующих экспериментов.

Также в данной главе рассмотрены структуры, в которых вместо слоя

Au используется композитный слой в виде матрицы SiO_2 с наночастицами Au. Показано, что для таких структур наибольшие значения угла фарадеевского вращения достигаются в коротковолновом диапазоне электромагнитного излучения.

В *третьей главе* приведены исследования формирования двух оптических мод, таммовского плазмон-поляритона и микрорезонаторной (Фабри-Перо). Рассматривается структура, состоящая из микрорезонатора с двухслойной феррит-гранатовой пленкой и двумя верхними слоями – буферным слоем SiO_2 и слоем Au. Проведена оптимизация структур с целью достижения наибольшей магнитооптической добротности. Показано, что в зависимости от толщины буферного слоя SiO_2 возможно добиться наиболее сильного связанного состояния мод, которое проявляется в виде одного или двух резонансов в спектрах пропускания и фарадеевского вращения. Один резонанс наблюдается при толщинах Au менее 15 нм, два – более 15 нм. Выявлено влияние связанного состояния на оптические и магнитооптические спектры, а также магнитооптическую добротность исследуемых структур.

В *четвертой главе* представлены результаты исследования эффектов, возникающих в наноструктурах при наклонном падении света. В параграфах 4.2, 4.3 и 4.4 изложены результаты расчетов оптических и магнитооптических эффектов в наноструктурах с модой таммовского плазмон-поляритона при полярной геометрии намагничивания. К наиболее важным на мой взгляд результатам следует отнести: а) обнаруженную поляризационную зависимость расталкивания резонансов мод таммовского плазмон-поляритона и Фабри-Перо; б) увеличение чувствительности моды таммовского плазмон-поляритона в присутствии моды Фабри-Перо в случае реализации сенсоров показателя преломления среды. В параграфе 4.5 рассматриваются новые магнитооптические эффекты, возникающие за счет структурирования в случаях, когда намагниченность внутри образца ориентирована под произвольным углом относительно нормали в плоскости падения света.

Пятая глава посвящена определению оптимальных режимов синтеза магнитооптических феррит-гранатовых слоев по данным магнитополяриметрии и сканирующей зондовой микроскопии. Исследовались феррит-гранатовые слои, которые получены методами вакуумного осаждения материала керамической мишени на ложку и отжига. При этом кристаллизация слоев происходит в процессе отжига по

островковому механизму с образованием нанокристаллитов. Показано, что при одновременном уменьшении времени и увеличении температуры кристаллизационного отжига возможно добиться увеличения размеров кристаллитов и периода доменной структуры феррит-гранатовых слоев. Установлена оптимальная температура отжига с длительностью 3 мин. Предложена методика синтеза феррит-гранатовых слоев под напыленным сверху слоем SiO_2 .

Научная новизна результатов диссертационной работы

К основным результатам диссертационной работы, обладающим научной новизной, следует отнести:

1. Предложенные и оптимизированные модели наноструктур с таммовскими плазмон-поляритонами.
2. Обнаруженные закономерности изменений оптических и магнитооптических спектров при изменении геометрических параметров слоев структуры в случаях формирования одной моды таммовского плазмон-поляритона и двух мод таммовского плазмон-поляритона и Фабри-Перо (при нормальном падении в полярной конфигурации намагниченности).
3. Обнаруженные закономерности изменений оптических и магнитооптических спектров при наклонном падении в геометрии Кречмана, которые могут быть использованы для создания хемо и биосенсоров.
4. Предсказанные и продемонстрированные асимметричный и интенсивностный эффекты Фарадея, которые возникают при наклонном падении света с произвольной (s + p) линейной поляризацией.
5. Оптимизированные режимы синтеза феррит-гранатовых пленок, которые могут быть использованы для улучшения оптических и магнитооптических параметров структур.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Обоснованность и достоверность выносимых на защиту научных положений определяется хорошей корреляцией полученных теоретических и экспериментальных результатов, использованием высокоточного

оборудования, современных методов организации эксперимента и обработки данных. Полученные результаты своевременно опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, входящих в международные базы цитирования, в том числе в журналах второго квартиля Web of Science и Scopus (Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Optical Material Express, Optical Materials, Journal of Experimental and Theoretical Physics) а также были широко представлены на профильных конференциях высокого уровня. Публикационные показатели соискателя соответствуют требованиям, утвержденным Положением о присуждении ученых степеней: 9 статей в реферируемых Web of Science и Scopus журналах; 1 статья в журнале из перечня ВАК и реферируемом RSCI; 16 статей журналах по материалам конференций и реферируемых Web of Science и Scopus; 4 патента на полезную модель; 1 глава в монографии, реферируемой в Web of Science и Scopus; 1 монография; 53 тезиса докладов на конференциях и симпозиумах. Публикации диссертанта цитируются в отечественных и зарубежных научных изданиях, следовательно, они известны специалистам. По данным Scopus индекс Хирша Т. В. Михайловой $H = 8$, а число цитирований равно 208 (на момент написания отзыва).

Практическая значимость полученных результатов

Результаты диссертационной работы представляют фундаментальный и практический интерес в области проектирования устройств на основе магнитооптических структур – устройств оптоэлектроники, фотоники, сенсорики и СВЧ-электроники. Полученные зависимости эффектов могут быть использованы при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ведущих образовательных и научных учреждениях Российской Федерации.

Замечания по диссертационной работе

Несмотря на большое количество интересных и значимых результатов работа не лишена некоторых недостатков. В качестве наиболее существенных замечаний необходимо отметить следующие:

1. Непонятно, почему соискатель в своей работе использует два идентичных по сути термина: «оптическое таммовское состояние» и «таммовский плазмон-поляритон». В чем их принципиальное отличие?

2. На 22-й странице приведена формула (1.1) для зависящего от намагниченности тензора диэлектрической проницаемости кристалла висмут-замещенного феррита-граната кубической симметрии с произвольно ориентированным вектором намагниченности в линейном по намагниченности приближении. В этом случае, действительно, все недиагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости должны быть ненулевыми, тогда как диагональные компоненты должны быть равны. В формуле (1.1) ϵ_{zz} -компонента отличается от равных друг другу ϵ_{xx} - и ϵ_{yy} -компонент. Такое соотношение между диагональными компонентами имеет место при учете квадратичных по намагниченности слагаемых в тензоре диэлектрической проницаемости при ориентации вектора намагниченности вдоль оси Z. На стр. 22 написано: «Разницей между компонентами ϵ_{xx} и ϵ_{zz} можно пренебречь при температурах ниже T_C ». А где соответствующие оценки или ссылки? Известно, что в кристаллах семейства железо-иттриевого граната компоненты линейного и квадратичного магнитооптических тензоров – величины одного порядка.
3. На стр. 66 на рис. 2.12 а) и б) для толщины слоя Au 28 нм представлено одинаковое распределение интенсивности света.
4. Формула для интенсивности света (1.33) на странице 37 записана некорректно. В ней должен стоять знак пропорциональности, но не равенства.
5. В начале стр. 46 написано «МО свойства пленок (Θ_F , коэрцитивная сила H_C и коэффициент прямоугольности K_p) были определены...». Угол фарадеевского вращения (и то, удельный!) действительно является магнитооптической характеристикой материала. Но коэрцитивная сила и коэффициент прямоугольности – это магнитные, а не магнитооптические характеристики.
6. На стр. 56 ниже рис. 2.6 и далее автор использует нетипичный термин «семипарный» для описания фотонного кристалла конечных размеров, образованного из семи периодов. Это жаргонный термин, который еще уместен при обсуждении результатов в лаборатории с коллегами.
7. Непонятно определение асимметричного эффекта Фарадея. В формуле (4.15) если вынести знак минус из второго слагаемого, то получится сумма углов вращения для противоположных направлений намагниченности в образце. Так ли это?
8. В формуле (4.15) допущена опечатка. Во-первых, числитель и

знаменатель под знаком \arcsin равны, по-видимому, в знаменателе должен стоять плюс. Во-вторых, у Θ_F должен быть верхний индекс (\pm).

9. В тексте диссертации встречаются опечатки. Например, ниже формулы (4.14) в цепочке равенств для компонент тензора ε « $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{zz}$ » должно быть « $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz}$ », т.е., равенство должно выполняться для диагональных компонент тензора ε . В ссылке [62] Faraday и Kerr напечатаны с маленькой буквы.

Несмотря на вышеприведенные замечания, большинство из которых носит технический характер, могу утверждать, что сформулированные замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы и не ставят под сомнение высокую оценку полученных научных результатов, а также значимость работы в целом.

Заключение (выводы о работе)

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Михайловой Татьяны Владиславовны «Структурно-морфологические особенности, оптические и магнитооптические эффекты в нанофотонных элементах и структурах» представляет собой законченный научный труд, в котором исследованы новые закономерности и эффекты в нанофотонных элементах и структурах, обладающих практической значимостью для разработки высокоэффективных устройств оптоэлектроники, фотоники и сенсорики нового поколения. Положения, выносимые на защиту, достаточно полно обоснованы в тексте диссертации. Автореферат адекватно отражает содержание и результаты диссертационной работы.

Тема диссертационной работы соответствует 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.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник отдела теории электронных и кинетических свойств нелинейных систем Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»

Любчанский Игорь Леонидович  «5» декабря 2023 г.

ПОДПИСЬ

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:

01.04.07 – Физика твердого тела

Контактные данные:

Почтовый адрес: 283048, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 72

Тел.: +7 (949) 302 29 09

E-mail: igorl@donfti.ru

Подпись Любчанского Игоря Леонидовича заверяю:

Ученый секретарь ФГБНУ ДОНФТИ,

к.т.н.



О. В. Прокофьева