ОТЗЫВ

официального оппонента Юрасова Алексея Николаевича 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.

В настоящее время область применений оптических и магнитооптических (МО) эффектов и перспективных наноструктур стремительно растет. Расширение возможностей технологии в формировании многослойных и более сложных наноструктур приводит к миниатюризации оптических устройств, к их интегрируемости и совместимости с электронными компонентами. В представленной диссертационной работе проведено исследование оптических и МО эффектов в наноструктурах, сформированных на основе магнитоактивных Bi-замещенных ферритов-гранатов (ВЗФГ). Подобные наноструктуры используют в качестве активных элементов, управляющих состоянием световой волны, сенсоров магнитных полей, газовых сенсоров или биосенсоров. Основной проблемой при создании МО наноструктур является использование МО активных элементов с характерными размерами от нескольких десятков до сотен нанометров, которые не обладают сами по себе необходимой величиной МО отклика. Однако, при использовании строго заданной геометрии наноструктуры (конфигурации) оптические эффекты интерференции и дифракции приводят к локализации излучения в МО элементах, усилению и преобразованию МО эффектов. В данном направлении важной становится проблема повышения эффективности МО активных наноструктур, разрешение которой возможно разными способами:

- совершенствованием технологии синтеза составляющих компонентов наноструктур;

– созданием новых конфигураций структур с необходимыми зависимостями известных МО эффектов;
– исследованием и применением МО эффектов, не характерных для сплошных сред (отдельных слоев), но возникающих в наноструктурах.

Всё вышеизложенное говорит **об актуальности работы**.

В своей структуре диссертационная работа включает введение со всеми необходимыми разделами, пять глав, заключение и список литературы. Общий объем диссертации составляет 216 страниц и содержит 100 рисунков и 6 таблиц.

Во **введении** соискатель обозначил актуальность выбранной тематики исследований, цель исследования и решаемые задачи, привел обоснование научной новизны, теоретической и практической значимости полученных результатов, сформулировал положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** изложены подходы, использованные для описания проектирования, синтеза и применения фотонных наноструктур. Проведен очень полный и обстоятельный литературный обзор по данной теме. Соискатель рассматривает свойства только одномерных МО наноструктур, физические процессы в которых достаточно точно моделируются с использованием метода матриц переноса 4 x 4 при различной ориентации намагниченности в среде и при наклонном падении света. На основании предложенных моделей реальные образцы МО наноструктур формировались с использованием вакуумных методов осаждения. Отдельный акцент сделан на методе синтеза МО пленок ВЗФГ, так как часть работы посвящена нахождению оптимальных условий синтеза таких слоев.

Во **второй главе** выполнен подробный анализ оптических таммовских наноструктур. Модели наноструктур включают диэлектрические слои оксидов кремния и титана, слои ВЗФГ разного состава, слои золота или композитные слои «наночастицы золота – оксид кремния». Конфигурации наноструктур подобраны таким образом, чтобы сформировать так называемое оптическое

таммовское состояние (или таммовский плазмон-поляритон), приводящее к максимальной локализации поля световой волны в слоях ВЗФГ и образованию соответствующих резонансов в спектрах коэффициента пропускания и фарадеевского вращения. Для реализации наноструктур рассмотрено использование двухслойных пленок ВЗФГ составов $Bi_{1,0}Y_{0,5}Gd_{1,5}Fe_{4,2}Al_{0,8}O_{12}$ / $Bi_{1,5}Gd_{1,5}Fe_{4,5}Al_{0,5}O_{12}$ или $Bi_{1,0}Y_{0,5}Gd_{1,5}Fe_{4,2}Al_{0,8}O_{12}$ / $Bi_{2,3}Dy_{0,7}Fe_{4,2}Ga_{0,8}O_{12}$, что приводит к значительному увеличению МО добротности в сравнении с известными МО таммовскими наноструктурами и с аналогичными наноструктурами на основе однослойной пленки ВЗФГ состава $Bi_{1,0}Y_{0,5}Gd_{1,5}Fe_{4,2}Al_{0,8}O_{12}$. Продемонстрированы параметры таммовских наноструктур, при которых достигаются наивысшие значения МО добротности и эффекта Фарадея.

Третья глава посвящена гибридным состояниям оптических мод в наноструктурах на основе двухслойных пленок ВЗФГ состава $Bi_{1,0}Y_{0,5}Gd_{1,5}Fe_{4,2}Al_{0,8}O_{12}$ / $Bi_{1,5}Gd_{1,5}Fe_{4,5}Al_{0,5}O_{12}$. Рассмотрен синтез и исследованы свойства таких структур в геометрии эффекта Фарадея, проведено моделирование оптических и МО спектров в геометрии на отражение. В отличие от конфигураций, рассмотренных во второй главе, предложенные наноструктуры обеспечивают образование двух оптических мод: таммовского плазмон-поляритона (благодаря наличию слоя золота) и микрорезонаторной моды Фабри-Перо (благодаря размещению между зеркалами Брэгга двухслойной пленки ВЗФГ с оптической толщиной равной резонансной длине волны). Толщины слоев структуры подбираются таким образом, чтобы два интерференционных состояния были совмещены на одной длине волны. Но, так как оптические моды сильно отличаются распределением интенсивности световой волны внутри структуры, формируется одно гибридное состояние, состоящее из двух расталкивающихся резонансов. Оптические и МО свойства такого гибридного состояния продемонстрированы в зависимости от изменения параметров слоев наноструктуры.

В **четвертой главе** исследуются оптические и МО спектры наноструктур при наклонном падении света с p-, s- и произвольной линейной (s + p) поляризацией. Рассмотрены, представляющие значительный интерес, микрорезонаторные наноструктуры. Для наноструктуры с гибридным состоянием мод таммовского плазмон-поляритона и микрорезонаторной моды Фабри-Перо обсуждается обнаруженный эффект изменения расталкивания резонансов гибридного состояния при смене поляризации падающего света. Предлагаются конфигурации наноструктур для создания оптических сенсоров, регистрирующих изменения показателя преломления раствора или газовой среды за счет изменения интенсивности света или МО отклика в окрестности резонансной длины волны моды таммовского плазмон-поляритона. Обнаружены и продемонстрированы квадратичное по намагниченности вращение плоскости поляризации (асимметричный эффект Фарадея) и линейная по намагниченности модуляция интенсивности световой волны (интенсивностный эффект Фарадея).

В **пятой главе** рассматриваются структурно-морфологические особенности МО активных диэлектрических слоев ВЗФГ. Рассмотрены методики «быстрого высокотемпературного» кристаллизационного отжига и «закрытого» синтеза, которые могут быть использованы при создании наноструктур с целью повышения их МО и оптического качества. Результаты, изложенных в данной главе исследований, имеют чисто прикладное значение.

В **заключении** перечислены основные результаты диссертации.

Диссертация заканчивается солидным списком публикаций соискателя, включающим 26 работ в ведущих научных журналах, десятки публикаций в рецензируемых журналах и трудах конференций, 4 патента, 1 монографию и 2 главы в монографии. Из этих работ 26 представлены в базе данных Scopus.

Из представленного выше краткого описания содержания диссертационной работы видно, что в ней рассмотрен широкий круг вопросов, охватывающий и подробное изучение свойств наноструктур с металлическими и металл-диэлектрическими композитными слоями, и исследование свойств

микрорезонаторных наноструктур только на основе диэлектрических слоев, и оптимизацию технологических условий синтеза отдельных слоев наноструктур. В работе обсуждаются и приводится сравнение функциональных характеристик наноструктур в качестве сенсоров и модуляторов. Вышеперечисленные результаты исследований, несомненно, обладают **новизной**. Как наиболее важные и представляющие наибольший интерес результаты хочется отметить следующие:

1. 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.

2. Предложены оригинальные таммовские наноструктуры, параметры которых были оптимизированы с целью достижения высоких значений МО добротности.

3. Впервые предложено использование таммовской наноструктуры с двухслойной пленкой ВЗФГ для сенсоров технического и медико-биологического применения.

4. Впервые предсказаны и продемонстрированы МО эффекты, возникающие в микрорезонаторных наноструктурах при падении волны с произвольной линейной (s + p) поляризацией.

Обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы обеспечивается использованием апробированных и широко известных методик моделирования свойств наноструктур и экспериментальных методов исследований, согласованностью результатов моделирования и экспериментов.

Диссертационная работа выполнена на высоком уровне, хорошо написана, общая структура выглядит продуманной и логичной.

Автореферат полностью соответствует тексту диссертационной работы.

Однако работа не лишена **недостатков**.

1. Получен большой объём результатов по оптическим и МО спектрам наноструктур. Возникает вопрос, как сильно влияют размерные эффекты на

данные свойства? Хотелось бы в работе увидеть более подробное обсуждение данного вопроса.

2. Не совсем понятно, как автор работы определил соответствие резонансов в спектрах, представленных на рис. 4.5, оптическим модам наноструктуры?

3. В работе не описано, чем обусловлен выбор конфигураций для наблюдения асимметричного и интенсивностного эффекта Фарадея (Глава 4, п. 4.5, рис. 4.24). Как влияет на эффекты направление намагниченности в МО слоях наноструктуры?

4. На ряде рисунков (например, рис. 5.3) приведены ломаные без указания погрешностей и доверительных интервалов, что затрудняет оценку полученных результатов.

5. В подписях к рисункам использовано большое количество аббревиатур (например, рис. 5.9), что затрудняет восприятие информации.

Указанные замечания не снижают ценности результатов диссертации и носят скорее характер пожеланий.

Подводя итог, отмечу, что работа посвящена актуальной тематике, в ней получены новые результаты, решены важные научные задачи. Основные результаты опубликованы в высокорейтинговых журналах, прошли апробацию на многих международных конференциях. Тем самым **достоверность** результатов не вызывает сомнений.

Результаты работы могут найти широкое применение в ведущих российских университетах и научных институтах.

Диссертация «Структурно-морфологические особенности, оптические и магнитооптические эффекты в нанофотонных элементах и структурах» соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям пп. 9 – 14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. Содержание работы соответствует паспорту специальности 1.3.8 Физика

конденсированного состояния (по физико-математическим наукам, пункт №2 паспорта специальности).

Считаю, что Михайлова Татьяна Владиславовна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры наноэлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования МИРЭА — Российского технологического университета (РТУ МИРЭА)

Юрасов Алексей Николаевич _____ «03» _____11_____ 2023 г.

подпись

Подпись А.Н. Юрасова заверяю

Проректор РТУ МИРЭА

О.Е. Винокуров

03.11.2023

Контактные данные:

Телефон: +79169141393, e-mail: yurasov@mirea.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация: 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Адрес места работы:

119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78, РТУ МИРЭА

Телефон: +7 499 215-65-65, e-mail: mirea@mirea.ru