

## ОТЗЫВ

оппонента Барыщева Александра Валерьевича на диссертационную работу  
Томилина Сергея Владимировича  
на тему «Мультирезонансные магнитоплазмонные композиты и гетероструктуры»,  
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук  
по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Томилина С.В. посвящена технологии и исследованиям оптических свойств искусственных плазмонных и магнитоплазмонных наноструктур – особенностям возбуждения различных резонансов и их проявлений в спектрах. В целом, работа имеет как фундаментальное, так и прикладное значение.

**Актуальность** проведенных исследований обусловлена растущим интересом к миниатюризации и повышению эффективности оптико-электронных устройств для обработки оптических сигналов в фотонных-интегральных схемах и детектирования биомолекулярных реакций и физико-химических величин. Плазмонные разупорядоченные и периодические наноструктуры, содержащие металлические наночастицы или слои широко применяются в фотонных и магнитофотонных устройствах для усиления оптических и магнитооптических эффектов и управления характеристиками электромагнитной волны. Новые возможности открываются при использовании плазмонных фотонных кристаллы, так выделяют таммовские структуры, которые позволяют усиливать амплитуду электромагнитной волны в активном слое, размещённом на границе фотонного кристалла и металла, и использовать такие высокодобротные резонансы поверхностных и волноводных мод для сенсорных приложений.

Работа Томилина С.В. благодаря оригинальным технологическим подходам синтеза градиентных плазмонных покрытий и оптических слоёв содержит уникальные результаты по исследованию различных оптических мод при монотонном изменении размерного параметра нанокompозитов и микрорезонаторов, как определяющего фактора условий резонансного возбуждения. Такой градиентный подход позволяет подробно изучить особенности взаимодействия и гибридизации резонансных мод различных типов, а также найти оптимальные параметры для максимального эффекта взаимодействия плазмонной и магнитооптической подсистем.

Диссертация изложена на 260 страницах текста, содержит 139 рисунков и 2 таблицы. Диссертация состоит из вступления, семи глав, выводов и списка цитируемой литературы из 161 наименования. Глава 1 содержит литературный обзор по теме исследования, в главе 2 описаны применённые экспериментальные методы и методики, главы 3–7 посвящены описанию основных результатов исследования. В конце диссертации приводится список опубликованных работ.

Во **введении** обосновывается актуальность темы, выбор направления и методов исследований, формулируются цели и задачи диссертационной работы, отображаются защищаемые положения, научная новизна и практическое значение полученных результатов, приводится информация о личном вкладе соискателя и апробации работы.

**Первая глава** традиционно содержит обзор литературы по теме диссертации. В ней проведен подробный анализ современных исследований по следующим направлениям:

- синтез плазмонных покрытий и функциональных слоёв с помощью вакуумных технологий;
- плазмонные резонансы – виды, способы возбуждения и регистрации;
- плазмонное усиление магнитооптических эффектов в нанокompозитах и тонкоплёночных наноструктурах;
- сенсорное применение плазмонного резонанса.

Во **второй главе** диссертации описаны экспериментальные методы исследования и методики изготовления плазмонных сверхтонких металлических покрытий и наночастиц на подложках различного типа, а также нанокompозитов и наноструктур на их основе. В конце главы дан формализм для моделирования оптических свойств изучаемых образцов.

**Третья глава** посвящена исследованию структурных особенностей наноплёнок при напылении, грануляции, ионном травлении и структуры межслойных интерфейсов. Выполнен термодинамический анализ прямого и обратного перколяционных переходов в наноплёнках с точки зрения фазовых переходов II рода. Обнаружено и исследовано явление направленной ионно-стимулированной диффузии на межслойном интерфейсе при ионной бомбардировке поверхности слоёв.

**Четвертая глава** содержит результаты экспериментальных и модельных исследований мультрезонаторных нанокompозитов на основе феррит-граната с различными локализованными плазмонными состояниями. В частности, рассмотрены особенности возбуждения дипольных, квадрупольных и связанных диполь-дипольных локализованных плазмонных мод, изменение резонансных условий под влиянием размерных факторов, диэлектрического окружения и наличия оболочки. Рассмотрены особенности усиления магнитооптических эффектов Фарадея и Керра на частотах различных плазмонных мод, оптимизированы параметры нанокompозита для получения максимального коэффициента усиления. Экспериментально и теоретически исследовано сенсорное применение локализованного плазмонного резонанса.

**Пятая глава** диссертации посвящена изучению мультрезонаторных тонкоплёночных структур, в которых реализуются поверхностные плазмонные резонансы. Резонансы возбуждались одновременно в предложенной автором «объединенной» геометрии Отто-Кретчманна и детектировались особенности в спектральных зависимостях интенсивности и фазы взаимодействующей электромагнитной волны.

Оптимизированы параметры тонкоплёночной структуры для максимальной эффективности возбуждения обеих плазмонных мод и продемонстрирована возможность использования такой двухрезонаторной схемы Отто-Кретчманна в качестве плазмонного сенсора. Показано, что скорость реакции плазмонного биосенсора на основе резонансной моды поверхностных плазмонов зависит от толщины чувствительного слоя лиганда и лимитируется скоростью диффузии аналита в слой лиганда. Исследовано плазмонное



усиление магнитооптического эффекта Фарадея за счёт поверхностной плазмонной моды, а также предложена модель плазмонных логических элементов.

В **шестой главе** рассмотрены многослойные магнитофотонные микрорезонаторы, в которых реализуются плазмонные таммовские состояния. Такие структуры представляют собой брэгговское зеркало с нанесённым на него согласующим слоем прозрачного диэлектрика, поверх которого нанесена плёнка благородного металла. Разработаны, изготовлены и исследованы различные конфигурации таммовских структур, в том числе, содержащие градиентные плазмонные и диэлектрические слои, в которых реализуются оптические микрорезонаторные моды Фабри-Перо (разных порядков) и таммовские плазмонные состояния. Изучены особенности гибридизации мод различных типов и показано влияние различных мод, в том числе гибридных, на усиление магнитооптических эффектов.

**Седьмая глава** посвящена теоретическому описанию магнитоплазмонных эффектов (плазмонное усиление эффекта Фарадея и асимметрия магнитооптического вращения или вертикальный сдвиг магнитооптической петли гистерезиса) в нанокомпозитах и гибридизации резонансных мод Фабри-Перо и таммовских состояний в магнитофотонных кристаллах.

Показано, что усиление магнитооптического эффекта Фарадея за счёт мод локализованного плазмонного резонанса обусловлено воздействием магнитного поля на магнитоплазмонный нанокompозит как эффективную среду в целом и определяется недиагональными членами эффективного тензора диэлектрической проницаемости. Обнаружено, что помимо увеличения фарадеевского вращения на резонансных длинах волн локализованного плазмонного резонанса, наблюдается также его ослабление в коротковолновой окрестности плазмонного резонанса, а также что комплексный индекс гирации кроме поворота плоскости поляризации описывает спектральные свойства знакопеременной эллиптичности.

Теоретически показано, что гибридизация мод Фабри-Перо и таммовского плазмонного резонанса обусловлена образованием единой связанной колебательной системы с двумя собственными модами. Физическая суть данной связи обусловлена изменением условий их одновременного возбуждения, а именно условиями формирования стоячей волны для синфазных и противофазных колебаний.

В **заключении** представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

В целом, диссертационная работа представляет собой завершённое и целостное научное исследование, посвященное исследованию структурных и оптических свойств мультрезонаторных нанокompозитов и микрорезонаторов (фотонных кристаллов) на основе благородных металлов и феррит-гранатов. Текст очень хорошо структурирован по смыслу, каждая глава посвящена отдельному направлению данного комплексного исследования. Следует отметить, что экспериментальные методы, методики и результаты, а также теоретические модели описаны подробно и доступно, аккуратно выполнены

оригинальные рисунки и схемы. Таким образом, изложенные результаты – их достоверность и новизна, представляют собой высокую научную ценность для развития направлений современной оптики.

Однако при общей высокой оценке диссертационной работы следует отметить ряд замечаний:

1. Рис. 3.6: По какой причине не приведены гистограммы? Построение гистограмм и их анализ показывает, что размеры занижены. Так для изображения (ж) в диапазоне 50-200 нм существует характерное распределение с максимумом для частиц с диаметром 185 нм. При этом вклады в начальный участок гистограммы 0-50 нм могут определяться артефактами (шумами) эксперимента.
2. Рисунки 3.6, 4.2 и 4.13 дают различные оценки диаметра наночастиц?
3. По какой причине большая часть работы выполнена с использованием висмут-содержащего феррит-граната без содержания иттрия?
4. К тексту на стр. 123: Автор обсуждает дипольную моду уединенных частиц и «некоторых» взаимодействующих частиц, т.е., в последнем случае, диполь-дипольное взаимодействие, которое является коллективным окликом всей системы. Знаком ли автор, например, с публикациями ЖЭТФ 151, 4, 686 (2017) и ЖММ 485, 54 (2019), видит ли какую-либо корреляцию между своими результатами и теми, что приводятся в публикациях?
5. К данным в Разделе 4.3: При обсуждении зависимостей  $H^+$  и  $H^-$  было бы полезно анализировать зависимость  $H = 0$  для немагнитного образца. Были ли эксперименты по обнаружению поворота плоскости поляризации вследствие поляризационной анизотропии как для массива наночастиц без граната, так и со слоем граната?
6. К рисунку 4.12: Как моделировались спектры разупорядоченного массива частиц?
7. К обсуждению о дипольной, квадрупольной и диполь-дипольной модах (рис. 4.14), проводилось ли моделирование с визуализацией полей в окрестности частиц?
8. Среднее арифметическое в формуле 4.1 используется, чтобы исключить вклад естественной оптической активности, связанный с влиянием на полный поворот плоскости поляризации (правильно говорить о повороте главной оси эллипса поляризации) любой анизотропии. Данный подход будет давать «более справедливую» оценку, если привести систему в состояние \*, в противном случае фарадеевское вращение граната будет являться триггером для полного поворота, который в общем случае несимметричная зависимость. \*Следует заметить, что в общем случае существует такое взаимное положение массива частиц и ориентации электрического поля волны, когда пошедшая волна сохраняет исходную поляризацию. В работе J. App. Phys. – 2008. – V. 103. – P. 07D301 выделена цепочка частиц на рис. 1, а на рис. 3 показан эффект взаимной ориентации образца и плоскости поляризации...
9. Знаком ли автор с публикацией IEEE Sensors Journal 18, 14, 5732 (2018)?
10. При обсуждении магнитооптического отклика материалов принято анализировать магнитооптическую добротность (figure of merit). В данной главе эта величина позволила бы сравнить исследованные структуры и проявление различных мод. Почему автор не использовал такой анализ?
11. Известно, что фарадеевское вращение поляризации – это невзаимное явление,



напротив вращение в геометрии Коттона-Мутона – взаимное. Какую природу имеет усиленное вращение поляризации вследствие плазмонного резонанса на наночастицах? Каково поведение исследованных образцов в многопроходном режиме?

### Некоторые опечатки:

Рис. 3.3. Отсутствует ноль. В тексте «в течении» и «в течение» встречаются с близкой частотой, «спектры фарадеевского прращения», «могнитоплазмонном композите», «Bregg».

Приведенные замечания в основном носят рекомендательный или редакционный характер и не умаляют общего положительного впечатления о диссертационной работе.

Результаты работы докладывались на многочисленных научных конференциях (29 тезисов докладов), а также опубликованы в 20 статьях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science. Также соискателем получены 7 патентов (4 на изобретения, 2 на полезные модели, 1 на ноу-хау). Текст автореферата и диссертации хорошо отражает основное содержание, защищаемые положения и выводы работы.


Таким образом, можно сделать заключение, что диссертационная работа Томилина Сергея Владимировича по актуальности, новизне, научному уровню и практической значимости полностью соответствует специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, и удовлетворяет всем критериям, установленным в Положении о присуждении учёных степеней. Автор работы, Томилин Сергей Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Оппонент:

Начальник оптической лаборатории ФГУП «ВНИИА»

доктор физико-математических наук

Александр Валерьевич Барышев

«22» мая 2024 г. 

подпись

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»,  
127030, Москва, ул. Суцневская, д. 22, тел.: +7 (499) 972-84-99, e-mail: baryshev@vniia.ru

Подпись Барышева А.В. заверяю

Учёный секретарь специализированного диссертационного совета  
на базе ФГУП «ВНИИА» Д 74.1.002.02, к.т.н.



 Л.В. Феоктистова