

ОТЗЫВ

оппонента Мерзликина Александра Михайловича
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

Исследование резонансного взаимодействия электромагнитного поля с веществом является актуальной задачей науки и техники как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. В случае металлов такое взаимодействие на оптических частотах порождает возникновение упорядоченных колебаний электронного ферми-газа, по сути плазмы. Квант таких колебаний носит название плазмон, а направление науки, изучающей методы генерации, свойства и способы применения таких плазмонов, получило название плазмоника. Диссертация Томилина Сергея Владимировича посвящена исследованию особенностей генерации и регистрации, а также исследованию свойств и сфер применения различных типов плазмонных мод, в том числе разного порядка, возникающих в мультирезонансных магнитоплазмонных нанокompозитах и многослойных гетероструктурах.

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что многомодовые (мультирезонансные) системы, в том числе многослойные структуры, в которых возможно возбуждение различных типов резонансов, перекрытие которых приводит к появлению новых связанных и гибридных мод плазмонных колебаний, позволяют существенно расширить спектр применения поверхностного и локализованного плазмонного резонанса и повысить чувствительность сенсорных систем на его основе за счёт применения дифференциальных измерений путём сравнения различных резонансов. Большой интерес представляют также таммовские структуры, которые позволяют резонансно усиливать амплитуду электромагнитной волны в активном слое, размещённом на границе фотонного кристалла и плазмонного металла. В подобных многослойных структурах при определённых условиях возможно одновременное возбуждение различных резонансов, приводящее к их гибридизации, которая предполагает образование смешанного состояния, обладающего как одновременно характеристиками, присущими каждому из состояний в отдельности, так и новыми уникальными характеристиками.

Диссертация изложена на 260 страницах печатного текста, включает 139 рисунков и 2 таблицы. Основная часть диссертации состоит из вступления, семи глав, выводов и списка литературы, включающего 161 цитирование. В конце диссертации приведен список работ, опубликованных по теме диссертации, включающий 57 библиографических ссылок.

Введение включает обоснование актуальности темы, формулировки цели и задач исследования, перечень защищаемых положений, научной новизны и практической значимости полученных результатов, также приводится информация о личном вкладе соискателя и апробации работы.

На защиту соискателем выносятся 7 научных положений, а перечень результатов, полученных впервые, включает 6 пунктов.

В первой главе приводится обзор мировой литературы по теме диссертации. Достаточно подробно описаны известные методики синтеза плазмонных покрытий и наночастиц. Рассмотрены физические принципы возникновения плазмонного резонанса и его типы, описаны методы возбуждения и регистрации различных резонансных плазмонных мод. Также рассмотрены особенности резонансного усиления магнитооптических эффектов различными типами плазмонных мод и сенсорное применение плазмонного резонанса.

Во второй главе диссертации достаточно подробно описаны применяемые в работе экспериментальные методы и методики синтеза и исследования плазмонных покрытий, оптических и магнитооптических слоёв (в том числе с градиентом толщины). Также описаны методы получения и исследования плазмонных самоорганизующихся наночастиц как в чистом виде, так и в составе композита. В конце главы описаны основные математические модели и программные пакеты, применяемые при моделировании различных структур и процессов. В частности, соискателем разработаны модели: неоднородного магнетронного напыления градиентных покрытий; расчёта параметров дипольных, квадрупольных и связанных диполь-дипольных плазмонных мод в нанокompозитах с учётом диэлектрической оболочки; анализа диффузионных процессов, в том числе направленной ионно-стимулированной диффузии.

Третья глава посвящена исследованию структурных особенностей плазмонных покрытий и функциональных (оптических, магнитооптических) слоёв. Исследована термодинамика процессов перколяции и деперколяции тонких плёнок с точки зрения фазового перехода второго рода. Также экспериментально исследовано влияние ключевых факторов деперколяции, таких как температура, время, толщина исходной плёнки, на структурные особенности получаемого гранулированного покрытия. Рассмотрена структура градиентных магнитооптических слоёв, полученных методом неоднородного плазменного травления, и структура межслойного интерфейса на границе гранатовой плёнки и подложки. Обнаружено и подробно изучено явление направленной ионно-стимулированной диффузии на межслойном интерфейсе при ионной обработке поверхности нанометровых слоёв.

В четвертой главе описаны результаты синтеза и исследования мультрезонансных магнитоплазмонных композитов и гетероструктур, в которых реализуются локализованные плазмонные состояния. Рассмотрены особенности генерации и регистрации, а также свойства дипольных, квадрупольных и связанных диполь-дипольных плазмонных мод. Подробно исследовано влияние описанных мод на усиление магнитооптического эффекта Фарадея в магнитоплазмонных композитах. Следует отметить, что применение соискателем методик нанесения градиентных магнитооптических слоёв, позволило оптимизировать структуру композита для получения максимального усиления магнитооптического эффекта Фарадея в 21 раз. Также в

магнитоплазмонных нанокompозитах обнаружено и подробно исследовано явление вертикального сдвига магнитооптической петли гистерезиса в окрестности плазмонного резонанса, приводящее к спектральной асимметрии магнитооптического вращения. Теоретически и экспериментально исследовано влияние диэлектрической среды и оболочки вокруг плазмонных наночастиц на спектральный сдвиг локализованного плазмонного резонанса. Данное исследование демонстрирует возможности сенсорного применения локализованных плазмонов.

Пятая глава диссертационной работы посвящена исследованию тонкоплёночных гетероструктур, в которых реализуются поверхностные плазмон-поляритонные состояния в виде поверхностных бегущих волн. Рассмотрены методы призмного возбуждения, а также амплитудной и фазовой регистрации поверхностного плазмонного резонанса. Предложена, изготовлена и исследована двухрезонансная структура, в которой возможно возбуждение различных мод на противоположных поверхностях плазмонного покрытия по механизмам Кретчманна и Отто. Методами численного моделирования и синтеза градиентных слоёв параметры такой структуры оптимизированы для максимально эффективного возбуждения обеих мод. Методами численного моделирования исследована возможность использования данной двухрезонансной структуры в качестве плазмонного сенсора. Исследовано изменение резонансных условий для обеих мод под влиянием диэлектрической среды и внешнего слоя. Также исследована скорость срабатывания такого сенсора при разной толщине внешнего слоя.

На примере магнитоплазмонной структуры исследовано плазмонное усиление магнитооптического эффекта Фарадея в эпитаксиальной плёнке феррит-граната за счёт поверхностного плазмонного резонанса. В завершении главы предложены теоретические модели плазмонных логических элементов «Не» и «Или», а также плазмонной логической схемы на основе углеродных нанотрубок с металлическим типом проводимости.

В шестой главе представлены результаты исследования многослойных гетероструктур, в которых реализуется третий тип плазмонных колебаний, таммовские плазмон-поляритоны. Рассмотрены основные принципы и методы возбуждения и регистрации таммовских плазмонных мод. Спроектированы, изготовлены и исследованы многорезонансные структуры на основе магнитофотонных кристаллов с плазмонным покрытием, в которых реализуются оптические микрорезонаторные моды Фабри-Перо и плазмонные моды Тамма. Следует отметить оригинальность решений в применении градиентных плазмонных и оптических слоёв, что позволило спектрально совместить резонансы разных типов. Было обнаружено, что при спектральном совмещении оптических и плазмонных резонансов происходит их гибридизация с образованием единой колебательной системы. Исследовано влияние различных резонансных мод, в том числе гибридизованных, на усиление магнитооптического эффекта Фарадея.

Седьмая глава полностью посвящена теоретическому анализу экспериментально наблюдаемых эффектов. Для объяснения плазмонного усиления эффекта Фарадея выполнен расчёт эффективного тензора диэлектрической проницаемости композитной

магнитоплазменной системы золото-гранат на основе модели эффективной среды Максвелла Гарнетта. Данный расчёт позволил не только выявить спектральное усиление магнитооптики за счёт внесения плазменной компоненты, но и показать возникновение знакопеременной эллиптичности, которая и приводит к возникновению асимметрии магнитооптических спектров. Также построена модель гибридизации резонансных мод Фабри-Перо и Тамма на основе модели связанных осцилляторов, где в роли связи выступает условие формирования стоячей волны в периодической структуре плазмонного магнито-фотонного кристалла.

В заключении тезисно перечислены основные результаты диссертации, включающие 11 пунктов.

Диссертационная работа при прочтении создаёт благоприятное впечатление и формирует образ завершённого и целостного научного исследования в рамках общего направления плазмоники и магнитоплазмоники, где подробно исследованы мультрезонансные структуры с тремя основными типами плазмонных колебаний. В целом экспериментальные методы, методики и результаты, а также математические модели описаны подробно и доступно, аккуратно выполнены рисунки, схемы и графики. Отдельно хочется подчеркнуть, что работа хоть и является по большей части экспериментальной и включает полный цикл от синтеза лабораторных образцов до их исследования и интерпретации полученных результатов, но в то же время содержит большое количество модельного анализа наблюдаемых процессов, оптимизации параметров структур, теоретической интерпретации экспериментальных эффектов и явлений. Это делает результаты, описанные в работе, особенно ценными как с прикладной, так и с фундаментальной точки зрения.

Не вызывает сомнения, что разработанные в рамках работы экспериментальные методики, установки, а также теоретические модели будут в дальнейшем успешно применены для научных исследований в данной области. Достоверность и новизна научных результатов, полученных автором, очевидна, а сами результаты представляют большой интерес для развития таких направлений как плазмоника, фотоника, сенсорика и т.д.

Следует особо отметить ясность и чёткость изложения материала, логичность и последовательность анализа результатов. Диссертация имеет очень чёткую структуру, где каждая глава посвящена исследованию сперва структурных свойств плазмонных покрытий, затем какого-то одного конкретного типа плазмонного резонанса, и в завершении отдельной главой приводится полностью теоретическая интерпретация всех основных магнитоплазмонных эффектов.

Однако, как и любая комплексная исследовательская работа настоящая диссертация не лишена некоторого числа неточностей, грамматических и стилистических ошибок. Таким образом, следует отметить ряд замечаний:

1) Не достаточно обоснован выбор формулы Гарнета (1.18 на стр. 32) для описания эффективных свойств плазмонного слоя. Аналогичных формул смешения более

десятка, почему именно формула Гарнета предпочтительна в данной работе?

2) На 130-й странице на рисунке 4.17 приведены измерения поворота плоскости вращения при проходе через наноккомпозит. Видно, что графики не симметричны относительно изменения направления намагничивавшего поля на противоположенное. Физика этого явления недостаточно отражена в тексте диссертации. Известно, что вращение плоскости поляризации может быть связано не только с магнитооптическими явлениями, но и с керальностью (которая могла возникнуть, например, за счет дальних или ближних корреляций между наночастицами золота). Необходимо провести исследования с ненамагниченным гранатом.

3) В дополнение к Рис. 4.17, 4.18, 4.19 и др. необходимо привести не только зависимость поворота угла от длины волны, но и степень эллиптичности.

4) На Рис. 5.6 и 5.7 показана зависимость коэффициента отражения от угла. при этом видно, что плазмон возбуждаемый в геометрии Крейчманна значительно добротнее (ширина провала уже) чем в геометрии Отто. Как правило, если делать эксперименты с пленкой металла на воздухе, наблюдается обратная картина - плазмон, возбуждаемый в геометрии Отто, значительно добротнее, чем в геометрии Крейчманна. Необходимо пояснить, почему в исследуемой структуре иначе.

Однако указанные замечания не снижают общей значимости и положительного впечатления о диссертационной работе.

Результаты работы прошли апробацию на многочисленных научных конференциях и представлены в 29 тезисах докладов. Более подробно результаты диссертационного исследования представлены в статьях, опубликованных в международных рецензируемых журналах по профилю работы (20 статей), все из которых индексируются в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science. Опубликована коллективная монография. Также автором получено 7 авторских свидетельств на результаты интеллектуальной деятельности.

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

Оппонент:

Заместитель директора по научной работе

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН (ИТПЭ РАН),

доктор физико-математических наук,
Мерзликін Александр Михайлович

« 10 » 06 2024 г.



ПОДПИСЬ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской Академии Наук»,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.6, тел.: _____, e-mail:
merzlikin_a@mail.ru

Подпись Мерзликина А.М. заверяю

Заместитель директора по научной работе по спецпрограммам

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН (ИТЭПЭ РАН)

Семенов Владимир Николаевич

« 10 »



ПОДПИСЬ