



УТВЕРЖДАЮ
директор ИФМ УрО РАН
академик РАН

Жинт Н.В. Мушников
«18» *апреля* 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Томилина Сергея Владимировича
на тему **«Мультирезонансные магнитоплазменные композиты
и гетероструктуры»**,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности
1.3.8 – Физика конденсированного состояния

В диссертационной работе Томилина С.В. представлены результаты фундаментальных и прикладных исследований в рамках общего направления мультирезонансной плазмоники и магнитоплазмоники, а в частности проектирования, создания и изучения магнитоплазменных композитов и гетероструктур для возбуждения резонансных состояний разного порядка и типа, в том числе сосуществующих в одном виде структур. Предложены, изготовлены и исследованы структуры, в которых помимо оптических резонансных состояний также реализуются локализованные, поверхностные и таммовские плазменные колебания. Исследована возможность совмещения и гибридизации резонансных мод различных типов и одного типа разных порядков. Также исследованы особенности резонансного усиления магнитооптических эффектов различными модами в мультирезонансных композитах и гетероструктурах. Рассмотрены и исследованы особенности применения мультирезонансных плазменных композитов и гетероструктур в качестве сенсоров разного типа. Приведено математическое обоснование и интерпретация основных магнитоплазменных эффектов, наблюдаемых экспериментально.

Актуальность темы диссертационной работы

Плазмоника является активно развивающейся отраслью оптики, магнитооптики и оптоэлектроники, поскольку плазмонные наноконпозиты и наноструктуры, содержащие металлические плёнки и наночастицы, широко применяются в фотонных и магнитофотонных устройствах для ближнепольного усиления оптических эффектов и магнитооптических эффектов (Фарадея, Керра, Коттона-Мутона), при конструировании плазмонных сенсоров и биосенсоров. Кроме того, представляют интерес фотонные кристаллы с таммовскими структурами, которые позволяют усилить амплитуду электромагнитной волны в активном слое и возбудить плазмон-поляритоны, распространяющиеся на дальнее расстояние. Создание мультрезонансных (многомодовых) систем, в том числе композитных и многослойных структур, в которых возможно возбуждение различных типов резонансов и новых связанных и гибридных мод плазмонных колебаний, изучение и математическое моделирование эффектов гибридизации различных резонансных мод и новых магнитооптических эффектов позволит не только получить новые фундаментальные знания в области мультрезонансной магнитоплазмоники и сенсорики, но и расширить диапазон использования таких структур, в том числе в виде сенсорных систем с высокой чувствительностью и стабильностью, что указывает на несомненную актуальность представленной диссертационной работы.

Научную новизну диссертационной работы Томилина С.В. определяют следующие результаты, описанные в работе:

Впервые выполнен термодинамический анализ прямого (при конденсации) и обратного (при грануляции) перколяционных переходов в тонких плазмонных слоях как фазового перехода второго рода, а также построена модель и выполнен анализ вклада ионно-стимулированной диффузии в распределение химических элементов в области межслойных интерфейсов.

Впервые исследована возможность и продемонстрировано одновременное возбуждение различных мод локализованного плазмонного резонанса разных порядков, в том числе мод связанных колебаний, в магнитоплазмонных нанокompозитах, исследовано влияние мод высших порядков, а также связанных мод на усиление магнитооптического эффекта Фарадея, получено рекордное усиление фарадеевского вращения в 21 раз.

Впервые обнаружен и исследован эффект вертикального смещения магнитооптической петли гистерезиса в окрестности мод локализованного плазмонного резонанса разных порядков, в том числе моды связанных колебаний, в магнитоплазмонных нанокompозитах. Предложена феноменологическая модель интерпретаций эффекта вертикального смещения магнитооптической петли гистерезиса на основании эффекта Коттона-Мутона.

Впервые исследованы мультрезонансные структуры, в которых одновременно реализуются несколько мод поверхностного плазмонного резонанса, предложена и исследована гетероструктура, в которой возможно возбуждение поверхностного плазмонного резонанса как по механизму Кретчманна, так и по механизму Отто на противоположных поверхностях плазмонного слоя. Исследованы особенности использования данной структуры в качестве плазмонного сенсора.

Впервые исследованы физические принципы возбуждения и взаимодействия различных резонансных мод в мультрезонансных гетероструктурах на основе многослойных магнитофотонных кристаллов с плазмонным покрытием в которых реализуются таммовские плазмонные состояния, предложена и изготовлена пространственно-неоднородная плазмонная гетероструктура, в которой таммовская резонансная мода гибридизируется с тремя микрорезонаторными модами Фабри-Перро. Предложена модель гибридизации мод Фабри-Перо и таммовского плазмонного резонанса за счёт формирования связанного состояния,

обусловленного формированием стоячих волн при синфазных и противофазных колебаниях.

При анализе тензора эффективной диэлектрической проницаемости магнитоплазмонного композита впервые обнаружено, что помимо усиления эффекта Фарадея на резонансных длинах волн локализованного плазмонного резонанса, имеет место также ослабление магнитооптического вращения в области коротких, относительно резонанса, длин волн, при этом аргумент комплексного индекса гирации описывает спектральное поведение знакопеременной эллиптичности в окрестности плазмонного резонанса.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для проектирования и изготовления мультрезонансных плазмонных нанокompозитов и гетероструктур с заранее заданными характеристиками, в том числе обладающие улучшенными прикладными характеристиками за счет усиления магнитооптических эффектов, а также имеющие перспективы использования в качестве сенсоров.

Полученные научные результаты можно рекомендовать для использования в научных учреждениях РАН и МОН РФ, в лабораториях и на предприятиях, которые занимаются созданием и исследованием свойств плазмонных материалов, композитов и гетероструктур и разработкой фотонных устройств, а также для использования при изучении спецкурсов физических и технологических направлений обучения.

Достоверность научных положений и выводов, представленных в диссертационной работе, подтверждается воспроизводимостью полученных результатов, использованием современного оборудования и методик для исследований, согласованием с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа Томилина С.В. состоит из введения, литературного обзора по теме исследования (Глава 1), описания экспериментальных методов и методик (Глава 2), пяти оригинальных глав, которые посвящены основным результатам работы, выводов и списка использованных источников, который включает 161 библиографическую ссылку. Диссертация изложена на 260 страницах текста, содержит 139 рисунков и 2 таблицы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, представлена научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена обзору литературных данных о современных методах получения и исследования плазмонных сверхтонких плёнок и наночастиц. Рассмотрены основы плазмоники и основные типы плазмонных мод, методы возбуждения и регистрации плазмонного резонанса. Рассмотрены особенности плазмонного усиления магнитооптических эффектов, а также сенсорное применение плазмонных резонансов различного типа.

Во **второй главе** описаны экспериментальные методы, методики и оборудование, используемые для получения плазмонных сверхтонких металлических покрытий и наночастиц на подложках различного типа, а также композитов и гетероструктур на их основе. В этой же главе дано описание экспериментального оборудования и методик проведения лабораторных исследований структурных, оптических, магнитооптических, плазмонных свойств полученных образцов мультрезонансных нанокомпозитов и гетероструктур. Приводятся математические модели для моделирования плазмонных структур и процессов.

Третья глава посвящена исследованию структурных особенностей плёнок, составляющих плазмонные гетероструктуры разного вида, при

напылении, грануляции и ионном травлении, а также исследованию структуры межслойных интерфейсов. Проанализирован процесс формирования плазмонных покрытий в виде тонких плёнок при конденсации на подложке из паровой фазы, при котором структура покрытия меняется с островковой на сплошную, и самоорганизующихся плазмонных наночастиц золота при термоактивированной грануляции тонких плёнок и показано, что эти процессы прямого и обратного перколяционного перехода, соответственно, являются фазовыми переходами второго рода

При исследовании плёнок висмут-замещённого феррит-граната продемонстрированы различные подходы к созданию плёнок с градиентом по толщине и способы регулирования области градиентного профиля в случае ионного травления.

На примере напылённых плёнок висмут-замещённого феррит-граната BiIG/GGG проанализирован вклад различных механизмов диффузии на формирование профиля распределения химических элементов на интерфейсе «плёнка-подложка». Предложена методика математического анализа получаемых в эксперименте профилей, которая позволяет восстановить «реальный» вид профиля без учёта воздействия ионно-стимулированной диффузии.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментальных и модельных исследований мультрезонансных композитов и гетероструктур с локализованными плазмонными состояниями. Показано, что в плазмонных наночастицах золота и композитах на их основе возможно возбуждение различных мод резонансного плазмонного резонанса, изучены особенности возбуждения локализованных дипольных и квадрупольных плазмонных мод, а также мод связанных диполь-дипольных колебаний и гибридных мод локализованных и распространяющихся плазмонов.

Экспериментально обнаружены и исследованы явления резонансного усиления магнитооптических эффектов (Фарадея и Керра), а также эффект

вертикального смещения магнитооптической петли гистерезиса в окрестности локализованного плазмонного резонанса в магнитоплазмонном композите на основе наночастиц золота и пленки висмут-замещенного железо-иттриевого граната.

Исследования влияния окружающей среды и диэлектрического слоя на особенности возбуждения различных мод локализованного плазмонного резонанса для сенсорного детектирования изменения диэлектрической проницаемости показали более высокую эффективность использования для этих целей связанной диполь-дипольной моды, которая на 50 % эффективнее, по сравнению с дипольной модой.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию мультирезонансных тонкоплёночных структур, в которых реализуются поверхностные плазмон-поляритонные состояния, и разработана и изготовлена структура, позволяющая совместить на одном устройстве плазмонные моды Кретчманна и Отто.

Показана и объяснена возможность увеличения более чем в 4 раза эффективности детектирования поверхностного плазмонного резонанса за счёт определения фазового сдвига p- и s-компонент в окрестности резонанса, а также возможность использования предложенных мультирезонансных гетероструктур в качестве плазмонного сенсора окружающей среды и биосенсора.

Обнаружено и исследовано усиление на порядок магнитооптического эффекта Фарадея в эпитаксиальных плёнках феррит-граната за счёт возбуждения поверхностного плазмонного резонанса в плазмонном слое (плёнке золота), нанесённом поверх магнитооптической плёнки.

Помимо сенсорного применения поверхностных плазмонных распространяющихся мод была рассмотрена возможность создания логических плазмонных элементов. При этом рассматривалось распространение нескольких поверхностных плазмонных мод в углеродных нанотрубках с металлическим типом проводимости.

В **шестой главе** рассмотрены многослойные магнитофотонные гетероструктуры, в которых реализуются таммовские плазмонные состояния. Структуры для возбуждения таммовских плазмонных мод представляют собой фотонный кристалл (зеркало Брэгга) с нанесённым на него буферным согласующим слоем прозрачного диэлектрика, поверх которого нанесён плазмонный слой.

В главе рассмотрены фотонные и магнитофотонные кристаллы и плазмонные покрытия, из которых можно создавать эффективные таммовские плазмонные структуры, в том числе мультрезонансного типа. Показано, что в мультрезонансных структурах такого типа возможно возбуждение таммовских плазмонных мод, микрорезонаторных мод Фабри-Перо различных порядков, мод локализованного и поверхностного плазмонных резонансов. Показано, что попытка спектрального совмещения мод Фабри-Перо и таммовских плазмонов приводит к их гибридизации, которая проявляется в «расталкивании» резонансных пиков и аномальном оптическом пропускании.

Показано, что все резонансные моды, в том числе гибридизованные моды, в магнитоплазмонных таммовских структурах приводят к усилению магнитооптического эффекта Фарадея. Эффективность усиления Фарадеевского вращения в значительной мере зависит от локализации резонансного усиления поля относительно магнитооптического слоя.

Седьмая глава посвящена математическому описанию плазмонного усиления эффекта Фарадея и асимметрии магнитооптического вращения или вертикального сдвига магнитооптической петли гистерезиса в нанокompозитах при гибридизации резонансных мод Фабри-Перо и таммовских плазмонов в магнитофотонных кристаллах с плазмонным покрытием с привлечением модели эффективной среды. С использованием этого подхода объяснено наблюдаемое в эксперименте усиление эффекта Фарадея на резонансных длинах волн локализованного плазмонного резонанса и некоторое его ослабление в области коротких, относительно этого резонанса, длин волн.

Аналитически показано, что комплексный индекс гирации в недиагональных членах тензора эффективной диэлектрической проницаемости для магнитоплазмонного композита кроме поворота плоскости поляризации описывает спектральное изменение знакопеременной эллиптичности в окрестности плазмонного резонанса.

Показано, что при спектральном совмещении мод Фабри-Перо и таммовского плазмонного резонанса микрорезонаторная и плазмонная подсистемы образуют связанную колебательную систему с двумя собственными модами. Физическая суть данной связи обусловлена изменением условий их одновременного возбуждения, а именно условием формирования стоячей волны для синфазных и противофазных колебаний.

В заключении перечислены основные результаты выполненных исследований и сделаны выводы, которые свидетельствуют о решении поставленных в работе задач.

Оценивая диссертационную работу Томилина С.В. в целом, можно констатировать, что ее результаты по своей актуальности, научной новизне и практической значимости соответствуют современному мировому научному уровню и заслуживают высокой оценки. Особо следует отметить логически выверенный подход к изучению мультрезонансных плазмонных структур, который начинается от анализа формирования плазмонных композитов и покрытий, продолжается математическим моделированием влияния толщин различных слоев многослойной структуры на характеристики различных плазмонных состояний и проектированием оптимальных систем и заканчивается получением реальных гетероструктур и экспериментальным доказательством существования отдельных мод разного типа и многомодовых состояний. В соответствии с этим подходом построен и текст диссертации, главы чётко структурированы по разным видам плазмонных резонансов. Текст диссертации обладает внутренним единством,

Важно отметить разработанный технологический подход, при котором в рамках одной структуры в результате напыления одного или нескольких слоев многослойной структуры с градиентом по толщине наблюдалась эволюция различных мод в зависимости только от толщины без необходимости учета отклонения от стехиометрии, шероховатости поверхностей и прочих особенностей отдельных слоев.

К тексту диссертации имеется ряд замечаний и вопросов, которые перечислены ниже.

1. При рассмотрении эффективной диэлектрической проницаемости композита (разделы 1.3 и 4.1) не анализируется влияние размера и формы металлических наночастиц, рассматривается только объемная доля компоненты (фактор заполнения) для сферических капель, хотя в этом же разделе на стр.29-30 отмечается, что существует влияние (причем довольно сильное) размера частиц и степени эллиптичности на энергию (длину волны) плазмонного резонанса.

2. При рассмотрении обратного перколяционного перехода (раздел 2.3.2 Принцип «сверху вниз») на начальном этапе, при котором пленка представляет собой сплошную структуру, отсутствуют оценки сформированного критического (переходного) слоя на границе пленка-подложка, который должен иметь большие напряжения и плотность дислокаций. На наш взгляд обсуждаемая в этом разделе самодиффузия должна зависеть от параметров критического слоя.

Кроме того, для оценки механизма обратного перколяционного перехода желательно было рассмотреть пленки на разных подложках (не только GGG), такие, у которых поверхностный потенциал больше или меньше (например, GAGG, YAG и NdGG). Вероятно, в этом случае температура деперколяции могла бы отличаться.

Также отметим, что в этом разделе рассматривается единственный механизм диффузии, рассмотренный в статье автора диссертации [104]. Другие

возможные механизмы, рассматриваемые в литературе, не только не обсуждаются, но и не упоминаются.

3. При рассмотрении пленок со слоем BiIG не описано, как ведут себя магнитные моменты в слоях по толщине градиентного слоя.

4. При обсуждении сенсорных приложений поверхностного плазмонного резонанса имеется фраза: «... такой сенсор будет иметь большую стабильность работы». Не понятно, в чем именно выражается стабильность. Там же, следующий абзац. Из него не ясно, какая толщина слоя лиганда в итоге оказывается оптимальной.

5. В разделе 5.6 автор приводит одно из возможных использований плазмонов – в плазмонной логике, указывая, что поверхностные плазмонные резонансы могут быть использованы для переносов сигналов в двоичной форме. Было бы полезно привести результаты моделирования таких резонансов и их взаимодействия, а также дать оценки характеристики устройства, работающего на таких объектах логики: длины волн, соотношение сигнал/шум и пр.

6. В качестве технического замечания отметим, что в списке литературы не все ссылки оформлены в соответствии с требованиями ГОСТ.

Высказанные замечания не затрагивают основных положений, защищаемых автором, и не снижают ценности полученных результатов.

Диссертация представляет собой законченное исследование и научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области плазмоники, а также изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, результаты которого могут быть полезны специалистам, занимающимся или интересующимся плазмоникой. Несомненно, диссертация Томилина С.В. представляет не только значительный вклад в фундаментальное развитие

мультирезонансной плазмоники, дающий понимание физическим причинам наблюдаемых эффектов усиления различных резонансов и формирования многомодовых состояний, но имеет существенное прикладное значение, которое связано с реальными перспективами использования результатов автора на практике в плазмонике и магнитооптике, что подтверждается наличием в списке публикаций автора семи патентов на полезные модели, изобретения и ноу-хау.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Результаты, представленные в диссертационной работе, соответствуют пункту 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления», пункту 6 «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами» паспорта специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертация не содержит заимствованного материала без ссылки на автора и (или) источник заимствования, не содержит результатов научных работ, выполненных в соавторстве, без ссылок на соавторов. Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертационная работа Томилина Сергея Владимировича на тему «Мультирезонансные магнитоплазмонные композиты и гетероструктуры» по объему выполненного исследования, его актуальности, новизне и значимости полученных результатов соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением № 842 Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а сам автор, Томили́н Сергей Владимирович, заслуживает

присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа заслушана и обсуждена на Научном совете ИФМ УрО РАН по спинтронике, магнитным наноструктурам и наноматериалам 3 апреля 2024 г. Положительный отзыв на диссертационную работу Томилина Сергея Владимировича «Мультирезонансные магнитоплазмонные композиты и гетероструктуры» одобрен Ученым советом ИФМ УрО РАН «10» апреля 2024 года (протокол № 6).

Ведущий научный сотрудник
лаборатории магнитных полупроводников
отдела наноспинтроники,
доктор физико-математических наук

Е.В. Мостовщикова

Главный научный сотрудник,
лаборатории магнитных полупроводников
отдела наноспинтроники,
доктор физико-математических наук

Ю.П. Сухоруков

Почтовый адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
Тел.: (343) 378-38-10; e-mail: mostovsikova@imp.uran.ru

Я, Мостовщикова Елена Викторовна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Е.В. Мостовщикова

Я, Сухоруков Юрий Петрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Ю.П. Сухоруков

Подписи Мостовщиковой Е.В. и Сухорукова Ю.П. заверяю
ученый секретарь ИФМ УрО РАН
кандидат физ.-мат. наук



И.Ю. Арапова