

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу

Щербака Сергея Александровича

“Электродинамическое моделирование резонансных оптических структур”,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.07 – «физика конденсированного состояния»

I. Актуальность темы исследования

Нано- и микроструктуры с оптическими резонансами представляют большой интерес для современной фотоники и твердотельной оптики. В частности, различные оптические резонансы широко применяются, например, в нелинейной спектроскопии или в сенсорах на основе гигантского комбинационного рассеяния. В первую очередь это относится к металлическим наночастицам, которые при возбуждении на частоте плазмонного резонанса индуцируют высокие локальные электрические поля, вследствие чего перспективны в качестве чувствительных зондов, эффективных наноантенн и, при нанесении на площадки, элементов, повышающих чувствительность различного рода сенсоров. Другая область применения резонансных структур – внутричиповые системы оптической связи. Здесь большой интерес представляют полупроводниковые микролазеры на основе мод шепчущей галереи, имеющие низкую пороговую мощность и, что существенно, планарную реализацию. Электродинамические свойства всех перечисленных структур сильно зависят от каждой конкретной конфигурации (формы, размеров), материалов и т.д., поэтому особую важность приобретают аналитические или численные модели, описывающие их свойства.

Диссертационная работа Сергея Александровича Щербака посвящена разработке именно этой темы – моделированию резонансных характеристик как металлических наночастиц и наноостровков, так и диэлектрических резонаторов дисковой, кольцевой и racetrack форм, поддерживающих моды шепчущей галереи. Таким образом, диссертационное исследование С. А. Щербака несомненно является актуальным.

II. Содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, приложения и списка литературы из 121 наименования. Материал изложен на 147 страницах формата А4, включает 49 рисунков и 2 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, перечислены цели, задачи, основные результаты и положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и значимость результатов, а также приведено краткое содержание работы.

Первая глава диссертации является обзорной. В ней представлены наиболее существенные литературные данные, относящиеся к плазмонным свойствам металлических наночастиц, диэлектрическим резонаторам с модами шепчущей галереи, а также к генерации второй гармоники металлическими наноструктурами. Акцент сделан на методах решения теоретических задач анализа электродинамических свойств таких структур, а также на их общефизических свойствах.

Вторая глава диссертации посвящена анализу плазмонных металлических nanoостровков, находящихся на диэлектрической подложке. Развита теория, описывающая в квазистатическом приближении поляризуемость покрытых слоем диэлектрика металлических nanoостровков усечённой сферической формы. На основе этой теории исследуются плазмонные резонансы наночастиц в зависимости от степени их усечения и толщины покрытия, а результаты моделирования сравниваются с экспериментом. На основе этого сравнения С.А. Щербаком сделан вывод о форме серебряных nanoостровков, полученных методом обратной диффузии, и золотых nanoостровков, полученных термическим испарением и последующим термическим отжигом однородной золотой плёнки. Также в этой главе на основе построенной модели объяснён новый эффект - сигнал второй гармоники от золотых nanoостровков с диэлектрическим покрытием монотонно растёт при увеличении толщины покрывающего слоя, несмотря на увеличивающееся отличие длины волны плазмонного резонанса и длины волны второй гармоники возбуждения. Последний раздел главы посвящён численному моделированию плазмонных наночастиц крупного размера – т.е. за пределами квазистатического приближения.

В третьей главе диссертации посредством численного моделирования методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics анализируются моды шепчущей галереи оптических микрорезонаторов дисковой, кольцевой и racetrack форм. Большое внимание уделяется особенностям собственных мод racetrack-резонаторов и их отличиям от мод шепчущей галереи в хорошо изученных дисковых и кольцевых резонаторах.

Отдельно анализируется эволюция модовых спектров микродисковых резонаторов при увеличении показателя преломления его окружения, а также слоистых структур – микродисковых резонаторов с диэлектрическим покрытием – при увеличении толщины покрытия. Кроме этого, исследуются переизлучение мод шепчущей галереи микродиска сферической наноантенной, поддерживающей резонансы Ми.

Четвёртая глава посвящена генерации второй оптической гармоники частицами с металлическим ядром и диэлектрической оболочкой, в этой главе развита соответствующая аналитической теории. Примечательно, что результаты строгой теории здесь подтверждают описанный во второй главе эффект роста сигнала второй гармоники от золотой частицы с увеличением толщины её диэлектрической оболочки. Также из модели следует, что толстые оболочки поддерживают резонансы Ми, которые, наравне с плазмонным резонансом ядра, вносят значительный вклад в генерацию второй гармоники.

В приложении приведены дополнительные материалы: выражения для распределения электромагнитных полей в структурах типа ядро-оболочка и графики диэлектрических функций используемых металлов.

III. Основные результаты работы

Результаты работы состоят в следующем:

- построена модель, описывающая поляризуемость металлических наноостровков формы усечённой сферы на диэлектрической подложке, покрытых слоем диэлектрика конечной толщины;
- объяснен эффект возрастания сигнала второй оптической гармоники от золотой наноостровковой плёнки с диэлектрическим покрытием при увеличении толщины покрывающего слоя, не зависящего от рассогласования длин волн резонанса и возбуждения;
- проанализированы особенности собственных мод оптических racetrack-резонаторов; показано, что моды, в отличие от дисковых и кольцевых резонаторов, распределены неравномерно: моды первого радиального порядка имеют «зигзагообразное» пространственное распределение, а для мод второго радиального порядка характерно перераспределение интенсивности между радиальными максимумами;
- показано, что резонаторы с диэлектрическим покрытием не поддерживают моды старших радиальных порядков, т.е. диэлектрическое покрытие резонаторов микродисковых лазеров приводит к модовой селекции излучения;

- исследовано переизлучение мод шепчущей галереи микродиска сферической наноантенной; показано, что выбором её радиального положения можно добиться преимущественного вывода мод соответствующего радиального номера. Кроме этого, моды ТЕ-поляризации взаимодействуют исключительно с электрическими резонансами наносферы, а ТМ – с магнитными;
- развита аналитическая теория генерации второй оптической гармоники частицами с металлическим ядром и диэлектрической оболочкой; показано, что сочетание плазмонного резонанса ядра с пространственным резонансом оболочки может привести к росту сигнала второй гармоники на 6-8 порядков.

На мой взгляд, из этих результатов наиболее впечатляющим является теоретическое объяснение обнаруженного в экспериментах роста сигнала второй гармоники при увеличении частотного рассогласования между плазмонным резонансом и сигналом-гармоникой.

IV. Научная новизна, обоснованность и значимость результатов диссертационной работы

Все результаты работы являются оригинальными, многие из них получены впервые.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается хорошим совпадением расчётов с экспериментальными данными. Существенно, что все теоретические положения работы имеют экспериментальное подтверждение. Помимо этого, в ряде частных случаев результаты, полученные на основе построенных моделей, совпадают с известными. В работе это отмечено в явном виде и приведены соответствующие литературные ссылки.

Результаты работы имеют большое практическое и теоретическое значение для сенсорики, нелинейной оптики, физики лазеров, микросистем оптической связи. Например, модели плазмонных свойств металлических наноостровков помогут увеличить их эффективность в качестве активных подложек в спектроскопии. Результаты, касающиеся собственных мод микрорезонаторов, модовой селекции и направленного вывода излучения, существенны для использования таких микролазеров в качестве источников излучения в микросистемах оптической связи. Соответственно, результаты диссертации могут быть интересны организациям, чья производственная, исследовательская или образовательная деятельность так или иначе связана с оптическими микро- и наноустройствами или с твердотельной оптикой в целом. Например, результаты могут быть применены на физическом

Факультете СПбГУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, АО «НИИ «Полнос» им. М.Ф. Стельмаха», в Университете «ИТМО».

Актуальность, новизну и значимость результатов подтверждают 14 публикаций автора в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science и входящих в перечень ВАК, в том числе в высокоуровневых журналах. Результаты диссертации были апробированы на 13 российских и международных конференциях.

V. Замечания по диссертации

1) В данной теоретической работе много внимания уделяется сравнению результатов расчёта и эксперимента. При сравнениях моделей и реальных экспериментальных результатов принято указывать, какие параметры варьировались в модели для её «подгонки» под эксперимент. В тексте этой информации нет. Если же таких «подгоночных параметров» не было, и хорошее совпадение теории и эксперимента получилось само собой, то это всё равно стоило бы отметить в тексте как весомый «плюс» работы.

2) Когда речь идёт о диэлектрическом покрытии микродисковых резонаторов, отмечается сильное падение добротности старших радиальных мод. А что происходит с добротностью первых радиальных мод и с порогом генерации для них в лазерных структурах?

Высказанные вопросы и замечания носят частный характер, не затрагивают положения, выносимые на защиту, не ставят под сомнение новизну и достоверность результатов и не снижают положительную оценку данной работы.

VI. Заключение

Таким образом, диссертационная работа Сергея Александровича Щербака является законченной научно-квалификационной работой, которая выполнена на высоком профессиональном уровне. Результаты оригинальны и имеют большое практическое и теоретическое значение.

Текст диссертации написан грамотно, оформление соответствует требованиям ВАК РФ, рисунки и графики наглядно отражают результаты. Отдельно стоит отметить существенное достоинство этой теоретической работы – особое внимание в ней уделяется не формулам, а физическому смыслу рассматриваемых явлений. Доклад по материалам диссертации С.А. Щербак представил на научном семинаре лаборатории оптики спина им. И.Н.Уральцева Физического факультета СПбГУ 27.09.2019, и доклад получил крайне положительные оценки слушателей.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Тематика работы С.А. Щербака соответствует паспорту специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния». По форме и содержанию диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением №842 Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. Автор диссертации Щербак Сергей Александрович несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,
доцент кафедры физики твёрдого тела
физического факультета,
Санкт-Петербургский государственный университет,
кандидат физ.-мат. наук

Чербунин Роман Викторович

Чербунин

198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, ул. Ульяновская, д.3
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет"
Телефон: (812)3242575, e-mail: r.cherbunin@spbu.ru

Личную подпись заверяю

Р.В. Чербунина

начальник отдела кадров №3

И.



10.10.2019

Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей