

## ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертационной работе Волковской Ирины Игоревны

«Поглощение и рассеяние электромагнитных волн малыми частицами и системами из них»,

представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.4 – радиоп физика

Диссертационная работа И.И. Волковской посвящена исследованиям процессов рассеяния и поглощения электромагнитных волн частицами, малыми по сравнению с длиной волны падающего излучения. Целью данной работы является развитие общего теоретического описания взаимодействия электромагнитного излучения с субволновыми объектами и системами из них. Автор применяет такие известные и апробированные методы, как мультипольное разложение решения в базисе векторных сферических гармоник при описании возбуждения резонансов в субволновом объекте, а также в случае, когда длина волны значительно превышает размеры частиц, использует описание рассеяния и поглощения излучения, ограничиваясь лишь дипольными откликами частицы. Основные задачи работы относятся к изучению как индивидуальных субволновых объектов, так и неупорядоченных смесей малых частиц. Одна из областей исследования – нелинейная нанофотоника, где автор изучает линейный и нелинейный отклик диэлектрических и полупроводниковых наноструктур при возбуждении резонансов Ми. Исследуются особенности частиц, изготовленных из таких материалов, как AlGaAs, GaAs и BaTiO<sub>3</sub>, а также возможности возбуждения различных коллективных мод в субволновых структурах из близко расположенных кремниевых дисков, которые по аналогии с химией принято называть олигомерами.

Управление светом на наномасштабах в оптическом и инфракрасном диапазонах длин волн актуально для создания новых источников света, датчиков для диагностики различных величин, за счет слабого изменения параметров окружающих сред, и постепенного перехода к оптической обработке информации. В качестве выбранных объектов исследования также выступают пористые керамические и композиционные материалы на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и металлические порошки с размерами частиц 1-10 мкм. Основная задача здесь – определение эффективных свойств таких систем, в частности, эффективной диэлектрической и эффективной магнитной проницаемостей, для дальнейшего моделирования процессов обработки материалов СВЧ излучением, нагрева или спекания, а также создания изделий с заданными свойствами.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и основные задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отмечены новизна полученных результатов и определен личный вклад автора.

Первая глава диссертации посвящена электродинамическому описанию электромагнитных волн в окрестности малых частиц. В начале главы приведен обзор известных исследований на эту тему. Можно сказать, что глава носит методический характер, и автор воспроизводит и сравнивает известные точные и приближенные решения задачи рассеяния электромагнитной волны на малой однородной сферической частице с

комплексной диэлектрической проницаемостью, в вакууме или однородной материальной среде. Рассматривается возбуждение в частице низших мультипольных гармоник в разложении Ми, а именно электро и магнитодипольной мод. Получены ограничения параметров задачи, определяющие применимость квазистатического дипольного приближения для сферической частицы как в вакууме, так и в среде, и проверена применимость этого приближения в различных случаях. Получены приближенные выражения для параметров лоренцевой кривой, описывающей коэффициент рассеяния при возбуждении магнитодипольного резонанса диэлектрической частицы с высоким показателем преломления и малыми потерями. Рассмотрены и проанализированы точные и приближенные методы расчета поглощения, получены зависимости коэффициентов поглощения от диэлектрических свойств материала частиц, их размера и параметров окружающей среды.

Вторая глава диссертации посвящена построению электродинамического описания мелкодисперсной среды. Автор приводит краткий обзор моделей для определения эффективных свойств неоднородных среды, описывает их применение и ограничения, и строит новую модель для определения эффективной диэлектрической и магнитной проницаемостей среды. Модель основана на вычислении наведенного дипольного момента в отдельной частице каждого сорта в переменном поле и окруженной средой с искомыми характеристиками. Модель используется для уточнения значений эффективной магнитной проницаемости металлических порошковых материалов для расчета поглощения микроволнового излучения при моделировании нагрева и спекания таких сред. Уравнение на эффективную магнитную проницаемость получается из равенства полного магнитного дипольного момента эффективной среды суммарному магнитному дипольному моменту металлических частиц во внешнем высокочастотном магнитном поле, возникающему благодаря возбуждению в частицах вихревых электрических токов. Приведены расчеты эффективной магнитной проницаемости однокомпонентных порошков произвольной концентрации из материалов с высокими значениями проводимости в широком диапазоне размеров частиц. Сформулированы условия применимости предложенной модели, и проверено их выполнение для металлических порошковых компактов на частотах микроволнового и миллиметрового диапазонов. Расчеты с использованием разработанной модели хорошо согласуются с результатами численного моделирования магнитной проницаемости среды из медных частиц в диапазоне частот от 2 до 25 ГГц, проведенного другими авторами. Вопросы поглощения микроволнового излучения в материалах, используемых в процессах микроволновой обработки, также затронуты в данной работе в задаче экспериментального определения диэлектрических свойств керамических композитных материалов. Был реализован метод измерений, основанный на сравнении интенсивностей электромагнитного излучения в рабочей камере гиротронного комплекса при наличии и при отсутствии образца внутри камеры. В результате получены температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 24 ГГц для материалов на основе  $Al_2O_3$  в широком диапазоне температур: для чистого  $Al_2O_3$  в диапазоне 200 – 1100 °С и для композита 88%  $Al_2O_3$  + 11 %  $ZrO_2$  + 1%  $Y_2O_3$  в диапазоне 200 – 600 °С. Отметим, что точность измерений 10-30% не высокая, однако считается приемлемой для большинства задач с использованием СВЧ-нагрева. Основное преимущество метода состоит в том, что он позволяет определить диэлектрические потери образцов при их размещении в нагревной камере установки для микроволновой обработки материалов и микроволновое

излучение используется как в качестве источника энергии для нагрева, так и в качестве диагностического сигнала.

В третьей главе диссертации автор исследует особенности генерации оптических гармоник в диэлектрических и полупроводниковых резонансных наноструктурах с использованием аналитических и численных методов, основанных на мультипольном разложении поля в базисе из векторных сферических гармоник. В начале главы приводится подробное описание векторных сферических гармоник, а также описание различной терминологии при их использовании в задачах рассеяния. Затем излагается теория генерации второй гармоники лазерного излучения диэлектрическими частицами с анизотропным тензором объемной квадратичной нелинейной восприимчивости при возбуждении волной накачки низших (электро-и магнитодипольных) резонансов типа Ми. С использованием леммы Лоренца получены аналитические выражения для мультипольных коэффициентов генерируемого поля на удвоенной частоте для сферических частиц из AlGaAs и BaTiO<sub>3</sub> при возбуждении магнитодипольного резонанса на основной частоте. Приведен анализ нелинейного отклика в зависимости от взаимной ориентации поляризации падающего и наведенного дипольного моментов и кристаллических осей материала частицы.

Автор исследовал также возможности повышения эффективности преобразования частоты при генерации второй или третьей гармоники при помощи лазерных пучков с осесимметричным состоянием поляризации. Взаимодополняющие подходы, основанные на мультипольном анализе и формализме теории связанных мод используются для описания формирования аксиально-симметричного супер резонансного магнитооктупольного состояния в нанодиске из AlGaAs. Затем автор определяет оптимальные условия возбуждения такого состояния для усиления генерации второй гармоники. Приведены результаты моделирования линейного рассеяния и нелинейного отклика для двух различных типов накачки, с мультипольным составом, подходящим для возбуждения высокодобротного магнитооктупольного состояния на основной частоте. Продемонстрировано многократное увеличение эффективности генерации второй гармоники в случае возбуждения диска азимутально поляризованным лазерным пучком по сравнению со случаем возбуждения плоской линейно поляризованной волной. Учтены нелинейные эффекты обратного влияния полей второй гармоники на поля на основной частоте, а также приведены оценки эффективности с учетом конечности длительности лазерных импульсов. Результаты моделирования нелинейного отклика кремниевых квадрумеров (группы из четырех частиц) показывают повышение эффективности генерации третьей гармоники на два порядка при освещении лазерным пучком с азимутальной поляризацией по сравнению с пучками с радиальной или линейной поляризацией, что также наблюдалось в эксперименте. Усиление интенсивности сигнала на третьей гармонике объясняется возбуждением коллективных мод структуры, характеризующихся наибольшей добротностью. С использованием мультипольного анализа и численного моделирования дано теоретическое описание наблюдаемой в эксперименте анизотропии генерации третьей гармоники тримерами и квадрумерами кремниевых дисков при вращении поляризации линейно поляризованного лазерного излучения, падающего вдоль осей дисков.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных материалов, и 15 работах в сборниках трудов и тезисов докладов международных и российских научных конференций.

Достоверность результатов диссертации подтверждается обоснованным применением хорошо известных методов электродинамики, сравнением аналитических выводов, результатов численного моделирования и имеющихся экспериментальных данных. Результаты, представленные в диссертации, получены лично автором либо при ее непосредственном участии.

В целом диссертацию можно характеризовать как актуальное исследование, выполненное на высоком научном уровне и имеющее важное фундаментальное и прикладное значение. При более детальной оценке к наиболее интересным и важным результатам можно отнести теоретическую модель удвоителя частоты на основе нанодиска из AlGaAs при одновременном возбуждении высокочастотных резонансных состояний на частотах лазерной накачки и ее второй гармоники и сравнение нелинейного отклика при использовании разных типов накачки с использованием мультипольного подхода. Представленный в работе подход может использоваться для прогнозирования и оценки параметров резонатора для возбуждения квази-связанных состояний в континууме в диэлектрических резонаторах и будет интересен широкому кругу исследователей, работающих в области диэлектрической нанофотоники, как теоретической, так и экспериментальной. Получение аналитических зависимостей мультипольных вкладов в излучение на частоте второй гармоники для сферических частиц из материалов с тензорной объемной квадратичной нелинейностью демонстрирует успешную реализацию подхода на основе леммы Лоренца для мультипольного анализа нелинейного отклика и подчеркивает возможность использования этого подхода не только для качественного, но и для количественного анализа мультипольного состава полей для нелинейных источников со сложным пространственным распределением. Следует особенно отметить, что результаты работы опубликованы в престижных научных журналах Nano Letters, ACS Nano, Advanced Optical Materials, Nanophotonics.

По представленным в диссертации материалам можно сделать ряд замечаний и вопросов

1. В третьей главе в разделе, посвященном генерации второй гармоники при возбуждении высокочастотных резонансных состояний в диэлектрическом субволновом резонаторе (раздел 3.4), приведены значения эффективности генерации второй гармоники в таблице 4 для нанодиска из AlGaAs, и сказано, что предложенный метод позволяет повысить эффективность частотного преобразования, однако не представлено сравнения с другими работами. Хотелось бы увидеть, как значения эффективности, приведенные в таблице 4, соотносятся с имеющимися работами, и действительно ли можно достичь таких значений в эксперименте, поскольку есть множество ограничивающих факторов, которые следует учитывать, такие как порог повреждения, эффективность сбора, конечная апертура, влияние подложки, конечность длительности импульсов и т. д.

2. В третьей главе при обсуждении эффекта анизотропии нелинейного отклика тримеров и квадримеров из кремния (раздел 3.5.1) приведены результаты моделирования для конкретных размеров структур. Однако размеры структуры являются одним из основных факторов, определяющих оптический отклик. Было бы интересно увидеть, как проявляется эффект анизотропии для тримеров и квадримеров с другими значениями диаметров дисков и другими размерами зазоров между дисками.

3. В третьей главе при обсуждении возможностей увеличения эффективности генерации третьей гармоники с использованием поляризационно-неоднородного лазерного излучения (раздел 3.5.2) приведены результаты расчетов мощности сигнала, нормированного на мощность сигнала от неструктурированной кремниевой пленки той же толщины. Было бы интересно увидеть сравнение усиления со случаем возбуждения азимутальным пучком одного диска той же высоты и заполнением того же объема, что и рассматриваемый квадрумер. Также в диапазон длин волн, представленном на рисунке 3.20, не входят моды  $RP_1$  и  $RP_2$ , которые можно возбудить радиальным пучком. Было бы интересно увидеть спектр рассеяния радиально поляризованного пучка и спектр сигнала на третьей гармонике при возбуждении этих мод. Кроме того, в тексте работы сказано, что теоретические выводы согласуются с результатами эксперимента. Было бы хорошо показать сравнение с экспериментом и узнать, как влияет апертура принимаемого сигнала на соотношение пиков в спектре отклика на третьей гармонике при возбуждении структуры азимутальным пучком.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на положительную оценку диссертационной работы И.И. Волковской. Автореферат и публикации по теме диссертации соответствуют содержанию диссертации. Диссертационная работа И.И. Волковской отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 11.09.2021), которые предъявляются к кандидатским диссертациям, а ее автор, Волковская Ирина Игоревна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физический Факультет Университета ИТМО

7 сентября 2022 г.

Рыбин Михаил Валерьевич

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», 197101, Кронверкский пр., д.49, лит. А, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Тел. +79052336650, e-mail: [m.rybin@metalab.ifmo.ru](mailto:m.rybin@metalab.ifmo.ru)

*подпись Рыбина М.В.  
удостоверено  
меткер ОПС  
Бой В.*

