

УТВЕРЖДАЮ

Проректор Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Московский государственный  
университет им. М.В. Ломоносова»



д.ф.-м.н., профессор,

/А. А. Федянин

«          »            2022 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу  
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 – радиофизика

Диссертационная работа И.И. Волковской посвящена исследованиям взаимодействия электромагнитных волн с частицами, малыми по сравнению с длиной падающей волны и системами из таких частиц.

Цель диссертационной работы – развитие общего теоретического описания взаимодействия электромагнитного излучения с субволновыми объектами и системами из них, а также применение развитых подходов в задачах поглощения электромагнитных волн в мелкодисперсных средах или компактированных материалах, задачах рассеяния и генерации оптических гармоник резонансными диэлектрическими и полупроводниковыми наноструктурами.

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

Во введении описаны актуальность выбора темы исследования, цели и задачи работы, методы исследования и научная новизна, научная и практическая значимость, сформулированы положения выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена электродинамическому описанию малых частиц в поле электромагнитной волны. В начале главы автор приводит обзор литературы о взаимодействии электромагнитного излучения с субволновыми системами, поддерживающими дипольные резонансы. Рассмотрены точные и приближенные методы описания рассеяния и поглощения электромагнитной волны малой сферической частицей при возбуждении низших дипольных мод. Проведен анализ и сравнение различных приближений. Приведены зависимости эффективности поглощения от диэлектрических свойств материала частиц, их размера и других параметров.

Глава 2 посвящена электродинамическому описанию мелкодисперсных материалов с помощью моделей эффективной среды. Основное внимание уделяется вопросам поглощения микроволнового излучения в металлических порошковых материалах, а также

в керамических и композитных материалах. Предложена новая модель расчета эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей смеси частиц на основе вычисления дипольного момента частицы в эффективной среде и получены условия ее применимости. Приведено сравнение предложенной модели с другими имеющимися способами расчета. Изложен метод и результаты экспериментального определения коэффициента поглощения микроволнового излучения в керамических и композиционных материалах при высоких температурах.

Глава 3 посвящена особенностям генерации оптических гармоник в диэлектрических и полупроводниковых резонансных наноструктурах из материалов с высоким показателем преломления. Изложена теория генерации второй гармоники лазерного излучения диэлектрическими частицами с анизотропным тензором объемной квадратичной нелинейной восприимчивости ( $\text{AlGaAs}$  и  $\text{BaTiO}_3$ ) при возбуждении волной накачки низших (электро- и магнитодипольных) резонансов типа Ми. Изложена теория генерации оптических гармоник при возбуждении высокодобротных резонансных состояний в субволновых диэлектрических структурах пучками с осесимметричным состоянием поляризации. Показано, что азимутально поляризованные пучки являются наиболее эффективным способом возбуждения сильно связанных TE-поляризованных мод (квази-локализованного состояния непрерывного спектра) нанодиска из  $\text{AlGaAs}$  с азимутальным распределением электрического поля с азимутальным распределением поля внутри диска. Рассмотрены особенности генерации третьей гармоники в наноструктурах из Si и представлены результаты численного моделирования нелинейного отклика олигомеров кремниевых дисков (тримеров и квадрумеров) при возбуждении коллективных мод с различным мультипольным составом с помощью пучков с линейной, азимутальной или радиальной поляризацией.

В заключении представлены 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. Текст работ, опубликованных по теме диссертации соответствует ее содержанию.

Достоверность и обоснованность основных результатов и положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнений.

Тема диссертации соответствует специальности 1.3.4 – «Радиофизика», автореферат полностью отражает содержание диссертации

### **Научная значимость результатов и практическое использование**

Исследования взаимодействия лазерных пучков с неоднородным состоянием поляризации с олигомерами цилиндрических частиц или другими упорядоченными наноструктурами, обладающими симметрией, открывают новые возможности для возбуждения узких резонансов с большим временем жизни и оптических переходов, что важно задач спектроскопии, при создании биологических и химических сенсоров и диагностики различных сред, например, возбуждении отдельных молекул или наноматериалов расположенных в ближнем поле наноструктуры. Поиск и внедрение новых способов повышения эффективности частотного преобразования также обеспечивают возможности детектирования сигнала при меньших значениях интенсивности падающего излучения, что позволяет оказывать меньшее влияние на свойства диагностируемой среды.

Определение мультипольного состава полей падающего излучения различных типов может применяться для оптимизации экспериментов по усилению нелинейных процессов в наноструктурах.

Знание диэлектрических характеристик материалов и омических потерь необходимо для производства деталей со сложной геометрией и настраиваемыми свойствами. Реализация метода измерений коэффициента поглощения и тангенса диэлектрических потерь керамических и композиционных материалов при высоких температурах в микроволновом диапазоне имеют несомненную значимость для развития технологий обработки материалов на основе керамики, в частности для аддитивных технологий. Результаты представляют интерес, в частности, при создании биосовместимой керамики для биомедицинских приложений. Метод может использоваться для измерения коэффициента поглощения во время процесса спекания и позволяет получать данные о том, как меняется процесс поглощения излучения при изменении температуры или пористости по мере уплотнения образцов, что важно для оптимизации микроволнового нагрева.

Модель эффективной магнитной проницаемости компактированных металлических порошковых материалов позволяет определять условия, при которых поглощение излучения в среде будет наиболее эффективным, и это может использоваться для ускорения процессов микроволнового нагрева и уплотнения металлических порошков. Это может быть актуально для организаций и предприятий, которые занимаются производством металлических порошков (например, РУСАЛ), а также композитных материалов.

### **Замечания**

Несмотря на высокий уровень представленной работы, хотелось бы отметить несколько замечаний и связанных с ними вопросов.

1. В разделе 3.2 автор приводит результаты генерации второй оптической гармоники для наночастиц из AlGaAs различного радиуса. При этом в качестве окружения выбран воздух, что невозможно реализовать на практике. Интересно было бы узнать, как наличие диэлектрической подложки может сказаться на данных результатах.
2. Можно ли на основе аналитических формул из раздела 3.2 сделать вывод, какие мультипольные вклады будут вносить наибольший вклад в выходной сигнал второй гармоники от подобных наночастиц? Если вспомнить, что AlGaAs является поглощающим материалом на длине волны излучения второй гармоники, то можно предположить, что моды с доминирующей концентрацией поля в центре частицы будут сильно подавлены по сравнению с модами, тяготеющими к краю. Как это учитывается в представленной модели?
3. В разделе 3.4 автор говорит о том, что эффективность генерации второй гармоники при возбуждении азимутально поляризованным пучком в несколько раз превышает случай с линейно поляризованным пучком. Для каких параметров азимутального пучка были получены эти результаты? Какова была его перетяжка и как ее изменение может повлиять на эффективность процесса?

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы и не влияют на обоснованность полученных результатов.

## Заключение

Диссертация отвечает всем требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК Минобрнауки России к кандидатским диссертациям, а ее автор Ирина Игоревна Волковская заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика»

Содержание диссертации обсуждалось на семинаре кафедры нанофотоники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова 01.07.2022 г. по результатам доклада соискателя. Настоящий отзыв составлен с учётом этого обсуждения.

Отзыв составил научный сотрудник кафедры нанофотоники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова к.ф.-м.н. по специальности лазерная физика Мусорин Александр Игоревич, musorin@nanolab.phys.msu.ru, +7 905 474-94-74

Научный сотрудник, к.ф.-м.н.



А.И. Мусорин

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»  
Почтовый адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1,  
Телефон: (495) 939-10-00,  
Email: [info@rector.msu.ru](mailto:info@rector.msu.ru),  
сайт: [www.msu.ru](http://www.msu.ru)

Подпись научного сотрудника кафедры нанофотоники физического факультета  
Мусорина А.И. заверяю

Ученый секретарь физического факультета МГУ  
д.ф-м.н., проф.



В.А. Каравеев