

## 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 посвящена исследованию взаимодействия электромагнитных волн с частицами, имеющими малые размеры по сравнению с длиной волны падающего излучения. В диссертации рассмотрен широкий круг задач, включающих определение эффективных параметров керамических композитных и порошковых материалов, исследование поглощения в них электромагнитного излучения микроволнового диапазона, анализ особенностей рассеяния электромагнитных волн и генерации оптических гармоник при возбуждении резонансов типа Ми в диэлектрических и полупроводниковых субволновых наноструктурах. Интерес к указанным проблемам обусловлен потребностями создания новых метаматериалов с заданными характеристиками на базе субволновых резонаторов, а также необходимостью развития методов микроволновой обработки различных мелкодисперсных материалов. Отмеченные обстоятельства делают развитие теоретических моделей, описывающих особенности взаимодействия электромагнитного излучения как с отдельными частицами малых электрических размеров, обладающими резонансными свойствами, так и с различными системами из таких частиц, безусловно, весьма актуальной задачей.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка публикаций автора по теме работы и списка цитируемой литературы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, очерчен круг решаемых задач, сформулированы цели работы, описаны использованные методы исследования, перечислены выносимые на защиту положения, отмечена новизна и обоснована достоверность полученных результатов, приведены сведения об их апробации и личном вкладе автора.

В главе 1 обсуждаются точные и приближенные решения задачи рассеяния и поглощения электромагнитных волн сферической частицей, имеющей малый радиус по сравнению с длиной волны в окружающей однородной среде. В рамках этого рассмотрения решение задачи, учитывающее низшие дипольные моды поля, сопоставляется с известным решением, полученным в квазистатическом дипольном приближении. На основе сравнения выражений для поля в окрестности частицы, отвечающих указанным решениям, получено условие, определяющее применимость квазистатического дипольного приближения. Приведены выражения для поглощенной и рассеянной мощности в случае возбуждения дипольных резонансов сферической частицы и определены параметры ее заполнения, при которых в ней достигается максимальное поглощение излучения применительно к резонансным условиям. При этом основное внимание уделено возбуждению магнитодипольного резонанса диэлектрической частицы с малыми омическими потерями в случае, когда ее радиус равен целому числу полуволн в заполняющей частицу среде. Получены

приближенные выражения для параметров лоренцевой кривой коэффициента рассеяния, описывающей магнитодипольный резонанс частицы с высоким показателем преломления, расположенной в свободном пространстве.

В главе 2 рассматривается новый метод определения эффективных свойств мелкодисперсных сред, на основе которого получена эффективная магнитная проницаемость металлических порошковых сред, используемая далее для расчета поглощения электромагнитного излучения в процессах микроволновой обработки подобных материалов. Метод основан на расчете наведенного дипольного момента сферического включения в эффективной среде с учетом зависимости этого момента от ее параметров. Заключительный раздел данной главы посвящен методу измерения диэлектрических свойств керамических и композитных материалов в микроволновом диапазоне при высоких температурах. Измерения мощности излучения при наличии и отсутствии исследуемого образца внутри нагревной камеры дают отношение добротностей резонатора в этих двух случаях, что позволяет вычислить коэффициент поглощения излучения в образце и затем тангенс угла диэлектрических потерь при известной действительной части диэлектрической проницаемости образца. Представлены результаты измерений температурных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне от 200°C до 600°C и 1100°C для двух образцов из алюмооксидной керамики на частоте 24 ГГц.

В главе 3 исследуются особенности генерации второй и третьей оптических гармоник в субволновых диэлектрических и полупроводниковых резонансных наноструктурах при их облучении лазерным пучком. Рассмотрен нелинейный отклик сферических и цилиндрических частиц из AlGaAs и BaTiO<sub>3</sub>, а также олигомеров кремниевых дисков. На основе разложения полей по векторным сферическим гармоникам, проанализирован мультипольный состав излучения, рассеянного такими структурами, а также его энергетические и угловые характеристики. Для сферических наночастиц из материалов, обладающих объемным тензором квадратичной нелинейной восприимчивости, рассчитаны мультипольные вклады в излучение на частоте второй гармоники при возбуждении первого магнитодипольного резонанса на основной частоте. Продемонстрирована возможность существенного возрастания эффективности генерации второй гармоники в нанодисках из арсенида алюминия-галлия при их облучении лазерным пучком с азимутальной поляризацией по сравнению со случаем использования линейно поляризованного излучения. На основе численного моделирования дано теоретическое объяснение эффекта анизотропии нелинейного отклика кремниевых олигомеров на частоте третьей гармоники. Установлено, что усиление данного отклика достигается путем возбуждения наиболее добротных резонансов системы на основной частоте путем подбора подходящего типа накачки, мультипольный состав которой соответствует мультипольному составу возбуждаемых мод. Приведены результаты моделирования нелинейного отклика при возбуждении наноструктуры из четырех дисков (квадрумеров) поляризационно-неоднородным лазерным излучением (пучками с радиальной и азимутальной поляризацией) и определены ее параметры, при которых достигается максимальная эффективность преобразования инфракрасного излучения в излучение видимого диапазона.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что она представляет собой законченную научную работу, в которой получен ряд новых результатов, важных в

теоретическом и практическом отношении. К числу наиболее интересных результатов диссертации можно отнести полученные в ней зависимости высокочастотной магнитной проницаемости порошковых сред из немагнитных проводящих материалов от концентрации и размеров частиц, образующих такие среды; реализацию метода измерения диэлектрических свойств керамических и композитных образцов с использованием гиротронного комплекса для микроволновой обработки материалов; определение факторов, влияющих на особенности генерации оптических гармоник субволновыми резонансными диэлектрическими и полупроводниковыми структурами. Результаты диссертации расширяют круг решенных задач по рассматриваемой тематике и могут быть использованы для развития методов спекания диэлектрических и металлических порошковых компактов, а также создания перспективных устройств нанофотоники, что значительно увеличивает ценность диссертации И. И. Волковской.

Достоверность результатов диссертации подтверждается использованием в ней апробированных теоретических и численных методов исследования, согласием сделанных в ней выводов с имеющимися экспериментальными данными, а также результатами, полученными ранее другими авторами для частных случаев. Все результаты диссертации имеют ясную физическую интерпретацию.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, опираются на полученные в ней результаты и являются полностью обоснованными.

Личный вклад автора состоит в проведении теоретического анализа и численных расчетов, участии в проведении ряда экспериментальных исследований, а также объяснении их результатов и не вызывает никаких сомнений.

Диссертация написана ясным и четким языком, хорошо оформлена и содержит большое число иллюстраций, делающих изложение достаточно наглядным.

В работе имеются, однако, некоторые недостатки.

1. В первой главе (раздел 1.2.3) при обсуждении условий поглощения ТЕ волны малой (по сравнению с длиной волны в окружающем свободном пространстве) сферической частицей на резонансе ее магнитодипольной моды автор приводит значения реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости частицы (107,7 и 0,6 соответственно), для которых имеет место резонансное поглощение. При этом в диссертации не обсуждается вопрос о возможности реализации материалов с такими параметрами.

2. Во второй главе при обсуждении вывода выражения (2.15) для магнитного дипольного момента сферической частицы в эффективной среде пропущены множители  $1/(2c)$  в формулах (2.17) и (2.19), где  $c$  – скорость света в вакууме, а в правых частях формул (2.18) и (2.19) отсутствует внешнее магнитное поле. При этом утверждение, что сумма выражений (2.18) и (2.19) дает магнитный дипольный момент частицы (2.15), используемый в последующем рассмотрении, не подтверждается непосредственной проверкой.

3. При обсуждении результатов экспериментов по определению тангенса угла потерь керамических материалов в разделе 2.3 указана погрешность выполненных измерений, достигающая 30%. Следовало бы пояснить, как была получена эта величина и чем объясняется ее сравнительно большое значение.

4. В главе 3 при обсуждении зависимости фактора ослабления мощности генерации второй гармоники от длительности импульса накачки (см. рис. 3.14) автор

ограничился столь схематичным обсуждением численного моделирования, дающего эту зависимость, что из текста диссертации практически невозможно понять, как конкретно оно проводилось.

Отмеченные недостатки не могут влиять на общую положительную оценку диссертации, ее научной и практической значимости.

Основные результаты диссертации И. И. Волковской опубликованы в 11 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК и 15 работах в сборниках трудов и тезисов докладов международных и российских научных конференций. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, можно заключить, что данная диссертационная работа является завершенным исследованием и удовлетворяет 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 – радиоп физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (специальность 01.04.03 – радиоп физика), профессор, заведующий кафедрой электродинамики радиоп физического факультета Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского

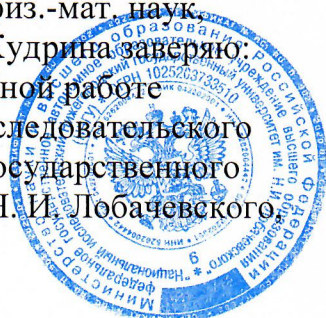
Выражаю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

Кудрин Александр Владимирович

06.09.2022

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского»  
Адрес: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23  
Тел.: (831) 4623262, электронный адрес: kud@rf.unn.ru

Подпись доктора физ.-мат. наук, профессора А. В. Кудрина заверю:  
Проректор по учебной работе  
Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского  
профессор



А. В. Князев