

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи
УДК 535.13:535.36

ЖУРАВЛЕВ АНТОН ВИКТОРОВИЧ

**РЕЗОНАНСНОЕ РАССЕЯНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН СФЕРИЧЕСКИМИ
ЧАСТИЦАМИ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2009

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент Геннадий Васильевич Белокопытов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Виктор Александрович Алешкевич

доктор физико-математических наук, профессор Александр Анатольевич Землянов

Ведущая организация: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Защита состоится 19 февраля 2009 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.67 при Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова по адресу 119992, г. Москва, ГСП-2, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория им. Р. В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан 16 января 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, Д 501.001.67
кандидат физико-математических
наук, доцент

А. Ф. Королев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования:

Исследование резонансного рассеяния света сферическими частицами является важным в многочисленных задачах как фундаментального, так и прикладного характера. Общая постановка задачи о дифракции электромагнитной волны на шаре была исследована в работах Ми [1] и Дебая [2]. Эти работы легли в основу оптики коллоидных сред и капельного аэрозоля. Кроме того, в биологии, медицине, радиофизике, ближнепольной микроскопии и других областях науки и техники широко развиты приложения теории Ми, связанные с применением металлических наночастиц и диэлектрических частиц микронных размеров.

По отношению к падающей электромагнитной волне сферические диэлектрические частицы являются объемными открытыми резонаторами, в которых возбуждаются вынужденные колебания. Последние эксперименты показывают, что добротность таких резонаторов, изготовленных из диэлектрика с низкими потерями, может достигать 10^{10} [3]. Высокие добротности таких частиц явились стимулом для развития целого ряда как научных направлений, так и технических приложений. Среди них можно отметить такие, как нелинейная оптика, квантовая электродинамика резонатора, резонаторно-улучшенная спектроскопия, а также создание на базе сферических диэлектрических частиц твердотельных лазеров, датчиков смещений и ускорений, сенсоров поверхностного слоя, биосенсоров, стабилизаторов частоты лазеров и СВЧ генераторов.

В металлических наночастицах на оптических частотах тоже возбуждаются вынужденные колебания, правда меньшей добротности. Это коллективные колебания электронов проводимости, вызванные действием электромагнитного излучения. Такие резонансы называют локализованными плазмон-поляритонными, или кратко – плазмонными. Они могут существовать в металлических наночастицах, когда действительная часть диэлектрической проницаемости вещества шара меньше нуля, что соблюдается для частот, меньших плазменной. Резонансные свойства наночастиц легли в основу развития целого ряда научных направлений и технических приложений.

Среди них можно отметить такие, как поверхностно-усиленная спектроскопия, оптическая микроскопия ближнего поля, визуализация биологических тканей, фототермическая терапия, доставка лекарственных препаратов. Широкое распространение получили также биосенсоры и маркеры биоспецифических взаимодействий на металлических наночастицах.

Широта различных применений сферических частиц обусловлена не только их уникальными свойствами, но и универсальностью оптических методов. Оптические методики регистрации и исследования наночастиц и диэлектрических частиц микронных размеров а также поверхностных слоев на них являются наиболее удобными, быстрыми по сравнению с другими и неразрушающими. В связи с этим **первая цель** настоящей диссертационной работы состоит в исследовании рассеяния света на сферических частицах и оценке перспектив применения обнаруженных закономерностей в оптическом диапазоне.

В ряде приложений остро стоит задача дистанционной диагностики поверхностного слоя, толщина которого в зависимости от системы варьируется от субмикронных до мономолекулярных размеров ($10^{-7} - 10^{-10}$). Существует широкое разнообразие датчиков и методик детектирования вещества поверхностного слоя. К ним можно отнести эллипсометрию, датчики на поверхностных плазмон-поляритонных волнах, интегрально-оптические интерферометры Маха-Цендера, дисковые резонаторы, а также сферические микрорезонаторы с различными элементами связи. Все эти устройства являются весьма чувствительными и широко используемыми в различных областях науки и техники. Датчики, в которых используются резонансные эффекты, являются наиболее чувствительными среди них, однако, они требуют элементов связи для подвода лазерного излучения. Это могут быть растянутые и срезанные оптические волокна, призмы, планарные волноводы. Элементы связи должны находиться вплотную к резонансным датчикам. Такие конструктивные особенности требуют специального аппарата для ввода и вывода исследуемого вещества в сенсоры, что во многих аспектах применения является желательным свойством. Однако есть задачи в которых нет возможности обеспечить подвод вещества в сенсор, напри-

мер, когда требуется удаленно и непрерывно (не разово, путем взятия пробы) контролировать показатель преломления жидкости или газа в потоке или когда объект исследования находится в герметичной камере с прозрачным окном, в которую подвод дополнительных коммуникаций затруднен. Примером последней задачи может быть проблема контроля толщины слоя в вакуумной камере установки по ионному осаждению. Во всех этих случаях востребован датчик, который позволяет удаленно регистрировать состояние поверхностного слоя. Причем желательно, чтобы датчик не требовал внешнего электропитания и работал автономно. Всем этим требованиям удовлетворяет сферический диэлектрический микрорезонатор, который возбуждается плоской волной или гауссовым пучком. Кроме того, часто требуется заменить регистрирующую часть сенсора в результате того что на ней адсорбировалось или хемисорбировалось вещество, которое затруднительно удалить. Сферический диэлектрический резонатор не дорог в изготовлении и легко может быть заменен, при этом регистрирующее оборудование остается неизменным. В связи с этим **вторая цель** настоящей диссертационной работы состоит в исследовании возможности улучшения характеристик сенсоров поверхностного слоя на диэлектрических резонаторах высокой добротности.

Еще одной актуальной задачей можно считать контроль качества металлических наночастиц. В настоящее время оптические методики уже нашли широкое применение в производстве композитных материалов, содержащих наночастицы. В частности, по частотной зависимости плазмонного резонанса осуществляется регистрация размеров металлических наночастиц, оценивается степень разброса их размеров. Для широкого круга приложений интересны металлодиэлектрические наночастицы, представляющие собой диэлектрические наночастицы, покрытые тонким поверхностным слоем металла. Требуют решения вопросы оптической диагностики однородности слоя, оценки дисперсии толщин слоев в таких частицах. Оценка распределения толщин слоев и их неоднородности важна в связи с тем, что толщина слоя влияет на поглощающие свойства частиц, а однородность – на усиление напряженности электрического поля. В связи с этим **третья цель** настоящей диссертационной работы со-

стоит в развитии оптических методов диагностики коллоидных сред, состоящих из металлодиэлектрических частиц, в частности методов оценки параметров распределения толщин металлических слоев.

Основными задачами диссертационной работы являются:

- Исследование структуры спектра поглощения и резонансного накопления энергии в прозрачных сферических частицах в широком диапазоне параметров дифракции, выявление закономерностей, связанных с резонансным возбуждением.
- Создание математической модели рассеяния плоской электромагнитной волны на сферической частице с анизотропным и (или) гиротропным поверхностным слоем и оценка возможности определения параметров анизотропного поверхностного слоя по характеристикам рассеяния.
- Исследование рассеяния света коллоидными средами, состоящими из диэлектрических наночастиц, покрытых тонким металлическим слоем. Оценка возможности определения параметров слоев статистического ансамбля частиц по угловым индикатрисам рассеяния.
- Исследование электромагнитных резонансов газовых пузырьков в жидкости. Оценка возможности регистрации размеров пузырьков по характеристикам рассеяния.
- Получение аналитических выражений электрической и магнитной дипольных поляризуемостей через парциальные амплитуды рассеяния теории Ми. Сопоставление этих выражений с квазистатическими и выявление границ применимости подхода представления сферической частицы парой эквивалентных точечных диполей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Установлено, что резонансные пики на зависимостях эффективности поглощения и накопленной энергии от параметра дифракции в диэлектрических шарах с низкими потерями сгруппированы в отдельные серии мод с одинаковым радиальным индексом, причем огибающие серий имеют подобный вид.
- Впервые получено аналитическое решение задачи рассеяния плоской электромагнитной волны на сферической частице с

тонким анизотропным и (или) гиротропным поверхностным слоем. При этом свойства слоя учитываются в граничных условиях путем введения тензора поверхностной поляризуемости.

- Предложен способ определения компонент тензора поверхностной поляризуемости тонкого анизотропного поверхностного слоя сферического кварцевого микрорезонатора. Метод основан на регистрации вызванных появлением слоя изменения параметров пары близких по частотам ТЕ и ТМ мод: сдвигов собственных частот и изменению добротностей.
- Исследовано влияние размерного эффекта, приводящего к анизотропии тонкого металлического слоя, на угловые индикатрисы рассеяния металлодиэлектрических наночастиц.
- Предложена модель, которая позволяет находить индикатрисы рассеяния коллоидных сред, состоящих из двухслойных наночастиц с анизотропным поверхностным слоем. При этом возможен учет статистического распределения частиц по размерам, слоев по толщинам и анизотропии слоев, вызванной размерным эффектом проводимости.
- В рамках предложенной модели решена обратная задача нахождения статистических параметров слоев (средней толщины и дисперсии) методом минимизации функционала среднеквадратичного отклонения теоретических угловых индикатрис рассеяния от экспериментальных.
- Исследованы условия представления рассеянного поля сферической частицы в виде поля двух точечных диполей. Показано, что границы применения дипольного приближения можно существенно (в 3–9 раз) расширить за пределы, установленные условием квазистационарности, при условии расчета поляризуемости с использованием формул парциальных амплитуд рассеяния теории Ми. Найдено, что для частиц с высокой диэлектрической проницаемостью дипольное представление является приближенно верным не только в дальней, но и в ближней зоне.

Практическая значимость работы:

Результаты работы могут быть использованы для улучшения характеристик сенсоров поверхностного слоя на основе сферических

диэлектрических микрорезонаторов, в частности для регистрации анизотропных и гиротропных слоев.

Разработана методика определения статистических параметров металлических слоев (средней толщины и дисперсии) ансамбля металлодиэлектрических наночастиц по угловым индикатрисам рассеяния. При этом размеры частиц могут быть меньше длины волны падающего излучения.

Положения, выносимые на защиту:

- Показано, что возможно определение всех компонент тензора поверхностной поляризуемости тонкого анизотропного поверхностного слоя сферического диэлектрического микрорезонатора путем регистрации вызванных появлением слоя изменений параметров пары близких по частотам ТЕ и ТМ мод: сдвигов собственных частот и изменению добротностей.
- Индикатрисы рассеяния коллоидных сред, состоящих из покрытых тонким металлическим слоем диэлектрических наночастиц, являются физическими характеристиками, по которым возможно определение статистических параметров поверхностных слоев (средней толщины и дисперсии).
- Максимальные размеры сферических частиц, при которых справедливо их представление парой эквивалентных точечных диполей, от трех до девяти раз больше (в зависимости от параметра дифракции и вещества шара), когда поляризуемость определена через точные формулы теории Ми, чем в случае использования квазистатических выражений поляризуемости.

Апробация работы и публикации:

Результаты диссертационной работы докладывались на Всероссийской конференции “Физика и применение микроволн” (Звенигород, 2005); Международной конференции “Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах” (Воронеж, 2005); Международной конференции “Materials for Advanced Technology / Advanced Materials” (Singapore, 2005); Международной конференции “ICONO/LAT 2005” (Санкт-Петербург, 2005); Всероссийской конференции “Волновые явления в неоднородных средах” (Звенигород, 2006); Всероссийской конференции “Физика и применение микроволн” (Звенигород,

2007), а также на семинарах кафедры физики колебаний физического факультета МГУ.

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 тезисах конференций [А1–А6], 5 статьях [А7–А11] и одном препринте [А12].

Личный вклад соискателя:

Результаты, представленные в диссертации, получены лично соискателем или в соавторстве при его определяющем участии.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы составляет 178 страниц, в том числе 153 страниц текста, 39 рисунков, 4 таблицы. Библиография содержит 246 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** содержится описание области научных исследований, к которой относится данная работа. Кратко изложено содержание представленных в литературе работ по данному направлению и обоснована актуальность темы исследований. Изложены цели диссертационной работы и ее наиболее важные результаты вместе с описанием их новизны и практической значимости.

Первая глава является обзором литературы. В связи с широтой проблемы и из-за большого количества публикаций было признано целесообразным ограничиться освещением круга вопросов, посвященных применению сферических микро- и нано- резонаторов в задачах оптической диагностики. Такой подход позволяет не только ограничить общее количество обзореваемых работ, но и коснуться практически всех существенных вопросов физики резонансного взаимодействия света со сферическими частицами. Некоторые вопросы, вошедшие в данный обзор, еще не нашли достаточного освещения в обзорной литературе. Обзор разбит на три части, ниже приведены названия параграфов для отражения его содержания.

- *Диэлектрические резонаторы микронных размеров в оптическом диапазоне (§1.1.). Сенсоры поверхностного слоя (§1.1.1.). Датчики смещений и ускорений (§1.1.2.). Резонаторно-*

улучшенная спектроскопия (§1.1.3.). Квантовая электродинамика резонатора (§1.1.4.).

- *Оптические менее плотные частицы* (§1.2).
- *Металлические наночастицы* (§1.3.). Поверхностно-усиленная спектроскопия (§1.3.1.). Визуализация тканей и фототермическая терапия (§1.3.2.). Оптическая микроскопия ближнего поля (§1.3.3.). Биосенсоры на металлических наночастицах (§1.3.4.).

Во **второй главе** описаны особенности резонансного возбуждения сферических частиц. При этом собраны сведения из различных источников, которые облегчают восприятие дальнейшего материала. Представлены классические модели, которые дополнены иллюстрациями, рассчитанными автором. Приведены аналитические выражения оптических полей в сферических частицах, коэффициенты разложения теории Ми. Кратко описан один из методов вычисления последних, который в дальнейшем применяется в диссертации. Далее глава разделена на три раздела, соответствующих физически разным особенностям резонансного возбуждения:

- *Собственные колебательные моды в прозрачных частицах* (§2.1). Описаны особенности резонансного и не резонансного возбуждения сферических частиц из диэлектрика с малыми потерями. Описано отличие мод шепчущей галереи и морфологических резонансов. Приведены численные расчеты распределения полей, соответствующие обоим случаям. Расчеты сопоставлены с экспериментальными фотографиями.
- *Электромагнитные поля в оптически менее плотных частицах* (§2.2). Приведена дисперсионная формула показателя преломления воды. Приведен расчет электромагнитного поля внутри пузырька и снаружи. Показано, что ни при каких условиях в пузырьках и вне их не наблюдаются высокие напряженности электромагнитного поля по отношению к падающей волне. Это важно для определения возможных причин эффекта сонолюминесценции [4].
- *Особенности рассеяния света металлическими частицами* (§2.2). Описаны следующие аспекты: понятие плазмонного резонанса в наночастицах; отличие его частоты от плазмонной

частоты в объемных металлах; модель Друде-Лоренца, и ее параметры согласно различным источникам; влияние конечного размера наночастиц на их оптические характеристики; особенности рассеяния диэлектрических частиц, покрытых тонким металлическим слоем. Приведены оценки минимальных размеров наночастиц, при которых существенную роль начинают играть квантовые эффекты.

В третьей главе приведены качественные закономерности поглощения и накопленной в резонаторе и за его пределами (вытекающих полей) энергии, которые являются общими для сферических резонаторов с невысоким показателем преломления при различных уровнях потерь. Спектры поглощения и накопленной энергии состо-

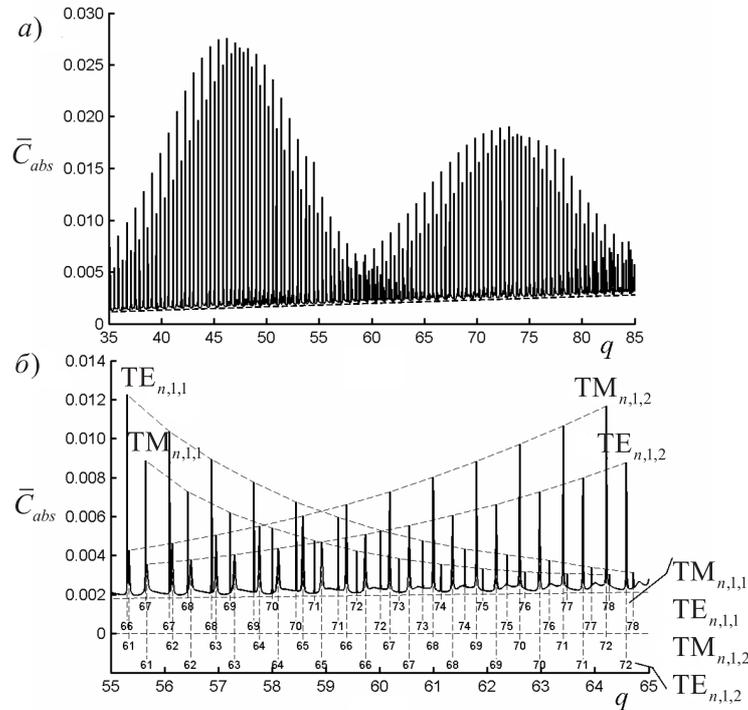


Рис. 1. Эффективность поглощения водяной капли \bar{C}_{abs} . Внизу указаны номера мод n , соответствующие резонансам указанных серий. $m_1 = 1.323 + 9.74 \cdot 10^{-6}i$, $m_2 = 1$

ят из нерезонансного “пьедестала”, и резонансных пиков, соответствующих возбуждению высокодобротных “мод шепчущей галереи” (см. рис. 1). При этом резонансные пики группируются в отдельные

серии, соответствующие модам различных порядков, а огибающие серий качественно подобны.

Описанные выше закономерности группировки резонансов в серии и вид огибающих серий становятся очевидными при рассмотрении спектров поглощения и накопленной энергии в широком интервале параметров дифракции и при учете конечного поглощения в диэлектрике. Сделанное при этом усовершенствование методики расчета панорамных спектров на неравномерной сетке будет также полезным при решении смежных задач теории Ми.

В четвертой главе получено аналитическое решение задачи рассеяния на сферической частице, учитывающие влияние тонкого анизотропного и (или) гиротропного слоя на ее поверхности. В качестве материальной электромагнитной характеристики слоя введен тензор поверхностной поляризуемости $\hat{\kappa}$ по методу, описанному в работе [5].

Были произведены исследования в рамках полученной модели, которые позволяют сделать ряд выводов. Так анизотропный поверхностный слой не нарушает сферическую симметрию задачи и не приводит к изменению набора возбуждаемых сферических гармоник по сравнению со стандартной теорией Ми, если компоненты тензора $\hat{\kappa}$ не зависят от угловых координат. Если слой обладает оптической активностью (гиротропией), возбуждаются моды, соответствующие ортогональной поляризации падающего излучения. При этом ТЕ (ТМ) моды исходной поляризации оказываются связанными с ТМ (ТЕ) модами ортогональной поляризации. Следствием возбуждения мод ортогональной поляризации может быть, в частности, изменение диаграммы направленности рассеянного излучения.

Итоговые соотношения модели поверхностной поляризуемости оказываются относительно простыми, сопоставимыми по сложности с формулами стандартной задачи Ми. Они допускают применение и для решения обратной задачи, то есть нахождения компонент тензора поверхностной поляризуемости тонкого анизотропного слоя. Предложен метод нахождения, который основан на регистрации вызванных появлением слоя изменений параметров пары близких по частотам ТЕ и ТМ мод: сдвигов собственных частот и изменению

добротностей.

Обратная задача актуальна в связи с экспериментами по возбуждению оптических микрорезонаторов из кварца с высокой добротностью ($10^6 - 10^{10}$). Одна из таких работ [3] указывает на то, что после отжига резонаторов, на их поверхности образуется мономолекулярный слой из адсорбированных молекул воды, который обладает аномальными для воды высокими потерями. Вместе с тем, в указанной работе регистрировались сдвиги частот и изменения добротностей только ТМ мод. Обработка результатов экспериментов с регистрацией пары близких по частотам ТЕ и ТМ мод и использованием результатов данной работы дает возможность диагностики свойств тонких анизотропных поверхностных слоев с извлечением детальной информации о нормальных и тангенциальных компонентах тензора поверхностной поляризуемости.

В **пятой главе** исследованы особенности резонансного рассеяния света металлическими и металлодиэлектрическими наночастицами. Глава разбита на две части.

Рассеяние света металлическими частицами (§5.1). Параграф посвящен некоторым аспектам, которые не нашли места в известной диссертанту литературе, вместе с тем представляющим научный интерес. Показано, что формулы эффективности экстинкции в длинноволновом (дипольном) приближении становятся неприменимыми для золотых наночастиц, больших 25-30 нм во всем диапазоне длин волн видимого, ультрафиолетового и ближнего ИК излучений. Эта граница существенно меньше оценки, используемой в литературе по общей физике, в которой часто полагают, что квазистатическое приближение справедливо, когда диаметр наночастиц в 15 раз меньше длины волны падающего света. Также была исследована зависимость частоты плазмонного резонанса от диаметров наночастиц в широком диапазоне параметров дифракции и представлены обзорные иллюстрации эффективности рассеяния и поглощения наночастиц из золота, серебра и алюминия, позволяющие находить оптимальные параметры наночастиц для создания эффективных поглотителей или рассеивателей. Обзорные иллюстрации построены с учетом размерного эффекта.

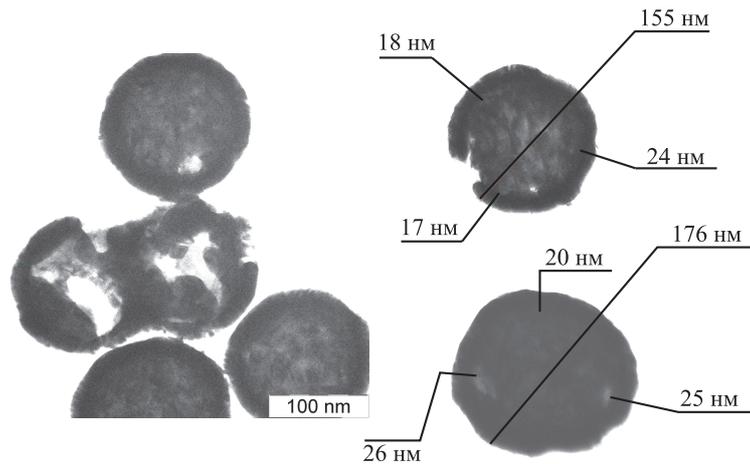


Рис. 2. Фотографии металлодиэлектрических наночастиц, сделанные на электронном микроскопе в ЦКП МГУ. Указаны диаметры наночастиц и толщины золотого покрытия, все наночастицы в одинаковом масштабе. Фотографии предоставлены Т. В. Лаптинской

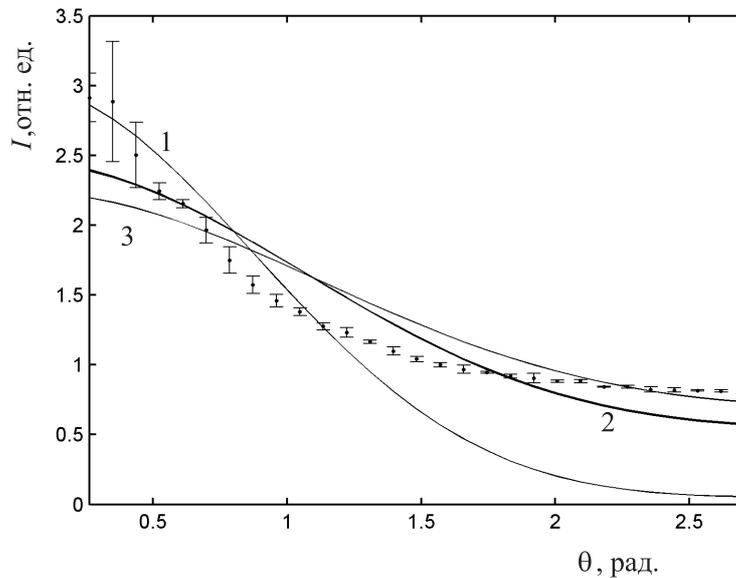


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния металлодиэлектрических частиц. Точки – эксперимент. Непрерывные кривые – расчет с учетом распределения частиц по размерам и в предположении гауссова распределения слоев по толщинам. Параметры гауссова распределения (d_0 нм, σ нм): кривая 1 – (10, 0); 2 – в минимуме функционала среднеквадратичного отклонения теоретических кривых от экспериментальных – (28, 0), (20, 3.6), (10, 8.0) и 3) – (40, 0).

Рассеяние света диэлектрическими наночастицами, покрытыми тонким металлическим слоем (§5.2). Было произведено сравнение теоретических моделей с экспериментом по рассеянию на металлодиэлектрических наночастицах, где в качестве металла и диэлектрика были выбраны золото и кремнезем (SiO_2). Раствор таких частиц был приготовлен А. С. Синицким (факультет наук о материалах МГУ), метод его получения подробно описан в [6], он состоит из металлодиэлектрических частиц со средним диаметром около 200 нм (см рис. 2). Упругое (или "статическое") и квазиупругое (или "динамическое") рассеяние света раствором с наночастицами исследовалось экспериментально на автоматизированной установке ALV-CGS-6010 (производство Германия, Ланген, лаборатория Т. В. Лаптинской, кафедра полимеров и кристаллов физического факультета МГУ), метод измерения описан в [7]. Результаты измерения угловых индикатрис рассеяния представлены на рис. 3.

Предложена модель, которая позволяет находить индикатрисы рассеяния коллоидных сред, состоящих из металлодиэлектрических наночастиц, которая учитывает статистическое распределение частиц по размерам, слоев по толщинам, и анизотропию слоев, вызванную размерным эффектом проводимости. Расчеты в рамках модели дали результаты, хорошо согласующиеся с полученными в эксперименте, см. рис. рис. 3.

В шестой главе диссертации установлено, что газовый пузырек в жидкости обладает электромагнитными резонансами, имеющими, при достаточно больших размерах пузырька, заметную добротность ($Q \sim 10^2$). Это означает, что большая часть электромагнитной энергии пузырька накапливается в виде волн, обладающих большой пространственной неоднородностью. Ввиду того, что в пузырьках больших размеров происходит одновременное возбуждение многих мод, наличие резонансов оказывается скрытым и не проявляется на интегральных характеристиках рассеяния. Однако резонансы могут проявляться на зависимостях дифференциального сечения света, рассеянного на большие углы.

Рассчитана сила светового давления, действующая на газовый пузырек в жидкости. Рассмотрены условия оптического погруже-

ния, при которых освещаемый газовый пузырек находится в жидкости в условиях устойчивого равновесия. Обсуждаются особенности и возможные приложения эффекта оптического погружения.

В седьмой главе диссертации получены формулы, позволяющие выразить электрическую и магнитную дипольные поляризуемости через парциальные амплитуды рассеяния теории Ми:

$$\begin{aligned}\alpha_e &= -i({}^e B_1)/k_2^3, \\ \alpha_m &= -i({}^m B_1)/k_2^3.\end{aligned}\tag{1}$$

Формулы (1) учитывают как потери энергии в диэлектрике, так и потери на излучение и пригодны для сферических частиц с любыми размерами и диэлектрическими проницаемостями. В частности, они остаются верными для резонаторов, у которых потери на излучение намного больше потерь за счет поглощения в диэлектрике. В то же время известные приближенные квазистатические формулы поляризуемости, перестают быть верными для таких частиц.

Были произведены расчеты дипольных вкладов в общую энергию волны, рассеянной диэлектрическим шаром, и показано, что если радиус сферических частиц удовлетворяет условию $a < \lambda_2/(4...5)$ (где λ_2 – длина волны в окружающей шар среде), то рассеянная волна в дальнем поле приближенно сводится к излучению двух осциллирующих диполей, электрического и магнитного. При этом для шаров из материала с высокой диэлектрической проницаемостью верхняя частота применимости дипольного приближения f_d может быть гораздо выше частоты основного дипольного резонанса ($f_d/f_{1,1,1}^{TE} = 5.3$ для рутила ($\epsilon' = 130$) и $f_d/f_{1,1,1}^{TE} = 22$ для ВК-7 ($\epsilon' = 2700$)).

Для сферических частиц с высокой проницаемостью ($\epsilon' > 10^2$) дипольное приближение хорошо описывает (с относительной точностью лучше 5%) также и ближнее поле рассеянного излучения. Это свидетельствует в пользу правомерности приближенных подходов по расчету характеристик метаматериалов, в которых рассеянные частицами поля заменяются полями эффективных дипольных излучателей [8]. Разумеется, в конкретных случаях для надежного

суждения о степени точности дипольного приближения требуется дополнительный расчет. Соответствующие вычисления не представляют больших трудностей, и время, затраченное на их проведение, заведомо окупается при моделировании метаматериалов.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Разработана и программно реализована методика расчета эффективностей поглощения, рассеяния, экстинкции, давления излучения, и других характеристик в теории Ми с неравномерным шагом по параметру дифракции, которая позволяет корректно учитывать и идентифицировать резонансы сферических частиц.
2. Проанализированы зависимости эффективности поглощения и накопленной энергии от параметра дифракции в диэлектрических шарах с низкими потерями. Показано, что резонансные пики сгруппированы в отдельные серии с одинаковым радиальным индексом, причем огибающие серий имеют подобный вид.
3. Показано, что наиболее эффективное возбуждение мод сферического оптического резонатора с низкими потерями достигается при условии, когда тепловые потери равны потерям на излучение. Это условие соблюдается, если радиус шара превышает критическое значение, которое, в частности, для кварцевого резонатора составляет 5 мкм.
4. Решение задачи Ми обобщено на случай модифицированных граничных условий, которые учитывают наличие тонкого поверхностного слоя путем введения поверхностной поляризуемости. Полученное решение применимо для учета влияния анизотропии и гиротропии поверхностного слоя на рассеяние частицы, а также для оценки параметров слоя по данным рассеяния.
5. Предложена модель, которая позволяет находить индикатрисы рассеяния коллоидных сред, состоящих из металлодиэлектрических наночастиц, которая учитывает статистическое

распределение частиц по размерам, слоев по толщинам, и анизотропию слоев, вызванную размерным эффектом проводимости. Расчеты в рамках модели дали результаты, хорошо согласующиеся с полученными в эксперименте с наночастицами SiO_2 , покрытыми золотом.

6. Исследованы электромагнитные резонансы газовых пузырьков в жидкости. Установлено, что в широком диапазоне параметров дифракции ($q < 500$), резонансы парциальных амплитуд имеют невысокую добротность ($Q < 10^2$). При одновременном возбуждении многих мод парциальные вклады в рассеяние под большими углами ($\theta > 90^\circ$), интерферируют в противофазе, что приводит к сильно осциллирующей от размера пузырька зависимости интенсивности рассеянного излучения.
7. Получены аналитические выражения электрической и магнитной поляризуемостей через парциальные амплитуды теории Ми. Установлены границы применимости подхода, при котором поле рассеяния шаром, в СВЧ и оптическом диапазонах в дальней и ближней зоне можно считать излучением пары эквивалентных точечных диполей, электрического и магнитного.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Журавлев А. В. Моделирование структуры электромагнитного поля и резонансных свойств сферических диэлектрических резонаторов, покрытых тонким поверхностным слоем // Материалы IV международного семинара. Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах. Воронеж. — 2005.
- A2. Белокопытов Г. В., Журавлев А. В. Влияние тонкого поверхностного слоя на резонансы сферических диэлектрических резонаторов // Тезисы конф. "X Всероссийская школа семинар: Физика и применение микроволн." Секция: электродинамика. — Звенигород: ООП физ. ф-та МГУ, 2005. — Р. 11–13.

- A3. Belokopytov G. V., Zhuravlev A. V., Lagarkov A. N. et al. Effective permeability of 2D-lattice of dielectric resonators // Int. Conf. on Materials for Advanced Technology / Int. Conf. of Advanced Materials. — Singapore: 2005. — P. R-8-OR26.
- A4. Belokopytov G. V., Zhuravlev A. V. The effect of thin surface layer on Mie scattering resonances // Theses conf. "ICONO/LAT 2005". Section: Physics and Optical Diagnostics of Nanostructures. — 2005. — P. IThU1.
- A5. Белокопытов Г. В., Журавлев А. В. Дипольная поляризуемость сферических частиц // Тезисы конф. "X Всероссийская школа семинар: Волновые явления в неоднородных средах". Секция: метаматериалы, периодические и дискретные структуры. — Звенигород: 2006. — P. 12-14.
- A6. Белокопытов Г. В., Журавлев А. В. Резонансы электромагнитной энергии в сферических диэлектрических резонаторах // Тезисы конф. "XI Всероссийская школа семинар: Физика и применение микроволн." Секция: электродинамика. — 2007.
- A7. Белокопытов Г. В., Журавлев А. В. Дипольная поляризуемость сферических частиц // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2008. — Т. 11, № 1. — С. 41-49.
- A8. Белокопытов Г. В., Журавлев А. В. Влияние тонкого поверхностного слоя на резонансы сферических диэлектрических резонаторов // Оптика и спектроскопия. — 2006. — Т. 100, № 4. — С. 681-686.
- A9. Белокопытов Г. В., Журавлев А. В. Давление света на газовые пузырьки: компенсация архимедовой силы // Письма в ЖТФ. — 2003. — Т. 29, № 24. — С. 22-26.
- A10. Белокопытов Г. В., Журавлев А. В. Структура спектра поглощения диэлектрического шара // Вестник Московского Университета, сер. 3 физика астрономия. — 2003. — Т. 44, № 2. — С. 34-38.
- A11. Belokopytov G. V., Zhuravlev A. V. The effect of thin surface layer on Mie scattering resonances // Proc. SPIE. — 2006. — Vol. 6258. — P. 62581-1 – 62581-12.

A12. Белокопытов Г. В., Журавлев А. В., Соколов А. И. Электромагнитные резонансы газовых пузырьков в жидкости. — М., 2003. — 14 с. — Препринт физического факультета МГУ N 1/2003.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mie G. Beitrage zur optik truber medien // Ann. Phys. (Leipzig). — 1908. — Vol. 25. — P. 377–445.
2. Debye P. Der lichtdruck auf kugeln von beliebigen material // Ann. Phys. (Leipzig). — 1909. — Vol. 30. — P. 57–136.
3. Gorodetsky M. L., Savchenkov A. A., Ilchenko V. S. Ultimate Q of optical microsphere resonators // Opt. Lett. — 1996. — Vol. 21, No. 7. — P. 453–455.
4. Taleyarkhan R. P., West C. D., Cho J. S. et al. Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation // Science. — 2002. — Vol. 295. — P. 1868.
5. Голубков А. А., Макаров В. А. Граничные условия для электромагнитного поля на поверхности сред со слабой пространственной дисперсией // УФН. — 1995. — Т. 165, № 3. — С. 339–346.
6. Синицкий А. С. Синтез, структура и дифракционные свойства фотонных кристаллов на основе опалов и инвертированных опалов: Дис. канд. хим. наук: 02.00.21. — Москва, 2008. — 141 с.
7. Sinitskii A. S., Khokhlov P. E., Abramova V. V. et al. Optical study of photonic crystal films made of polystyrene microspheres // Mendeleev Communications. — 2007. — Vol. 17, No. 1. — P. 4–6.
8. Белокопытов Г. В., Лагарьков А. Н., Семенов В. Н., Чистяев В. А. Модель искусственного магнетика, двумерная решетка резонансных диполей // Радиотехника и электроника. — 2005. — Т. 50, № 1. — С. 89–94.