На правах рукописи

Долматов Артур Викторович

Исследование СВЧ диэлектрической проницаемости композитных материалов с различной формой и структурой проводящих включений

1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН)

Научный руководитель:

Маклаков Сергей Сергеевич
к.ф.-м.н., заведующий лабораторией №5 электрофизики новых функциональных материалов ИТПЭ РАН, г. Москва

Официальные оппоненты:

Барышев Александр Валерьевич
д.ф.-м.н., начальник оптической лаборатории Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», г. Москва

Калинин Юрий Егорович
д.ф.-м.н., профессор кафедры физики твердого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж

Ведущая организация:

Федеральное государственное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия орденов Ленина, Октябрьской Революции, Жукова Краснознамённая имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж

Защита состоится 10.12.2025 на заседании Диссертационного совета 99.1.044.02 на базе ИТПЭ РАН при участии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 6, конференц-зал (комната 306)
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Автореферат разослан _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 99.1.044.02
доктор физико-математических наук Дорофеенко А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Композитные материалы (КМ), состоящие из диэлектрической матрицы и проводящих включений, широко применяются в качестве активных сред для СВЧ приложений и для создания пассивных СВЧ элементов антенной техники, позволяющих формировать необходимую структуру электромагнитного поля: линз, рассеивателей, согласующих элементов. Получение КМ с заданными электрофизическими характеристиками для нужд практического производства остаётся актуальной задачей современной электродинамики. Однако, несмотря на развитые теоретические представления о зависимости СВЧ диэлектрической проницаемости от структуры КМ, теоретические предсказания электродинамических характеристик конкретных материалов часто не совпадают с экспериментальными результатами, а для ряда экспериментальных наблюдений нет соответствующих объяснений. Одной из причин расхождения экспериментальных и теоретических результатов является неоднородность структуры реальных КМ, а также отсутствие методов описания этой неоднородности.

Важным фактором, влияющим на диэлектрическую проницаемость КМ, является форма частиц включений. Использование частиц различной формы из одного и того же материала позволяет существенно изменять его электродинамические свойства. Методы учёта формы частиц и распределения частиц по размерам для применения в электродинамических расчётах в настоящее время отсутствуют. В связи с этим, разработка метода, позволяющего оценивать распределение частиц наполнителя КМ по форме, а также оценка применимости различных способов аппроксимации формы частиц для проведения электродинамических расчётов, представляют несомненный интерес.

Важной проблемой является описание эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей КМ как функции проницаемостей материала частиц включений и матрицы. Стандартный подход к решению этой задачи состоит в применении эмпирических формул смешения. Формулы смешения используют идеализированные модели, основанные на рассмотрении включений эллипсоидальной формы. Классические модели смешения, такие как формулы Максвелла, Максвелла Гарнетта и Бруггемана, часто не позволяют описывать свойства КМ, поскольку не учитывают явление перколяции, взаимодействие между частицами включений и неоднородность распределения включений по форме и структуре. В связи с этим, развитие моделей смешения, позволяющих учитывать распределение частиц включений по форме и размерам, полученное на основе экспериментальных данных, является актуальной задачей с точки зрения фундаментальной и прикладной электрофизики.

Другой актуальной проблемой является формирование агрегатов частиц в структуре КМ. Скопление частиц, сопряжённое с контактными явлениями, приводит к изменению эффективного фактора деполяризации и изменяет электродинамические свойства КМ. Известно, что нанесение защитных

покрытий на поверхность металлических частиц наполнителя может препятствовать образованию агрегатов. С учётом требований к механическим, термическим и коррозионным свойствам современных КМ наиболее перспективным является нанесение слоёв химически инертного и прочного оксида кремня, что позволяет повысить степень контроля электрофизических параметров КМ. Однако в настоящее время известны примеры нанесения защитных диэлектрических оболочек только незначительной толщины, порядка 100 нм. Разработка методики нанесения защитной оболочки из оксида кремния большей толщины представляет интерес для расширения возможностей создания новых наполнителей КМ.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное исследование влияния формы и структуры металлических включений микронных размеров на СВЧ диэлектрическую проницаемость КМ с диэлектрической матрицей.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Анализ формы частиц включений с использованием данных электронной микроскопии. Определение оптимального способа аппроксимации формы несферических частиц для расчёта эффективной диэлектрической проницаемости КМ.

2. Экспериментальный и теоретический анализ вклада распределения частиц включений по форме в эффективную диэлектрическую проницаемость КМ. Построение спектральной характеристической геометрической функции распределения частиц по форме на основе экспериментальных данных.

3. Исследование зависимости диэлектрических свойств КМ от состава и толщины диэлектрической оболочки SiO_x на поверхности частиц карбонильного железа. Разработка метода направленного изменения физико-химических свойств и толщины оболочек SiO_x на поверхности мелкодисперсных частиц железа.

4. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния толщины оболочки SiO_x на частицах железа на эффективную диэлектрическую проницаемость КМ.

5. Исследование однородных лёгких диэлектрических материалов с контролируемой диэлектрической проницаемостью для применений в СВЧ диапазоне.

Научная новизна. Исследованы особенности структуры КМ с несферическими наполнителями, разработана методология учёта распределения включений по форме и размерам при оценке эффективной диэлектрической проницаемости включений. Проведено сравнение различных методов аппроксимации формы несферических частиц включений эллипсоидами и параллелепипедами для оценки коэффициентов деполяризации и эффективной диэлектрической проницаемости КМ на основе таких частиц. Предложена модель, позволяющая учитывать распределение трёх экспериментально определённых факторов деполяризации частиц наполнителя для расчёта диэлектрической проницаемости КМ. Показано, что учёт распределения частиц по форме повышает точность расчёта эффективной диэлектрической проницаемости КМ с металлическими включениями.

Впервые в результате многоитерационного гидролиза ортокремниевого эфира получены оболочки SiO_2 на поверхности частиц карбонильного железа толщиной до 450 нм. На основании численных расчётов продемонстрирована возможность применения однородного лёгкого диэлектрика для создания эффективного отражателя СВЧ излучения дециметрового диапазона длин волн.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современного оборудования и верифицированных методик, качественным соответствием теоретических и экспериментальных данных при оценке эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей металл-диэлектрических КМ, воспроизводимостью результатов при использовании различных физико-химических методов, а также согласием с теоретическими и экспериментальным результатами других исследователей.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке методов анализа и проектирования необходимых особенностей СВЧ диэлектрической проницаемости КМ с диэлектрической матрицей и металлическими включениями. Полученные в работе результаты развивают существующие представления о влияния формы частиц включений на электродинамические параметры КМ. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для создания перспективных КМ с новыми функциональными возможностями для СВЧ приложений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод определения коэффициентов деполяризации несферических частиц включений для применения в электродинамических расчётах диэлектрической проницаемости КМ. Метод использует экспериментальные данные о форме частиц, полученные при помощи электронной микроскопии. Математический аппарат метода включает аппроксимацию формы частиц эллипсоидами и параллелепипедами и позволяет оценить с высокой точностью значения диэлектрической проницаемости КМ при низких концентрациях включений.

2. Математическая модель, учитывающая распределение несферических частиц включений по форме, позволяющая повысить точность расчёта эффективной диэлектрической проницаемости КМ по сравнению с моделями, в которых используются усреднённые данные о форме частиц.

3. Возможность направленного изменения диэлектрических свойств КМ за счёт модификации поверхности частиц включений защитной оболочкой SiO_2. Разработана методика нанесения оболочек SiO_2 толщиной до 450 нм на частицы карбонильного железа при помощи итерационного гидролиза ортокремниевого эфира. Теоретически и экспериментально показано, что увеличение толщины оболочки направленно уменьшает диэлектрическую проницаемость КМ на основе полученных порошков.

4. Электродинамические расчёты, показывающие перспективность применения разработанных в ходе выполнения работы лёгких диэлектрических материалов для создания эффективных линзовых отражателей для дециметрового диапазона длин волн.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы были представлены в виде устных и стендовых докладов на международных и всероссийских научных конференциях: 62-я – 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Долгопрудный, 2019-2023); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2019, 2020, 2021, 2022); XXIV Международная конференция «Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах» (Москва, 2021); Ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН (2019 – 2024), а также на научных семинарах лаборатории электрофизики новых функциональных материалов ИТПЭ РАН.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении гранта Российского научного фонда №25-19-00393 и индивидуального гранта по программе «Умник-МФТИ 2023». Результаты работы были использованы в ИТПЭ РАН при проведении научных исследований в рамках подпрограммы 6 Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) по теме 12.1.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 6 статьях, из которых 4 статьи индексируются базами данных Web of Science и Scopus, и в 20 тезисах докладов на научных конференциях. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024680265, регистрационный номер №20244668294. Программа позволяет рассчитывать эффективную диэлектрическую проницаемость двух- и трехкомпонентных КМ, учитывая при этом форму частиц.

Личный вклад автора состоит в постановке задач, практической реализации экспериментальных методов для их решения, химическом синтезе модифицированных ферромагнитных порошков с последующим анализом при помощи физико-химических методов. Автором выполнен весь объём экспериментальных работ, связанных с измерениями СВЧ диэлектрической и магнитной проницаемостей КМ, проведены численные расчёты эффективных электродинамических параметров и предложены новые модели для оценки эффективной диэлектрической проницаемости КМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 97 ссылок. Работа изложена на 123 страницах, содержит 63 рисунка и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая значимость, обоснована достоверность полученных результатов, а также содержатся сведения об апробации результатов и личном вкладе автора.

В **первой главе** представлен обзор литературы по теме диссертации. Рассмотрены основные подходы к созданию КМ, являющихся эффективными поглотителями электромагнитной энергии в СВЧ диапазоне. Показано, что наиболее перспективными наполнителями при создании СВЧ поглотителей являются порошки на основе железа. Представлен анализ возможных модификаций материалов на основе железа для создания перспективных функциональных материалов. Показано, что использование структур «ядро-оболочка» с магнитным ядром и диэлектрической оболочкой на основе SiO_2 расширяет возможности применения таких порошков для задач поглощения электромагнитного излучения по сравнению с обычными железными порошками. Рассмотрены процессы, происходящие при образовании слоя SiO_2 на частицах железа.

Также рассмотрены особенности структуры и свойств лёгких КМ, которые могут применяться в качестве однородных сферических отражателей и диэлектрических линз для радиофизических приложений в СВЧ диапазоне.

Представлены основные методы исследования эффективных электродинамических свойств КМ при помощи формул смешения. Формулы смешения используются для описания эффективных свойств двухкомпонентных смесей, состоящих из матрицы и включений. Рассмотрены традиционные подходы, основывающиеся на идеальной матричной структуре материала со слабовзаимодействующими сферическими включениями: модель Максвелла Гарнетта, теория эффективной среды (модель Бруггемана), формула Ландау–Лифшица–Лойенги.

Показано, что для описания КМ с несферическими включениями необходимо использовать более сложные модели: спектральную теорию Бергмана–Милтона, формулу Оделевского. В отличие от традиционных моделей смешения, такие модели позволяют учитывать форму отдельных включений или используют эффективный форм-фактор – эмпирически получаемый параметр, описывающий эффективную форму включений.

Вторая глава посвящена исследованию влияния формы и размера частиц магнитных наполнителей на СВЧ диэлектрическую проницаемость КМ.

В **разделе 2.1** исследуются КМ на основе несферических и сферических включений, а также сравниваются подходы к аппроксимации формы наполнителей эллипсоидами и параллелепипедами. Теоретические оценки диэлектрической проницаемости КМ, полученные при использовании модели Максвелла Гарнетта, сравниваются с экспериментальными данными.

В качестве объекта исследования использовали КМ с парафиновой матрицей и частицами различной формы. КМ изготавливались смешением навесок наполнителя и матрицы при нагревании выше точки плавления парафина и медленном остывании с постоянным механическим перемешиванием. Далее частицы полученного материала измельчали и формовали горячим прессованием в форме тороида. В качестве наполнителей с частицами различной формы выбраны порошки с камневидными частицами с фракциями от 100 до 500 мкм, порошки сферического карбонильного железа со средним размером 3 мкм и плоские металлические частицы с латеральными размерами до 150 мкм. Комплексные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей исследованных КМ были экспериментально определены по методу Николсона–Росса–Уира [1, 2]. S-параметры КМ, помещённых в воздушную линию, были измерены в диапазоне частот 0,5–15 ГГц при помощи векторного анализатора цепей. Порты на концах коаксиального кабеля были откалиброваны с помощью стандартной процедуры калибровки TRL [3].

Для теоретической аппроксимации диэлектрической проницаемости ε_{eff} КМ «наполнитель + парафиновая матрица» использовалась формула Максвелла Гарнетта, обобщённая для случая несферических частиц:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_e + \varepsilon_e \frac{(p/3)\sum_{j=1}^{3} \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_e)}{\varepsilon_e + N_j(\varepsilon_i - \varepsilon_e)}}{1 - (p/3)\sum_{j=1}^{3} \frac{N_j(\varepsilon_i - \varepsilon_e)}{\varepsilon_e + N_j(\varepsilon_i - \varepsilon_e)}} \ . \qquad (1)$$

Здесь ε_e и ε_i – диэлектрические проницаемости матрицы и наполнителя, соответственно, N_j – коэффициент деполяризации вдоль главной оси j эллипсоида и p – объёмная концентрация включений.

Коэффициенты деполяризации N_j несферических включений рассчитывали двумя способами. В первом случае частицы аппроксимировали эллипсоидами, значения N_j для которых выводятся аналитически [4]. Во втором случае включения аппроксимировали параллелепипедами. Для параллелепипедов значения N_j могут быть рассчитаны численными методами, исходя из связи полного магнитного момента образца с приложенным магнитным полем [5]. В этом случае один из коэффициентов деполяризации рассчитывается по следующей формуле [5]:

$$N^{-1} = 1 + \frac{3c}{4a}\left(1 + \frac{a}{b}\right), \qquad (2)$$

где a, b и c – длины сторон параллелепипеда, описывающего изображение частицы на электронной микрофотографии. Остальные коэффициенты деполяризации рассчитываются, учитывая, что наибольший вклад в поляризуемость частицы даёт наименьший из коэффициентов деполяризации, а сумма N_j равна единице.

При увеличении концентрации наполнителя и при увеличении несферичности формы включений значение действительной части

диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{eff}=\varepsilon'$ возрастает (Рис. 1). Форма зависимости ε' от «вытянутости» частиц различается для разных способов описания частиц. Это вызвано отличиями в математических моделях, в которых форма частиц описывается параллелепипедами или эллипсоидами. При объёмной концентрации наполнителя 5 % и аппроксимации включений параллелепипедами формула смешения предсказывает значение $\varepsilon' = 3{,}0 \pm 0{,}2$ в зависимости от «вытянутости» включений. При аппроксимации включений эллипсоидами диапазон значений ε' шире: $\varepsilon' = 3{,}1 \pm 0{,}7$ в зависимости от «вытянутости» частиц.

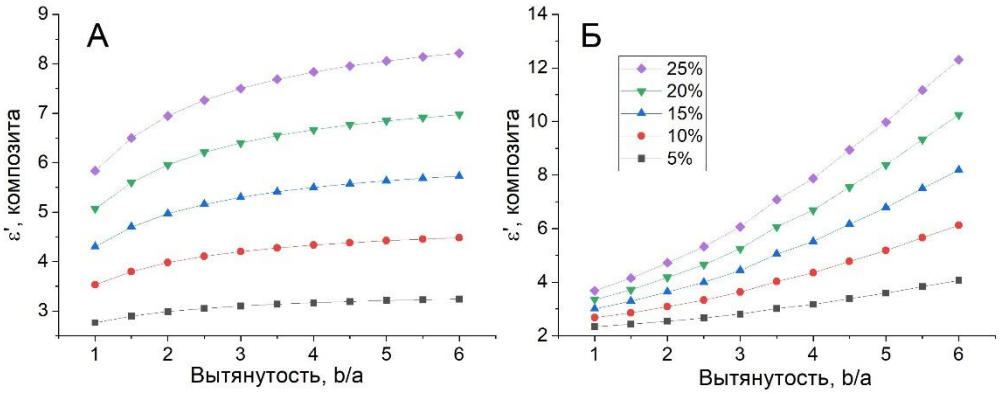


Рис. 1. Рассчитанные значения эффективной диэлектрической проницаемости КМ для несферических включений при различной концентрации и «вытянутости» частиц: А – аппроксимация частиц параллелепипедами; Б – аппроксимация частиц эллипсоидами.

Для получения количественных характеристик, описывающих форму несферических частиц, анализировали изображения со сканирующего электронного микроскопа (Рис. 2). Было экспериментально определено, что для набора репрезентативной статистики достаточно провести измерения формы 300 индивидуальных частиц каждого конкретного порошка. Расширение выборки до 2000 частиц не приводит к существенному изменению распределения частиц по размерам. Также проведён сравнительный анализ экспериментальных данных, получаемых при помощи метода исследования размера частиц, основанного на использовании электронной микроскопии, и традиционного метода, основанного на лазерной дифракции. Обнаружено, что агрегация частиц в иммерсионной жидкости при проведении измерения, а также отклонение формы частиц от сферической формы приводят к искажению результатов оптического метода. Размеры частиц, полученные с применением лазерной дифракции, смещены в область больших размеров.

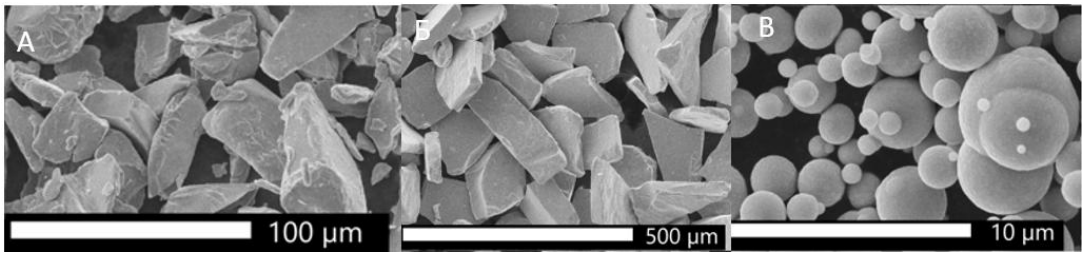


Рис. 2. Изображения с электронного микроскопа: А – несферические частицы, малая фракция; Б – несферические частицы, крупная фракция; В – сферические частицы карбонильного железа.

Введём количественную характеристику, отражающую «вытянутость» частиц, как отношение длины большей полуоси эллипса, описанного вокруг изображения частицы, к меньшей. Полученные данные показывают, что крупная и мелкая фракции порошков, выбранных для исследования, по «вытянутости» частиц отличаются незначительно (Рис. 3). Следовательно, стоит ожидать близкие значения ε′ для КМ на основе этих порошков.

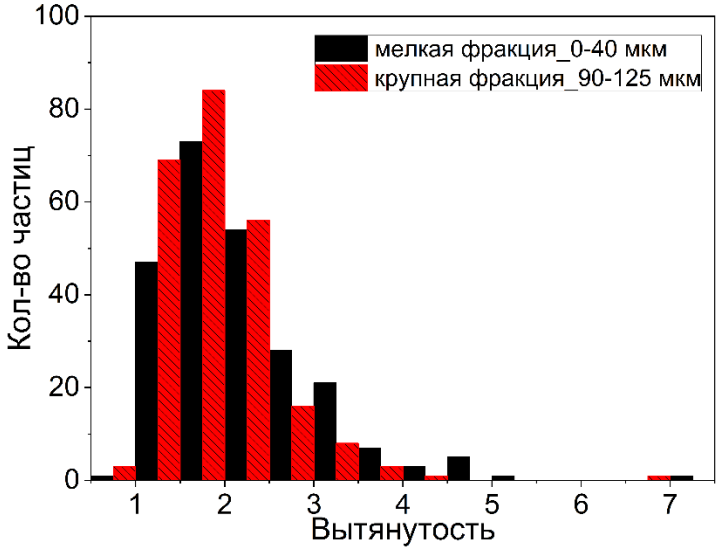


Рис. 3. Распределение двух фракций несферических частиц по форме («вытянутости»).

Сравнение теоретической оценки (Рис. 1) с экспериментальными данными (Рис. 4) показывает, что оба метода аппроксимации дают количественное согласие с экспериментом. Величина диэлектрической проницаемости, рассчитанная при описании частиц параллелепипедами, оказалось ближе к измеренному значению, чем при описании частиц эллипсоидами. Это связано с тем, что реальная форма частиц включений имеет не эллипсоидальную форму, и поле внутри частиц неоднородно.

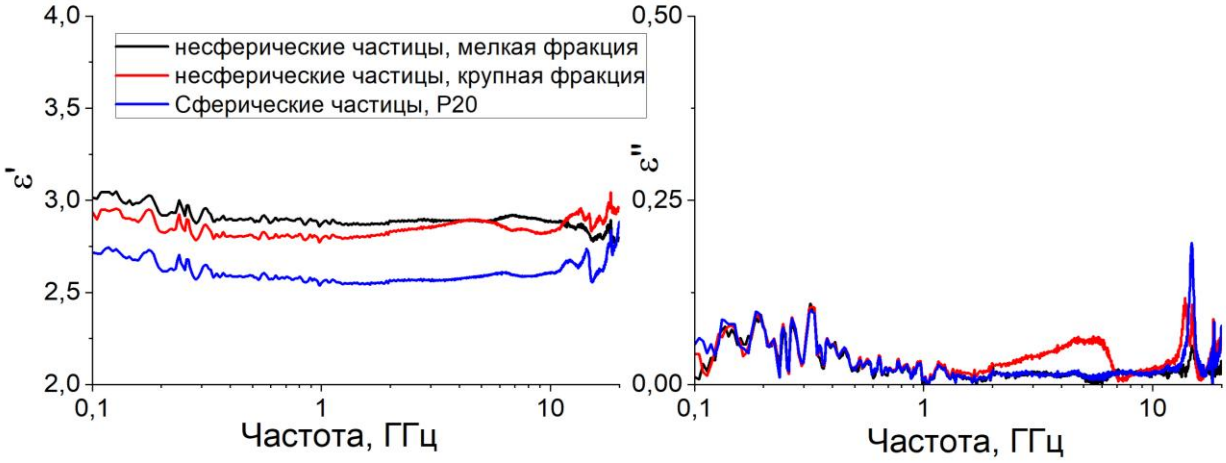


Рис. 4. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости для КМ с включениями частиц несферической (черная и красная линии) и сферической формы (синяя линия). Концентрация включений 5 % об.

Частотная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости ε′ в исследуемом диапазоне частот отсутствует. Различие в значении величины ε′ КМ на основе камневидных частиц аморфных сплавов составляет менее 3 %, поскольку частицы практически не отличаются по форме. Для КМ со сферическими частицами расчёт, предсказывающий значение ε′ = 2,7, полностью совпадает с экспериментальными результатами.

В **разделе 2.2** исследовано влияние распределения частиц по форме на эффективную диэлектрическую проницаемость КМ с парафиновой матрицей и включениями сильно несферической формы – плоскими пластинками. Теоретическая оценка диэлектрической проницаемости КМ проводилась по нескольким формулам смешения, в том числе с применением спектральной теории Бергмана–Милтона. Результаты теоретических расчётов сравнивались с экспериментальными данными.

Для оценки диэлектрической проницаемости ε_{eff} КМ использовали три модели: модель Максвелла Гарнетта (1), формула смешения Максвелла

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_e + (p/3)\sum_{j=1}^{3}\frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_e)\varepsilon_e}{\varepsilon_e + N_j(\varepsilon_i - \varepsilon_e)} \tag{3}$$

и модель Оделевского

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_e + \varepsilon_e \frac{(p/3)\sum_{j=1}^{3}\frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_e)}{\varepsilon_e + N_j(\varepsilon_i - \varepsilon_e)}}{1 - (p/3p_c)\sum_{j=1}^{3}\frac{N_j(\varepsilon_i - \varepsilon_e)}{\varepsilon_e + N_j(\varepsilon_i - \varepsilon_e)}} \ . \tag{4}$$

Здесь p_c – порог перколяции.

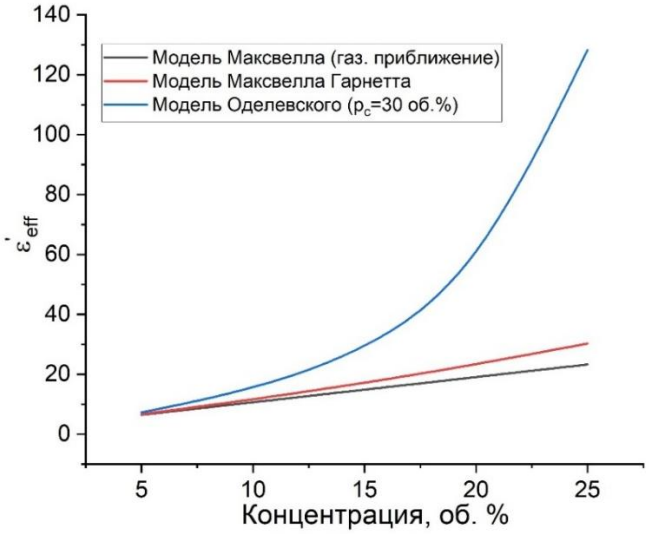


Рис. 5. Рассчитанная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости КМ «Fe + парафин» от концентрации включений с использованием различных формул смешения (частицы размером 100:50:2 мкм).

Формула смешения Максвелла (3) может применяться только для сильно разряженных смесей с невзаимодействующими включениями и имеет порог перколяции p_c = 100 об.%, что является нереалистичным приближением. Модель Максвелла Гарнетта (1) вводит локальное взаимодействие между включениями, но сохраняет порог перколяции на уровне 100 об.% и при малых концентрациях не отличается от формулы Максвелла (см. Рис. 5). Модель Оделевского (4) предполагает заданный порог перколяции (на Рис. 5 он был выбран равным 30 %), что позволяет точнее оценить эффективную диэлектрическую проницаемость при более высоких концентрациях. Недостатком этого метода является трудность оценки p_c в реальных КМ, поскольку порог перколяции является эмпирическим параметром.

Общим недостатком большинства моделей смешения является использование единственного «эффективного» коэффициента деполяризации. Предполагается, что все включения в КМ имеют одинаковую форму. В работе предложена модель, основанная на использовании спектральной теории, которая позволяет учитывать распределение частиц включений по форме. Для построения спектральной функции (геометрической характеристической функции) необходимо оценить форму частиц включений (Рис. 6) на основе микрофотографий, рассчитать коэффициенты деполяризации для каждой частицы и нормировать полученные кривые с учётом правила сумм. После построения спектральной функции $B(N_j)$ и аппроксимации Гоша–Фукса (Рис. 7) диэлектрическая проницаемость КМ рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_e \left(1 + \sum_{j=1,2,3} \int_0^1 \frac{(\varepsilon_i - 1) B(N_j)}{1 + N_j(\varepsilon_i - 1)} dN_j \right). \quad (5)$$

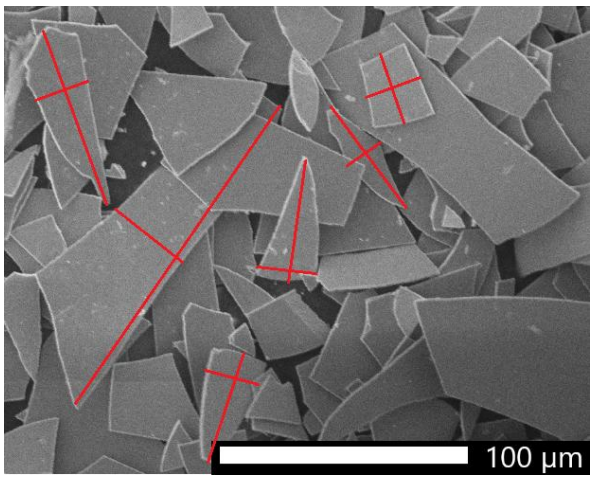


Рис. 6. Микрофотография частиц наполнителя.

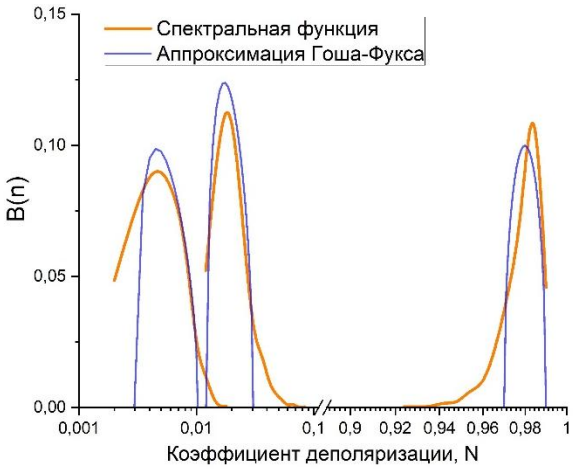


Рис. 7. Спектральная функция и аппроксимация методом Гоша–Фукса для одного из образцов.

Для экспериментального исследования влияния распределения частиц на диэлектрическую проницаемость КМ осуществлено фракционирование частиц с использованием вибросита с калибром ячейки 20, 50 и 125 мкм. Помимо влияния распределения частиц по форме, также был исследован эффект тонкой диэлектрической оболочки на поверхности частиц на значение диэлектрической проницаемости КМ. На Рис. 8 показана измеренная частотная зависимость диэлектрической проницаемости для КМ с разной формой включений при объёмной концентрации включений 5 %. КМ с включениями более крупных частиц имеют более высокие значения ε′. Следует отметить, что для исследованных плоских частиц изменение размера одновременно означает изменение формы, поскольку толщина частиц остаётся постоянной.

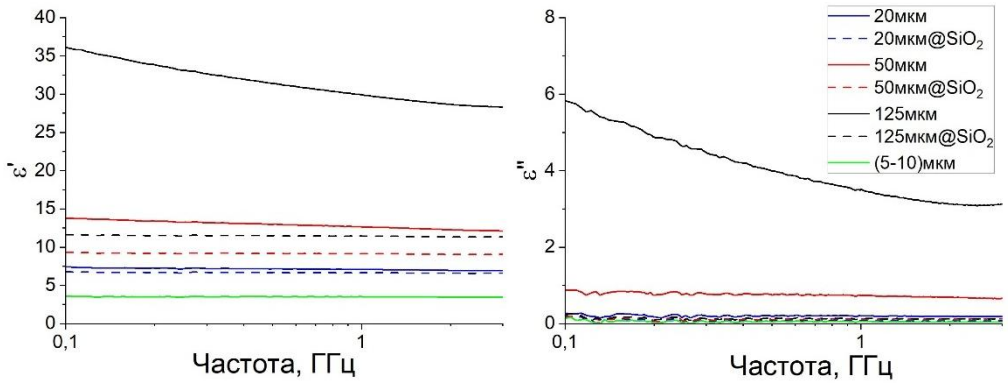


Рис. 8. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости для КМ с разной формой включений. Объёмная концентрация включений 5 %.

Штриховые линии на Рис. 8 показывают зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для КМ с частицами в диэлектрической оболочке. Наличие оболочки позволяет эффективно снижать ε′ и ε″ для КМ. Этот эффект наиболее заметен для КМ с более крупными частицами. Для частиц со средним размером 125 мкм нанесение оболочки позволяет снизить ε′ более чем в два раза. Высокие значения ε′ для КМ с крупными частицами связаны с электростатическими взаимодействиями при наложении частиц друг на друга.

На Рис. 9 представлено сравнение экспериментально измеренных значений действительной части диэлектрической проницаемости образцов КМ с результатами расчётов. Расчёты выполнялись с использованием двух различных подходов: с использованием формулы смешения Максвелла, а также с помощью разработанного подхода с использованием спектральной теории Бергмана–Мильтона и применением метода Гоша–Фукса. Из Рис. 9 видно, что разработанный подход обеспечивает лучшее соответствие с экспериментальными данными. Это связано с тем, что в спектральной теории учитывается реальное распределение коэффициентов деполяризации.

Согласие экспериментальных и теоретических данных для почти сферических частиц (с наименьшим средним размером) обеспечивается тем,

что исследуемая концентрация далека от порога перколяции. С ростом несферичности порог перколяции стремительно уменьшается. При нанесении диэлектрической оболочки частицы изолируются, что существенно увеличивает критическую концентрацию и позволяет добиться лучшего согласия с теорией.

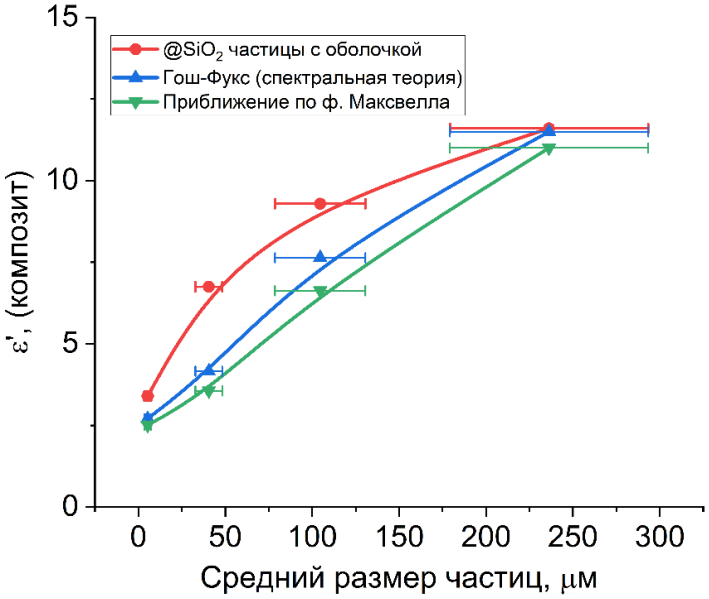


Рис. 9. Сравнение рассчитанных и экспериментальных значений ε′ КМ при объёмной концентрации включений 5 %.

Третья глава посвящена исследованию электродинамических параметров КМ с частицами железа, покрытыми диэлектрической оболочкой SiO_2.

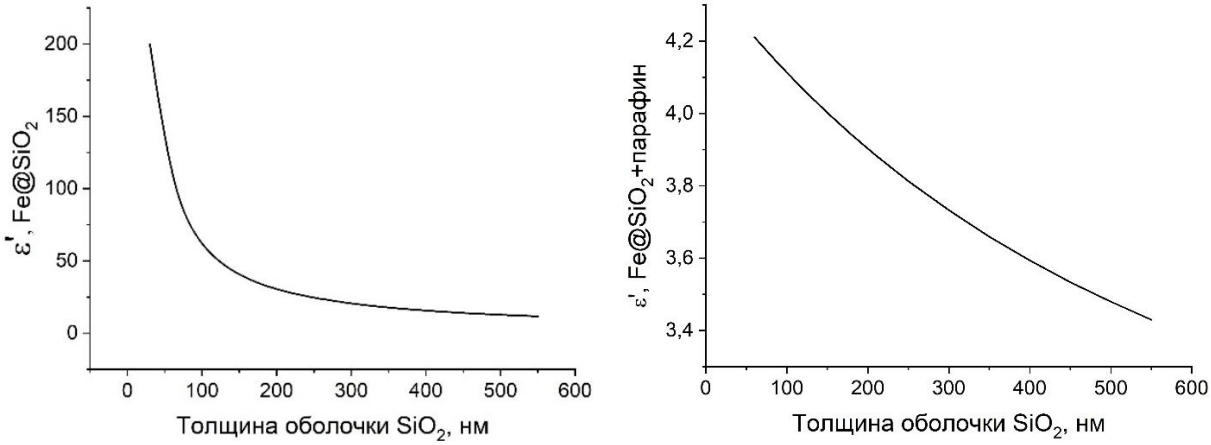
В **разделе 3.1** представлен процесс получения и методы анализа морфологии и элементного состава порошков железа с оболочкой SiO_2 ($Fe@SiO_2$). Для получения диэлектрической оболочки на поверхности частиц карбонильного железа Р-20 применяли модифицированный процесс Штобера [6], описываемый формулой:

$$n(SiOEt)_4 + 2nH_2O + NH_3 = nSiO_2 + 4nEtOH \qquad (6)$$

Процесс Штобера проводили в одну стадию в плоскодонной колбе на 100 мл. Для реакции использовали чистое карбонильное железо Р-20, тетраэтоксисилан (TEOS) и аммиак водный NH_3 ч.д.а. Отношение Fe:TEOS поддерживали 1:5. Реакцию проводили в ультразвуковой ванне. Варьировали длительность реакции, количество итераций реакции и соотношение реагентов. Длительность реакции варьировали от 1 до 6 часов при неизменном отношении $[TEOS]/[NH_3]=1,5$. При варьировании соотношения $[TEOS]/[NH_3]$ от 0,75 до 4,5 длительность реакции составляла 2 часа. По завершении процесса порошок выделяли декантацией с использованием магнита. При варьировании количества итерации реакции от 1 до 3 длительность реакции составляла 2 часа, а соотношение $[TEOS/NH_3]=1,5$. Между итерациями продукт высушивали при 60°С на воздухе в течение 2–4 часов.

Для анализа морфологии и элементного состава порошков использовался сканирующий электронный микроскоп JEOL 7000, оснащённый приставкой для локального рентгеноспектрального анализа. Для исследования магнитостатических свойств порошки смешивали с модельной матрицей (парафин) и получали КМ «Fe@SiO_2+парафин». Для анализа намагниченности насыщения использовался вибрационный магнитометр.

В **разделе 3.2** проведён расчёт эффективной диэлектрической проницаемости КМ «Fe@SiO_2 + парафин» с использованием формулы Максвелла Гарнетта (1). При проведении расчётов толщина диэлектрической оболочки варьировалась от 30 до 550 нм. Расчёт проводили в два этапа. На первом этапе рассчитывали диэлектрическую проницаемость КМ «железные частицы + оболочка-матрица SiO_2» (Fe@SiO_2). На втором этапе полученные величины использовали для расчета свойств КМ ««Fe@SiO_2 + парафиновая матрица» (Fe@SiO_2 + парафин). Объёмная доля наполнителя Fe@SiO_2 в парафиновой матрице составляла 20 %. Эффективная диэлектрическая проницаемость КМ «Fe@SiO_2 + парафин» снижается на 20 % при увеличении толщины оболочки от 30 до 550 нм (см. Рис. 10).



(а) (б)

Рис. 10. Рассчитанная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости от толщины оболочки SiO_2 для КМ «Fe@SiO_2» (а) и для КМ «Fe@SiO_2 + парафин» (б).

Раздел 3.3 посвящён обсуждению результатов серии экспериментов при вариации длительности реакции осаждения SiO_2 на частицы карбонильного железа Р-20. При длительности реакции 1 час на частицах железа образуется диэлектрическая оболочка SiO_2 толщиной 100–120 нм. При увеличении длительности реакции до 2 часов толщина оболочки возрастает до 150 нм. При дальнейшем увеличении длительности реакции рост оболочки не наблюдается даже в избытке реагентов. Предположительно это связано с сокращением количества свободных активных центров роста SiO_2 на частицах железа – поверхностных гидроксильных групп.

На Рис. 11 показана измеренная зависимость квазистатического значения диэлектрической проницаемости от толщины оболочки SiO_2. При увеличении длительности реакции от 2 до 6 часов толщина оболочки SiO_2 и, следовательно, квазистатическое значение ε′ не изменяются. При длительности реакции 1 час частицы обладают меньшей по толщине оболочкой, что приводит к увеличению значения ε′. Отметим, что в рамках модели Максвелла Гарнетта б*о*льшим значениям толщины диэлектрических оболочек соответствует меньшее значение диэлектрической проницаемости, что согласуется с полученными в эксперименте данными.

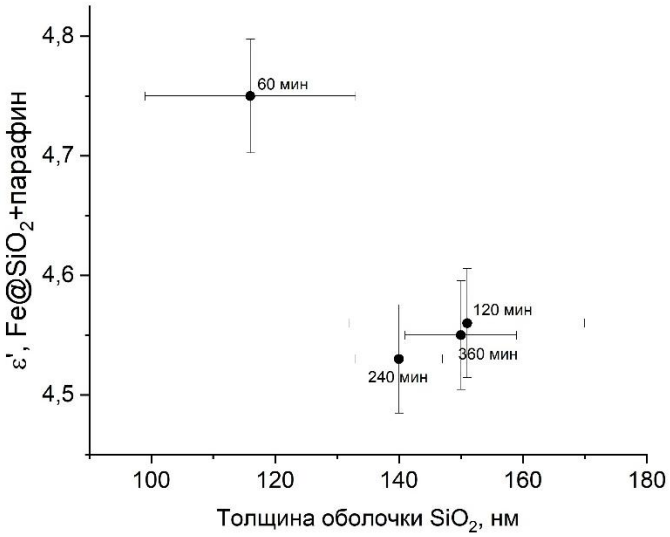
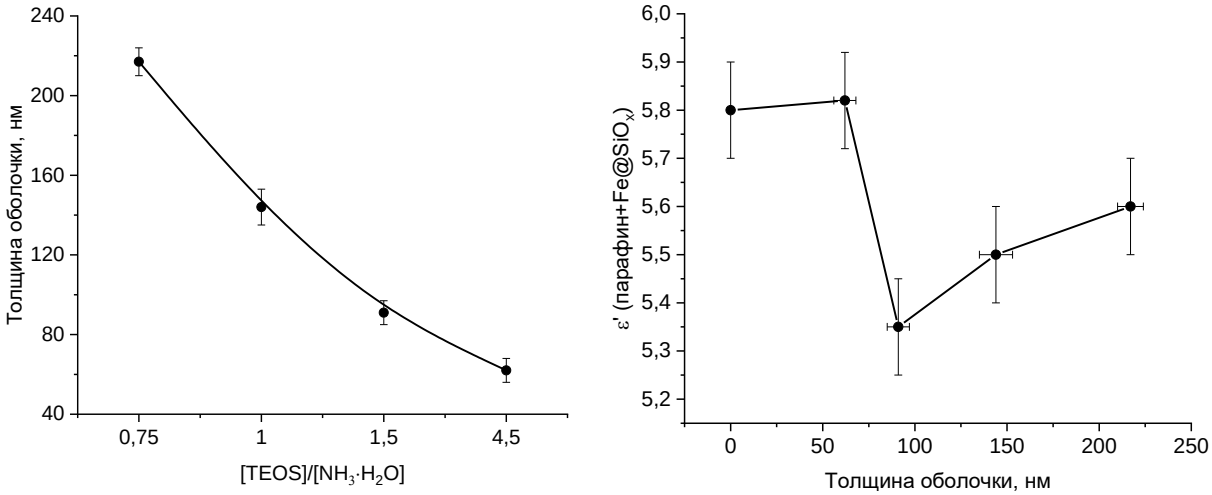


Рис. 11. Зависимость действительной части диэлектрической проницаемости (квазистатические значения) КМ «Fe@SiO_2 + парафин» от толщины оболочки SiO_2.

Раздел 3.4 посвящён обсуждению результатов серии экспериментов при изменении соотношения основных реагентов. Известно, что кислотность среды, которую можно регулировать содержанием водного аммиака в реакционной смеси NH_3 влияет на механизм реакции образования SiO_2. Это приводит к изменению скорости протекания реакции, размера индивидуальных частиц SiO_2 и состава итогового продукта [7]. Из анализа изображений электронной микроскопии было установлено, что толщина оболочки увеличивается от 60 до 220 нм при изменении соотношения [TEOS]/[NH_3] от 4,5 до 0,75 (Рис. 12 (а)). Оболочка SiO_2, полученная в более кислой среде (большее значение [TEOS]/[NH_3]), обладает сильно развитой шероховатой поверхностью. Гидролиз в более кислой среде приводит к избытку кислорода в продукте. Отклонение состава SiO_x от SiO_2 вызвано в первую очередь присутствием поверхностных гидроксильных групп и связано с развитостью поверхности.

При соотношении [TEOS]/[NH_3]=4,5 получена несплошная оболочка толщиной 60 нм. Сплошность оболочки оценивали по стойкости коррозии в 10 % растворе NaCl. Для этого изучаемые порошки равномерно распределяли по клейкой ленте и помещали в солевой раствор. Стойкость к коррозии

интерпретировали как отсутствие следов коррозии вблизи границы раздела «изучаемый порошок – воздух – солевой раствор». Для КМ со сплошной оболочкой наблюдается уменьшение ε′ (Рис. 12 (б)) относительно КМ с частицами без защитной оболочки. Небольшое увеличение диэлектрической проницаемости с ростом толщины оболочки более 100 нм предположительно связано с присутствие большого количества полярных химических групп на поверхности частиц Оптимальным соотношением реагентов [TEOS]/[NH_3] является значение 1,5.



(а) (б)

Рис. 12. Зависимость толщины оболочки от соотношения [TEOS]/[NH_3] (а); зависимость действительной части диэлектрической проницаемости (квазистатические значения) КМ «Fe@SiO_x + парафин» от толщины оболочки SiO_2 (б).

В **разделе 3.5** описан разработанный метод синтеза, позволяющий получать оболочки SiO_2 толщиной до 450 нм. При увеличении количества итераций нанесения оболочки SiO_2 от 1 до 3 наблюдалось увеличение толщины оболочки на отдельных частицах от 150 нм до 450 нм (см. Рис. 13). Проведение итерационного процесса оказывается возможным, предположительно, за счёт образования новых активных гидроксильных групп на поверхности частиц при сушке на воздухе.

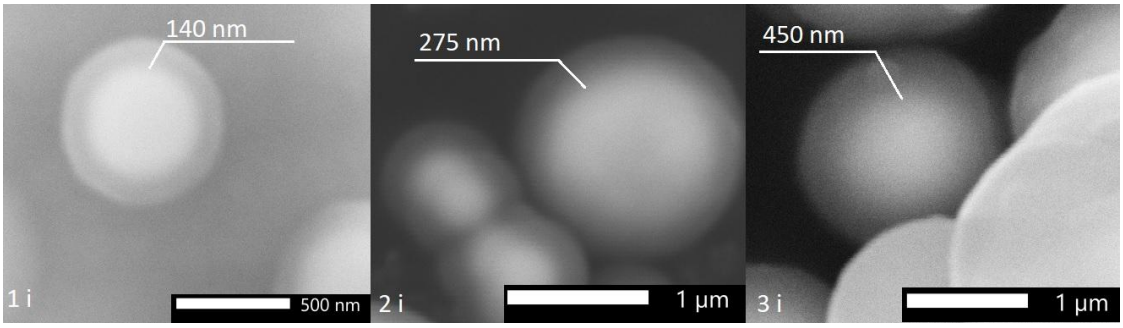


Рис. 13. Изображения сканирующей электронной микроскопии частиц с оболочкой при изменении числа итераций реакции гидролиза: слева – 1 итерация, по центру – 2 итерации, справа – 3 итерации.

При увеличении числа итераций осаждения SiO_2 на частицы железа от 1 до 3 намагниченность насыщения КМ «Fe@SiO_2 + парафин» уменьшалась от 230 до 175 Гс (см. Рис. 14 (а)). Уменьшение намагниченности насыщения связно со снижением магнитной фракции в КМ и, следовательно, с увеличением содержания SiO_2 и ростом толщины диэлектрической оболочки.

Для определения средней толщины оболочки SiO_2 использовали усреднение значений, полученных из анализа изображений электронной микроскопии, которое сопоставляли с результатами расчётов объёма немагнитной фазы, полученного на основе измерений намагниченности насыщения КМ. Значения толщины оболочки, рассчитанные из данных магнитостатических измерений, достаточно хорошо соответствуют значениям, полученным при обработке изображений электронной микроскопии (см. Рис. 14 (б)).

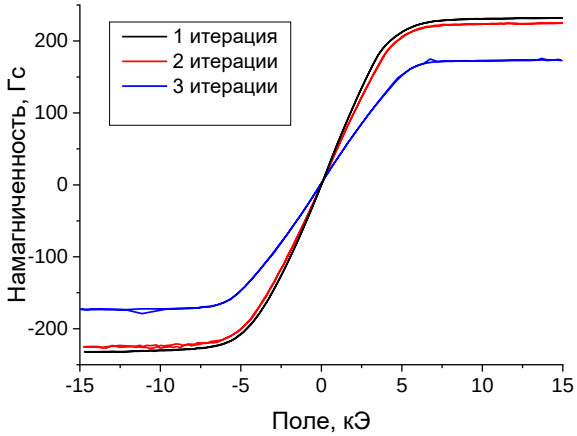


Рис. 14 (а). Кривые намагничивания в итерационной серии экспериментов.

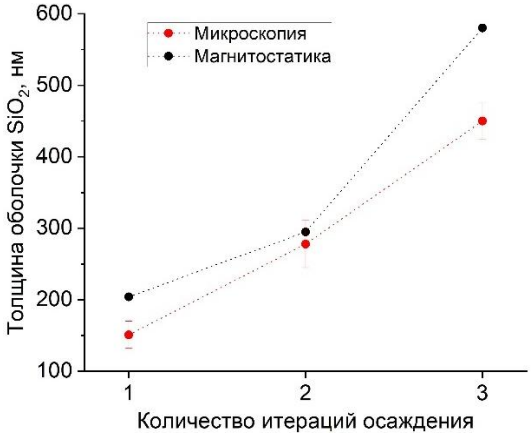


Рис. 14 (б). Сравнение значений толщины оболочки, полученных методом электронной микроскопии и по обработке данных магнитостатических измерений.

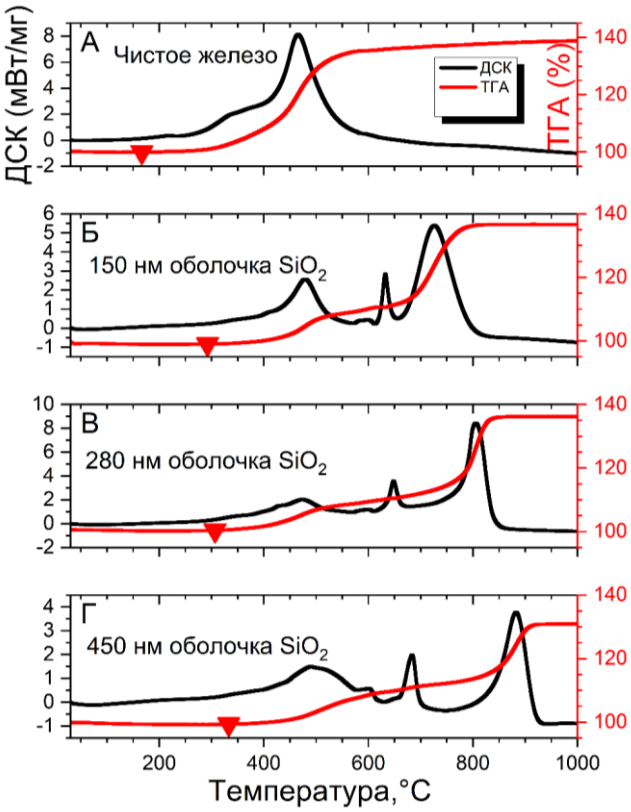


Рис. 15. Результаты синхронного термического анализа: А – железо Р-20; Б – 1 итерация осаждения SiO_2; В – 2 итерации осаждения; Г – 3 итерации осаждения.

На Рис. 15 представлены результаты синхронного термического анализа порошковых образцов карбонильного железа Р-20 и частиц с оболочкой SiO_2 различной толщины. Механизм реакции окисления железа до высшего оксида включает образование смеси промежуточных фаз: FeO, Fe_3O_4, Fe_2O_3. Диэлектрическая оболочка предотвращает окисление Fe при низких температурах и, таким образом, повышает термостойкость железа. Увеличение толщины оболочки SiO_2 сдвигает температуру начала окисления от 166,7 °С (для чистого карбонильного железа) до 331,2 °С (для оболочки толщиной 450 нм).

Измеренные частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей для КМ с частицами, полученными при различном числе итераций осаждения SiO_2, показаны на Рис. 16. Значение действительной части диэлектрической проницаемости ε′ постепенно уменьшается с ростом частоты для всех образцов с диэлектрической оболочкой. Из Рис. 16 А видно, что с увеличением толщины оболочки происходит заметное уменьшение эффективной диэлектрической проницаемости КМ. Можно сделать вывод, что эффективная диэлектрическая проницаемость исследованных образцов КМ определяется, в основном, пространственным распределением частиц в диэлектрической матрице КМ, и, следовательно, эффективной электрической ёмкостью между соседними частицами.

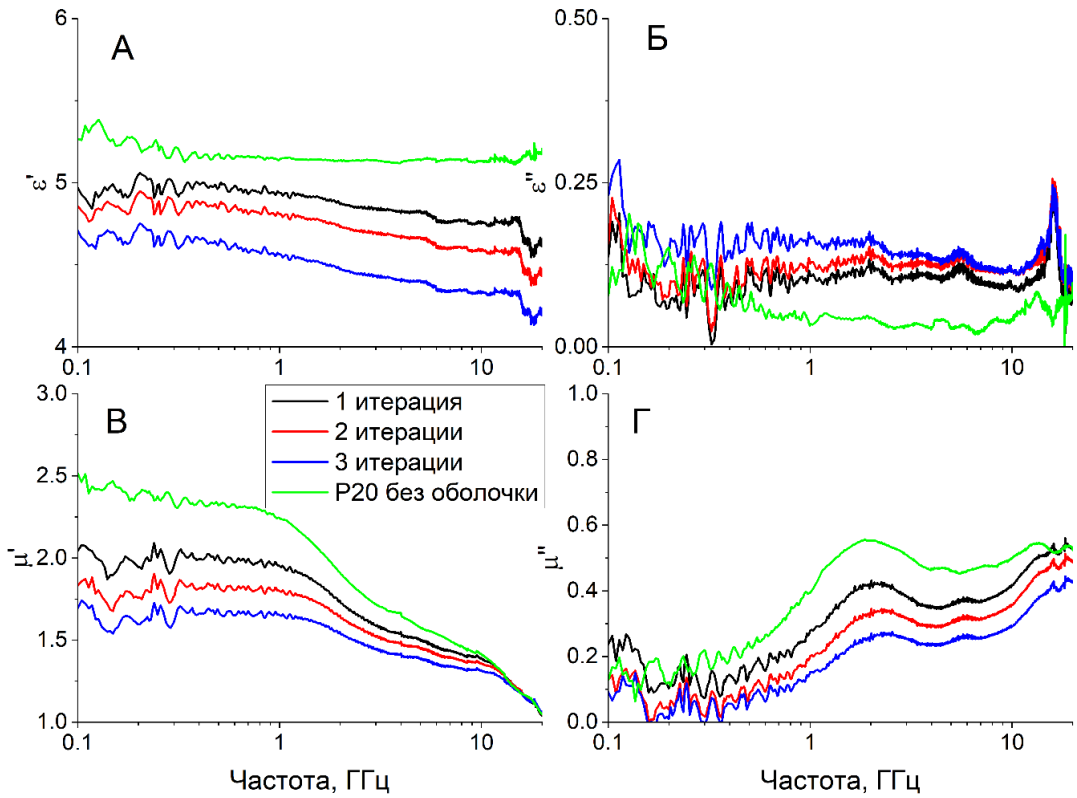


Рис. 16. Частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей для КМ, полученных при различном количестве итераций нанесения оболочки SiO_2.

Действительная и мнимая части магнитной проницаемости также уменьшаются с ростом числа итераций (Рис. 16 В, Г), что подтверждает результаты магнитостатических измерений. При этом уменьшаются только абсолютные значения μ′ и μ″, но частотная зависимость остается постоянной для всех образцов с диэлектрической оболочкой. Это свидетельствует о том, что при нанесении оболочки не происходит процессов, изменяющих магнитные свойства частиц железа, и появление оболочки не изменяет характер магнитных взаимодействия между частицами в КМ.

В четвёртой главе на основе исследований взаимосвязи между диэлектрическими свойствами КМ и строением частиц включений предложен метод получения лёгких диэлектрических материалов на основе вспененного пенопласта и металлических микронных частиц наполнителя.

В **разделе 4.1** проведены численные электродинамические расчёты эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) однородных и многослойных сферических отражателей. Известно [8], что для однородной диэлектрической линзы можно рассчитать зависимость ЭПР от диэлектрической проницаемости материала линзы. При этом минимальная расходимость между падающим и отраженным лучами достигается при значении ε′ = 3,5, что обеспечивает максимально возможное значение ЭПР. При данном значении диэлектрической проницаемости наблюдается фокусировка падающей электромагнитной волны на металлическом отражателе, закрывающем часть диэлектрической сферы (см. вставку на Рис. 17). Это приводит к эффективному отражению, увеличивающему ЭПР такого объекта по

сравнению со случаями, когда сфера выполнена из материала с другим значением ε′.

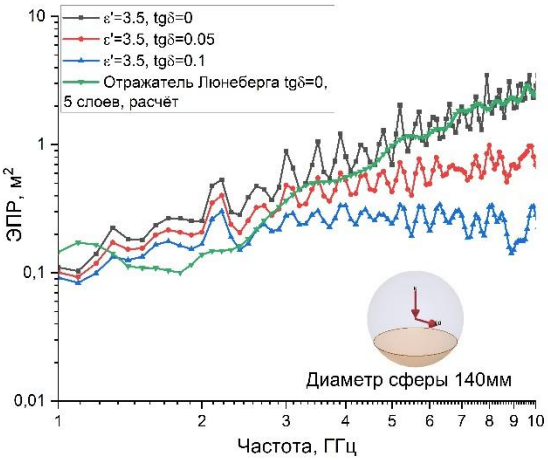


Рис. 17. Сравнение ЭПР однородных отражателей при различных значениях тангенса диэлектрических потерь и отражателя Люнеберга.

На Рис. 17 представлены результаты численного расчёта ЭПР однородных сферических линз (отражателей) с металлизацией поверхности 120 градусов, диаметром 14 см и ε′ = 3,5 при различных значениях тангенса диэлектрических потерь tgδ. Из Рис. 17 видно, что однородный сферический отражатель без потерь сравним по величине ЭПР с отражателем Люнеберга того же диаметра, однако даже незначительные диэлектрические потери могут привести к существенному снижению ЭПР.

Обнаружено, что при тангенсе диэлектрических потерь 0,1 происходит существенное снижения ЭПР отражателя (на величину до 20–30 дБ) на высоких частотах (в области геометрической оптики). При этом в диапазоне частот 1,5–2,5 ГГц диэлектрические потери не приводят к потере преимущества однородной линзы перед многослойной. В указанном диапазоне частот однородные диэлектрические отражатели демонстрируют более высокие значения ЭПР по сравнению с отражателем Люнеберга. Это связно с дифракционными явлениями, а также резонансами на размере сферы, поскольку в данной области длин волн размер предложенной сферы становится сопоставим с длиной волны. Также значительное количество резонансных максимумов на кривой зависимости ЭПР разработанной линзы от частоты может быть использовано в прикладных задачах, когда требуется достижение интенсивного отражения электромагнитной волны с модулированной амплитудой. Таким образом, при помощи электродинамических расчётов продемонстрирована возможность создания простого по структуре сферического отражателя, который успешно конкурирует с идеальным многослойным отражателем Люнеберга в области длин волн, сопоставимых с размером самого отражателя.

В **разделе 4.2** представлены экспериментальные исследования серии модельных КМ с матрицей из парафина и частицами металлической пудры. Были исследованы частицы различного состава: медная, бронзовая и алюминиевая пудра. Тангенс диэлектрических потерь рассчитывали из

экспериментально измеренных значений частотных зависимостей действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости. Результаты экспериментов показывают, что для всех полученных КМ tgδ < 0,01 даже при высоких концентрациях включений (Рис. 18 (а)). Для дальнейших исследований была выбран КМ с алюминиевой пудрой марки ПАП-2, поскольку такие КМ имеют минимальную плотность и минимальные диэлектрические потери. Пудра ПАП-2 имеет характерную плоскую форму частиц микронного размера.

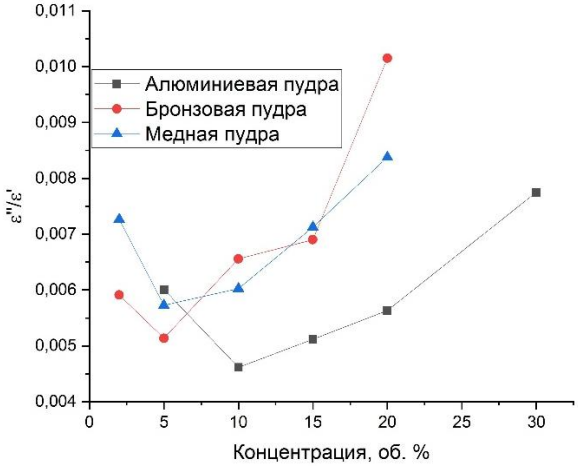


Рис. 18 (а). Зависимость тангенса диэлектрических потерь для образцов КМ «парафин + пудра» от концентрации включений.

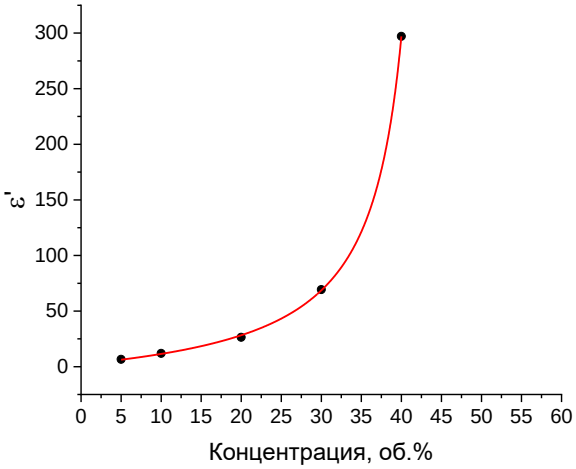


Рис. 18 (б). Аппроксимация данных концентрационной серии КМ «парафин + ПАП-2» моделью Оделевского.

Для оценки необходимой концентрации частиц металлической пудры в КМ с пенопластом была проведена аппроксимация данных концентрационной серии КМ «парафин + ПАП-2» формулой Оделевского в предположении, что однородная диэлектрическая матрица не оказывает существенного влияния на свойства КМ с учётом пластинчатой формы включений (Рис. 18 (б)).

Получение КМ на основе пенопласта и ПАП-2 можно разделить на две стадии. На первой стадии происходит механическое смешивание порошков термореактивных гранул пенопласта и алюминиевой пудры. На второй стадии смесь помещается в пресс-форму и помещается в термостат для вспенивания. В качестве матрицы был выбран пенопласт марки ПЭН-И-100, который вспенивается в течение 6 часов при температуре 110 °С [9]. При нагреве до 100 °С под действием выделяющегося газообразного вспенивающего реагента гранулы увеличивают свой объём в 30–60 раз.

После вспенивания и отверждения КМ извлекали из пресс-формы, вырезали в форме образцов и определяли комплексную диэлектрическую проницаемость квазиоптическим методом в открытом пространстве по измеренным значениям коэффициента отражения [10]. При помощи данного метода получены образцы КМ со значениями ε′ до 8. Значение диэлектрической проницаемости КМ можно направленно изменять двумя способами: регулируя объёмную долю воздушных пор в структуре пенопласта и варьируя концентрацию частиц наполнителя. Диэлектрическая

проницаемость КМ возрастает с увеличением концентрации включений и уменьшением объёма воздушных пор, то есть с возрастанием плотности КМ (Рис. 19 (а)).

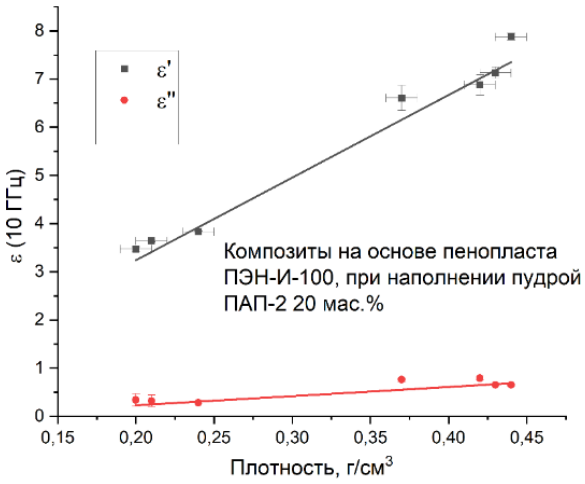


Рис. 19 (а). Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости КМ на основе ПЭН-И-100 от плотности КМ

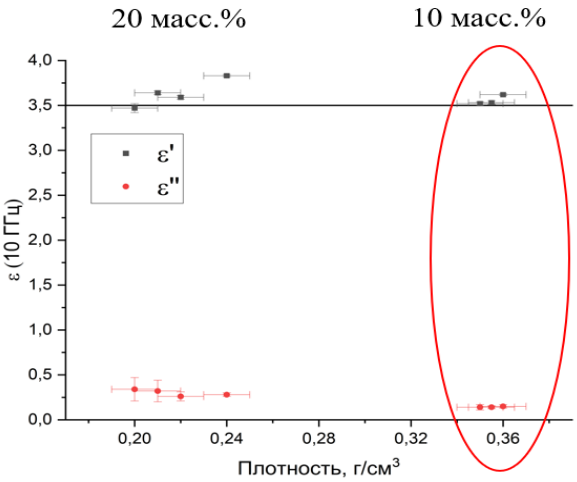


Рис. 19 (б). Связь комплексной диэлектрической проницаемости КМ на основе ПЭН-И-100 с плотностью: воспроизводимость КМ с ε′ = 3,5.

Для получения материала с наибольшим значением ЭПР необходимо создание КМ со значением ε′ = 3,5 при минимальных значениях ε″. На Рис. 19 (б) представлены измеренные значения комплексной диэлектрической проницаемости полученных образцов КМ с массовой концентрацией включений 10 и 20 %. Получение значения ε′ = 3,5 возможно при различных комбинациях плотности КМ и концентрации включений. Минимальные диэлектрические потери наблюдаются у материалов с большей плотностью.

В рамках проведённого исследования диэлектрические потери в КМ на основе термореактивного полимера оказались выше, чем у КМ с однородной парафиновой матрицей. Микроскопические исследования показывают, что разработанные лёгкие КМ обладают большей микро-неоднородностью структуры по сравнению с однородной структурой КМ с парафином. Гранулы терморасширенного полимера с размером порядка 100-200 мкм таких КМ окружены алюминиевыми частицами. Это приводит к локальному повышению эффективной концентрации и, за счёт контактных явлений между частицами наполнителя, предположительно, приводит к формированию диэлектрических потерь. Для получения рассчитанных значений ЭПР однородного сферического отражателя требуется проведение дополнительных исследований, направленных на создание технологии образования лёгких диэлектриков, обладающих однородностью структуры на макро- и микро-масштабах.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан метод определения количественных характеристик распределения частиц включений КМ по форме и размеру на основе экспериментальных данных электронной микроскопии для применения в электродинамических расчётах диэлектрической проницаемости.

2. Проведено моделирование коэффициентов деполяризации несферических частиц с применением различных аппроксимаций. Предложенный подход позволяет рассчитывать значения эффективной диэлектрической проницаемости при низких концентрациях частиц включений в КМ. Показано, что рассчитанные значения эффективной диэлектрической проницаемости КМ согласуются с результатами измерений.

3. Разработана модель, позволяющая учитывать количественные характеристики распределения частиц включений по форме для расчёта эффективной диэлектрической проницаемости КМ. Показано, что предложенный метод повышает точность расчёта диэлектрической проницаемости по сравнению с моделями, в которых используются усреднённые данные о форме частиц.

4. Показано, что в КМ на основе частиц железа возможно варьирование диэлектрической проницаемости при помощи изменения толщины и состава оболочки SiO_x на поверхности частиц железа. Для этого впервые предложена методика осаждения оболочки SiO_2 толщиной до 450 нм, основанная на итерационном проведении реакции гидролиза ортокремниевого эфира в водно-спиртовой среде с выделением и сушкой промежуточного продукта между итерациями.

5. Показано, что диэлектрическая проницаемость КМ на основе частиц железа, модифицированных тонким диэлектрическим слоем, зависит от толщины слоя SiO_2 и подчиняется формуле смешения Максвелла Гарнетта.

6. При помощи синхронного термического анализа в токе воздуха обнаружено, что защитная оболочка SiO_x толщиной 450 нм повышает термостойкость железа, сдвигая температуру начала окисления железа с 167 до 331 °C. При этом наличие оболочки SiO_2 на частицах железа не изменяет частотную зависимость магнитной проницаемости в КМ с диэлектрической матрицей, и значение магнитной проницаемости снижается пропорционально содержанию ферромагнитной фазы в КМ.

7. При помощи электродинамических расчётов показана возможность применения диэлектрических материалов со значением действительной части диэлектрической проницаемости 3,5 для создания эффективного сферического отражателя электромагнитного излучения, предназначенного для частотного диапазона 0,1–3 ГГц.

8. С использованием формул смешения и данных о форме частиц наполнителя разработан метод получения лёгких КМ на основе металлических включений и термореактивного полимера, позволяющий формировать контролируемые значения диэлектрической проницаемости Методика

включает контроль плотности и концентрации частиц включений с использованием формул смешения.

Основные публикации по теме диссертации

1. **Dolmatov A.V.**, Maklakov S.S., Artemova A.V., Petrov D.A., Shiryaev A.O., Lagarkov A.N. Deposition of a SiO2 Shell of Variable Thickness and Chemical Composition to Carbonyl Iron: Synthesis and Microwave Measurements // Sensors. – 2021. – V. 21. – P. 4624.

2. **Dolmatov A.V.**, Maklakov S.S., Artemova A.V., Petrov D.A., Shiryaev A.O., Lagarkov A.N. Deposition of Thick SiO_2 Coatings to Carbonyl Iron Microparticles for Thermal Stability and Microwave Performance // Sensors. – 2023. – V. 23. – №. 3. – P. 1727.

3. Shiryaev, A., Rozanov, K., Kostishin, V., Petrov, D., Maklakov, S., **Dolmatov, A.**, Isaev, I. Retrieving the Intrinsic Microwave Permittivity and Permeability of Ni-Zn Ferrites // Coatings. – 2023. – V. 13. – P. 1599.

4. **Dolmatov, A.V.**; Rozanov, K.N.; Maklakov, S.S.; Petrov, D.A. Study of the permittivity of composite materials filled with non-spherical inclusions of diverse structure // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2025. – V. 58. – P. 235301.

5. **Долматов А.В.**, Маклаков С.С., Гаранов В.А., Беляйков И.Н., Петров Д.А., Ширяев А.О., Осипов А.В., Старостенко С.Н. // Современная электродинамика. – 2023. – № 1(3). – С. 10-16.

6. Князьков Р.А., Старостенко С.Н., Артёмова А.В., Комаров И.В., **Долматов А.В.**, Ширяев А.О., Иванов П.А., Осипов А.В., Петров Д.А., Маклаков С.А., Зезюлина П.А., Бузников Н.А., Маклаков С.С. Стеклометаллический порошковый ферромагнитный материал для применения в композитах, предназначенных для СВЧ диапазона // Современная электродинамика. – 2024. – № 4 (12). – С. 21-29.

Список цитируемой литературы

1. Nicolson, A. M.; Ross, G. F., Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques. // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 1970. – №19, (4), С. – 377-382.
2. Weir, W. B., Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. // *Proc. IEEE.* – 1974. – №62, (1), С. – 33-36.
3. Engen, G. F.; Hoer, C. A., Thru-Reflect-Line: An Improved Technique for Calibrating the Dual Six-Port Automatic Network Analyzer. // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 1979. – №27, (12), С. – 987-993.
4. Sihvola, A. H., *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*. / Institution of Electrical Engineers: 1999.
5. Prozorov, R.; Kogan, V. G., Effective Demagnetizing Factors of Diamagnetic Samples of Various Shapes. // *Physical Review Applied.* – 2018. – №10, (1), С. – 014030.

6. Maklakov, S. S.; Lagarkov, A. N.; Maklakov, S. A.; Adamovich, Y. A.; Petrov, D. A.; Rozanov, K. N.; Ryzhikov, I. A.; Zarubina, A. Y.; Pokholok, K. V.; Filimonov, D. S., Corrosion-resistive magnetic powder Fe@SiO2 for microwave applications. // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2017. – №706, С. – 267-273.
7. Rahman, I. A.; Vejayakumaran, P.; Sipaut, C. S.; Ismail, J.; Abu Bakar, M.; Adnan, R.; Chee, C. K., Effect of anion electrolytes on the formation of silica nanoparticles via the sol–gel process. // *Ceramics International.* – 2006. – №32, (6), С. – 691-699.
8. Кобак, В. О., *Радиолокационные отражатели* /М. Советское радио: 1975.
9. Trifonov, S.; Malygin, A.; D'yakova, A.; Lopez-Cuesta, J.; Cinausero, N., Thermal stability of polymer compositions with modified alumina. // *Russian Journal of General Chemistry.* – 2008. – №78, С. –.
10. Semenenko, V. N.; Chistyaev, V. A.; Politiko, A. A.; Baskov, K. M., Ultrawide measurement bench for measuring electromagnetic properties of materials in free space in a microwave range. // *Izmeritel`naya Tekhnika.* – 2019. – №2, С. – 55-59.