

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу
Долматова Артура Викторовича
«Исследование СВЧ диэлектрической проницаемости композитных
материалов с различной формой и структурой проводящих включений»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Диссертационная работа Долматова А.В. посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию электрофизических характеристик композитных материалов на основе частиц ферромагнитных и других металлов.

Актуальность диссертационной работы определяется перспективами прикладного применения функциональных композитных материалов в СВЧ диапазоне. К возможным приложениям относятся поглотители электромагнитных волн, элементы антенной техники, сердечники СВЧ индукторов и др. Изготовление и изучение композитных материалов с заданными электрофизическими характеристиками для практических приложений является важной задачей современной электродинамики. В связи с этим актуальность выполненных в работе исследований зависимости диэлектрической проницаемости для электромагнитного излучения СВЧ диапазона от структуры композитных материалов не вызывает сомнений.

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

В первой главе представлен обзор литературы по теме диссертации. Рассмотрены основные подходы к изготовлению композитных материалов, являющихся эффективными поглотителями электромагнитной энергии в СВЧ диапазоне. Показано, что использование частиц «ядро-оболочка» с магнитным ядром и диэлектрической оболочкой на основе SiO_2 расширяет возможности их применения для задач поглощения электромагнитного

излучения. Освещены особенности структуры и свойств лёгких композитных материалов, которые могут применяться в качестве однородных сферических отражателей и диэлектрических линз для радиофизических приложений в СВЧ диапазоне. Представлены основные методы исследования эффективных электродинамических свойств композитных материалов при помощи формул смешения.

Вторая глава посвящена исследованию влияния формы и размера частиц магнитных наполнителей на СВЧ диэлектрическую проницаемость композитных материалов. Для композитов с частицами разной формы проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими оценками с использованием модели Максвелла Гарнетта. Показано, что аппроксимация частиц параллелепипедами приводит к лучшему количественному согласию с экспериментом, так как точнее описывает реальную неоднородность поля внутри частиц по сравнению с их аппроксимацией эллипсоидами. Показано, что формула смешения Оделевского и разработанный подход с использованием спектральной теории Бергмана-Милтона лучше описывают экспериментальные данные для композитных материалов с сильно несферическими включениями.

В третьей главе приведены результаты исследования электродинамических параметров композитных материалов с частицами железа, покрытыми диэлектрической оболочкой SiO_2 . Разработан процесс синтеза порошков $\text{Fe}@\text{SiO}_2$ с помощью модифицированного процесса Штобера. Теоретически предсказано, что увеличение толщины оболочки от 30 до 550 нм приводит к снижению эффективной диэлектрической проницаемости композита на 20 %. Экспериментально установлено, что толщина диэлектрической оболочки увеличивается с ростом времени реакции и числа итераций, достигая 450 нм после трёх циклов. Увеличение толщины оболочки приводит к снижению диэлектрической проницаемости, а также повышает термостойкость частиц, сдвигая температуру начала окисления с 166 до 331 °С. Установлено, что диэлектрическая оболочка

эффективно снижает диэлектрическую проницаемость без изменения магнитных свойств частиц железа.

Разработке лёгких диэлектрических материалов на основе вспененного пенопласта и металлических частиц для создания сферических отражателей посвящена Глава 4. Численные электродинамические расчёты показали, что однородный сферический отражатель с $\varepsilon' = 3,5$ имеет сопоставимую с отражателем Люнеберга эффективную поверхность рассеяния в частотном диапазоне 1,5–2,5 ГГц. Экспериментально подтверждена возможность создания композитов на основе пенопласта ПЭН-И-100 и алюминиевой пудры ПАП-2. Установлено, что диэлектрическая проницаемость полученных материалов регулируется плотностью композита и концентрацией наполнителя, достигая значений $\varepsilon' = 3,5$ при минимальных диэлектрических потерях.

Научная новизна. Все полученные автором результаты и положения, выносимые на защиту, обладают научной новизной. Среди полученных результатов выделяются следующие:

1. Разработана модель, позволяющая учитывать количественные характеристики распределения частиц включений по форме для расчёта эффективной диэлектрической проницаемости композитов. Продемонстрировано, что предложенный подход позволяет повысить точность расчёта диэлектрической проницаемости по сравнению с моделями, в которых используются усреднённые данные о форме частиц.

2. Предложен итеративный процесс синтеза, позволивший получить на частицах карбонильного железа диэлектрические оболочки SiO_2 различной толщины для управления электродинамическими свойствами композитных материалов на основе таких частиц.

3. Проведённые электродинамические расчёты продемонстрировали возможность применения диэлектрических материалов со значением действительной части диэлектрической проницаемости 3,5 для создания эффективных сферических отражателей в частотном диапазоне 0.1–3 ГГц.

Практическая значимость работы заключается в развитии научных представлений о частотной зависимости диэлектрической проницаемости современных СВЧ материалов и о взаимодействии ферромагнитных частиц разной формы в структуре композита. Разработанные материалы с диэлектрической оболочкой на поверхности ферромагнитных частиц перспективны для создания новых композитных термостойких материалов, для применения в антенной технике и решения задач электромагнитной совместимости. Результаты работы могут быть использованы при проведении теоретических и экспериментальных исследований электрофизических свойств композитных материалов и для разработки новых материалов для СВЧ-устройств.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждается применением современного аналитического оборудования и аттестованных методик исследований, согласием результатов, при использовании независимых методов измерений, а также соответствием экспериментальных данных и теоретических зависимостей при определении эффективных электрофизических параметров композитных материалов.

Диссертация является завершённым научным исследованием. Текст диссертации написан хорошим литературным языком и изложен на высоком научном уровне с использованием общепринятых в современной науке терминов и определений. Материал диссертационной работы последовательно и логично структурирован. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Апробация результатов исследования. По материалам диссертационной работы опубликовано 6 статей в российских и международных журналах, в том числе 4 работы в журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus. Полученные автором результаты были многократно представлены на российских и международных конференциях, таким образом апробация результатов диссертации не вызывает сомнений.

По диссертационной работе Долматова А.В. можно сделать следующие замечания.

1. К результатам на рисунках 2.15 и 3.1б. Отношение ϵ без оболочки/с оболочкой примерно 2 в низкочастотной части (2.15). Какова причина и как это соотносится с данными расчёта на рис. 3.1б? Почему не представлены данные для нулевой толщины?
2. На рисунке 3.8 наблюдается значительное расхождение между толщинами оболочек, определёнными методами электронной микроскопии и магнитостатических измерений. Однако в работе не обсуждаются возможные систематические погрешности методов и их влияние на конечные результаты.
3. По тексту диссертации экспериментальные и расчетные величины вещественной части диэлектрической проницаемости представлены на разных графиках. Почему не демонстрировалось их соответствие на общем графике?
4. На страницах 84 и 85 предполагается влияние стехиометрии наращиваемого материала оболочки и утверждается об оптимальности условий $[\text{TEOS}]/[\text{NH}_3]=1,5$ для синтеза сплошной оболочки SiO_2 . Сравнивались ли свойства композита, состоящего из частиц с оболочкой, полученной за одну итерацию (параметр 0,75 на рис. 3.13), с композитом из частиц с такой же толщиной оболочки, но полученной за несколько итераций (например, параметр 1,5)?
5. На странице 104 представлены данные по диэлектрическим потерям, но отсутствует сравнение с известными аналогами из литературы. В чём заключается преимущество разработанных материалов?

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основного содержания работы и не снижают общего положительного мнения о диссертации Долматова А.В.

Проведённые исследования электрофизических и электромагнитных явлений соответствуют направлению исследований п. 8 паспорта научной

специальности 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки (отрасль науки – физико-математические).

Таким образом, диссертационная работа Долматова А.В. «Исследование СВЧ диэлектрической проницаемости композитных материалов с различной формой и структурой проводящих включений», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, том числе требованиям раздела II Положения «О порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. с последующими изменениями, а её автор, Долматов Артур Викторович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Официальный оппонент:

Барышев Александр Валерьевич – доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07. «физика конденсированного состояния», начальник оптической лаборатории Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»

«12.11.» 2025г.



А.В. Барышев

e-mail: baryshev@vniia.ru

Почтовый адрес: 127030, Москва, Сущевская ул., д.22

Подпись Барышева А.В. заверяю

Учёный секретарь специализированного диссертационного совета на базе ФГУП «ВНИИА» Д 74.1.002.0



Л.В. Феоктистова

11.2025

Сведения об официальном оппоненте

по диссертационной работе Долматова Артура Викторовича на тему «Исследование СВЧ диэлектрической проницаемости композитных материалов с различной формой и структурой проводящих включений», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13. «Электрофизика, электрофизические установки»

Фамилия Имя Отчество	Барышев Александр Валерьевич
Шифр и наименование специальностей, по которым защищена диссертация	01.04.07 - Физика конденсированного состояния
Ученая степень и отрасль науки	Доктор физико-математических наук
Ученое звание	Профессор
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы оппонента	Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова (ФГУП «ВНИИА»)
Занимаемая должность	Начальник оптической лаборатории ФГУП «ВНИИА»
Почтовый индекс, адрес	127030, Москва, Сущевская ул., д.22
Телефон	(499) 978-7803
Адрес электронной почты	baryshev@vniia.ru
Список основных публикаций официального оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	<u>Список научных публикаций по теме диссертации в период с 2020 по 2025 гг.</u> 1. Kulikova D.P., Baburin A.S., Lotkov E.S., Rodionov I.A., Baryshev A.V. In-situ ellipsometric study of WO ₃ -dielectric permittivity during gasochromic colouration // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Т. 82. С. 767-775. 2. Inozemtsev V.A., Dokukin M.E., Sgibnev Y.M., Sherstyukova E.A., Kandrashina S.S., Shvedov M.A., Shelaev A.V., Nikonorov N.V., Sergunova V.A., Baryshev A.V. Na-Ag Ion-Exchanged Glass Substrates for Plasmon-Enhanced Fluorescence Imaging of Neutrophils // Sensors. 2025. Т. 25(7). С. 2278. 3. Shelaev A.V., Kulikova D.P., Amiraslanov A.S., Baburin A.S., Rodionov I.A., Baryshev A.V. Periodically structured Pd/PdO nanofilm as laser-written optical sensing element for

hydrogen detection // Nano-Structures and Nano-Objects. 2024. T. 39. C. 101234.

4. Kulikova D.P., Baburin A.S., Amiraslanov A.S., Lotkov E.S., Rodionov I.A., Pukhov A.A., Baryshev A.V., Dorofeenko A.V. Optical properties of ultrathin Pd and Pt films on a quartz substrate and on tungsten trioxide films // Journal of Radio Electronics. 2023. T. 2023 (12)

5. Tananaev P., Shelaev A., Sgibnev Y., Kulikova D., Efremova S., Voennov A., Baryshev A. Fabrication of $\text{Bi}_x\text{Y}_3-x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ thin films by thermal decomposition of metal oleates // Ceramics International. 2023. T. 49 (23) C. 38921-38927.

6. Rodionov S.A., Kulikova D.P., Pomozov A.R., Afanasyev K.N., Merzlikin A.M., Baryshev A.V. Polarization features in optical spectra of partially oxidized permalloy nanofilms // Optical Materials. 2023. T. 145 C. 114484.

7. Baburin A.S., Moskalev D.O., Lotkov E.S., Sorokina O.S., Baklykov D.A., Avdeev S.S., Buzaverov K.A., Yankovskii G.M., Baryshev A.V., Ryzhikov I.A., Rodionov I.A. Evolutionary selection growth of silver films for low-loss nanophotonic devices // Surfaces and Interfaces. 2023. T. 39 C. 102897.

8. Lotkov E.S., Baburin A.S., Ryzhikov I.A., Sorokina O.S., Ivanov A.I., Zverev A.V., Ryzhkov V.V., Bykov I.V., Baryshev A.V., Panfilov Y.V., Rodionov I.A. ITO film stack engineering for low-loss silicon optical modulators // Scientific Reports. 2022. T. 12 (1)

9. Kulikova D.P., Dobronosova A.A., Kornienko V.V., Nechepurenko I.A., Baburin A.S., Sergeev E.V., Lotkov E.S., Rodionov I.A., Baryshev A.V., Dorofeenko A.V. Optical properties of tungsten trioxide, palladium, and platinum thin films for functional nanostructures engineering // Optics

Express. 2020. T. 28 (21) C. 32049.

10. Kulikova D.P., Afanasyev K.N., Bykov I.V., Efremova S.L., Pomozov A.R., Shalygina E.E., Baryshev A.V. Transformation of magneto-optical figure of merit for permalloy nanofilms upon oxidation // Optical Materials. 2020. T. 107 C. 110067

Достоверность указанных сведений подтверждаю

Ученый секретарь специального дисс. совета
на базе ФГУП «ВНИИА» Д 74.1.002.02, к.т.н.

Федосеева Л.В.

« 12 » ноября 2025 г.

