

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Долматова А.В. «Исследование СВЧ диэлектрической проницаемости
композитных материалов с различной формой и структурой проводящих
включений» представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности – 1.3.13 – электрофизика,
электрофизические установки

В текущем столетии стремительно развиваются исследования физических явлений в композиционных материалах (КМ) различного состава и структуры, особое место среди которых занимают композиции, состоящие из диэлектрической матрицы и проводящих включений. Такие КМ широко применяются в качестве активных сред для СВЧ приложений и для создания пассивных элементов антенной техники, позволяющих формировать необходимую структуру электромагнитного поля: линз, рассеивателей, согласующих элементов и других устройств СВЧ-электроники. 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. Поэтому цель диссертации Долматова А.В., посвященной выявлению закономерностей влияния формы и структуры металлических включений микронных размеров на СВЧ диэлектрическую проницаемость КМ с диэлектрической матрицей, представляется актуальной, как с научной, так и с практической точек зрения.

Наиболее **важными результатами**, имеющими несомненную научную ценность, являются:

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. Методом моделирования определены коэффициенты деполяризации несферических частиц. Разработанный на его основе подход позволяет рассчитать эффективную диэлектрическую проницаемость КМ с низкой концентрацией включений. Расчетные значения хорошо согласуются с результатами измерений.

2. 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. Установлено, что диэлектрическая проницаемость КМ с частицами железа, покрытыми слоем SiO_2 , зависит от толщины этого слоя и описывается формулой смешения Максвелла-Гарнетта.

3. 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 предусматривает контроль плотности и концентрации включений.

Научная новизна работы заключается в разработке и верифицировании модели оценки эффективной диэлектрической проницаемости композитов, которая позволяет учитывать распределение частиц наполнителя по форме и размерам. Автором показано, что аппроксимация несферических частиц параллелепипедами обеспечивает более точное согласие с экспериментом по сравнению с моделью эллипсоидов. Впервые предложен многоитерационный метод синтеза, позволивший получить на частицах карбонильного железа диэлектрические оболочки SiO_2 рекордной толщины до 450 нм, что существенно повысило их термическую стабильность и позволило эффективно управлять электродинамическими свойствами композита. На основе численного моделирования обоснована концепция применения легкого однородного диэлектрика с $\epsilon' \approx 3.5$ для создания сферических отражателей СВЧ-излучения, демонстрирующих в дециметровом диапазоне эффективность, сопоставимую с классическим отражателем Лунеберга.

Практическая значимость работы заключается в развитии научных представлений о частотной зависимости СВЧ диэлектрической проницаемости современных материалов и взаимодействии ферромагнитных

частиц разной формы в структуре композита. Разработанные порошковые материалы с диэлектрической оболочкой на поверхности частиц перспективны для создания новых магнитных материалов СВЧ-диапазона, термостойких материалов, для решения задач электромагнитной совместимости и применения в антенной технике. Результаты диссертации могут быть использованы научно-исследовательскими учреждениями и образовательными организациями при проведении теоретических и экспериментальных исследований электрофизических свойств композиционных материалов, изучении высокочастотных характеристик и разработке новых материалов для СВЧ-устройств.

Достоверность результатов обеспечивается применением современного аналитического оборудования и аттестованных методик исследований, качественным соответствием теоретических моделей экспериментальным данным при определении эффективных диэлектрических и магнитных характеристик металл-диэлектрических композитов, воспроизводимостью результатов при использовании независимых физико-химических методов, а также их согласованностью с опубликованными теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

По диссертации можно сделать следующие замечания:

1. На странице 48 диссертации утверждается, что аппроксимация частиц параллелепипедами дала результат более близкий к экспериментальным данным, чем модель с эллипсоидами. Однако в тексте отсутствует количественное обоснование этого вывода — не приведены сравнительные таблицы с погрешностями расчетов для разных методов аппроксимации. Также на странице 66 заявлено, что для сильно несферических частиц соответствие теоретических моделей экспериментальным данным ухудшается, но не указаны границы применимости разработанных методов и степень этого ухудшения.

2. На странице 78 отмечено, что толщины оболочек, рассчитанные из данных магнитостатических измерений, систематически превышают значения, полученные методом электронной микроскопии. Автор объясняет это возможным наличием отдельных частиц SiO_2 , не связанных с железным ядром, но не приводит оценки доли такого "свободного" диоксида кремния и не исследует способы минимизации этого побочного продукта синтеза. Кроме того, на странице 85 сделан вывод об оптимальности условий синтеза при соотношении $[\text{TEOS}]/[\text{NH}_3]=1,5$, однако не представлены данные о

воспроизводимости результатов в этих условиях и стабильности полученных порошков при длительном хранении.

3. На странице 110 автором констатируется значительное расхождение между расчетной и экспериментальной ЭПР сферического отражателя. Автор объясняет это дефектами изготовления, но не проводит количественного анализа вклада различных факторов — несферичности, неоднородности материала, качества металлизации. Также на страницах 108-109 показана зависимость диэлектрической проницаемости от плотности композита, но не исследован вклад межфазных явлений на границе "полимер-наполнитель" в формирование диэлектрических потерь, которые оказались существенно выше, чем у модельных материалов с парафиновой матрицей.

4. В тексте диссертации имеются также замечания по оформлению работы:

- подписи к рисункам сделаны другим размером шрифта, к тому же к некоторым рисункам они приведены на следующей странице;
- литература приводится через один интервал.

Отмеченные недостатки не снижают общего положительного мнения о работе, не влияют на достоверность результатов диссертации и не ставят под сомнение их значимость. Представленные результаты являются новыми и оригинальными.

Автореферат и список опубликованных работ правильно отражают содержание диссертации. Представленные в диссертационной работе результаты исследований опубликованы **в 6 статьях в российских и международных журналах**, в том числе 4 работы в журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, и многократно докладывались на международных всероссийских конференциях.

Работа по структуре и содержанию отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к научно-квалификационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Работа изложена на 123 страницах, содержит 63 рисунка, 2 таблицы.

Проведённые исследования электрофизических и электромагнитных явлений соответствуют направлению исследований п. 8 паспорта научной специальности 1.3.13 – «Электрофизика, электрофизические установки» (отрасль науки – физико-математические).

В заключение отметим что, 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 раздела II Положения «О порядке присуждения учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. с последующими изменениями, а её автор, Долматов Артур Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 – «Электрофизика электрофизические установки».

Официальный оппонент,

профессор кафедры твердотельной электроники
им. В.Г. Колесникова Воронежского
государственного технического университета,
д.ф.-м.н. (специальность 01.04.07),
профессор



Калинин Юрий Егорович
10.11.2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет».

Почтовый адрес: 394006, РФ, Воронежская область, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84,
Тел: (473) 207-22-20
Email: kalinin48@mail.ru

Подпись профессора кафедры твердотельной электроники им. В.Г. Колесникова факультета радиотехники и электроники ВГТУ

Ю.Е. Калинин

Ученый



В.П. Трофимов

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	Калинин Юрий Егорович
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	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»,
Занимаемая должность	Профессор кафедры твердотельной электроники ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
Почтовый индекс, адрес	394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84
Телефон	8-903-656-78-16
Адрес электронной почты	Kalinin48@mail.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 г.г.</u> 1. Fedotova J.A.; Pashkevich A.V.; Ronassi Ali Arash; Koltunowicz T.N.; Fedotov A.K.; Zukowski P.; Fedotov A.S.; Kasiuk J.V.; Kalinin Yu.E.; Sitnikov A.V.; Fedotova V.V.; Evtuh A. Negative capacitance of nanocomposites with CoFeZr nanoparticles embedded into silica matrix // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 511(), 166963. (2020). 2. Fadeev E.A., Lähderanta E., Aronzon B.A., Mekhiya A.B., Kalinin Y.E., Makagonov V.A., Pankov S.Y., Foshin V.A., Granovsky A.B. Unconventional magnetoresistance in ZnO/C multilayers at low temperatures // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2021. T.

535. С. 167963.

3. Volochaev M.N.; Granovsky A.B.; Zhilova O.V.; Kalinin Yu.E.; Ryl'kov V.V.; Sumets M.P.; Makagonov V.A.; Pankov S.Yu.; Sitnikov A.V.; Fadeev E.; Lahderanta E.; Foshin V.A. Transport and magnetic phenomena in ZnO-C thin-film heterostructures. Superlattices and Microstructures // 106449, (2020).

4. Котов Л.Н., Устюгов В.А., Власов В.С., Уткин А.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. Структура и ФМР характеристики магнитных композитных пленок (CoFeB + SiO₂) // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 3. С. 441-445.

5. A.V. Sitnikov, V.A. Makagonov, Y.E. Kalinin, S.B. Kushchev, V.A. Foshin, N.N. Perova, E.A. Ganshina, A.B. Granovsky. Magnetic, magnetoresistive and structural properties of Co_x(CoO)_{100-x} thin film composites // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. August 2023, 171154.

6. Sitnikov A.V., Babkina I.V., Kalinin Yu.E., Nikonov A.E., Kopytin M.N., Shakurov A.R., Remizova O.I., Yanchenko L.I. Formation of (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)_x(LiNbO₃)_{100-x} composite film on a metallic substrate // Technical Physics. 2024. Т. 69. № 2. С. 399-403.

7. Kalinin Y.E., Sitnikov A.V., Makagonov V.A., Foshin V.A., Volochaev M.N., Pripechenkov I.M., Perova N.N., Ganshina E.A., Rylkov V.V., Granovsky A.B. Magnetic properties and magnetoresistance of hybrid multilayer nanostructures $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_N$ // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2024. Т. 604. С. 172287.

8. Sitnikov A.V., Makagonov V.A., Kalinin Y.E., Kushchev S.B., Foshin V.A. Structure and electrical properties of Co_N(CoO)_{100-N} thin-film composites // Technical Physics. 2024. Т. 69. № 6. С. 1813-1822.

9. Sitnikov A.V., Kalinin Yu.E., Babkina I.V.,

Nikonov A.E., Kopytin M.N., Yanchenko L.I., Shakurov A.R. Influence of lithium ions on memristor properties of capacitor structures based on nanocomposites $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ // Technical Physics. 2024. T. 69. № 7. С. 2133-2140.

10. А.В. Ситников, Ю.Е. Калинин, И.В. Бабкина, А.Е. Никонов, А.Р. Шакуров, М.Н. Копытин. Влияние термической обработки на мемристивные свойства конденсаторных структур $\text{Cu}/(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}/\text{LiNbO}_3/\text{Cr}/\text{Cu}/\text{Cr}$ // Физика твердого тела, 2024, том 66, вып. 10. С. 1713-1720.

11. Kotov, Z. N. Blinov, P. D. Kovalev, D. V. Zavarin, Yu. E. Kalinin, and A. V. Sitnikov. Concentration and Angular Dependences of Ferromagnetic Resonance Parameters and Magnetic Structure of CoTaNb/MgO Composite Films // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2024, Vol. 88, Suppl. 1, pp. S80–S84. © Pleiades Publishing, Ltd., 2024. P. S80-S84.

12. Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, В.А. Макагонов, В.А. Фошин, М.Н. Волочаев. Прыжковая проводимость в многослойных наноструктурах $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_n$ // Физика твердого тела, 2024, том 66, вып. 11. С. 1941-1949.

13. А.В. Ситников, Ю.Е. Калинин, И.В. Бабкина, А.Е. Никонов, Д.С. Погребной, А.Р. Шакуров. Влияние электрического поля на электротранспортные свойства нанокompозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ // Журнал технической физики, 2025, том 95, вып. 1. С. 107-113.

Подпись официально

Ю.Е. Калинин

Подпись профессор

Ученый секретарь

В.П. Трофимов