

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор
Московского государственного
университета
имени М.В. Ломоносова

профессор А.А. Федянин

_____ 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» о диссертационной работе Ширяева Артема Олеговича на тему «Экспериментальное исследование СВЧ свойств композитных материалов во внешнем постоянном магнитном поле», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Диссертационная работа Ширяева А.О. посвящена экспериментальному исследованию влияния внешнего магнитного поля на СВЧ магнитную проницаемость композитных материалов. **Тема работы актуальна** по целому ряду причин, имеющих как фундаментальный, так и прикладной характер. Во-первых, композитные ферромагнитные материалы активно используются для создания СВЧ устройств, радиопоглощающих или радиоотражающих покрытий, а также для других важных применений, хотя многие проблемы, связанные с механизмами изменения магнитной проницаемости в СВЧ диапазоне, остаются нерешенными. Во-вторых, подавляющее число исследований СВЧ свойств магнитных материалов выполнено в отсутствие магнитного поля, что приводит к потере части информации о механизмах высокочастотной магнитной проницаемости. В-третьих, существуют два разных подхода к исследованию СВЧ магнитной

проницаемости, а именно, с помощью измерения параметров ФМР на фиксированных частотах, и при прохождении или отражении СВЧ волн в волноводных устройствах. Первый способ не позволяет получить частотную дисперсию, но обладает высокой чувствительностью, а второй - обладает меньшей чувствительностью, но обеспечивает возможность анализа параметров материала в широком спектре электромагнитного излучения. Сравнение результатов, полученных этими двумя методами, и совместное их применение весьма целесообразно и интересно. Наконец, нельзя не отметить, что исследование электрофизических, электромагнитных и радиационных явлений и процессов в композитных материалах является одной из центральных задач электрофизики и материаловедения. Из вышесказанного следует, что исследования, на результатах которых основана диссертация Ширяева А.О., весьма важны и своевременны.

Работа по содержанию и структуре отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к научно-квалификационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка и 2 таблицы. Диссертация включает в себя оглавление, список использованных сокращений и обозначений, введение, пять глав, заключение с описанием основных результатов работы и список цитируемой литературы, включающий 140 наименований. В конце каждой главы приводятся её основные результаты.

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту, описаны новизна и практическая значимость проводимых исследований, приведен список публикаций и сформулирован личный вклад автора.

В первой главе представлен литературный обзор, состоящий из четырёх параграфов, обосновывающий постановку решаемых задач. В первом параграфе рассмотрено влияние ферромагнитного резонанса, доменных

границ и скин-эффекта на СВЧ магнитную проницаемость композитных материалов. Во втором рассмотрены формулы смешения, наиболее часто употребляемые для описания свойств композитных материалов. Третий параграф посвящен современным методам измерения магнитных свойств материалов. Особое внимание уделено работам, содержащим измерения СВЧ магнитной проницаемости во внешнем магнитном поле и интерпретацию физических механизмов, которые формируют сложный спектр магнитной проницаемости. В четвертом параграфе на основе обзора литературных данных, сформулированы решаемые в диссертационной работе задачи.

Вторая глава посвящена описанию исследуемых материалов и использованных методов и также состоит из четырех параграфов. Первый параграф посвящен особенностям изготовления тонких ферромагнитных плёнок и коаксиальных образцов на их основе, исследуемых в третьей главе. Во втором параграфе описано изготовление порошков и композитных материалов, СВЧ свойства которых исследованы в четвертой и пятой главах. Третий параграф содержит описание использованных методов измерений и разработки стенда для измерений магнитной проницаемости в магнитном поле. В четвертом параграфе приведены основные результаты главы.

Третья глава состоит из пяти параграфов и содержит результаты исследования СВЧ магнитной проницаемости тонких плёнок во внешнем магнитном поле с помощью предложенного метода. Первый параграф содержит описание способов измерения магнитной проницаемости плёнок. В параграфе предложены два способа нахождения намагниченности насыщения и поля магнитной анизотропии. Проверено совпадение найденных величин со справочными данными и результатами измерений методом ФМР и с помощью вибрационного магнитометра. Второй параграф посвящен исследованию влияния переменных размагничивающих полей на результаты измерений. Третий параграф посвящен определению физических механизмов, формирующих измеряемый СВЧ спектр магнитной

проницаемости. Автором показано, что наблюдаемое поведение вызвано ферромагнитным резонансом. В четвертом параграфе проведено исследование влияния постоянных размагничивающих полей на магнитную проницаемость, измеренную в магнитной поле. Предложен метод учёта полей размагничивания, основанный на расчёте эффективных факторов коаксиальных образцов, что позволило автору перейти от качественного к количественному анализу полученных данных. Пятый параграф содержит основные результаты главы.

Четвёртая глава посвящена исследованию СВЧ свойств композитных материалов при отсутствии внешнего магнитного поля. Она содержит три параграфа, первый из которых посвящен измерению СВЧ материальных параметров исследуемых композитных материалов и описанию эффективной диэлектрической проницаемости формулами смешения Максвелла-Гарнетта и Оделевского. Второй параграф посвящён восстановлению собственной магнитной проницаемости включений из измеренной эффективной магнитной проницаемости композитных материалов. Собственная магнитная проницаемость восстановлена с помощью формулы смешения Винера. В третьем параграфе изложены основные результаты главы.

В пятой главе, состоящей из четырёх параграфов, приведены результаты исследований поведения СВЧ магнитной проницаемости композитных материалов при наличии внешнего магнитного поля. Первый параграф посвящён определению собственной магнитной проницаемости включений при приложении внешнего магнитного поля. Здесь впервые экспериментально продемонстрирована неприменимость стандартных моделей смешения при приложении внешнего магнитного поля. Второй параграф посвящён поиску причин неприменимости формул смешения и анализу частотной дисперсии магнитной проницаемости при изменении внешнего магнитного поля. Автором обнаружено два эффекта, приводящих к существенному искажению спектра магнитной проницаемости при

приложении внешнего магнитного поля. Первый эффект связан с наличием доменных мод, они же приводят к неприменимости формул смещения. В третьем параграфе подробно исследован второй эффект, который вызван влиянием размагничивающего поля на отдельные включения в композитном материале. В четвёртом параграфе представлены основные результаты главы.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна работы состоит в развитии методики, получении и анализе результатов, определяемых частотной дисперсией СВЧ магнитной проницаемости композитных материалов, и в первую очередь, изменением СВЧ магнитной проницаемости в магнитном поле. Исследование частотной дисперсии магнитной проницаемости в магнитном поле впервые позволило разделить магнитные потери, вызванные различными физическими механизмами, а учёт размагничивающего поля в коаксиальном образце - перейти к количественному описанию магнитных свойств. Достоверность полученных экспериментальных результатов не вызывает сомнений.

Однако работа не свободна от недостатков:

1. В литературном обзоре и главе, посвященной тонким пленкам уделено большое внимание закону Аше. Однако в главах, посвященных композитным материалам, его применимость не исследована.
2. Парафин довольно мягкий материал. Не приводит ли сильное магнитное поле к изменению положения включений в образце? Интересно было бы сравнить с другим типом наполнителя.
3. Частота резонанса, судя по данным рисунка 3.19 немонотонно зависит от внешнего магнитного поля, но данный факт в работе не обсуждается.
4. В подразделе 5.3 показано, что при концентрации включений менее 7% внешнее размагничивание происходит не на всем образце, а на

отдельных частицах. В работе следовало бы подробнее обсудить, с чем связаны критерии такого размагничивания для концентрации частиц, их размера и формы.

5. В работе использованы термины, не являющиеся общепринятыми, такие как, «коаксиальная ось», «пики магнитных потерь», «поле размагничивается на образце» и т.п. В небольшом числе имеются и опечатки, например, в подписи к рисунку 3.7 идёт отсылка к рисунку 3.5, вместо 3.6.

Отмеченные недостатки не затрагивают основных выводов и результатов диссертации, не снижают их ценности и не ставят под сомнение их значимость.

Полученные в диссертационной работе результаты имеют большую **научную и практическую значимость** как для развития представлений о частотной и полевой зависимости СВЧ магнитной проницаемости различных материалов, так и для создания новых композитных материалов с уникальными СВЧ магнитными свойствами, радиопоглощающих покрытий, подложек для антенн и для решения задач электромагнитной совместимости.

Обоснованность и достоверность вошедших в диссертационную работу материалов обеспечена использованием стандартных методов измерений, оценкой погрешностей, хорошим соответствием теоретических и экспериментальных данных, а также соответствием экспериментальных результатов, полученных с помощью разных методов измерений.

Автореферат диссертации полностью отражает её основное содержание.

Представленные в диссертационной работе результаты исследований опубликованы в **11 статьях в журналах**, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых в международных базах данных Web Of Science и SCOPUS,

многократно докладывались на международных и всероссийских с международным участием конференциях.

Результаты диссертации могут быть использованы в научных и образовательных организациях, где осуществляются теоретические и экспериментальные исследования композитных материалов, исследованием высокочастотных свойств и разработкой СВЧ устройств, например, ФГБОУ ВО «УдГУ» (г. Ижевск), ФГБОУ ВО «ИжГТУ» (г. Ижевск), ФГБУН ИФМ УрО РАН (г. Екатеринбург), ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН (г. Ижевск), ФТИНТ НАН Украины (г. Харьков), АО СЭГЗ (г. Сарапул), АО «ВНИИНМ», ЗАО «СуперОкс», и других научно-исследовательских учреждениях.

Таким образом, диссертационная работа Ширяева Артема Олеговича на тему «Экспериментальное исследование СВЧ свойств композитных материалов во внешнем постоянном магнитном поле», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки, является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальных задач, имеющих существенное значение для понимания высокочастотных свойств композитов в постоянном магнитном поле. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе критериям 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, Ширяев Артем Олегович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Диссертационная работа обсуждена на заседании кафедры магнетизма физического факультета ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В. Ломоносова» «16» мая 2022 г., протокол № 8.

Заключение по диссертации подготовлено 22 июля 2022 года.

Доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
магнетизма Физического факультета
ФГБОУ ВО «МГУ имени
М.В.Ломоносова», специальность
1.3.12 – Физика магнитных явлений

Перов Николай Сергеевич



Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры магнетизма
Физического факультета ФГБОУ ВО
«МГУ имени М.В.Ломоносова»,
специальность 1.3.12 – Физика
магнитных явлений

Прудников Валерий Николаевич



Контактная информация:

Адрес: 119991 Москва, Ленинские

горы, д.1 стр.2, МГУ имени

М.В.Ломоносова, Физический

Факультет, Кафедра магнетизма

Телефон: +7 (495) 939-18-47

Электронная почта: perov@magn.ru

Сайт: <http://magn.ru/>