

## ОТЗЫВ

Официального оппонента  
доктора физико-математических наук Бузникова Никиты Александровича  
на диссертацию Ширяева Артема Олеговича  
«Экспериментальное исследование СВЧ свойств  
композитных материалов во внешнем постоянном магнитном поле»,  
представленную на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Диссертационная работа А.О. Ширяева посвящена комплексному экспериментальному исследованию частотной дисперсии магнитной проницаемости композитных материалов в присутствии внешнего магнитного поля.

Актуальность диссертационной работы определяется перспективами применения композитных материалов для различных технических приложений в СВЧ диапазоне. К таким приложениям относятся поглотители электромагнитных волн, магнитодиэлектрические подложки для антенн, сердечники СВЧ индукторов и др. В настоящее время использование композитных материалов с магнитными включениями вызывает большой интерес, и актуальность исследований взаимодействия электромагнитных волн с композитными материалами не вызывает сомнений.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы, включающего 140 ссылок. Общий объём диссертационной работы составляет 148 страниц, включая 52 рисунка.

В первом разделе диссертационной работы представлен литературный обзор физических явлений, приводящих к возникновению частотной

дисперсии магнитных свойств материалов в СВЧ диапазоне. Также приведён анализ формул смешения, используемых для описания эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей композитных материалов, и обзор методов измерения магнитных характеристик материалов. На основе рассмотренных исследований автором сформулированы решаемые в работе задачи.

Второй раздел посвящён особенностям изготовления исследуемых материалов и описанию используемых в работе методов измерений. Рассмотрены особенности изготовления тонких плёнок на подложке, композитных материалов и коаксиальных образцов на их основе; представлена методика измерений частотной дисперсии магнитной проницаемости при наличии внешнего постоянного магнитного поля, основанная на методе Николсона–Росса.

В третьем разделе проведена верификация разработанной методики измерения СВЧ магнитной проницаемости в присутствии внешнего магнитного поля на тонких ферромагнитных плёнках на гибкой подложке. Определены магнитные характеристики плёнок, исследована проблема влияния размагничивающих полей, проведены сравнения значений полученных магнитных характеристик с другими методами измерений. Показано, что учёт влияния размагничивания на магнитную проницаемость коаксиальных образцов позволяет проводить количественный анализ измеряемых данных.

В четвёртом разделе приведены результаты измерений диэлектрической и магнитной проницаемости исследуемых композитных материалов, наполненных частицами сендаста, в отсутствие внешнего магнитного поля. Подробно рассмотрен вопрос нахождения собственной магнитной проницаемости малых магнитных частиц из эффективной

магнитной проницаемости композитного материала. Проведена оценка погрешности определения собственной магнитной проницаемости включений.

В пятом разделе разработанная методика измерения СВЧ магнитной проницаемости применена к исследованию композитных материалов. Исследована возможность определения собственной магнитной проницаемости малых частиц при наличии внешнего магнитного поля, интерпретированы измеренные СВЧ магнитные потери и изучены эффекты, связанные с размагничивающими полями.

Научная новизна. Все полученные автором результаты и положения, выносимые на защиту, обладают научной новизной. Из новых результатов, полученных в диссертационной работе, особый интерес представляют следующие.

1. Предложена новая комплексная методика измерения и анализа СВЧ магнитной проницаемости в зависимости от частоты и внешнего магнитного поля.

2. Предложен метод учёта размагничивания коаксиальных образцов, который позволил проводить количественный анализ измеренных данных.

3. Впервые экспериментально продемонстрирована неприменимость формулы смещения Винера для описания магнитной проницаемости композитных материалов в присутствии внешнего магнитного поля.

Практическая значимость результатов работы обусловлена тем, что разработанные измерительный стенд и метод количественного анализа магнитной проницаемости могут быть использованы для анализа СВЧ свойств уникальных композитных материалов. Эти композитные материалы могут быть использованы, например, в качестве поглотителей электромагнитных волн, магнитодиэлектрических подложек для антенн,



сердечников СВЧ индукторов и др. Также подобные материалы могут быть применены для улучшения радиотехнических характеристик антенных систем и систем обеспечения электромагнитной совместимости. Результаты работы могут быть использованы организациями радиоэлектронной, приборостроительной и авиационной промышленности.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждается использованием современных методик, согласием результатов, полученных разными методами измерений, а также соответствием экспериментальных результатов и выводов теории.

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. Работа хорошо структурирована, материал изложен последовательно и логично, структура диссертации соответствует сформулированным цели и задачам проведенного исследования. Каждый раздел заканчивается выводами, отражающими основные изложенные в нём положения и результаты. В работе приведены списки используемых обозначений и сокращений, что облегчает работу с диссертацией. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Апробация результатов исследования. По материалам диссертационной работы опубликовано 11 статей в рецензируемых журналах. Большая часть из этих статей опубликовано в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science. Таким образом, результаты диссертации достаточно подробно освещены в научной печати. Также полученные автором результаты были представлены на более чем десяти российских и международных конференциях, и должная апробация результатов диссертации не вызывает сомнений.

К диссертационной работе Ширяева А.О. есть небольшие замечания.

1. В работе слишком мало внимания уделено влиянию скин-эффекта на магнитную проницаемость, измеряемую в присутствии внешнего магнитного поля. В тоже время, как представляется, скин-эффект может иметь определяющую роль в формировании спектра магнитной проницаемости как для композитных материалов, так и для тонких ферромагнитных плёнок.
2. Автор использует термин «тонкие плёнки», однако непонятно, до каких значений толщин плёнки можно считать тонкими, и от чего это зависит?
3. В четвёртом разделе исследованы частотные зависимости магнитной проницаемости композитных материалов с включениями сферической формы при отсутствии внешнего поля. Однако магнитная проницаемость этих композитов при наличии внешнего магнитного поля в работе не рассматривались.
4. Не указано, чем определяются нижняя и верхняя границы частотного диапазона измерений используемого метода, и можно ли этот диапазон расширить. В разделе 1.4 указано, что измерения методом Николсона–Росса могут быть проведены до частоты 18 ГГц, а во Введении и в разделах 2.1 и 5.4 – до 20 ГГц.

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основного содержания работы и не изменяют общей положительной оценки диссертации А.О Ширяева.

Резюмируя сказанное, можно констатировать, что диссертационная работа А.О. Ширяева является завершённым научным исследованием, посвящена актуальной теме, содержит ряд новых, важных в научном и практическом плане результатов, которые вносят значительный вклад в

понимание СВЧ диэлектрических и магнитных свойств композитных материалов и малых магнитных частиц. Работа соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней № 842 от 24.09.2013 г., а её автор, Ширяев Артем Олегович, заслуживает присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

**Официальный оппонент:**

главный научный сотрудник  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,  
д.ф.-м.н.

Телефон: +7(498)6574026, доб. 2127

Электронная почта: N\_Buznikov@vniigaz.gazprom.ru

Н.А. Бузников

3 августа 2022 г.

Подпись Н.А. Бузникова заверяю



Е.В. Мелникова

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИНАЗ» (ООО «Газпром ВНИИНАЗ»).

Почтовый адрес: 142717, Московская область, г.о. Ленинский, п. Развилка, пр-д Проектируемый № 5537, здание 15, строение 1

Телефон: +7(498)6574206

Электронная почта: vniigaz@vniigaz.gazprom.ru