

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

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

**Актуальность темы.** В научно-технической литературе в последнее время наблюдается всплеск интереса к композитным материалам, в частности, к их динамическим магнитным свойствам. Проведенное Ширяевым А.О. исследование выполнено на уровне, соответствующим современному уровню отечественной и мировой науки. Метод исследования, предложенный автором, основан на измерении магнитной проницаемости в зависимости как от частоты, так и от внешнего магнитного поля. Метод расширяет возможности как качественного, так и количественного анализа частотной дисперсии сверхвысокочастотной магнитной проницаемости композиционных материалов.

Диссертация Ширяева А.О., объемом 148 страниц текста, включает в себя пять разделов. **В первом** представлен литературный обзор современного состояния исследований по тематике диссертации. В нем рассмотрены основные эффекты, приводящие к формированию магнитных потерь на сверхвысоких частотах, формулы смещения и методы измерения электродинамических свойств материалов. На основе рассмотренной литературы в конце раздела поставлены задачи, решаемые в диссертационной работе.

**Во втором разделе** рассмотрены исследуемые материалы и используемые методы. Раздел содержит подробное описание деталей изготовления исследуемых материалов и образцов, а также методов, используемых в работе для измерения магнитных свойств материалов (метод Николсона–Росса, ФМР и др.). Стоит отметить, что все представленные

методы исследований реализованы с использованием современной измерительной аппаратуры, что позволило автору получать результаты, конкурентоспособные на мировом уровне. Основным результатом раздела является разработанный стенд, предназначенный для проведения измерений диэлектрических и магнитных свойств материалов в зависимости от частоты и от внешнего магнитного поля.

**Третий раздел** диссертации посвящен исследованию структур на основе тонких ферромагнитных пленок. Выбор подобных материалов в качестве объекта исследования логично обоснован автором. По сравнению с композиционными материалами исследованные пленки обладают простотой измерений в приложенном магнитном поле и более простой интерпретацией полученных экспериментальных результатов, что позволяет использовать их для проверки разработанной методики. Основными целями раздела являлись проверка методики, учёт размагничивания на коаксиальных образцах, нахождение численных значений намагниченности насыщения и полей магнитной анизотропии материалов, сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами других методов измерений и интерпретация природы дисперсии измеренной магнитной проницаемости. Считаю, что поставленные в разделе цели достигнуты в полной мере.

**Четвертый раздел** посвящен исследованию композиционных материалов без приложения внешнего магнитного поля. В разделе исследована применимость формул смешения (Максвелла Гарнетта, Оделевского и Винера) для описания как диэлектрических, так и магнитных эффективных свойств композиционных материалов, наполненных включениями сендаста. К основным результатам раздела можно отнести следующие положения: рассчитана погрешность определения собственной магнитной проницаемости включений с помощью формулы смешения Оделевского; показано, что эффективная магнитная проницаемость исследованных композиционных материалов описывается формулой Винера.

В пятом разделе исследованы измеренные зависимости комплексной магнитной проницаемости тех же композиционных материалов от частоты и приложенного магнитного поля. Проведены исследования образцов композиционных материалов различной толщины, объемной доли включений, ориентации частиц в образце. При изучении поведения магнитной проницаемости в поле обнаружено два эффекта, приводящих к расщеплению магнитных потерь. Первый эффект автор связывает с расщеплением ферромагнитного резонанса на доменной структуре в частицах. Этот же эффект приводит к неприменимости формул смешения при приложении внешнего магнитного поля. Второй эффект вызван влиянием размагничивания на отдельных включениях в изотропном композиционном материале.

Каждый раздел заканчивается подразделом с выводами, отражающими основные изложенные в ней положения и результаты. В конце диссертации приведено общее заключение, где сформулированы основные результаты диссертационной работы. Полученные результаты, без сомнения, могут быть полезны широкому кругу исследователей, имеющих дело с композиционными материалами, наполненными ферромагнитными включениями.

**Автореферат** включает необходимые сведения о диссертации Ширяева А.О., соответствует ее содержанию и позволяет оценить полноту и объем проведенных исследований.

Полученные в диссертации результаты обладают **научной новизной**, что подтверждается фактом их публикации в престижных международных журналах и цитированием статей, содержащих результаты работы, в научно-технической литературе. Среди полученных результатов я бы выделил следующие: разработан новый метод измерений и анализа магнитных характеристик материалов с помощью измерений СВЧ- магнитной проницаемости в коаксиальной линии при приложении внешнего магнитного

поля; исследована применимость формул смешения при наличии внешнего магнитного поля и экспериментально зафиксирована неприменимость стандартной формулы смешения для описания магнитной проницаемости композиционных материалов, наполненных неразмагниченными включениями; учтено влияние размагничивания на результаты измерений магнитной проницаемости, что позволило получить количественные характеристики исследуемых материалов.

Полученные автором результаты обладают **практической ценностью**. Разработанная методика измерений и анализа СВЧ магнитных свойств материалов может быть полезна при решении задач электромагнитной совместимости, проектировки антенн и создании радиопоглощающих покрытий. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в различных организациях, занимающихся разработкой материалов радиотехнического назначения, например, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», АО ЦКБА, АО НПП «Исток», ООО НПП «Радиострим», и др.

**Достоверность** экспериментальных результатов обеспечена использованием стандартных измерительных методик и согласием результатов, полученных разными методами измерений.

Все основные результаты диссертации **опубликованы** в авторитетных отечественных и зарубежных научных изданиях. Особо выделю 4 статьи в Journal of Magnetism and Magnetic Materials и одну в Journal of Applied Physics. Общее количество публикаций составляет 11 статей в рецензируемых журналах, что вполне достаточно для кандидатской диссертации. Список цитируемой литературы (140 наименований) является предельно полным. Высокий уровень апробации защищаемых положений подтверждается участием автора с докладами в международных и российских конференциях.

Выводы как к каждому разделу диссертации, так и общие выводы из всей работы, представляются достаточно обоснованными и важными, как для

теории, так и для практических разработок. Тематика работы соответствует паспорту специальности 1.3.13 – Электрофизика и электрофизические установки, и пункту паспорта 8 – Исследование электрофизических, электромагнитных и радиационных явлений и процессов в различных средах для решения практических задач промышленного производства.

Как и любая научная работа, данная диссертация не лишена недостатков. Отмечу основные из них.

1) Не рассмотрены величины погрешностей определения материальных параметров с помощью метода Николсона–Росса.

2) В подразделе 5.2 показано, что формула смещения Винера оказывается неприменима при приложении поля. Могут ли в этом случае быть использованы другие формулы смещения?

3) В работе исследованы плоские частицы размером 40 – 63 мкм, полученные с помощью рассева через сита с соответствующими размерами ячеек. Не указано, почему исследована именно эта фракция и как размер сит может повлиять на измеряемые СВЧ- материальные параметры.

4) В автореферате (в разделе «Общая характеристика работы») и в диссертации (в разделе «Введение») отсутствует подраздел **«Степень разработанности темы исследования»**, что усложняет для категории ученых, не являющихся узкими специалистами, реальную оценку научной новизны работы.

4) Имеются замечания по оформлению работы. Не везде выдержан единообразный стиль в подписях к рисункам: часть из них завершается точкой (см. подписи к рисункам 2.4, 2.5, 2.7, 3.6, 3.10, 3.16 и т.д.), в то время как у большинства рисунков точка в конце подписи отсутствует. Некоторые графики имеют слишком мелкие подписи к осям, например, 3.9, 5.3, 5.17, 5.18.

Указанные недостатки не влияют на общее положительное впечатление от работы. Считаю, что представленная диссертационная работа Ширяева

А.О. «Экспериментальное исследование СВЧ свойств композитных материалов во внешнем постоянном магнитном поле» представляет собой законченную научно-квалификационную работу и соответствует всем требованиям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а А.О. Ширяев заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

**Заведующий кафедрой технологии материалов электроники  
Федерального государственного автономного образовательного  
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский  
пр-кт, д. 4, стр. 1 тел.: +7 (495) 955-00-32, www.misis.ru, e-mail:  
drvvgkostishyn@mail.ru), профессор, д.ф.-м.н., действительный член  
Академии Инженерных Наук РФ**

**Костишин Владимир Григорьевич**

Подпись В.Г. Костишина В.Г. заверяю

**ПОДПИСЬ**  
Проректор по безопасности  
и общим вопросам  
НИТУ «МИСиС»

М.П.



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСиС» 119049, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1., тел.:  
+7 (495) 955-00-32, www.misis.ru,  
kancela@misis.ru