

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Ширяева Артёма Олеговича,  
«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.

Разработка материалов с особыми физическими свойствами - важнейшая задача, определяющая успехи в развитии СВЧ техники. Перспективными в этой связи рассматриваются композитные материалы, состоящие из диэлектрической матрицы с включениями ферромагнитных частиц. В этой связи, значительный интерес представляют исследования структуры и магнитных свойств ферромагнитных частиц, образующих композит, поскольку именно эти частицы определяют СВЧ свойства композитного материала. Знания различных физических механизмов (ФМР, движение доменных границ, скин-эффект), отвечающих за магнитные потери материала в различных СВЧ диапазонах носят, в основном, качественный характер. Это объясняется тем, что точная оценка различных параметров ферромагнитных частиц- включений композита затруднена в силу их значительного разброса, что часто затрудняет выполнение даже качественной оценки.

В представленной работе проблему как количественного, так и качественного анализа высокочастотной дисперсии магнитной проницаемости малых магнитных частиц, входящих в состав композиционного материала, предлагается решать с помощью измерений магнитной проницаемости в зависимости не только от частоты, но и от внешнего магнитного поля.

Цель диссертационной работы состоит в экспериментальном исследовании магнитной структуры и динамических магнитных свойств композитов на основе парафина с включениями ферромагнитных частиц сендаста ( $\text{Al}_{0,054}\text{Si}_{0,096}\text{Fe}_{0,85}$ ) с помощью измерений в коаксиальной линии СВЧ магнитной проницаемости материала при приложении внешнего магнитного поля. Решаемые в работе задачи обеспечили достижение поставленной цели.

Особое внимание заслуживают следующие результаты. Разработка комплексной методики измерения и количественного анализа магнитной проницаемости материала в частотном диапазоне от 0,1 до 20 ГГц при приложении внешнего магнитного поля до 2400 Э, позволяющая определять физические механизмы, приводящие к появлению наблюдаемых магнитных потерь. Предложена методика определения значений намагниченности насыщения и поля магнитной анизотропии, а также проверена её применимость при измерении в условиях приложения внешнего магнитного поля СВЧ магнитной проницаемости коаксиальных образцов тонких ферромагнитных пленок (Fe и супермаллоя  $\text{Ni}_{0,79}\text{Fe}_{0,16}\text{Mo}_{0,05}$ ), нанесенных на гибкие подложки.

Предложенная и апробированная на ферромагнитных плёнках методика измерения частотной зависимости магнитной проницаемости применена для подобных измерений композитов на основе парафина с пластинчатыми включениями сендаста в условиях приложенного внешнего магнитного поля. Показано, что в этом случае собственная магнитная проницаемость частиц должна быть восстановлена и что формула смешения

Винера, корректно описывающая магнитную проницаемость композита в отсутствие внешнего магнитного поля, при приложении поля оказывается неприменимой. Показано, что измеренные СВЧ магнитные потери в пластинчатых частицах сендаста обусловлены доменными модами – уширением естественного ферромагнитного резонанса на доменной структуре частиц. Показано, что в исследуемых изотропных композитных материалах с объемной концентрацией пластинчатых частиц сендаста менее  $(7,0 \pm 0,3) \%$  размагничивающие поля, возникающие на отдельных частицах при приложении поля напряженностью более 1300 Э, приводят к искажению пика магнитных потерь.

#### Замечания по автореферату

1. В тексте автореферата зачастую отсутствуют конкретные экспериментальные результаты, полученные автором, и сведения об их аналитической обработке, а только приводится словесное обобщение этих данных.

Некоторые примеры (*наклонный шрифт* - авторский):

- стр. 9-10 “...описаны особенности получения материала частиц и изготовления композитов....Представлены изображения образцов, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, и результаты измерений гранулометрического распределения размеров порошков”. Указанные особенности получения частиц, изображения образцов, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, и гранулометрического распределения размеров порошков в тексте автореферата отсутствуют.

- стр. 11 “...приведены результаты измерений образцов из тонких ФМ пленок супермаллоя. ...Из измеренных зависимостей с помощью двух предложенных способов найдены намагниченность насыщения  $4\pi M_0$ , поле магнитокристаллической анизотропии  $H_k$  и поле магнитострикции  $H_u$ ”. В автореферате результаты измерений не представлены.

- стр. 13-14 “...представлены измеренные зависимости статической диэлектрической проницаемости от концентрации включений  $\epsilon_{st}(p)$  и зависимости магнитной проницаемости от концентрации включений и частоты  $\mu(p, f)$  ... Из найденного фактора оценен диаметр пластинчатых включений, который хорошо согласуется с реальным размером частиц, определенным из микрофотографий”. В автореферате отсутствуют какие-либо экспериментальные данные, подтверждающие выше указанные зависимости.

- стр. 16 “Для исследования данного эффекта проведены измерения образцов с различной толщиной, различной концентрацией включений, а также образцов с изотропной и анизотропной ориентацией частиц”. “...однако магнитная проницаемость образца при наличии внешнего поля зависит от его толщины”. В автореферате не указаны ни толщины, ни интервалы концентраций, не проиллюстрирована зависимость магнитной проницаемости от толщины.

2. Отсутствует обоснование выбора материала - основы композита.

Сделанные замечания, связанные, в основном, с оформительской частью работы над авторефератом, несколько не снижают научной значимости и высокого научного уровня



выполненной диссертационной работы, о чём также свидетельствуют 11 публикаций результатов работы в высоко рейтинговых журналах, входящих в базу данных web of science и в перечень ВАК РФ. Последнее также свидетельствует об актуальности и оригинальности выполненной работы.

Как следует из автореферата, диссертация, в рамках поставленных задач, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся новые научные данные. Работа соответствует требованиям и критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а её автор, Ширяев Артём Олегович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Главный научный сотрудник Института

Металлургии и Материаловедения им. А.А.Байкова РАН

проф., доктор технических наук

  
11.08.22

Е.Н. Шефтель

Подпись Шефтель Е.Н. удостоверяю

Учёный секретарь ИМЕТ РАН

К.Т.Н

