Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра радиоэлектроники

ДОПУСТИТЬ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ГЭК
Руководитель ООП
канд. физ.-мат. наук, доцент
_____ А.Г. Коротаев
«14» июня 2022 г.

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах подготовленной научно – квалификационной работы (диссертации)

СПЕКТРЫ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И ПОРОШКОВЫХ ФЕРРИМАГНЕТИКОВ С КУБИЧЕСКОЙ И ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре
направление подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия

Журавлёва Елена Владимировна

Научный руководитель
канд. физ.-мат. наук, доцент
_____ В.А. Журавлёв
подпись
«14» июня 2022 г.

Автор работы
аспирант
_____ Е.В. Журавлёва
подпись

Томск-2022

Актуальность темы исследования

Интерес к изучению ферримагнетиков обусловлен перспективностью их использования в современной радиоэлектронике. Ферриты находят широкое применение в качестве одного из основных магнитных материалов. Но для практического применения необходимо создавать материалы с заданными электромагнитными характеристиками. Для магнитных материалов, применяемых на СВЧ, такими характеристиками являются спектры магнитной $\mu(\omega) = \mu'(\omega) - i\mu''(\omega)$ и диэлектрической $\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega)$ проницаемостей (МП и ДП, соответственно). Если ДП в СВЧ диапазоне меняется слабо, то частотные зависимости МП имеют более сложный вид. В общем случае магнитные спектры имеют несколько областей аномальной дисперсии, которые характеризуются резким спадом действительной составляющей и существенным ростом магнитных потерь. На сегодняшний день накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал по процессам, происходящим в низкочастотной области спектра и в области резонанса доменных границ. При этом область аномальной дисперсии МП, связанная с естественным ферромагнитным резонансом (ЕФМР), обусловленным процессами вращения вектора намагниченности в эффективном внутреннем поле магнитной анизотропии, еще изучена недостаточно. В частности, в литературе слабо освещен вопрос об особенностях спектров МП в области ЕФМР при наличии доменной структуры. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной в настоящее время. Актуальность работы подтверждается ежегодным ростом статей по теме исследования.

Степень разработанности темы исследования

Большинство ферритов в размагниченном состоянии обладают доменной структурой, т.е. состоят из отдельных однородно намагниченных областей с различными направлениями намагниченности, разделенными доменными границами. Наличие доменной структуры оказывает существенное влияние на ЕФМР. Намагничивание образца в слабых полях может осуществляться за счет процессов вращения вектора намагниченности и процессов смещения доменных границ (ДГ), поэтому начальную магнитную восприимчивость можно представить как сумму восприимчивостей вращения и смещения. Аналитический обзор литературных источников показал, что на сегодняшний день изучен вклад в спектры магнитной проницаемости от смещения ДГ, однако, методы количественной оценки вклада от вращения вектора намагниченности в эффективную проницаемость ферритов до сих пор не предложены.

При анализе поведения на СВЧ поликристаллических ферритов сначала рассчитывают тензор магнитной проницаемости (МП) отдельного монокристаллического зерна. Затем с помощью тех или иных предположений об их форме, их взаимодействии и распределении по объему образца можно рассчитать СВЧ параметры поликристаллического образца.

Цели и задачи, объект и предмет исследования

Объектом исследования является ферримагнетик с гексагональной кристаллической структурой, синтезированный по стандартной керамической технологии.

Предмет исследования – спектры магнитной проницаемости гексаферритов с анизотропией типа: ось легкого намагничивания и плоскость легкого намагничивания.

Цель диссертационного исследования заключается в изучении влияния доменной структуры на естественный ферромагнитный резонанс гексаферритов в размагниченном состоянии.

Задачи, которые необходимо решить для достижения цели:

1) провести аналитический обзор литературных источников по тематике диссертационной работы;

2) рассчитать тензоры магнитной проницаемости однодоменных невзаимодействующих частиц гексаферритов с анизотропией типа: ось легкого намагничивания и плоскость легкого намагничивания;

3) рассчитать тензоры магнитной проницаемости многодоменных частиц гексаферритов. Исследовать влияние доменной структуры на спектр магнитной проницаемости;

4) провести измерения спектров магнитной проницаемости экспериментальных образцов в микроволновом диапазоне частот;

5) выполнить разделение областей дисперсии в спектрах по соотношениям Крамерса-Кронига;

6) провести анализ полученных результатов. Сравнить экспериментальные данные с расчетными.

Научная новизна заключается в том, что:

1) Впервые получены формулы для расчета тензора магнитной проницаемости отдельного монокристаллического зерна гексаферритов с анизотропией типа: ось легкого намагничивания и плоскость легкого намагничивания. Рассчитан тензор магнитной проницаемости многодоменных частиц гексаферритов. Исследовано влияние доменной структуры на спектр магнитной проницаемости в области ЕФМР. Вычислена МП поликристаллического образца.

2) Впервые проведены расчеты спектров магнитной проницаемости гексаферрита $Co_{2-x}Zn_x$–W. Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными.

Теоретическая и практическая значимость работы

В результате работы получены новые знания о том, что область ЕФМР в ферримагнетиках с кубической и гексагональной кристаллическими структурами

может существенно расширяться за счет магнитного взаимодействия колебаний намагниченности в соседних доменах.

Результаты работы дают возможность моделировать электромагнитные свойства ферримагнетиков в зависимости от статических магнитных характеристик и формы отдельных монокристаллических зерен поликристалла. Впервые, появилась возможность, заведомо, без проведения множества экспериментов, рассчитывать магнитную проницаемость материала. Построена функциональная связь спектров МП ферримагнетиков со статическими магнитными характеристиками: величинами намагниченности насыщения, полей анизотропии и морфологией материалов.

Методология и методы исследования

В соответствии с поставленными задачами в диссертационной работе используется комплексный подход, сочетающий в себе численные расчеты и экспериментальные методы.

Экспериментальное исследование электромагнитных параметров композитов на основе гексаферритов проводилось волноводным (коаксиальным) методом.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов достигается сравнительным анализом расчета и эксперимента, многократными измерениями спектров магнитной проницаемости ферримагнетиков. Достоверность экспериментальных результатов подтверждается непротиворечивостью с современными физическими представлениями и величинами значений магнитной проницаемости, приведенных в литературных источниках. Для измерения использовано поверенное оборудование с аттестованными методиками измерения ЦКП «Центр радиоизмерений ТГУ», аккредитованное на техническую компетентность.

Результаты работы апробированы на следующих конференциях:

1) Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь, 2021).

2) Всероссийская конференция Студенческих научно-исследовательских инкубаторов (г. Томск, 2022).

Основные результаты исследования

Произведен расчет тензора магнитной проницаемости однодоменных частиц гексаферритов с осью легкого намагничивания (ОЛН). Далее был проведен расчет с учетом влияния доменных границ. Считалось, что частицы имеют форму эллипсоида вращения, ось вращения которого совпадает с гексагональной осью *c* кристалла, направленной вдоль оси *z* декартовой системы координат. Выражение для тензора МП образца эллипсоидальной формы получили из решения уравнения движения намагниченности с учетом диссипации Ландау-Лифшица-Гильберта.

Показано, что учёт доменной структуры существенно влияет на спектр магнитной проницаемости образцов гексаферритов с анизотропией типа ОЛН, а именно ЕФМР смещается в сторону более высоких частот, появляются две резонансных частоты в области ЕФМР.

Расчеты тензора МП однодоменных гексаферритов и при наличии доменной структуры были проведены и для материалов с плоскостью легкого намагничивания (ПЛН). Считали, что отклонения вектора намагниченности от положения равновесия малы. Вектор намагниченности лежит в плоскости *xy*. В таком случае координатная ось *y* является одной из осей легкого намагничивания $\varphi = \frac{\pi}{6}$. Образец разбит на плоскопараллельные домены равного объема (V/2). Общий вид тензора МП имеет следующий вид:

$$\vec{\mu}_{cp} = \begin{vmatrix} \chi_x^+ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \chi_z^+ \end{vmatrix} \vec{h}$$

Для анизотропии типа ПЛН резонансные частоты компонент тензора μ_x, μ_z различны и совпадают лишь для образца в форме тонкого диска.

Наличие доменной структуры приводит оказывает существенное влияние на ЕФМР, поскольку внутренние динамические размагничивающие поля на границах доменов обеспечивают связь колебаний намагниченности в соседних доменах. Резонансные частоты связанных колебаний зависят от ориентации переменного намагничивающего поля по отношению к доменной границе.

В расчетах показано, что и резонансные частоты, и величина проницаемости существенно зависят от размагничивающих факторов эллипсоидального зерна.

Были проведены численные и экспериментальные исследования.

Список работ, опубликованных автором диссертации

Материалы диссертации опубликованы в 20 работах, в том числе в 7 статьях, входящих в сборники, цитируемые в «Scopus», в 2 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК.

1. Lysenko E.N., Zhuravlev V.A., Zhuravleva E.V. Electrical and magnetic properties of ZrO2-doped lithium-titanium-zinc ferrite ceramics // Ceramics International, V. 45 (2019) – P. 20148 – 20154.

2. Журавлев В.А., Журавлева Е.В. Спектры магнитной проницаемости литий-титан-цинкового феррита с добавками двуокиси циркония // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. Вып. 3. С. 233 – 235.

3. Журавлёва Е.В. Спектр магнитной проницаемости одноосных гексаферритов в области естественного ферромагнитного резонанса // сборник трудов Девятнадцатой Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов (СНИИ-2022), принято в печать.

4. Kuleshov G.E., Zhuravleva Ye.V., Chernobrova D.A. Microwave Electromagnetic Parameters of Composite Radiomaterials based on Carbon Nanostructures and Ferrimagnetics // Materials of 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) / NTSU Printing office, Novosibirsk, 2014. – P. 158 – 160.

5. Zhuravlyova Ye.V. Electromagnetic Characteristics of Composites Based on Multiferroics Powders at Microwave Frequencies / Ye.V.Zhuravlyova, O.A., Dotsenko // Advanced Material Research, V. 1085 (2015) – P. 214 – 217.

6. Kuleshov G.E., Zhuravlyova Y.V., Dotsenko O.A. Electromagnetic response from composite radiomaterials based on multiwall carbon nanotubes at microwave frequencies // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21−23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978-1-4799-7102-2.

7. Zhuravlyova Ye.V., Kuleshov G.E., Dotsenko O.A., Ul`yanova O.A. Electromagnetic response of composite materials based on ferroelectric/ferrite // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2015), материалы конф. в 2 т., Т. 1, С. 633 – 634, Севастополь, 2015. IEEE Catalog Number CFP15788-PRT, ISBN 978-1-4673-9414-7.

8. Журавлёва Е.В. Электромагнитные характеристики композитов на основе бариевых ферритов / Е.В. Журавлева, О.А. Доценко// Известия высших учебных заведений. Физика, 2013, Т. 56, № 8/2, С. 258 – 259.

9. Zhuravlyova Ye.V. Research of two-layer composite material with hexagonal ferrite and ferroelectric / O.A. Dotsenko, Ye.A. Krasilova // Известия высших учебных заведений. Физика, 2015, Т. 58, № 10/3, С. 248 – 251.

10. Dotsenko O.A., Suslyaev V.I., Frolov K.O. Analysis and reoperation of the magnetic permeability spectra of textured composite based on Z-type hexaferrite by using Cramers-Kronig relations // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, V.168, issue 012072 (2017) doi:10.1088/1757-899X/168/1/012072.

11. Журавлёва Е.В. Electromagnetic characteristics of composites based on multiferroics powders on microwave // Перспективы развития фундаментальных наук, 2014, Томск, С. 359 – 361.

12. Журавлёва Е.В. Электромагнитные свойства композитов на основе сегнетоэлектриков и ферритов // Труды Международной молодежной научной школы, 2014, Томск, С. 44 – 47.

13. Журавлёва Е.В., Черноброва Д.А., Кочеткова О.А., Вагнер Д.В. Зависимость электромагнитных характеристик композиционных материалов, содержащих гексаферриты, сегнетоэлектрики и углеродные наноструктуры, от состава // Наука. Инновации. Технологии, 2013, часть 4, С. 143 – 146.

14. Журавлёва Е.В. Динамические электромагнитные характеристики силикон / Ba3Co2.4Ti0.4Fe23.2O41 / BaTiO3 // Труды Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2014. – С. 44 – 47.

15. Журавлёва Е.В., Доценко О.А., Вагнер Д.В., Электромагнитные характеристики CoFe2O4/МУНТ // Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов 2013. – С.53 – 55.

16. Журавлёва Е.В., Доценко О.А., Вагнер Д.В. Влияние состава композита, содержащего магнитные и диэлектрические наноструктуры, на его электромагнитные

характеристики // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12−13, 2013. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1

17. Журавлёва Е.В., Доценко О.А., Вагнер Д.В. Диэлектрические свойства композиционного радиоматериала на основе углеродных нанотрубок // Электронные средства и системы управления 2013. – С. 36 – 40.

18. Журавлёва Е.В., Чернoброва Д.А. Измерение электромагнитных характеристик CoFe2O4/МУНТ // Актуальные проблемы радиофизики, материалы второй Международной молодежной научной школы, 2013, Томск, С.37 – 38.

19. Журавлёва Е.В. Мультиферроики – перспективные материалы радиоэлектроники // Труды десятой региональной конференции студенческого научно-исследовательского инкубатора, 2013, Томск, С.34 – 35.

20. Журавлёва Е.В., Фролов К.О. Исследование свойств композиционного материала, содержащего гексагональный феррит и сегнетоэлектрик // Труды Международной молодежной научной школы, 2015, Томск, С. 28 – 32.

(/index.php/ru/) (/index.php/en/)

(/index.php)

Поиск заимствований в научных текстах$^{\beta}$

Введите текст:

...или загрузите файл:

Файл не выбран... **Выбрать файл...**

Укажите год публикации: 2022

Выберите коллекции

Все

Рефераты	**Википедия**	**Российские журналы**
Авторефераты	**Российские конференции**	**Энциклопедии**
Иностранные конференции	**Иностранные журналы**	**Англоязычная википедия**
PubMed		

Анализировать

Проверить по расширенному списку коллекций системы Руконтекст (http://text.rucont.ru/like)

Обработан файл:
01. НД Журавлёва Е.В..docx.

Год публикации: 2022.

Оценка оригинальности документа - 91.36%

Процент условно корректных заимствований - 0.0%

Процент некорректных заимствований - 8.64%

Просмотр заимствований в документе

Время выполнения: 9 с.

Документы из базы

Источники заимствования	В списке литературы	Источники Заимствования
1. Электромагнитные характеристики композитных радиоматериалов на основе порошков гексаферритов и углеродных наноструктур в гигагерцовом диапазоне (http://vak2.ed.gov.ru/idcUploadAutoref/renderFile/105089) Авторы: Кулешов Григорий Евгеньевич. Год публикации: 2013. Тип публикации: автореферат диссертации. http://vak2.ed.gov.ru/idcUploadAutoref/renderFile/105089 (http://vak2.ed.gov.ru/idcUploadAutoref/renderFile/105089) Показать заимствования (5)		8.64%

Дополнительно

Значимые оригинальные фрагменты

Библиографические ссылки

Искать в Интернете

© 2015 2022 Институт системного анализа Российской академии наук (http://www.isa.ru/index.php?lang=ru)