

На правах рукописи

РОЗАНОВ Константин Николаевич

**Частотно-зависимые магнитные и диэлектрические свойства композитных
материалов для широкополосных СВЧ применений**

01.04.11 – Физика магнитных явлений

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва 2018

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной электродинамики
Российской академии наук

Научный консультант:

Лагарьков Андрей Николаевич
доктор физико-математических наук
академик РАН

Официальные оппоненты:

Никитов Сергей Апполонович
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН,
директор Института радиоэлектроники
им. В.А.Котельникова РАН

Ганьшина Елена Александровна
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры магнетизма
физического факультета МГУ имени
М.В.Ломоносова

Костишин Владимир Григорьевич
доктор физико-математических наук,
профессор, зав. кафедрой технологии
материалов электроники Национального
исследовательского технологического
университета «МИСиС»

Защита диссертации состоится «7» июня 2018 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.18 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА» по адресу: <https://istina.msu.ru/dissertations/106198705/>

Автореферат разослан «_____» апреля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.01.18
кандидат физ.-мат. наук, доцент

А.И. Ефимова

...

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в приложениях для СВЧ диапазона широко применяются магнитные материалы, используемые в качестве поглотителей или концентраторов СВЧ поля. Поглотители могут быть использованы для борьбы с электромагнитными помехами, обеспечения электромагнитной совместимости, снижения радиолокационной заметности и пр. [1]. К концентраторам относят различные фильтры, сердечники СВЧ индукторов, подложки миниатюризированных антенн для мобильных устройств и т.п. [2]. Соответственно, одним из актуальных разделов физики магнитных явлений является исследование взаимодействия электромагнитных волн с магнитными материалами.

Корректное описание СВЧ магнитных свойств материалов во многих случаях требует рассмотрения полного набора материальных параметров, магнитной проницаемости $\mu = \mu' - i\mu''$ и диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$. Для достижения наибольшей эффективности материалов в технических применениях их материальные параметры должны удовлетворять определённым требованиям, имея заданные значения в широком диапазоне частот СВЧ диапазона [3]. При такой постановке задачи рассматривают обычно тот компонент тензора эффективной магнитной проницаемости материала, который имеет максимальное значение; величины остальных компонентов, как правило, остаются за рамками рассмотрения.

Таким образом, возникает необходимость управления частотной дисперсией диэлектрической и магнитной проницаемостей [4] для получения их высоких значений, малых потерь или сильной зависимости от частоты в заданном частотном диапазоне. Однако существуют достаточно жёсткие физические ограничения на динамическое поведение материальных параметров; наличие этих ограничений необходимо учитывать при оценке реализуемости требуемых частотных зависимостей материальных параметров.

Хорошо известным примером таких ограничений являются соотношения Крамерса–Кронига (см., напр., [5]), связывающие диссипацию энергии в материале с наличием частотной дисперсии соответствующего материального параметра, а также закон Снука [6], который соотносит величину магнитной проницаемости с частотой, выше которой материал не проявляет динамических магнитных свойств.

В ряде магнитных материалов, таких как тонкие ферромагнитные плёнки, композитные материалы, содержащие ферромагнитные включения пластинчатой формы, гексагональные ферриты и некоторые виды аморфных микропроводов, ограничение Снука может быть превзойдено [7, 8], что позволяет достичь предельно высоких значений динамической магнитной проницаемости.

В качестве электродинамических материалов часто используют композиты, которые могут иметь преимущества перед однородными материалами в высоком электрическом сопротивлении, низком удельном весе, хороших механических свойствах, химической стабильности, более широких возможностях механической обработки [9]. Свойства композитных материалов могут варьироваться в широких пределах при изменении концентрации включений, в результате механического размола включений и др. Применение композитов делает возможным отдельное рассмотрение электродинамических свойств, зависящих, в основном, от наполнителя, и физико-механических свойств, которые в первую очередь определяются матрицей композита. Это позволяет создавать материалы, совмещающие высокую эффективность для технических применений (например, для радиопоглощения) и необходимые физико-механические свойства (например, стойкость материала к различным внешним воздействиям) [10].

В СВЧ диапазоне основным механизмом, формирующим магнитные спектры, служит естественный ферромагнитный резонанс. Тем не менее, экспериментально наблюдаемые частотные зависимости магнитной проницаемости часто имеют сложную форму. Смещение, искажение и уширение магнитных спектров или расщепление их на несколько изолированных пиков, как правило, связаны с неоднородностью материала [11]. Наличие магнитной структуры может приводить к возникновению доменных мод ферромагнитного резонанса или расщеплению резонанса на спиновых волнах. Структурная неоднородность материала (особенно в композитных материалах) приводит к искажению формы дисперсионных зависимостей вследствие размагничивания на элементах структуры [12]. Существенное влияние на форму дисперсионных зависимостей магнитной проницаемости могут оказывать также скин-эффект, магнитоупругий эффект (вследствие неоднородности механических напряжений в материале), электродинамические (резонансные) эффекты.

В целом, несмотря на свою актуальность, вопрос об интерпретации положения, ширины и формы экспериментально наблюдаемых линий магнитного поглощения в магнитных материалах далёк от окончательного решения. Не определены количественные соотношения, описывающие влияние указанных выше эффектов на параметры дисперсионных зависимостей. Не ясно, как определять конкретные механизмы, отвечающие за ту или иную область частотной дисперсии магнитных материалов в СВЧ диапазоне [13]. Отсутствует общепризнанная теория композитных материалов, которая позволяла бы точно описывать их эффективные материальные параметры в широком диапазоне концентраций и частот [14]. Практически нет данных о собственной магнитной проницаемости материала включений в композитных материалах и пр.

Таким образом, определение механизмов, отвечающих за формирование частотной дисперсии магнитной проницаемости ферромагнитных материалов, и закономерностей, связывающих параметры дисперсионных зависимостей, с целью использования полученных результатов при создании устройств СВЧ является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы являлось экспериментальное и теоретическое исследование законов частотной дисперсии диэлектрической и магнитной проницаемости магнитных композитных материалов в СВЧ диапазоне. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1 Разработка и модернизация методов измерения СВЧ материальных параметров для увеличения точности и широкополосности измерений.
- 2 Экспериментальное и теоретическое исследование частотной дисперсии СВЧ магнитной проницаемости тонких ферромагнитных плёнок, определение физических механизмов, определяющих форму дисперсионных зависимостей, и соотношений, связывающих между собой параметры этих зависимостей.
- 3 Экспериментальное и теоретическое исследование частотной дисперсии СВЧ магнитной проницаемости композитных материалов, наполненных проводящими порошками, определение связи между эффективной проницаемостью композита и собственной проницаемостью включений и возможностей нахождения собственной проницаемости из данных измерений.

- 4 Экспериментальное и теоретическое исследование частотной дисперсии СВЧ материальных параметров композитных материалов с волокнистыми включениями.
- 5 Применение полученных результатов к решению практических задач, в т.ч., задачи о широкополосности поглотителей электромагнитных волн.

Новизна работы. Все основные положения, выносимые на защиту, являются новыми и представляют интерес для широкого круга исследователей, что подтверждается их активным цитированием в отечественной и зарубежной научно-технической литературе.

Методы исследования. В основном, исследование проведено экспериментальными методами. Ряд задач решен при помощи теоретических или численных методов.

Практическая ценность результатов диссертации состоит в определении ограничений на показатели эффективности различных элементов СВЧ техники, использующих магнитные материалы, таких как поглотители электромагнитных волн и полосковые антенны на магнитодиэлектрической подложке. Также в ходе работы был разработан ряд оригинальных методов измерения СВЧ диэлектрической и магнитной проницаемости материалов.

Достоверность результатов. Достоверность полученных в работе результатов, как экспериментальных, так и теоретических, подтверждается результатами сопоставления эксперимента и теории. Для разработанных измерительных методов выполнен анализ погрешностей и проведены измерения на образцах с известными свойствами.

Личный вклад автора. Личный вклад соискателя в получение научных результатов, вошедших в диссертацию, состоит в постановке задач, разработке экспериментальных и теоретических методов их решения, проведении теоретических исследований, анализе, интерпретации и обобщении полученных результатов. Экспериментальные исследования и численные расчеты проводилась соискателем как самостоятельно, так и с участием соавторов. В диссертацию включены только те результаты выполненных в соавторстве исследований, в которых личный вклад соискателя являлся определяющим.

На защиту выносятся:

- 1 Новые методы измерения диэлектрической и магнитной проницаемости материалов в СВЧ диапазоне, включая метод измерения СВЧ магнитной проницаемости в короткозамкнутой полосковой измерительной ячейке с применением двух калибровочных образцов и метод измерения диэлектрической проницаемости листовых образцов в коаксиальном резонаторе с поперечным разрезом, где для учета влияния разреза на результат измерения получена аналитическая формула.
- 2 Справедливость ограничения Аше на высокочастотную магнитную проницаемость магнитных материалов для случая ферромагнитной плёнки с полосовой доменной структурой и произвольной ориентацией вектора намагниченности. Метод определения константы Аше из экспериментальных данных с использованием лоренцевой аппроксимации частотной зависимости магнитной проницаемости, что позволяет получать более точные результаты по сравнению с общепринятым методом интегрирования измеренных магнитных потерь.
- 3 Формула смешения для композитных материалов, содержащих проводящие включения «камневидной» формы, которая обобщает формулы смешения Максвелл Гарнета и Брюггемана и демонстрирует хорошее согласие с измеренными значениями СВЧ диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов в широком диапазоне концентраций включений и частот.
- 4 Композитный магнитодиэлектрический материал на основе многослойных плёнок пермаллоя, которые нанесены на тонкую лавсановую плёнку методом магнетронного распыления, характеризующийся высокой квазистатической магнитной проницаемостью, около 60, и высокой амплитудой пика магнитных потерь – 50 на частоте около 1 ГГц при содержании пермаллоя 22 об.%. На частотах вблизи пика магнитных потерь материал может быть использован как поглотитель магнитного поля, на более низких частотах – в качестве концентратора поля, например, для изготовления сердечников миниатюризованных полосковых антенн.

- 5 Правило сумм для соотношения Крамерса–Кронига для логарифма модуля коэффициента отражения от плоскостлой структуры и следующее из него ограничение на предельное значение отношения ширины рабочего диапазона длин волн к толщине радиопоглощающего покрытия, справедливое как для однослойных, так и для многослойных покрытий с любым физически реализуемым законом частотной дисперсии материальных параметров, а также для неоднородных материалов.
- 6 Эмпирическое соотношение, связывающее предельное отношение ширины рабочего диапазона длин волн к толщине радиопоглощающих покрытий и количество минимумов модуля коэффициента отражения, расположенных в пределах рабочего диапазона. Дополнительные ограничения на широкополосность магнитных радиопоглотителей, связанные с законами Снука и Аше. Возможность создания с использованием активных материалов высокоэффективных радиопоглощающих покрытий, значительно превосходящих по эффективности и широкополосности поглотители, которые можно реализовать на обычных материалах той же толщины.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 81 статья в рецензируемых журналах, 3 главы в книгах и 2 патента. Основные результаты диссертации опубликованы в 29 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Апробация результатов работы. Результаты работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях и симпозиумах:

- ЕТОПИМ-4: 4th Int. Conf. on El. Transport and Opt. Properties of Inhomogeneous Media, July 23–30, 1996, Moscow–St.-Petersbourg, Russia;
- 7-я Междунар. Крымская Микроволновая Конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», 15–18.09.1997 г., Севастополь, Украина;
- 1998 URSI Int. Symp. Electromagn. Theory, 25–28.05.1998, Thessaloniki, Greece;
- PIERS-1998: Progress Electromagn. Res. Symp., 13–17.07.1998, Nantes, France;
- 8-я Междунар. Крымская Микроволновая Конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», 14–17.09.1998, Севастополь, Украина;
- 7-я Междунар. конф. по спиновой электронике, пос. Фирсановка М.О., 13–16.11.1998;

- ICEAA-99: Int. Conf. Electromagnetic in Adv. Appl., 13–17.09.1999, Torino, Italy;
- Всероссийская научно-техн. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-1999, Таганрог, 22–25.09.1999;
- 8-я Междунар. конф. по спиновой электронике, пос. Фирсановка М.О., 12–14.11.1999;
- PIERS 2000: Progress Electromagn. Res. Symp., 5–14.07.2000, Cambridge, USA;
- 10-я Междунар. конф. по спиновой электронике, пос. Фирсановка М.О., 16–18.11.2001;
- INTERMAG 2002: Int. Magnetic Conf., 28.04–2.05.2002, Amsterdam, Holland;
- UMR-Rolla Consortium Meeting, 10–15.05.2002, Rolla, Missouri, USA;
- MISM 2002: Moscow Int. Symp. on Magnetism, 20–24.06.2002, Moscow, Russia;
- 16th Conf. Electromagn. Fields and Materials, 11–13.09.2002, Bratislava, Slovakia;
- ICCE 11: Int. Conf. on Composite Engineering, 8–14.08.2004, Hilton-Head Island, South Carolina, USA;
- MISM 2005: Moscow Int. Symp. on Magnetism, 25–30.06.2005, Moscow, Russia;
- ICMAT 2005: 3rd Int. Conf. Materials Adv. Technol., 3–8.07.2005, Singapore;
- Joint 9th Int. Conf. on Electromagnetics in Adv. Appl. (ICEAA-2005) and 11th Eur. Electromagn. Structures Conf. (EESC-05), 12–16.09.2005, Torino, Italy;
- ICMAT 2007: 4th Int. Conf. on Materials for Advanced Technologies, 1–6.07.2007, Singapore (приглашённый доклад);
- MSMW 07: 6-th Int. Kharkov Symp. on Phys. Eng. of Microwaves, Millimeter and Submillimeter waves, Kharkov, Ukraine, 25–30.06.2007 (приглаш. доклад);
- MISM 2008: Moscow International Symposium on Magnetism, 20–25.06.2008, Moscow, Russia (приглашённый доклад);
- Int. Symp. “Microwires: Research and Applications”, 12–13.03.2009, Madrid, Spain (приглашённый доклад);
- PIERS 2010: Progress in Electromagnetic Res. Symp., 5–9.07.2010, Cambridge, MA, USA (приглашённый доклад);

- EMTS 2010: Int. Symp. on Electromagnetic Theory, 16–19.08.2010, Berlin, Germany (приглашённый доклад);
- URSIGASS 2011: 30th URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, Turkey, 13–20.08.2011 (приглашённый доклад);
- MISM 2011: Moscow Int. Symp. on Magnetism, 21–25.08.2011, Moscow, Russia;
- PIERS 2011: Progress in Electromagn. Res. Symp., 12–16.09.2011, Suzhou, China;
- COST Action MP0902 Composites of Inorganic Nanotubes and Polymers, Workshop, Prague, Czech Republic, 17–19.04.2012 (приглашённый доклад);
- 2012 IEEE Symp. on Electromagnetic Compatibility, 5–10.08.2012, Pittsburgh, USA (приглашённый доклад);
- PIERS 2012: Progr. Electromagn. Res. Symp., 19–23.08.2012, Moscow, Russia;
- ICMAT 2017: 9th Int. Conf. on Materials for Advanced Technologies, 18–23.06.2017, Singapore (приглашённый доклад);
- а также на Ежегодных научных конференциях Института теоретической и прикладной электродинамики РАН (ИТПЭ РАН) в 2000–2015 гг., на научных семинарах, проведённых в ИТПЭ РАН, Институте радиоэлектроники РАН (Москва, Россия), National University of Singapore (Сингапур), University of Missouri-Rolla (Ролла, Миссури, США), University of Electronic Sci. and Technol. (Ченду, КНР), University of Tel-Aviv (Тель-Авив, Израиль).

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении проектов РФФИ №№ 06-08-00788-а, 07-08-92111-ГФЕН-а, 09-08-00158-а, в которых автор был руководителем, и 99-02-1654-а, 01-02-17962-а, 05-08-01212-а, 08-02-00830-а, 09-08-01161-а, 12-08-00954-а, 13-08-00103-а и 15-08-03535-а, а также проекта РФФИ 16-19-10490, в которых автор был исполнителем.

Объём и структура работы. Диссертационная работа изложена на 326 страницах машинописного текста, иллюстрируется 143 рисунками, содержит 754 ссылки на литературные источники и состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы. В начале каждого раздела приведен краткий обзор литературных данных по проблеме, обосновывающий постановку решаемых задач.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимость полученных результатов, описаны структура, объём и содержание диссертационной работы.

Раздел 1 посвящен экспериментальным методам измерения СВЧ диэлектрической и магнитной проницаемостей, разработанным и использованным при проведении работы. В **подразделе 1.1** приведен обзор современных методов измерения параметров материалов на СВЧ. Отмечено, что наиболее распространены метод Николсона–Росса–Уира в коаксиальной линии или в свободном пространстве, а также метод измерения магнитной проницаемости тонких ферромагнитных плёнок, использующий закороченную полосковую ячейку. Эти стандартные методы позволяют решать большинство задач, связанных с исследованием СВЧ свойств материалов. Однако для проведения экспериментальных исследований в рамках настоящей работы потребовалась доработка и развитие стандартных методов.

В **подразделе 1.2** рассмотрен метод измерения магнитной проницаемости тонких ферромагнитных плёнок в коаксиальной линии. Метод использует плёнки, которые нанесены на гибкую диэлектрическую подложку и скручены в рулонный образец, как показано на рис. 1. Метод обладает высокой чувствительностью измерения магнитной проницаемости, что обусловлено как сравнительно большим количеством плёнки, используемым при изготовлении образца, так и возможностью применения стандартных калибровочных процедур для устранения влияния неоднородностей линии на результат измерения. Значения магнитной проницаемости связаны с измеряемым коэффициентом отражения простыми аналитиче-



Рисунок 1 – Рулонный образец из тонкой ферромагнитной плёнки, нанесённой на гибкую подложку, для измерения магнитной проницаемости в коаксиальной линии

скими соотношениями, так как образец полностью заполняет сечение линии.

Показано, что использование короткозамкнутой отражающей ячейки для измерения магнитной проницаемости увеличивает чувствительность по сравнению с методом Николсона–Росса–Уира. Проанализированы погрешности измерения и предложены уточнённые формулы для связи измеренных эффективных проницаемостей образца, $\varepsilon_{\text{эфф}}$ и $\mu_{\text{эфф}}$, и собственных проницаемостей плёнки,

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \varepsilon \frac{h + h_{\text{д}}}{h_{\text{д}}}, \quad \mu_{\text{эфф}} = \frac{h_{\text{д}}}{h + h_{\text{д}}} (1 + \mu h K / h_{\text{д}}), \quad (1)$$

$$\text{где } K = \frac{\text{tg}(k_{\text{мет}} h / 2)}{k_{\text{мет}} h / 2}, \quad k_{\text{мет}} = \sqrt{\pi f \mu \sigma} (1 - i), \quad (2)$$

где μ и σ – собственная магнитная проницаемость и проводимость плёнки, f – частота, $h_{\text{д}}$ и $\varepsilon_{\text{д}}$ – толщина и диэлектрическая проницаемость диэлектрической подложки в образце, δ – глубина скин-слоя, h – толщина плёнки. Величина K характеризует влияние скин-эффекта на эффективные параметры образца. Применение (1) и (2) приводит к корректным результатам на частотах, где существенно скинирование, что подтверждено анализом измеренных данных.

В подразделе 1.3 описан применённый в работе полосковый метод измерения магнитной проницаемости. Преимуществом полосковых методов является высокая чувствительность измерения магнитной проницаемости, недостатком – отсутствие методов калибровки, предназначенных для устранения погрешностей, которые связаны с неоднородностями измерительного тракта. Предложена процедура для калибровки неоднородностей однопортовой полосковой измерительной ячейки при помощи калибровочных образцов, что позволило расширить частотный диапазон измерений в область высоких частот. Хотя частоты ферромагнитного резонанса большинства ферромагнитных плёнок в размагниченном состоянии не превышают нескольких ГГц, задача расширения частотного диапазона измерения их магнитной проницаемости актуальна. В частности, расширение диапазона необходимо для проведения измерений в постоянном магнитном поле, где наблюдается сильный сдвиг линий магнитного поглощения в область высоких частот; такие измерения могут дать ценные данные о неоднородности образца, влиянии скин-эффекта и др.

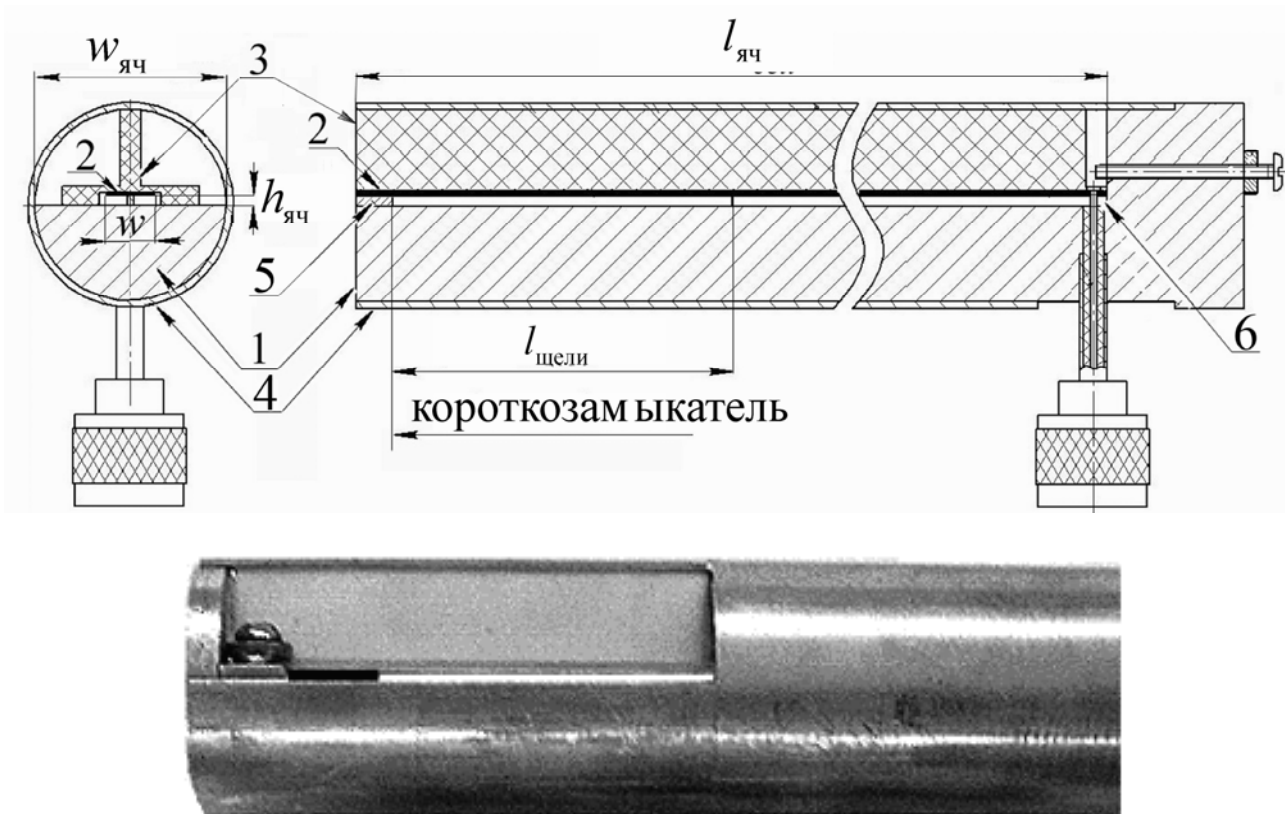


Рисунок 2 – Чертеж поперечного и продольного сечения полосковой ячейки (сверху). На фотографии снизу показан короткозамкнутый конец ячейки; поглощающий экран 4 снят, чтобы было видно короткозамыкатель 5 и центральной полосок 2 с механической опорой 3. Образец помещается между центральным полоском 2 и основанием ячейки 1 перпендикулярно плоскости рисунка

Разработанный метод основан на использовании измерительной ячейки, показанной на рис. 2, для которой осуществлена полная калибровочная процедура с применением двух калибровочных образцов; электродинамические свойства калибровочных образцов предполагаются известными. Один из этих образцов может быть магнитным композитным материалом, свойства которого измерены другим методом, например, коаксиальным. В качестве второго образца можно выбрать полоску немагнитного металла, свойства которой полностью определяются скин-эффектом. Рабочий диапазон частот измерений ограничен сверху длиной металлического калибровочного образца из-за размерного (полуволнового) резонанса на нём. Плотный прижим проводящего образца к основанию ячейки позволяет подавить этот резонанс, но более высокие моды трудно подавить надёжно, поэтому наивысшая частота измерений не превыша-

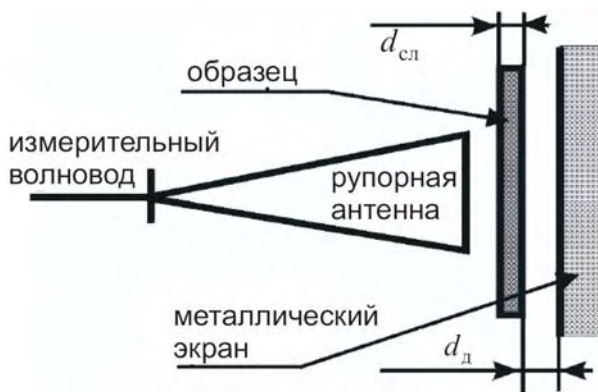


Рисунок 3 – Принципиальная схема измерения СВЧ диэлектрической проницаемости листовых материалов скалярным квазиоптическим методом

ет 8 ГГц. Минимальная рабочая частота определяется точностью измерения ослабления и фазовых сдвигов. Пара оптимизированных калибровочных образцов достаточна для измерений в диапазоне частот порядка четырёх октав. Рассмотрено влияние диэлектрической проницаемости образца, которое можно учесть приближенно даже без знания её точного значения в случае, когда толщина образца меньше рабочего зазора полосковой линии.

В подразделе 1.4 описан скалярный квазиоптический метод измерения СВЧ диэлектрической проницаемости листовых материалов, применённый при исследовании композитных материалов с проводящими волокнами. Метод использует измерение модуля коэффициента отражения от образца с диэлектрическими потерями, расположенного на заданном расстоянии от металлического экрана, в зависимости от этого расстояния. Для того чтобы избежать ограничения на оптическую толщину образцов и снизить случайную погрешность измерения, проводят измерения модуля коэффициента отражения при нескольких расстояниях между образцом и экраном в окрестности интерференционного минимума. После этого диэлектрическую проницаемость образца находят при помощи метода наименьших квадратов.

Принципиальная схема установки показана на рис. 3. При измерении образец располагался вплотную к апертуре рупорной антенны, что позволило упростить используемое оборудование, в частности, избежать необходимости использования безэховой камеры, а также пренебречь дифракцией на краях образца. При условии, что размер выходной апертуры рупора превышает 3λ , где λ – длина волны зондирующего излучения, погрешность измерения не превышает оценена как $\pm 10\%$ для обеих частей измеряемой диэлектрической проницаемости.

В подразделе 1.5 предложен метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости листовых материалов в мегагерцовом диапазоне частот. Листовой образец помещается в сквозной разрез, прорезанный в корпусе коаксиального резонатора перпендикулярно его оси. Получена простая аналитическая формула для нахождения комплексной диэлектрической проницаемости образца из измеренного относительного сдвига комплексной резонансной частоты $\delta = (f_{\text{рез1}} - f_{\text{рез0}}) / f_{\text{рез0}}$:

$$\varepsilon = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi f_{\text{рез0}}}{c} d \left(1 + \frac{L}{d} \delta - \Lambda d\right)\right) \cdot (1 + \Lambda d) \Big/ \left(\frac{\pi f_{\text{рез0}}}{c} d\right), \quad (3)$$

где d – толщина образца, L – длина резонатора, $f_{\text{рез0}}$ – комплексная резонансная частота пустого резонатора, $f_{\text{рез1}}$ – комплексная резонансная частота резонатора с образцом, c – скорость света,

$$\Lambda = \left(\frac{2}{\pi}\right)^3 \cdot \frac{1}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right), \quad (4)$$

а r_1 и r_2 – внутренний и внешний поперечные размеры коаксиального резонатора, в котором проводят измерения, соответственно. При выводе формул (3) и (4) предполагалось, что толщина образца равна ширине разреза в резонаторе. Обработка экспериментальных данных в резонаторе с $r_2 = 20$ см и толщиной разреза до 1,5 см с использованием полученных формул позволило снизить систематическую погрешность измерения, связанную с наличием разреза, до величины не выше 2%.

Предложенный метод расчета, основанный на лемме Лоренца, не использует метод малых возмущений и поэтому применим для образцов с высокой диэлектрической проницаемостью. Метод может быть также использован при анализе других конфигураций измерительных установок, в которых образец помещён в неоднородность линии передачи.

Раздел 2 посвящен теоретическому и экспериментальному исследованию частотных зависимостей магнитной проницаемости ферромагнитных материалов. Так как получение высоких значений магнитной проницаемости в СВЧ диапазоне возможно при использовании тонких ферромагнитных плёнок, то именно их магнитным свойствам уделено основное внимание.

Подраздел 2.1 описывает теорию ферромагнитного резонанса и известные из литературы данные об особенностях частотных зависимостей магнитной проницаемости материалов. Проводимое рассмотрение основано на анализе ограничений на зависимость магнитной проницаемости от частоты f , вытекающих из обобщённого закона Снука,

$$\left(\mu_{\text{ст}} - 1\right) f_{\text{рез}}^2 \leq p \kappa \left(4\pi \gamma M_0\right)^2 = K_A, \quad (5)$$

справедливого, в частности, для тонких ферромагнитных плёнок и КМ с пластинчатыми магнитными включениями, и его обобщения на случай сложной формы частотной зависимости магнитной проницаемости – интегрального закона Аше,

$$\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \mu''(f) f df \leq K_A. \quad (6)$$

В (5) и (6) через p обозначено объёмное содержание магнитной фазы в неоднородном материале, M_0 – намагниченность насыщения этой фазы, $f_{\text{рез}}$ – частота естественного ферромагнитного резонанса, κ – фактор, учитывающий возможную преимущественную ориентацию магнитных моментов, $\gamma \approx 3$ ГГц/кЭ – гиромагнитное отношение, K_A – константа Аше. Применение соотношений (5) и (6) позволяет делать выводы о магнитной структуре материалов и получать оценки предельных свойств устройств, использующих магнитные материалы.

Для достижения равенства в (5) и (6), т.е., для получения существенно более высоких значений магнитной проницаемости на высоких частотах по сравнению с материалами, подчиняющимися стандартному закону Снука, необходимо, чтобы в частицах (кристаллитах или включениях), составляющих материал, размагничивающие поля вдоль двух из трёх главных осей частицы были малы. Тогда статический магнитный момент ориентирован вдоль одной из этих осей, а вдоль другой может быть получено высокое значение СВЧ магнитной проницаемости. Этому условию удовлетворяют тонкие ферромагнитные плёнки, композитные материалы с пластинчатыми ферромагнитными включениями, гексагональные ферриты и ферромагнитные микропровода с циркулярной магнитной анизотропией. Для некоторых из этих материалов в за-

кон Аше может входить дополнительный числовой множитель, но во всех случаях сохраняется квадратичная зависимость правой части от намагниченности насыщения, что и обеспечивает высокие значения СВЧ магнитной проницаемости. Свойства тонких ферромагнитных плёнок рассмотрены в разделе 2, остальные упомянутые материалы исследованы в следующих разделах работы.

Широкому применению обобщённого закона Снука для анализа экспериментальных данных препятствует то, что он строго выводится только для простейшего случая однородно-намагниченной эллипсоидальной частицы, без учета наличия доменной структуры и влияния скин-эффекта. Кроме того, уравнение (5) справедливо только для высокочастотного ферромагнитного резонанса, в котором нет расщепления пика магнитных потерь или искажения его формы. Интеграл в соотношении (6), который используют для определения константы Аше для сложных дисперсионных зависимостей, во многих случаях сходится медленно. Так как экспериментальные данные доступны в ограниченном частотном диапазоне, это обстоятельство резко снижает точность получаемой оценки константы Аше.

В подразделе 2.2 теоретически исследована применимость соотношения (5) для магнитно-неоднородных материалов, а именно, для ферромагнитной плёнки с полосовой доменной структурой и произвольным направлением оси лёгкого намагничивания. С использованием подхода Смита–Белжера получены выражения для частотной зависимости магнитной проницаемости в такой плёнке. Это позволило получить ограничения на СВЧ магнитные свойства в аналитическом виде, что важно как для понимания свойств ферромагнитных материалов, так и для решения ряда практических задач. Показано, что и выход намагниченности из плоскости плёнки, и наличие в плёнке узких доменов ужесточают ограничение (5) на динамическую магнитную проницаемость. Таким образом, это неравенство справедливо не только для однородно намагниченных плёнок, но и для плёнок с полосовой доменной структурой. Можно предположить, что рассматриваемые ограничения на динамическую магнитную проницаемость материалов выполняются и для произвольной доменной структуры.

В подразделе 2.3 исследована применимость интегрального закона (6) при использовании данных, полученных в ограниченном частотном диапазоне, что является ключевым фактором применения закона Аше к реальным материалам. В том числе, рассмотрены случаи сильного скин-эффекта и существенной неоднородности материала.

Стандартным методом применения закона Аше является вычисление интеграла в левой части (6) по измеренным значениям магнитной проницаемости в ограниченном частотном диапазоне, с заменой интегрирования до бесконечности интегрированием до верхней частоты, на которой проведены измерения. В работе показано, что для дисперсионного закона, следующего из уравнения движения магнитного момента в форме Ландау–Лифшица–Гилберта, ограничение (6), строго говоря, неприменимо, так как интеграл расходится. Но в случае высоких динамических значений магнитной проницаемости частотная дисперсия Ландау–Лифшица–Гилберта близка к лоренцеву закону частотной дисперсии,

$$\mu(f) = \mu_{\infty} + \frac{\mu_{ст} - 1}{1 + if/f_{рел} - (f/f_{рез})^2}, \quad (7)$$

где амплитуда и частота резонанса связаны между собой соотношением (5), μ_{∞} – оптическая проницаемость, равная единице в большинстве магнитных материалов, а $f_{рел}$ – релаксационная частота. Для дисперсионного закона (7) интеграл (6) сходится и может быть использован для нахождения константы Аше из эксперимента. Расходимость интеграла (6), связанная с различием между законами дисперсии Ландау–Лифшица–Гилберта и Лоренца, возникает лишь на очень высоких частотах и не сказывается на возможности экспериментального определения K_A . Основной проблемой при таком определении остается медленная сходимость интеграла, связанная с относительно высоким затуханием ферромагнитного резонанса в реальных материалах. Точно так же, к расходимости интеграла (6) и медленному росту интегрального значения с частотой приводит и скин-эффект.

Предложен метод определения K_A из экспериментальных данных о частотной зависимости магнитной проницаемости, основанный на аппроксимации измеренной частотной зависимости лоренцевым законом частотной дисперсии, который, в общем случае, может включать в себя несколько резонансных членов; зна-

чения K_A определяют из параметров аппроксимирующей кривой. Показано, что этот метод позволяет получать более точные данные в более широком диапазоне параметров задачи по сравнению с общепринятым методом численного интегрирования измеренных магнитных потерь.

Подраздел 2.4 посвящён результатам экспериментального исследования СВЧ частотной дисперсии магнитной проницаемости плёнок железа с примесью азота, нанесённых методом магнетронного напыления на лавсановую подложку. Исследованы, в том числе, многослойные плёнки, где слои железа чередуются с немагнитными прослойками SiO_2 , и структурированные плёнки. Применение магнетронного напыления обеспечило высокую скорость нанесения плёнок. Использование гибких лавсановых подложек малой толщины, 10 мкм, позволило получать на основе изготовленных плёнок композитные материалы с высоким содержанием ферромагнитной фазы, как описано в разделе 3. Описаны технология изготовления исследуемых плёнок, данные, полученные при физико-механических исследованиях, и результаты исследования СВЧ магнитной проницаемости.

Проанализировано, как влияют на СВЧ магнитные свойства рассматриваемых материалов скинирование, магнитострикция и другие физические эффекты. Так как плёнки Fe–N, как и чистое железо, обладают высокой константой магнитострикции, то возникающее при сгибании тонкой гибкой плёнки эффективное поле магнитоупругой анизотропии может оказаться сравнимым с полем кристаллической магнитной анизотропии и способно заметно влиять на СВЧ магнитные свойства таких плёнок. Поэтому результаты измерений СВЧ магнитной проницаемости изготовленных из плёнок рулонных образцов существенно зависят от способа изготовления образца. Наиболее сильно различающиеся результаты получены при использовании коаксиального метода измерений для рулонных образцов, свернутых нанесённой плёнкой внутрь и наружу, см. рис. 4, так как при изготовлении таких образцов возникают механические напряжения растяжения или сжатия. Полученные данные позволили получить оценки эффективных магнитных полей, дающих вклад в СВЧ магнитные свойства ферромагнитных плёнок. Из проведённого анализа следует, что для получения более точных оценок необходим учёт неоднородности магнитной структуры исследуемых образцов.

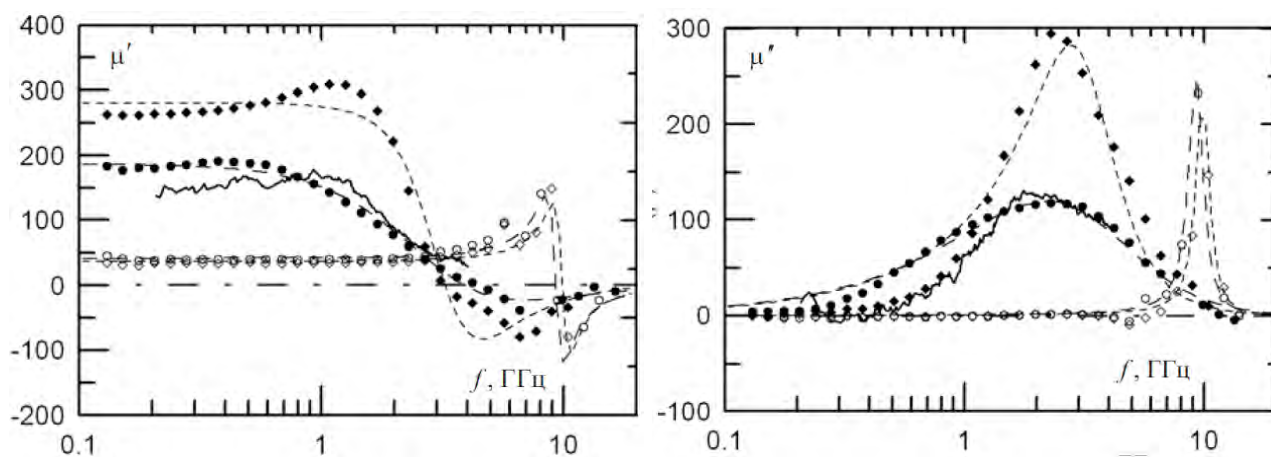


Рисунок 4 – Измеренная частотная зависимость действительной (слева) и мнимой (справа) частей магнитной проницаемости плёнки Fe–N толщиной 0,12 мкм. Символы – результат коаксиальных измерений: кружки – образец свернут железом внутрь, ромбы – железом наружу, пустые символы – измерение во внешнем магнитном поле 480 Э, закрашенные символы – без внешнего поля. Пунктирные линии соответствуют аппроксимациям лоренцевой зависимостью, сплошные кривые – данные полоскового метода

В подразделе 2.5 описано экспериментальное исследование СВЧ магнитных свойств однослойных и многослойных плёнок пермаллоя. Для них также оценен вклад магнитоупругого эффекта в поле магнитной анизотропии, определяющее положение пика СВЧ магнитных потерь. В этом случае влияние магнитоупругого эффекта меньше, чем для железа, но всё равно хорошо заметно. Проанализированы физические механизмы, приводящие к снижению СВЧ магнитной проницаемости плёнок при увеличении их толщины. Показано, что основным из этих механизмов является возникновение перпендикулярной анизотропии, а не скин-эффект. Перпендикулярная анизотропия приводит к выходу магнитных моментов из плоскости плёнки и формированию полосовой доменной структуры. Это ухудшает СВЧ свойства материала, увеличивая коэрцитивную силу и снижая магнитную проницаемость. Экспериментально показано, что создание многослойных структур с чередующимися ферромагнитными и диэлектрическими слоями препятствует возникновению перпендикулярной анизотропии и позволяет создавать композитные структуры с высокими значениями СВЧ магнитной проницаемости.

Раздел 3 описывает результаты экспериментальных и теоретических исследований эффективных СВЧ свойств композитных материалов. В **подразделе 3.1** приведен литературный обзор известных экспериментальных данных по СВЧ свойствам композитных материалов, методам их теоретического описания и сравнению теории с экспериментом. В основном работы в этой области посвящены описанию концентрационных зависимостей диэлектрической проницаемости смеси металл-диэлектрик и используют формулы смешения, простая математическая форма которых облегчает их применение для анализа экспериментальных данных.

Магнитные композиты часто характеризуются частотной дисперсией магнитных свойств в СВЧ диапазоне. Теория, предсказывающая материальные параметры композитного материала, должна удовлетворять следующим требованиям. Она должна давать одновременное описание и диэлектрических, и магнитных свойств, что необходимо для правильного предсказания электродинамического отклика материала в широком диапазоне частот и концентраций. Теория должна содержать эмпирические подгоночные параметры, которые делали бы её применимой для широкого ряда структур композитных материалов, а также должна обеспечивать метод поиска этих параметров. Теория должна согласовываться с известными предельными случаями: теорией Ландау–Лифшица–Лойенги, что необходимо для выполнения закона Аше, и приближением малых возмущений. И, наконец, она не должна основываться на известных значениях собственной магнитной проницаемости включений, которая, как правило, не известна для реальных наполнителей композитных материалов; оптимально, чтобы теория предлагала также и метод поиска собственной проницаемости включений. До настоящего времени продолжает появляться большое количество литературы на эту тему, что свидетельствует об отсутствии удовлетворительного решения задачи.

Также представлен обзор литературы по свойствам композитных материалов на основе тонких ферромагнитных плёнок. Отмечено, что, несмотря на то, что такие материалы предложены достаточно давно, экспериментальных исследований их СВЧ свойств практически нет.

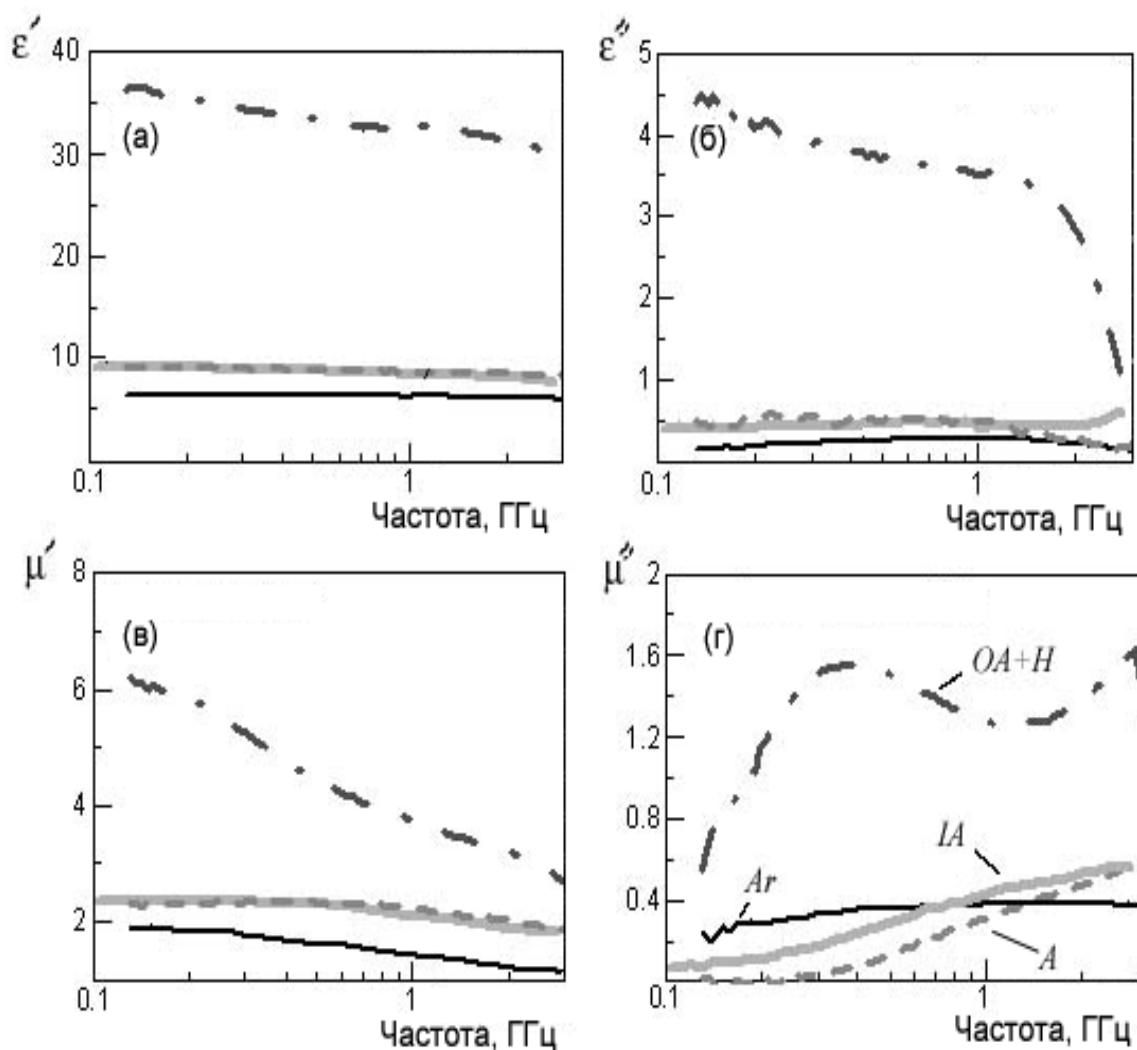


Рисунок 5 – Измеренные частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов с наполнением 20 об. % порошка Fe, измельчённого в различных средах: *Ar* – в аргоне, *OA+H* – в 3 % растворе олеиновой кислоты в гептане, *IA* – в изопропиловом спирте, *A* – в ацетоне

Подраздел 3.2 посвящен экспериментальному исследованию свойств композитных материалов с включениями, полученными механическим размоллом железа с различными добавками в различных размольных средах (аргоне, ацетоне, гептане и др.). В качестве примера полученных данных на рис. 5 показаны измеренные частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов с наполнением 20 об. % порошка Fe, измельчённого в атмосфере аргона (*Ar*), в 3 % растворе олеиновой кислоты в гептане (*OA+H*), изопропиловом спирте (*IA*) и ацетоне (*A*).

Показано, что выбор размольной среды позволяет в широких пределах изменять форму размолотых частиц, получая как камневидные, так и пластинчатые частицы различного размера. Также показано, что значения СВЧ материальных параметров композита в значительной степени определяются формой входящих в них включений. В частности, композиты, содержащие пластинчатые частицы, имеют существенно более высокие значения диэлектрической и магнитной проницаемостей по сравнению со случаем камневидных частиц. Изменение в небольших пределах химического состава проводящих ферромагнитных частиц влияет на частотные зависимости магнитной проницаемости композитных материалов значительно слабее. Сделанные выводы носят качественный характер; для получения количественных выводов о собственной магнитной проницаемости включений и о виде формулы смешения, которой подчиняются свойства композита, необходимо привлечение данных о концентрационной зависимости эффективной магнитной проницаемости.

В подразделе 3.3 влияние формы включений на значения эффективных материальных параметров композита рассмотрено теоретически. Установлены общие принципы проведения сопоставления формул смешения с экспериментом и рассмотрено, в каких случаях форма частотной зависимости эффективной магнитной проницаемости в композите не повторяет частотную зависимость проницаемости включений, изменяясь при изменении концентрации включений.

Проведенный анализ позволил сделать следующие выводы. Для СВЧ магнитной проницаемости композитов с пластинчатыми частицами, как правило, выполняется формула смешения Винера, и влияние взаимодействия между включениями на форму дисперсионной зависимости пренебрежимо мало. Нелинейная зависимость статической проницаемости от концентрации всегда сопровождается низкочастотным сдвигом пика потерь, происходящим при росте концентрации. В композитах с ферромагнитными включениями СВЧ диэлектрическая проницаемость всегда выше магнитной. Полученные закономерности использованы при оптимизации свойств радиопоглощающих покрытий в разделе 5.

Композитные материалы с порошками гексагональных ферритов исследованы в подразделе 3.4 как пример материалов, в которых выполняется формула

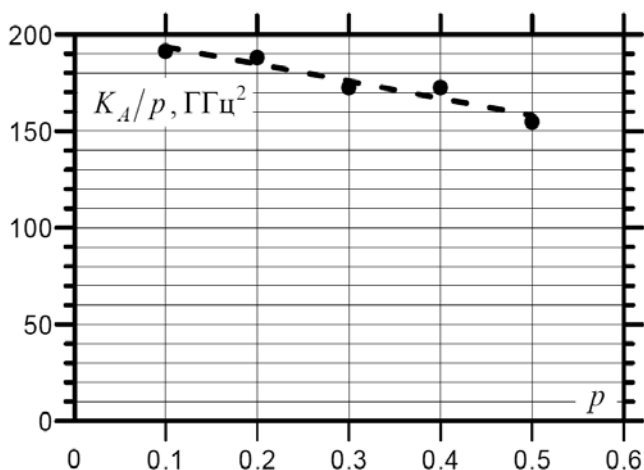


Рисунок 6 – Отношение измеренных значений константы Аше к концентрации включений, K_A/p , в зависимости от величины p (точки). Линией показана линейная аппроксимация данных

смешения Максвелл Гарнета. Измеренные частотные зависимости магнитной проницаемости хорошо описываются лоренцевым законом частотной дисперсии с пиком магнитных потерь, расположенным на частотах порядка 3–4 Гц. Магнитное взаимодействие между включениями в этих композитах невелико, хотя заметно. В то же время наблюдаются отклонения от теории: значения константы Аше, определённые по измеренным данным, не пропорциональны концентрации включений, см. рис. 6. Этот эффект может быть связан с влиянием размагничивающих полей на включениях; он должен быть сильнее выражен для композитов, содержащих наноразмерные (т. е., близкие к однодоменным) включения.

В подразделе 3.5 рассмотрены композитные материалы, содержащие проводящие включения нерегулярной формы («камневидные»), для которых изменение концентрации включений приводит к изменению формы частотной зависимости магнитной проницаемости. Экспериментально исследованы концентрационные зависимости материальных параметров композитов с порошками Fe, полученными механическим размолотом в атмосфере аргона. Показано, что эффективные материальные параметры композитов существенно зависят от наличия разброса форм-факторов включений; этот разброс необходимо учитывать в формулах смешения в случае, если эффективный форм-фактор отличается от $1/3$.

На основе полученных данных предложена формула смешения,

$$p \frac{\chi_{\text{вкл}}}{\chi_{\text{эфф}}} + \frac{1-p}{DpN_{\text{эфф}}} \frac{1}{1/p - 1/p_c - 1/N_{\text{эфф}}/\chi_{\text{эфф}}} = 1, \quad (8)$$

позволяющая найти эффективную восприимчивость композита $\chi_{\text{эфф}}$ из собственной восприимчивости включений $\chi_{\text{вкл}}$ и объёмной концентрации включений

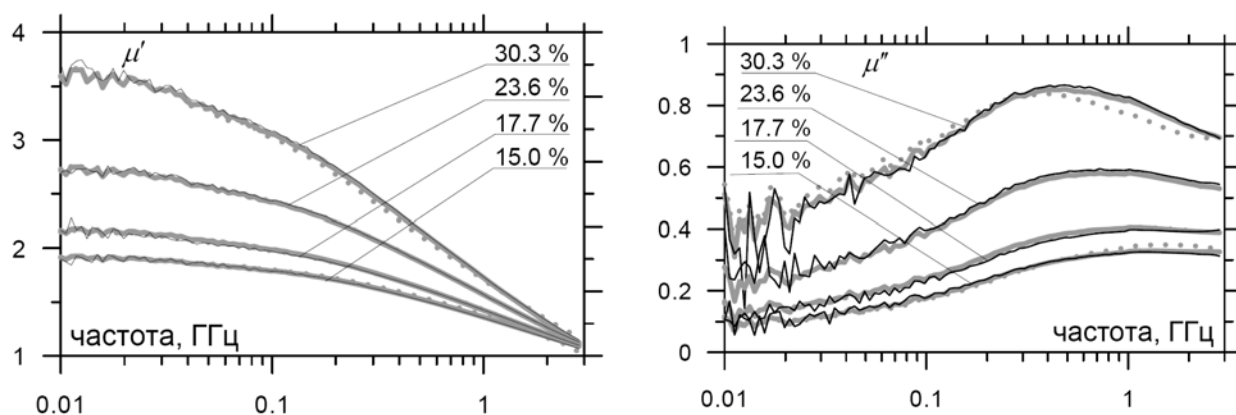


Рисунок 7 – Измеренные частотные зависимости магнитной проницаемости композитного материала с размолотым порошком железа (черные линии, слева – действительная часть, справа – мнимая часть). Серыми линиями показаны значения магнитной проницаемости, найденные без учета распределения включений по форме (пунктир) и по формуле смешения (8), с учетом этого распределения (сплошные линии)

p. Формула использует функцию разброса эффективных форм-факторов включений (т.е., вид спектральной функции Бергмана–Милтона), типичную для теории эффективной среды, и два эмпирических параметра: эффективный форм-фактор включений $N_{эфф}$ и порог протекания p_c ; символом D в (8) обозначена размерность композита. Значения эмпирических параметров можно найти из концентрационных зависимостей эффективной диэлектрической проницаемости, используя уравнение Оделевского, в которую (8) переходит при $\chi_{вкл} \rightarrow \infty$. Требование согласия теории с формулой смешения Ландау–Лифшица–Лойенги при близких значениях проницаемости включений и матрицы обеспечивает единственность решения задачи. При $N_{эфф}=1/3$ и $p_c=1/3$ уравнение (8) переходит в формулу смешения теории эффективной среды, а при $N_{эфф}=1/3$ и $p_c=1$ – в формулу смешения Максвелл Гарнета.

Таким образом, предложенная формула объединяет теории эффективной среды и Максвелл Гарнета в единое уравнение. Для значений $N_{эфф}$ и p_c , отличающихся от указанных выше, получаются другие формулы смешения, что даёт широкие возможности для описания измеренных СВЧ материальных параметров композитов. Эти формулы могут характеризоваться конечной шириной пика спектральной функции даже при малых концентрациях включений, что соответствует распределению частиц включений в композите по форме. Сравнение теории с данными измерений показало хорошее согласие между ними, см. рис. 7.

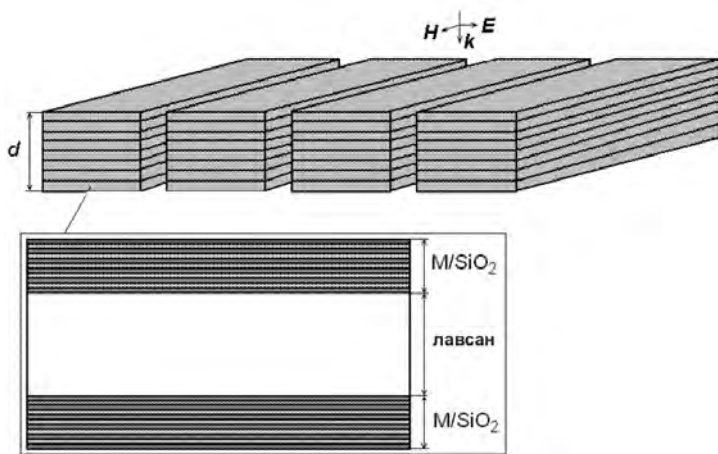


Рисунок 8 – Эскиз структурированного плоскостлоистого магнитного материала

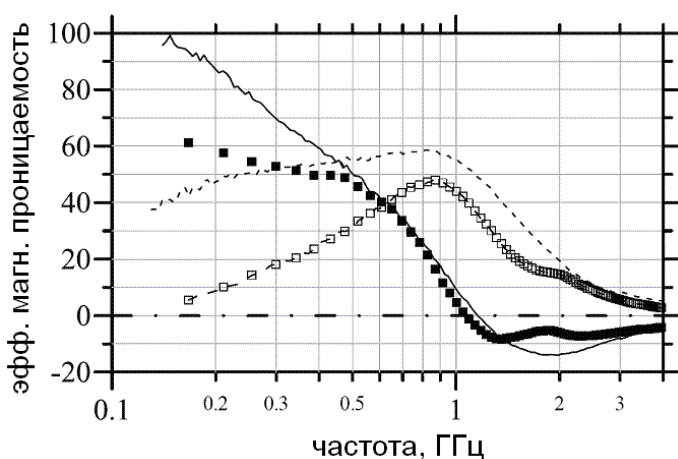


Рисунок 9 – Частотная зависимость эффективной магнитной проницаемости ламината: квадратики – измерение, линии – моделирование на основе измерений в коаксиальной ячейке. Действительная часть – заполненные символы и сплошные линии, мнимая – пустые символы и пунктирные линии

В подразделе 3.6 предложено использование слоистых структур из тонких ферромагнитных плёнок, в том числе структурированных, в качестве композитных материалов с высокими значениями СВЧ магнитной проницаемости. Описан разработанный композитный магнитный материал на основе плёнок железа для применения в качестве сердечника полосковой антенны.

Также исследованы свойства тонких ферромагнитных плёнок на основе пермаллоя. Предложен новый магнитный материал для высокочастотных применений, обладающий уникально высокими значениями магнитной проницаемости. Материал представляет собой ламинат из многослойных плёнок пермаллоя, нанесённых на тонкую лавсановую плёнку методом магнетронного распыления. При содержании пермаллоя 22 об.% квазистатическая магнитная проницаемость достигает значения 60, а амплитуда пика магнитных потерь – 50 на частоте около 1 ГГц. Структура материала показана на рис. 8, а его измеренные частотные зависимости магнитной проницаемости – на рис. 9.

По сравнению с собственной магнитной проницаемостью исходной плёнки, разработанный материал имеет меньший тангенс потерь на частотах ниже максимума магнитных потерь, см. данные на рис. 9. Это может быть связано с механическим выравниванием поверхности плёнок при склеивании под прессом, из-за чего магнитная структура слоев становится более однородной. Материалы с высокими значениями магнитной проницаемости и низкими тангенсами магнитных потерь могут быть полезны для ряда технических приложений.

Полученные результаты показали, что слоистые структуры на основе многослойных ферромагнитных плёнок являются конкурентно-способными материалами для СВЧ применений, требующих высоких значений магнитной проницаемости, по сравнению с широко применяемыми в этом качестве прессованными композитами с пластинчатыми ферромагнитными частицами.

В **разделе 4** описано экспериментальное исследование композитных материалов с волокнистыми включениями. Были исследованы композиты на основе: (1) проводящих волокон, обладающих резонансной дисперсией СВЧ диэлектрической проницаемости; (2) углеродных нанотрубок, рассматриваемых в качестве перспективной альтернативы широко используемым саженаполненным полимерам; (3) остеклованного аморфного ферромагнитного микропровода, который может проявлять высокие значения СВЧ магнитной проницаемости.

В **подразделе 4.1** приведен литературный обзор по динамическим диэлектрическим свойствам композитных материалов с отрезками проводящих волокон. Показано, что в таких материалах наблюдаются высокие значения статической диэлектрической проницаемости при малой концентрации включений, а также сильная частотная дисперсия СВЧ диэлектрической проницаемости. Основной проблемой, обсуждаемой в литературе в отношении композитов с волокнами, является поиск формулы смешения, которая позволила бы правильно предсказывать их порог протекания.

Также проанализированы литературные данные по СВЧ свойствам композитов с магнитными волокнами. Анализ показал, что для получения высоких динамических значений магнитной проницаемости следует в качестве

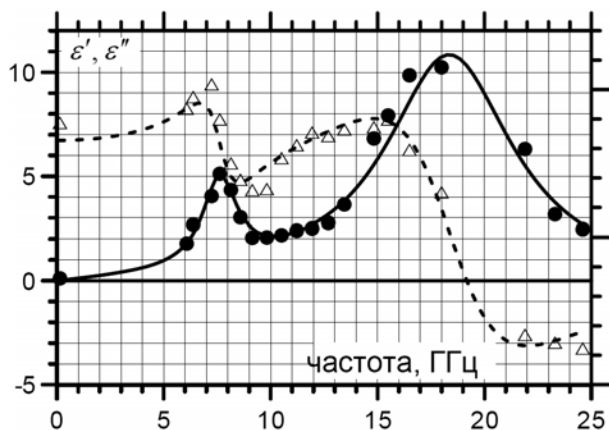


Рисунок 10 – Дисперсионная зависимость диэлектрической проницаемости для композитного материала, содержащего алюминизированные волокна двух различных длин: 5 мм ($p=0,07\%$) и 12 мм ($p=0,03\%$). Точки – экспериментальные данные (треугольники для действительной части и круги для мнимой части), линии – аппроксимирующая лоренцева зависимость

включений использовать аморфные ферромагнитные микропровода в стеклянной оболочке, характеризующиеся циркулярной магнитной анизотропией.

Подраздел 4.2 посвящён результатам экспериментального исследования листовых композитных материалов, наполненных отрезками проводящих (углеродных или алюминизированных) волокон. Показано, что эти композиты могут проявлять различные типы частотной дисперсии диэлектрической проницаемости – от чисто дебаевской до лоренцевой, в зависимости от длины и проводимости волокон. Лоренцева частотная зависимость наблюдается для высокопроводящих волокон, при этом частота лоренцева резонанса определяется полуволновым резонансом рассеяния на волокнах, а добротность – сопротивлением излучения резонансного волокна. В широком диапазоне концентраций включений, почти до порога протекания, свойства исследованных композитов согласуются с пределом малых возмущений. Одна из измеренных частотных зависимостей диэлектрической проницаемости приведена на рис. 10.

Впервые была экспериментально зафиксирована отрицательность действительной части эффективной диэлектрической проницаемости в таких композитах на частотах выше резонанса, так что исследованные материалы можно отнести к метаматериалам. Как и в метаматериалах, диэлектрическая проницаемость листового композита с проводящими волокнами может зависеть от толщины листа. Это было экспериментально показано на примере зависимости частоты резонанса эффективной диэлектрической проницаемости от толщины образца.

Исследование композитных материалов, содержащих длинные проводящие волокна вместе с другими типами наполнителей (порошками или короткими волокнами), позволило проанализировать особенности описания свойств неоднородных материалов в терминах эффективной среды. Экспериментально показано, что положение частоты резонанса полуволнового диполя в неоднородном окружении и, следовательно, его эквивалентная ёмкость, полностью определяются толщиной материала и его диэлектрической анизотропией. Анизотропия эффективной среды также объясняет линейную зависимость порога протекания от степени вытянутости включений. Эффекты, связанные с влиянием масштаба неоднородности или локальной анизотропии эффективной среды, которые использованы в известных теориях для получения линейной зависимости порога протекания от размеров волокна, не обнаружены.

Подраздел 4.3 описывает экспериментальное исследование СВЧ диэлектрической проницаемости композитов, содержащих другой тип волокнистых включений – одностенные и многостенные углеродные нанотрубки. Исследуемые материалы демонстрируют высокие значения действительной части диэлектрической проницаемости, умеренный тангенс диэлектрических потерь и заметную частотную дисперсию проницаемости, что открывает перспективы для использования таких материалов на СВЧ. Измеренные частотные зависимости проницаемости описываются перколяционным законом частотной дисперсии, но наблюдается и ряд отклонений от предсказаний перколяционной теории. Например, критические индексы отличаются от стандартных универсальных значений. Это может быть связано с влиянием неидеальных электрических контактов между включениями, составляющими кластеры; в перколяционной теории и формулах смещения этим влиянием обычно пренебрегают.

Подраздел 4.4 содержит экспериментальные данные по СВЧ свойствам композитных материалов с остеклованным аморфным ферромагнитным микропроводом. Для композитов с микропроводом с практически нулевой магнитострикцией измерения были проведены, в том числе, в присутствии внешнего постоянного магнитного поля, направленного перпендикулярно к оси микропровода. Пик магнитных потерь композитного материала наблюдается на частотах ниже

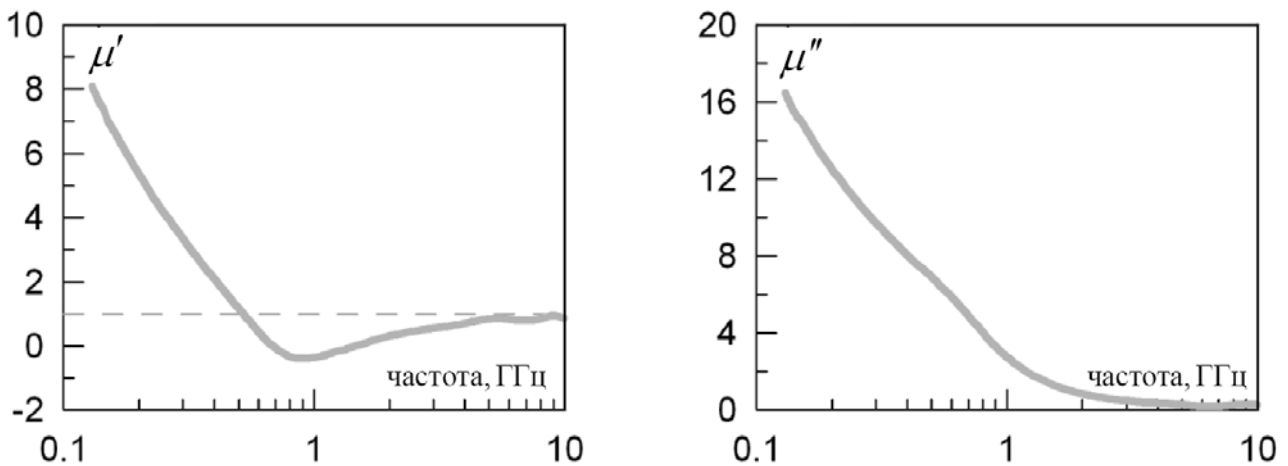


Рисунок 11 – Измеренная частотная зависимость магнитной проницаемости композитного материала с наполнением микропроводами на основе кобальта

1 ГГц, а форма пика определяется движением доменных границ в керне микропровода, а также скин-эффектом. Диэлектрическая проницаемость композита в диапазоне частот от 5 до 10 ГГц зависит от внешнего постоянного магнитного поля, что связано с магнитоимпедансным эффектом в микропроводах. Был также исследован композитный материал с микропроводом на основе кобальта, проявляющий резонанс магнитной проницаемости на частотах около 2 ГГц. Выше резонанса возникают отрицательные значения магнитной проницаемости, что может быть использовано для создания метаматериалов СВЧ диапазона, см. рис. 11.

Таким образом, при ориентации отрезков провода вдоль СВЧ магнитного поля магнитная проницаемость вдоль оси провода может быть высока, но полоса поглощения находится в области частот не выше 2 ГГц. Поэтому композитные материалы с наполнением микропроводами не представляют интереса в качестве материалов с высокой СВЧ магнитной проницаемостью.

Раздел 5 посвящён аналитическому и численному исследованию широкополосности радиопоглощающих покрытий. В **подразделе 5.1** приведён обзор литературы по проблеме создания радиопоглотителей, эффективных при нормальном падении электромагнитной волны. Показано, что задача получения низкого значения коэффициента отражения на заданной частоте в целом решена. Обычно здесь применяют композитные материалы, в которых согласование на рабочей частоте достигается изменением толщины слоя и концентрации наполнителя.

Нерешённой проблемой остается получение наибольшей ширины минимума частотной зависимости коэффициента отражения, что важно для создания тонких широкополосных радиопоглощающих покрытий. Известно, что радиопоглотители могут иметь большую широкополосность, если они включают в себя материалы с высокими значениями СВЧ магнитной проницаемости; состоят из нескольких слоев с различными значениями материальных параметров; используют материалы с частотной дисперсией материальных параметров. Аналитические соотношения, описывающие эти соотношения, известны только для некоторых простейших модельных случаев.

В подразделе 5.2 рассмотрены аналитические свойства комплексного коэффициента отражения R от произвольной многослойной структуры, расположенной на идеально отражающей поверхности. Показано, что

$$\left| \int_0^{\infty} \ln |R(\lambda)| d\lambda \right| \leq 2\pi^2 \mu_{ст} d \quad (9)$$

где λ – длина волны, d – толщина структуры, $\mu_{ст}$ – усреднённое значение её статической магнитной проницаемости, а коэффициент отражения определяется как отношение амплитуд отражённой и падающей волн. Неравенство (9) аналогично правилу сумм для соотношений Крамерса–Кронига, записанных в отношении коэффициента отражения, с той разницей, что интеграл берется по длине волны, а не по частоте. Это позволило использовать для вычисления значения интеграла квазистатическую асимптотику подынтегрального выражения, что, в свою очередь, приводит к простому аналитическому неравенству.

Полученное соотношение позволило получить простую аналитическую оценку для предельного значения отношения ширины рабочего диапазона длин волн $\Delta\lambda$ к толщине радиопоглощающего покрытия:

$$\frac{\Delta\lambda}{d} < \frac{2\pi^2 \mu_{ст}}{|\ln R_0|}, \quad (10)$$

где R_0 – максимальный уровень коэффициента отражения по полю от поглотителя в пределах рабочего диапазона. Из (10) следует, что в широкополосных диэлектрических радиопоглощающих покрытиях с уровнем коэффициента отражения минус 10 дБ ($R_0=0,316$), в том числе многослойных, отношение толщины к макси-

мальной рабочей длине волны не может превышать $1/17,2$. Полученные результаты обобщены также на случай наклонного падения электромагнитной волны.

Ограничение (10) справедливо как для однослойных, так и для многослойных радиопоглощающих покрытий, включающих в себя материалы с любым физически реализуемым законом частотной дисперсии материальных параметров, в том числе, для киральных материалов и искусственных магнетиков. Доказательство неравенства не использует описание материала поглотителя в терминах эффективных материальных параметров в пределах рабочего диапазона, поэтому оно справедливо и для материалов, размер неоднородности которых сравним с длиной волны в пределах рабочего диапазона.

В отличие от численных методов, которые дают для отношения $\Delta\lambda/d$ оценку снизу, неравенство (10) является оценкой этого отношения сверху, т.е., определяет не достижимую ни при каких обстоятельствах область значений этой величины. Дальнейшее исследование имело целью определить, насколько в реальных материалах можно приблизиться к этому предельному значению.

В подразделе 5.3 задача о широкополосности радиопоглощающих покрытий рассмотрена при помощи метода эквивалентных схем. Получена предельная широкополосность, которая может быть достигнута при использовании только четвертьволнового минимума коэффициента отражения. Предложен метод оптимизации, основанный на представлении частотной зависимости коэффициента отражения в виде дробно-рациональной функции и не зависящий от деталей структуры поглотителя. Показано, что рабочий диапазон частот может быть значительно расширен, если поглотитель совмещает в себе несколько полюсов коэффициента отражения, связанных с интерференцией в многослойной структуре и/или с резонансами частотной зависимости материальных параметров. Для случаев одного и двух полюсов получено аналитическое выражение для частотной зависимости коэффициента отражения, позволяющей достичь максимальной широкополосности поглощения при минимальной толщине радиопоглощающего покрытия.

Таким образом, ключевым фактором для получения широкополосных радиопоглощающих покрытий является возможность получения материалов с высокими значениями магнитной проницаемости в СВЧ диапазоне. Корректной харак-

теристикой широкополосности поглотителя является отношение ширины рабочего диапазона длин волн к толщине покрытия, $\Delta\lambda/d$. Следующие подразделы посвящены уточнению полученных соотношений при помощи численной оптимизации свойств радиопоглощающих покрытий. При этом в отличие от большинства аналогичных исследований, либо вообще не учитывающих физической реализуемости частотно-зависимых свойств материалов, либо использующих базы данных по свойствам конкретных материалов, в данной работе применен промежуточный подход: реализуемость используемых частотных зависимостей учтена, но в максимально общем виде.

В подразделе 5.4 описаны результаты численного исследования диэлектрических радиопоглощающих покрытий. На основании предыдущих разделов работы сделан вывод, что достаточно общее описание частотных зависимостей материальных параметров может быть проведено на основе лоренцева дисперсионного закона, который и использован здесь для параметризации частотной дисперсии диэлектрической и магнитной проницаемости. Это позволило найти разумный компромисс между простотой, общностью и точностью описания и учесть физические или эмпирические ограничения на параметры дисперсионных зависимостей для придания результатам физического смысла, необходимого для связи с экспериментом. При аппроксимации были учтены соотношения между параметрами дисперсионных зависимостей диэлектрической и магнитной проницаемостей, рассмотренные выше.

Показано, что для тонких поглотителей при оптимальном выборе параметров отношение $\Delta\lambda/d$ не зависит от ширины и положения рабочего диапазона частот, а определяется только числом слоев и типом дисперсии материальных параметров, подчиняясь простому эмпирическому закону:

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{d}\right)_{\text{макс}} = \frac{32}{\pi} \frac{3}{n+2} \frac{R_0^{1/(n+1)}}{1 - R_0^{2/(n+1)}}, \quad (11)$$

причем параметры этой зависимости определяются количеством n минимумов коэффициента отражения, расположенных в пределах рабочего диапазона. Согласие между результатами расчета и зависимостью (11) проиллюстрировано рис. 12. Предельно низкие уровни коэффициента отражения не могут быть получены на

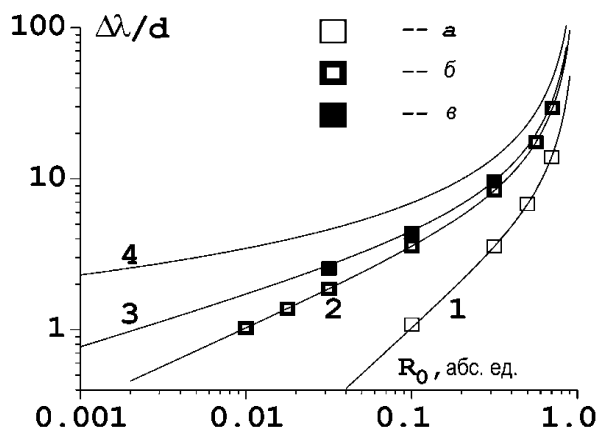


Рисунок 12 – Предельное отношение $\Delta\lambda/d$ в зависимости от R_0 для различных типов диэлектрических радиопоглопителей: (а) – простой экран Далленбаха, (б) и (в) – однослойный диэлектрический радиопоглопититель с резонансной дисперсией диэлектрической проницаемости при $n=1$ и $n=2$, соответственно. Кривые 1–3 соответствуют зависимости (11), кривая 4 – предельному значению (10) при $\mu_{ст}=1$

простых схемах поглотителей; для их достижения должны быть применены более сложные конструкции. В многослойных радиопоглопителях возможны несколько схем с близкими характеристиками, и выбор лучшей из них определяется технологическими соображениями. Полученные результаты могут быть использованы при создании и анализе радиопоглопителей, в частности, при выборе начальных точек для программ оптимизации и при интерпретации полученных результатов.

Подраздел 5.5 описывает результаты численной оптимизации свойств радиопоглопителей с резонансной частотной дисперсией магнитной проницаемости. Показано, что среди магнитных поглотителей, магнитный экран Далленбаха обладает наилучшими диапазонными свойствами. В то же время, магнитный экран Солсбери имеет ряд преимуществ: например, ширина его рабочего диапазона не зависит от значения диэлектрической проницаемости материала слоя.

Общим критерием качества магнитного экрана является величина статической магнитной проницаемости; однако вследствие ограничений на добротность ферромагнитного резонанса практические оценки вовлекают значение мнимой части магнитной проницаемости в пределах рабочего диапазона. Также существенно то, что с точки зрения увеличения широкополосности поглотителя влияние частотной зависимости магнитной и диэлектрической проницаемости эквивалентны. В практических материалах частотная дисперсия магнитной проницаемости слишком слаба, чтобы привести к заметному расширению рабочего диапазона.

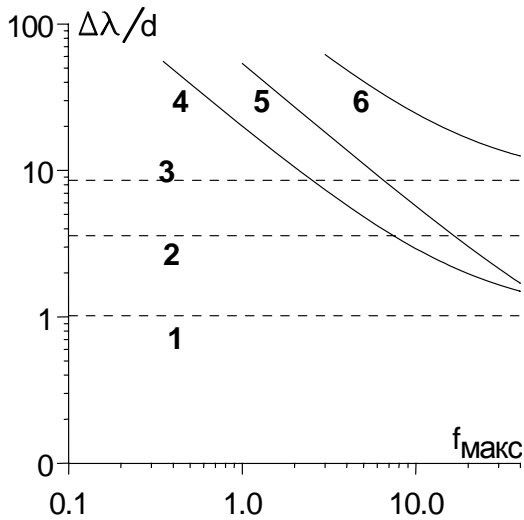


Рисунок 13 – Зависимость отношения ширины рабочего диапазона к толщине поглотителя от положения высокочастотной границы рабочего диапазона $f_{\text{макс}}$ для различных поглощающих схем при $R_0 = -20$ дБ и $M_0 = 800$ Гс: 1 – диэлектрический поглотитель без частотной дисперсии диэлектрической проницаемости; 2 – диэлектрический поглотитель с резонансной дисперсией диэлектрической проницаемости; 3 – предельное значение для диэлектрических поглотителей; 4 – магнитный экран Солсбери; 5 – интерференционный магнитный поглотитель; 6 – предельное значение для магнитных материалов

Для магнитных радиопоглотителей были рассмотрены также ограничения на широкополосность, связанные с законами Снука и Аше, см. рис. 13. Это позволило обосновать известный факт, что с ростом рабочей частоты эффективность магнитных поглотителей резко снижается, и на длинах волн, меньших, чем приблизительно 1 см, их преимущество в широкополосности над диэлектрическими материалами исчезает.

В подразделе 5.6 исследована возможность создания тонких широкополосных покрытий на основе активных сред. Для таких сред соотношения Крамерса–Кронига не выполняются, и поэтому ограничение на широкополосность поглощения, выведенное выше, для них неприменимо. Приведен обзор литературных данных, посвященных анализу свойств сред, для которых могут не выполняться соотношения Крамерса–Кронига, в приложении к возможностям их применения для эффективного радиопоглощения. Такие применения лежат в русле концепции *smart skin* («интеллектуальных покрытий»), которая активно разрабатывается в настоящее время. Большинство опубликованных работ использует концепцию управляемых структур, для функционирования которых необходим датчик внешней электромагнитной волны, сигнал с которого должен управлять перестройкой параметров управляемого слоя. Показано, что применение этого принципа вызывает ряд проблем.

В качестве альтернативы рассмотрена возможность использования для радиопоглощения активных слоев. Подраздел содержит пример численной оптимизации радиопоглощающего покрытия на основе активной среды. Параметры активной среды были заданы через RC -схему, которая соответствует решётке диполей, нагруженных усилительными диодами. Показано, что на основе таких слоев возможно создание радиопоглотителей, имеющих более высокие эффективность и широкополосность по сравнению с обычными материалами той же толщины. Показано, что самогенерация в активном материале может быть подавлена. Физический смысл полученного результата состоит в том, что наличие в многослойной структуре активного слоя снижает суммарные потери энергии в ней и, соответственно, позволяет увеличить потери в пассивных слоях. Это, в соответствии с соотношениями Крамерса–Кронига приводит к усилению частотной дисперсии диэлектрической проницаемости и, следовательно, к расширению рабочего диапазона частот при неизменной толщине материала.

Разработка активных радиопоглощающих покрытий является альтернативой применению материалов с высокими значениями магнитной проницаемости и, в перспективе, позволит преодолеть ограничения, свойственные пассивным поглотителям. По этой причине, несмотря на сравнительно высокую стоимость и техническую сложность изготовления, активные поглотители в будущем смогут составить серьёзную конкуренцию традиционным пассивным поглотителям, позволив выйти на качественно новый уровень решения проблемы радиолокационной заметности.

В заключении сформулированы основные результаты, вынесенные на защиту.

Основные результаты диссертации

- 1 Предложены модификации методов измерения СВЧ материальных параметров материалов, в частности, калибровочная процедура для полосковой измерительной ячейки с применением двух калибровочных образцов, электродинамические свойства которых известны, а также метод учёта влияния поперечного разреза в линии передачи на результат измерения материальных параметров в этой линии. Разработанные подходы позволили значительно улучшить чувствительность измерений.

- 2 Показано, что ограничение Аше, дающее предельные высокочастотные значения магнитной проницаемости магнитных материалов, справедливо для случая ФМ плёнки с полосовой доменной структурой и произвольной ориентацией вектора намагниченности. Полученный результат позволяет предположить, что ограничение справедливо и для материалов с произвольной доменной структурой.
- 3 Предложен метод определения константы Аше из экспериментальных данных с использованием лоренцевой аппроксимации частотной зависимости магнитной проницаемости, позволяющий получать более точные результаты по сравнению с общепринятым методом интегрирования измеренных магнитных потерь.
- 4 Предложен метод оценки влияния магнитоупругого эффекта на СВЧ свойства тонких ферромагнитных плёнок на гибкой подложке по результатам измерения СВЧ магнитной проницаемости рулонных образцов в коаксиальной линии.
- 5 Предложена формула смещения для композитных материалов с проводящими включениями «камневидной» формы, обобщающая формулы смещения Максвелл Гарнета и Брюггемана и позволяющая получать хорошее согласие с измеренными значениями СВЧ диэлектрической и магнитной проницаемостями в широком диапазоне концентраций включений и частот.
- 6 Показано, что использование многослойных плёнок, в которых отдельные ФМ слои наносят через диэлектрические подложки, позволяет снизить влияние механических напряжений, накапливающихся при нанесении толстых плёнок, и значительно увеличить количество ферромагнитного металла, которое может быть нанесено на одну подложку без заметного ухудшения СВЧ магнитных свойств. Это позволило разработать композитный материал на основе многослойных плёнок пермаллоя, нанесённых на тонкую лавсановую плёнку методом магнетронного распыления, с рекордно высокими значениями магнитной проницаемости в частотном диапазоне сотен мегагерц: квазистатическая магнитная проницаемость дости-

гает значения 60, а пик магнитных потерь – 50 на частоте около 1 ГГц при содержании пермаллоя 22 об.%.
7

Экспериментально обнаружена сильная частотная дисперсия СВЧ диэлектрической проницаемости в композитных материалах с отрезками проводящих волокон, возникающая из-за дипольного резонанса рассеяния на волокнах. На частотах выше резонанса действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости может принимать отрицательные значения. Показано, что эффективные диэлектрические свойства листовых композитных материалов с проводящими волокнами могут быть описаны теорией эффективной среды при учете анизотропии композита.

8 Предложена новая форма правила сумм соотношений Крамерса–Кронига для коэффициента отражения, согласно которой значение логарифма модуля коэффициента отражения от плоскостлой структуры на металлической подложке, проинтегрированное по всем длинам волн от нуля до бесконечности, ограничено сверху величиной, пропорциональной толщине слоя и значению его статической магнитной проницаемости.

9 Предложенное правило сумм позволило получить оценку предельного значения отношения ширины рабочего диапазона длин волн к толщине радиопоглощающего покрытия, справедливую для многослойных покрытий с любым физически реализуемым законом частотной дисперсии материальных параметров, а также для неоднородных материалов.

10 Продемонстрировано, что предельное отношение ширины рабочего диапазона длин волн к толщине диэлектрического радиопоглотителя определяется только количеством минимумов коэффициента отражения, расположенных в пределах рабочего диапазона, и предложен простой эмпирический закон, описывающий эту зависимость; в магнитных радиопоглощающих покрытиях существуют дополнительные ограничения на широкополосность, связанные с выполнением законов Снука и Аше.

11 Теоретически показано, что применение активных материалов может привести к созданию радиопоглотителей с отношением ширины рабочего диапазона длин волн к толщине, значительно превосходящим предельное значение, которое может быть реализовано на обычных материалах.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

- 1 Lagarkov A.N., Matytsin S.M., **Rozanov K.N.**, Sarychev A.K. Dielectric properties of fiber-filled composites // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. P. 3806.
- 2 **Rozanov K.N.**, Starostenko S.N. Numerical study of bandwidth of radar absorbers // Eur. Phys. J. – Appl. Phys. 1999. V. 8. P. 147.
- 3 **Rozanov K.N.** Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers // IEEE Trans. Antennas Propagat. 2000. V. 48. P. 1230.
- 4 **Розанов К.Н.**, Симонов Н.А., Осипов А.В. Измерение магнитной проницаемости ферромагнитных плёнок на сверхвысоких частотах // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. С. 229.
- 5 **Розанов К.Н.**, Преображенский Е.А. Применение нелинейных и активных материалов для создания широкополосных радиопоглотителей // Успехи современной радиоэлектроники. 2003. № 3. С. 26.
- 6 Matytsin S.M., Hock K.M., Liu L., Gan Y.B., Lagarkov A.N., **Rozanov K.N.** Shift of resonance frequency of long conducting fibers embedded in a composite // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. P. 1146.
- 7 **Розанов К.Н.**, Старостенко С.Н. Влияние дисперсии магнитной проницаемости на широкополосность магнитных радиопоглотителей, Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. С. 715.
- 8 Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Maklakov S.A., Osipov A.V., **Rozanov K.N.**, Ryjikov I.A., Simonov N.A., Starostenko S.N. Experimental study of microwave permeability of thin Fe films // J. Magn. Magn. Mater. 2003. V. 258–259. P. 195.
- 9 Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Maklakov S.A., Osipov A.V., **Rozanov K.N.**, Ryjikov I.A., Starostenko S.N. Microwave permeability of laminates with thin Fe-based films // J. Magn. Magn. Mater. 2004. V. 272. P. 2208.
- 10 **Rozanov K.N.**, Li Z. W., Chen L.F., Koledintseva M.Y. Microwave permeability of Co₂Z composites // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. Art. no. 013905.
- 11 **Розанов К.Н.**, Преображенский Е.А. Синтез широкополосных радиопоглощающих покрытий на основе сложных сред, составленных из активных электрических диполей // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. С. 858.

- 12 Liu L., Matitsine S.M., Gan Y.B., **Rozanov K.N.** The thickness dependence of resonance frequency in anisotropic composites with long conductive fibers // *Electromagnetics*. 2005. V. 25. P. 69.
- 13 Buznikov N.A., **Rozanov K.N.** The effect of stripe domain structure on dynamic permeability of thin ferromagnetic films with out-of-plane uniaxial anisotropy // *J. Magn. Magn. Mater.* 2005. V. 285. P. 314.
- 14 Ikonen P.M.T., **Rozanov K.N.**, Osipov A.V., Alitalo P., Tretyakov S.A. Magnetodielectric substrates in antenna miniaturization: potential and limitations // *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 2006. V. 54. P. 3391.
- 15 Starostenko S.N., **Rozanov K.N.**, Osipov A.V. Microwave properties of composites with glass coated amorphous magnetic microwires // *J. Magn. Magn. Mater.* 2006. V. 298. P. 56.
- 16 Liu L., Matitsine S.M., Gan Y.B., Chen L.F., Kong L.B., *Rozanov K.N.* Frequency dependence of effective permittivity of carbon nanotube composites // *J. Appl. Phys.* 2007. V. 101. Art. no. 094106.
- 17 Елсуков Е.П., **Розанов К.Н.**, Ломаева С.Ф., Осипов А.В., Петров Д.А., Сурнин Д.В., Чулкина А.А., Шуравин А.С. Структура, магнитостатические свойства и СВЧ характеристики нанокристаллических механоактивированных порошков Fe и Fe-Si // *Физика металлов и металловедение*. 2007. Т. 104. С. 261.
- 18 Елсуков Е.П., **Розанов К.Н.**, Ломаева С.Ф. и др. СВЧ свойства порошков Fe, измельчённых в различных средах // *Физика металлов и металловедение*. 2008. Т. 106. С. 482.
- 19 Starostenko S.N., **Rozanov K.N.**, Osipov A.V. A broadband method to measure magnetic spectra of thin films // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 103. Art. no. 07E914.
- 20 Лагарьков А.Н., Маклаков С.А., Осипов А.В., Петров Д.А., **Розанов К.Н.**, Рыжиков И.А., Седова М.В., Старостенко С.Н., Якубов И.Т. // *Свойства слоистых структур на основе тонких ферромагнитных плёнок. Радиотехника и электроника*. 2009. Т. 54. С. 625.
- 21 Lagarkov A.N., **Rozanov K.N.** High-frequency behavior of magnetic composites // *J. Magn. Magn. Mater.* 2009. V. 321. P. 2082.

- 22 **Rozanov K.N.**, Osipov A.V., Petrov D.A., Starostenko S.N., Yelsukov E.P. The effect of shape distribution of inclusions on the frequency dependence of permeability in composites // *J. Magn. Magn. Mater.* 2009. V. 321. P. 738.
- 23 Karilainen A.O., Ikonen P.M.T., Simovski C.R., Tretyakov S.A., Lagarkov A.N., Maklakov S.A., **Rozanov K.N.**, Starostenko S.N. Experimental studies on antenna miniaturisation using magneto-dielectric and dielectric materials // *IET Microwaves, Antennas Propagat.* 2011. V. 5. P. 495.
- 24 **Rozanov K.N.**, Koledintseva M.Y., Drewniak J.L. A mixing rule for predicting of frequency dependence of material parameters in magnetic composites // *J. Magn. Magn. Mater.* 2012. V. 324. P. 1063.
- 25 Лагарьков А.Н., Кашуркин О.Ю., Маклаков С.А., Осипов А.В., **Розанов К.Н.**, Рыжиков И.А., Старостенко С.Н., Якубов И.Т. Влияние магнитоупругого эффекта на СВЧ магнитные свойства тонких плёнок Fe-N, Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. С. 441.
- 26 Han M., Liang D., **Rozanov K.N.**, Deng L. Microwave permeability and Mössbauer spectra of flaky Fe-Si-Al particles // *IEEE Trans. Magn.* 2013. V. 49. P. 982.
- 27 Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Osipov A.V., Maklakov S.A., **Rozanov K.N.**, Ryzhikov I.A., Starostenko S.N. A laminate of ferromagnetic films with high effective permeability at high frequencies // *AIP Advances.* 2014. V. 4. Art. no. 107143.
- 28 **Rozanov K.N.** and Koledintseva M.Y. Application of generalized Snoek's law over a finite frequency range: A case study // *J. Appl. Phys.* 2016. V. 119. N. 7. Art. no. 073901.
- 29 Zezyulina P.A., Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Maklakov S.A., Maklakov S.S., Naboko A.S., Osipov A.V., Petrov D.A., **Rozanov K.N.**, Ryzhikov I.A., An effect of the perpendicular anisotropy and eddy currents on the microwave performance of single-layer and multi-layer permalloy films // *IEEE Magn. Lett.* 2016. V. 7. Art. no. 3505804.

Все указанные выше основные публикации по теме работы, кроме п.5, напечатаны в журналах, входящих в базу данных Web of Science. Публикация п.5 входит в базу данных РИНЦ.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Sohn J., Han S.H., Yamaguchi M., and Lim S.H. Tunable electromagnetic noise suppressor integrated with a magnetic thin film // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. Art. no. 103501.
- [2] Stergiou C., Eleftheriou E., Zaspalis V. Enhancement of the Near-Field UHF RFID With Ferrite Substrates // *IEEE Trans. Magn.* 2012. V. 48 P. 1497.
- [3] Wallace J.L. Broadband magnetic microwave absorbers: fundamental limitations // *IEEE Trans. Magn.*, 1993. V. 29. P. 4209.
- [4] Nakamura T., Tsutaoka T., Hatakeyama K. Frequency dispersion of permeability in ferrite composite materials // *J. Magn. Magn. Mater.* 1994. V. 138. P. 319.
- [5] Milton G.W., Eyre D.J., and Mantese J.V. Finite Frequency Range Kramers-Kronig Relations: Bounds on the Dispersion // *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 79. P. 3062.
- [6] Snoek J.L. Dispersion and absorption in magnetic ferrites at frequencies above 1 Mc/s // *Physica.* 1948. V. 14. P. 207.
- [7] Acher O. and Adenot A. L. Bounds on the dynamic properties of magnetic materials // *Phys. Rev. B.* 2000. V. 62. P. 11324.
- [8] Chai G.Z., Xue D.S., Fan X.L., et al. Extending the Snoek's Limit of Single Layer Film in $(\text{Co}_{96}\text{Zr}_4/\text{Cu})_n$ Multilayers // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 93. Art. no. 152516.
- [9] Idris F.M., Hashim M., Abbas Z., et al. Recent developments of smart electromagnetic absorbers based polymer-composites at gigahertz frequencies // *J. Magn. Magn. Mater.* 2016. V. 405. P. 197.
- [10] Bregar V.B. Advantages of ferromagnetic nanoparticle composites in microwave absorbers // *IEEE Trans. Magn.* 2004. V. 40. P. 1679.
- [11] Huijbregtse J., Roozeboom F., Sietsma J., et al. High-frequency permeability of soft-magnetic Fe–Hf–O films with high resistivity // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 83. P. 1569.
- [12] Lagarkov A.N., Rozanov K.N. High-frequency behavior of magnetic composites // *J. Magn. Magn. Mater.* 2009. V. 321. P. 2082.
- [13] Liu Z.W., Liu Y., Yan L., et al. Thickness-dependent properties of FeTaN thin films deposited on flexible substrate // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 99. Art. no. 043903.
- [14] Sihvola A. *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications* – L.: IEE Publishing, 1999. – 284 p.