

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Салогуб Дмитрий Владимирович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА ФЕРРИТ-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ИЗ МАГНИТОМЯГКИХ ФЕРРИТОВ СО СТРУКТУРОЙ ГРАНАТА И ШПИНЕЛИ

Специальность 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники

Автореферат
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доц., к.т.н. Исаев Игорь Магомедович

МОСКВА 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Интенсивное развитие и модернизация беспроводных технологий связи, радиолокации и т.п. создает колоссальные электромагнитные помехи (ЭМП; «микроволновое загрязнение»). Последнее пагубно влияет на здоровье людей и животных, инициирует сбои средств связи, а иногда и их выход из строя, облегчает электронное мошенничество. Борьба с ЭМП требует разработки новых радиопоглощающих материалов (РПМ) для защиты от электромагнитного излучения в широком диапазоне частот.

Вторая мировая война стала эпохой зарождения РПМ. Развитие СВЧ-технологий сразу же потребовало и защиты от микроволнового излучения. Инженеры тех лет подарили нам теорию микроволнового излучения и военные технологии, многие из которых активно используются и по нынешний день.

РПМ должны обладать низкой электропроводностью и высокими значениями магнитной и диэлектрической проницаемостей. Поэтому повышение магнитной и диэлектрической проницаемостей материалов в широком диапазоне частот позволяют уменьшить толщину радиопоглощающих покрытий (РПП) на их основе. Среди этих материалов весьма перспективными являются феррит-полимерные композиты (ФПК). В последние десятилетия активно ведется разработка и исследование ФПК как в России, так и за рубежом. Исследования Деринга В., Покусина Д.Н. показали, что наряду с интерференционными процессами на радиопоглощающие свойства материалов оказывают влияние диссипативные процессы, - магнитные и диэлектрические потери. Диссипативный механизм поглощения электромагнитного излучения, обеспечивающий превращение электромагнитной энергии в тепловую, заметно повышается при наличии резонанса доменных границ в частицах феррита, входящих в состав композита, а также при близких значениях магнитной и диэлектрической проницаемостей материала. Частотные зависимости магнитной и диэлектрической проницаемостей определяются электропроводностью, электромагнитными свойствами и структурой материала.

Магнитная проницаемость композита определяется магнитными свойствами наполнителя из частиц ферритовой фазы, его количеством, гранулометрическим составом и особенностями распределения. Для эффективных РПМ перспективными магнитными наполнителями из ферритов являются Ni-Zn-, Mg-Mn-Zn-ферриты со структурой шпинели и железо-иттриевые гранаты ($Y_3Fe_5O_{12}$; ЖИГ; YIG), обладающие оптимальным сочетанием магнитных свойств и электросопротивления.

Выбор конкретного материала определяется диапазоном частот поглощения электромагнитного излучения. В области частот менее 1 ГГц предпочтительнее использовать в качестве наполнителей композитов ферриты-шпинели, обладающие высокими значениями магнитной проницаемости. При более высоких частотах предпочтительнее ферриты-гранаты, обладающие меньшими значениями магнитной проницаемости, но высоким электросопротивлением в сочетании с полимерной матрицей с более высоким электросопротивлением. Свойства ферритов во многом определяются технологией их получения. Большой интерес представляет технология получения ферритов методом радиационно - термического спекания (РТС), позволяющая получать ферриты с высокими значениями эксплуатационных параметров по сравнению с керамической технологией (КТ).

Полимерная матрица в значительной степени определяет радиопоглощающие свойства композита. Выбор материала полимера определяется рабочим частотным интервалом композиционного материала. Наличие в матрице полярных полимеров типа политетрафторэтилена (ПТФЭ), поливинилиденфторида (ПВДФ) или поливинилхлорида (ПВХ) повышают диэлектрическую проницаемость композиционных материалов. С другой стороны, удельное электросопротивление полярных полимеров ниже электросопротивления неполярных полимеров. Матрица из неполярных полимеров с высоким удельным электросопротивлением позволяет увеличить рабочие частоты применения радиопоглощающего композита. Изменение соотношения полярных и неполярных звеньев в полимере позволяет регулировать его электрофизические свойства и тем самым, радиопоглощающие свойства феррит-полимерных композитов. Поэтому в качестве матрицы композитов представляют интерес сополимеры на основе полярного поливинилиденфторида П(ВДФ-ТФЭ) и аморфного неполярного полистирола (ПС).

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в изучение радиопоглощающих свойств магнитных полимерных композитов с наполнителями на основе ферромагнетиков внесла научная школа ИТПЭ РАН под руководством академика Лагарькова А.Н. и д.ф.-м.н. Розанова К.Н. Системные исследования радиопоглощающих свойств феррит-полимерных композитов на основе ферритовых наполнителей и технологии их получения выполнены в работах кафедры Технологии Материалов Электроники НИТУ «МИСИС» под руководством проф. Костишина В.Г. и доц. Исаева И.М. Имеются также многочисленные публикации зарубежных исследователей (Liu P., Sun G., Bera R., Wang M., Teber A. и др.), посвященные исследованию радиопоглощающих свойств феррит-полимерных композитов. Однако нами не обнаружено публикаций с представлением результатов исследований в диапазоне частот электромагнитных волн (ЭМВ) 0,05-7,0 ГГц феррит-полимерных композитов, содержащих наполнители на основе железо-иттриевых гранатов ($Y_3Fe_5O_{12}$). Оптимальный выбор радиопоглощающих композитов с заданными свойствами затруднен также по причине небольшого количества работ по изучению феррит-полимерных композитов с наполнителями на основе Ni-Zn-ферритов в диапазоне частот ЭМВ 0,05-7,0 ГГц.

Исходя из этого, в работе поставлена следующая **цель**:

– разработка технологических режимов получения радиопоглощающих феррит-полимерных композитов с использованием в качестве матрицы полярных и неполярных полимеров, а в качестве наполнителей Ni-Zn-ферритов-шпинелей и ферритов-гранатов ($Y_3Fe_5O_{12}$) и комплексное исследование электромагнитных и радиопоглощающих свойств полученных композитов. Для выполнения поставленной цели, решались **следующие задачи**:

- анализ литературных источников, посвященных получению и изучению радиопоглощающих свойств ферритов и феррит-полимерных композитов в широком частотном диапазоне;
- анализ литературных источников, посвященных сравнению различных способов получения ферритов;
- исследование влияния базового состава, легирующих добавок и технологии получения на радиопоглощающие свойства ферритов;

- исследование влияния параметров ферритовых наполнителей, природы полимерной матрицы на частотную зависимость магнитной и диэлектрической проницаемостей и электропроводность феррит-полимерных композитов;
- исследование влияния концентрации наполнителя из частиц ферритовой фазы на радиопоглощающие свойства феррит-полимерных композитов.

Научная новизна

1. Впервые изучены магнитные, электромагнитные и радиопоглощающие свойства поликристаллических ферритов $Y_3Fe_5O_{12}$, полученных методом РТС. Впервые установлено влияние технологических режимов РТС на характеристики пика отражения $K_{отр}$ $Y_3Fe_5O_{12}$ и показано, что полученный методом РТС ЖИГ может использоваться в качестве РПМ в диапазоне частот 0,7 ГГц-1,2 ГГц.

2. Впервые установлено, что в синтезированных методом керамической технологии поликристаллических ферритах-гранатах $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ с разной долей Ga ($x=0$; $x=0,38$; $x=0,63$ и $x=1,03$ форм. ед.) частотное положение пика отражения электромагнитного излучения $f_{max}K_{отр}$ снижается с 1,0 до 0,11 ГГц, а его интенсивность изменяется от $|K_{отр}|=9,0$ дБ до $|K_{отр}|=0,52$ дБ.

3. Впервые установлено, что для NiZn-ферритов 1000НН и 2000НН, полученных при температурах спекания от 1200 °С до 1400 °С, зависимости частотного положения максимума пика отражения на металлической пластине $f_{max}K_{отр}$ от частотной ширины пика отражения $\Delta f K_{отр}$ на уровне интенсивности поглощения «-10 дБ» являются линейными.

4. Впервые изучены в диапазоне частот 0,05-7,0 ГГц электромагнитные и радиопоглощающие свойства феррит-полимерных композитов ПВС-YIG, Ф2М-YIG, Ф42-YIG, ПВС-2000НН, Ф2М-2000НН и Ф42-2000НН при значениях концентрации ферритового наполнителя $C_m = 20\%$ масс.; 40% масс.; 60% масс. и 80% масс.

5. Впервые на базе полимеров Ф2М и Ф42 и NiZn-феррита 2000НН разработаны эффективные радиопоглощающие композиты, обладающие широкой полосой поглощения и потерями на отражение – 20 ÷ - 27 дБ.

Практическая значимость работы

1. Разработаны технологические режимы получения методом РТС качественных поликристаллических ферритов-гранатов $Y_3Fe_5O_{12}$. В очередной раз доказана высокая энергоэффективность метода РТС при спекании ферритовой керамики.

2. Определены оптимальные технологические режимы получения ферритов-гранатов $Y_3Fe_5O_{12}$, NiZn-ферритов-шпинелей 1000НН и 2000НН и феррита-шпинели $Li_{0.37}Fe_{2.29}Zn_{0.21}Mn_{0.17}O_4$ с максимальным уровнем поглощения электромагнитных волн в определенных частотных диапазонах.

3. Разработан радиопоглощающий феррит химического состава $Li_{0.37}Fe_{2.29}Zn_{0.21}Mn_{0.17}O_4$ (патент РФ №2759859), позволяющий достигать максимальных потерь электромагнитного излучения до – 23 дБ (патент РФ №2759859).

4. Разработаны составы эффективных радиопоглощающих композитов на основе матриц из полимеров Ф2М и Ф42 и наполнителя из NiZn-феррита 2000НН. Разработки защищены НОУ-ХАУ.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Увеличение температуры РТС поликристаллических ферритов $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ от 1300 °С до 1450 °С приводит к росту интенсивности их коэффициента отражения $|K_{\text{отр}}|$ на металлической пластине и смещению частотного положения $f_{\text{max}}|K_{\text{отр}}|$ в область меньших частот по линейному закону $f_{\text{max}}|K_{\text{отр}}| = -0,071T_{\text{сп РТС}} + 11,112$.

2. С ростом концентрации ионов Ga^{3+} от 0,38 ф. е. до 1,03 ф. е. в поликристаллических ферритах $\text{Y}_3\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ их коэффициент отражения $K_{\text{отр}}$ на металлической пластине увеличивается от -9,0 дБ до -0,63 дБ, зависимость $K_{\text{отр}} = f(C_{\text{Ga}^{3+}})$ – близка к линейной и выражается зависимостью $y = 7,6648x - 8,1218$. При этом пик поглощения сдвигается в область меньших частот, а зависимость $f_{\text{max}}|K_{\text{отр}}|$ от $C_{\text{Ga}^{3+}}$ является квадратичной и имеет вид $y = -1,0591x^2 - 0,0118x + 1,2755$.

3. Изменение температуры спекания поликристаллических NiZn-ферритов 1000НН и 20000НН от 1200 °С до 1400 °С позволяет варьировать величину их коэффициента отражения $K_{\text{отр}}$ на металлической пластине, частотное положение $f_{\text{max}}|K_{\text{отр}}|$ и частотную ширину пика отражения $\Delta f K_{\text{отр}}$.

При этом зависимость $f_{\text{max}}|K_{\text{отр}}|$ от $\Delta f K_{\text{отр}}$ на уровне интенсивности поглощения «-10 дБ» имеет линейную зависимость и выражается, как:

$y = 0,5041x - 0,4265$ для ферритов 1000НН и $y = 0,344x - 0,2924$ для ферритов 2000НН.

4. Увеличение температуры спекания поликристаллических ферритов $\text{Li}_{0.37}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ от 950 °С до 1100 °С позволяет изменять их коэффициент отражения на металлической пластине от -13 дБ до -23 дБ, при этом частотное положение основного пика поглощения не зависит от температуры и является постоянным, а зависимость от температуры спекания минимального коэффициента отражения – близка к линейной и выражается уравнением $K_{\text{отр min}} (\text{дБ/мм}) = 41,5 - 0,058 \cdot T_{\text{сп}}$.

5. Наличие двух пиков на спектрах отражения композитов с наполнителем из порошка $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и полимерной матрицы (ПВС, Ф2М или Ф42) обусловлено явлением интерференции, а минимум ($f_{\text{min}} = 4,226$ ГГц) между 1-м и 2-м пиками $K_{\text{отр}}$ соответствует нулевому узлу интерференционной картины.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность представленных данных обеспечивается использованием современного аттестованного и сертифицированного оборудования и методик. Достоверность полученных результатов исследований подтверждается их успешной публикацией в ряде известных рецензируемых российских и зарубежных научных изданий.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: **1).** XXIX Международная конференция «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)», Москва, МЭИ, 26-27 ноября 2021; **2).** IX International Scientific Conference «Actual problems of solid state Physics», Минск, 22-26 ноября 2021; **3).** The 4th International Baltic Conference on Magnetism 2021, Svetlogorsk, Russia August 29 - September 2, 2021; **4).** Пятый Российско-Белорусский семинар-конференция «Новые наноматериалы и их электромагнитные свойства». Томск, 4-6 апреля 2021 г.; **5).** XXV Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах»,

Москва, РТУ МИРЭА, 1- 6 июля 2024. **6).** Photonic and Electromagnetic Research Symposium PIERS 2025 in Chiba. 5-9 November 2025, Chiba, Yapan.

Результаты диссертационной работы использованы в процессе выполнения научно-исследовательского проекта РНФ № 19-19-00694 (2019-2021 гг.) «Разработка ферритовых композиционных материалов, как эффективных сред радиопоглощения и интенсивных магнитоэлектрических эффектов».

Разработке "Радиопоглощающий феррит" (патент РФ № 2759859, авторы Исаев И.М., Костишин В.Г., Коровушкин В.В., Шакирзянов Р.И., Тимофеев А.В., Миронович А.Ю., Салогуб Д.В.), выполненной в рамках настоящей диссертационной работы и гранта РНФ № 19-19-00694, присуждена серебряная медаль и Диплом XXV Московского международного салона изобретений и инновационных технологий «Архимед-2022».

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 10 статей, в том числе 7 статей в журналах, индексируемых в Scopus, WoS (одна из них – в журнале Q1), 1 публикация в журнале, рекомендованном ВАК РФ по специальности и 2 статьи в Материалах научных конференций. Также получен Патент РФ № 2759859 на радиопоглощающий феррит, 1 НОУ-ХАУ на способ получения радиопоглощающего ЖИГ и 2 НОУ-ХАУ на радиопоглощающие композиты.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 176 источников и приложения. Работа изложена на 238 страницах печатного текста, содержит 20 таблиц, 168 рисунка, 61 формулу.

В приложении представлен акт об использовании результатов диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описана актуальность проблемы, сформулированы основные задачи, обоснована научная новизна работы, практическая значимость, основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы. В первой части обзора рассмотрены кристаллографические особенности магнитомягких ферритов со структурой граната и шпинели, их магнитные и электрические свойства. Во второй части литобзора рассмотрены и проанализированы существующие в литературе данные о комплексной диэлектрической и комплексной магнитной проницаемостях ферритов-гранатов и ферритов-шпинелей разных составов и коэффициенты их отражения на металлической пластине. Проанализированы особенности поглощения и механизмы поглощения электромагнитных волн ферритами-гранатами и ферритами-шпинелями разных составов. Рассмотрены и проанализированы имеющиеся в литературе данные о электромагнитных и радиопоглощающих свойствах композитов с наполнителями из ферритов-шпинелей и ферритов-гранатов.

Сделан вывод, что в мировой научной литературе отсутствуют системные исследования по электромагнитным и РП-свойствам Ni-Zn-ферритов в диапазоне частот 0,05 ГГц – 7,0 ГГц. В частности, не найдено публикаций о влиянии температуры спекания на электромагнитные и РП-свойства Ni-Zn-ферритов в указанном диапазоне частот электромагнитных волн. Также, в научной печати отсутствуют системные работы по электромагнитным и радиопоглощающим

свойствам полимерных композитов с матрицей в виде поливинилового спирта (ПВС), полимеров Ф2М и Ф42 и наполнителями в виде ЖИГ, в виде Ni-Zn-ферритов-шпинелей. Исходя из выводов литературного обзора, формулируются цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлена информация об объектах исследования (поликристаллических ферритах и композитах на их основе), технологиях их получения, а также описание используемого технологического и исследовательского оборудования. Приведена информация об используемых оксидах для получения поликристаллических ферритов $Y_3Fe_5O_{12}$, NiZn-Zn-ферритов 1000НН и 2000НН. Детально описана технология РТС, используемая для получения поликристаллических ферритов YIG. Представлена схема изготовленного для получения методом термопрессования композитов стенда, приведены технологические характеристики получения феррит-полимерных композитов при использовании в качестве матриц поливинилового спирта, полимера Ф2М и полимера Ф42.

Для проведения исследования магнитных, электромагнитных и радиопоглощающих характеристик, образцы объектов исследования изготавливались в виде колец с размерами: внешний диаметр $D_{\text{внешн}} = 16^{-0,05}$ мм, внутренний диаметр $d_{\text{внутр}} = 7^{-0,05}$ мм и высота $h = 5-7$ мм. Измерения магнитных характеристик проводились на магнитоизмерительной установке МК-3Э, а также на вибрационном магнитометре ВМ-07. Для проведения измерений на вибромагнетометре, образцы готовились в виде сфер диаметром $\varnothing = 1-3$ мм.

Для измерения комплексной диэлектрической проницаемости, комплексной магнитной проницаемости и коэффициента отражения на металлической пластине использовался ВАЦ Rohde&Schwarz ZVL-13 и пакет программного обеспечения CELL-2 с использованием волноводного тракта на базе ВАЦ. Измерительная установка на базе векторного анализатора цепей Rohde&Schwarz ZVL и схема установки представлены на рис. 2.14. Измерения проводились в диапазоне частот 0,05 ГГц – 7,0 ГГц.

В третьей главе представлены результаты изучения магнитных, электромагнитных и радиопоглощающих свойств поликристаллических ферритов-гранатов и ферритов-шпинелей разных составов, а также результаты исследования электромагнитных и радиопоглощающих свойств полимеров ПВС, Ф2М и Ф42.

В частности, были исследованы полученные методом РТС поликристаллические ферриты $Y_3Fe_5O_{12}$. На рис. 1 представлены кривые намагничивания и петли гистерезиса поликристаллических образцов $Y_3Fe_5O_{12}$, полученных при разных технологических режимах РТС. Как показали исследования, с ростом температуры РТС от 1300°C до 1450°C кривая намагничивания образцов из медленно растущей становится интенсивно восходящей, сама петля гистерезиса сужается, значение индукции насыщения существенно растет. При этом максимальная магнитная проницаемость увеличивается от 50 до 750, а положение максимума магнитной проницаемости смещается с 477 А/м до 85 А/м. С увеличением при РТС $T_{\text{сп}}$ от 1300°C до 1450°C максимальная индукция B_m поликристаллических образцов ЖИГ почти линейно растет от 0,05 Тл до 0,165-0,170 Тл, остаточная индукция B_r растет от 0,03 Тл до 0,09 – 1,0 Тл, а коэрцитивная сила H_c уменьшается от 285 А/м до 55 А/м (см. рис. 3.4).

Как и при термическом спекании, РТС поликристаллических ЖИГ образцов приводит к их усадке: внешний диаметр образцов $D_{\text{внеш}}$ уменьшается с 18,2 мм до 15,7 мм, внутренний диаметр $d_{\text{внут}}$ уменьшается с 8,7 мм до 7,1 мм, а высота образца h уменьшается с 6,7 мм до 5,2 мм.

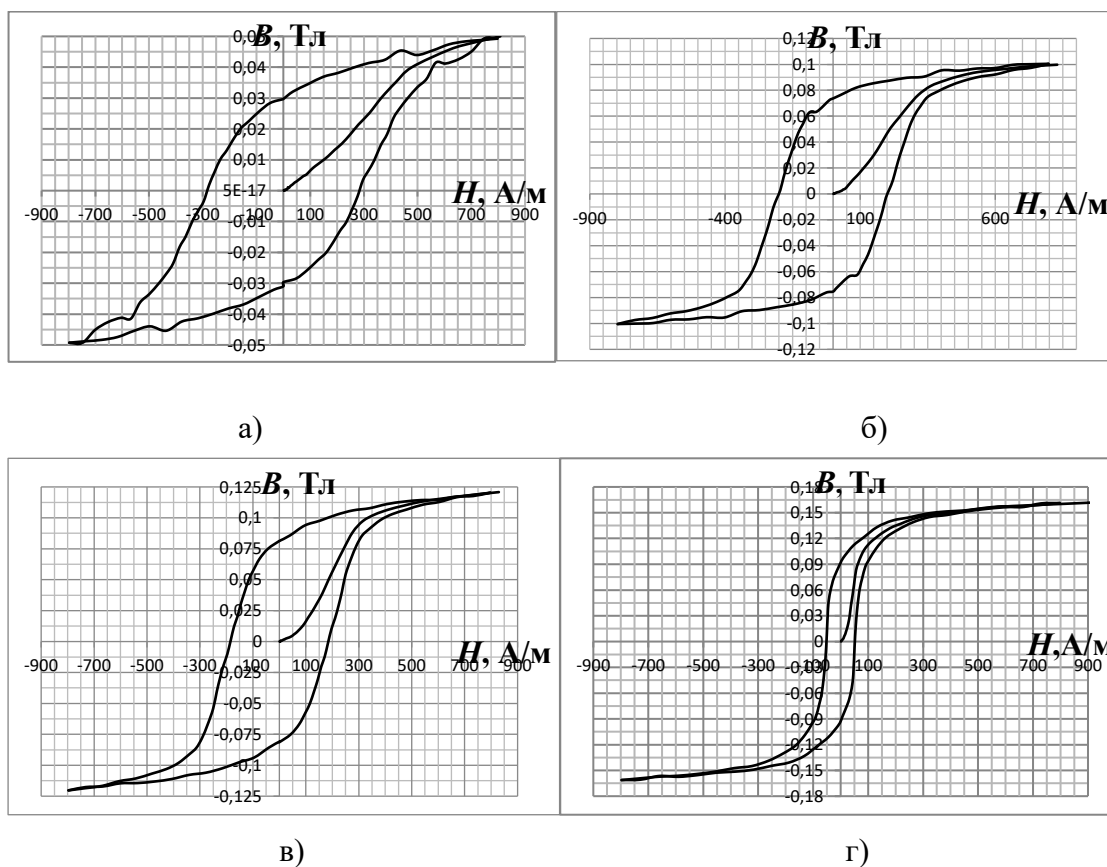


Рисунок 1 – Кривые намагничивания и петли гистерезиса поликристаллических образцов $Y_3Fe_5O_{12}$, полученных при разных технологических режимах РТС: а) $T_{\text{сп}} = 1300^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сп}} = 60$ минут, б) $T_{\text{сп}} = 1350^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сп}} = 60$ минут, в) $T_{\text{сп}} = 1400^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сп}} = 38$ минут, г) $T_{\text{сп}} = 1450^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сп}} = 30$ минут

Использование технологии РТС в производстве поликристаллических ферритов-гранатов ($Y_3Fe_5O_{12}$) позволяет снизить себестоимость данного материала не менее чем на 25% по сравнению с технологией спекания в традиционных термических печах.

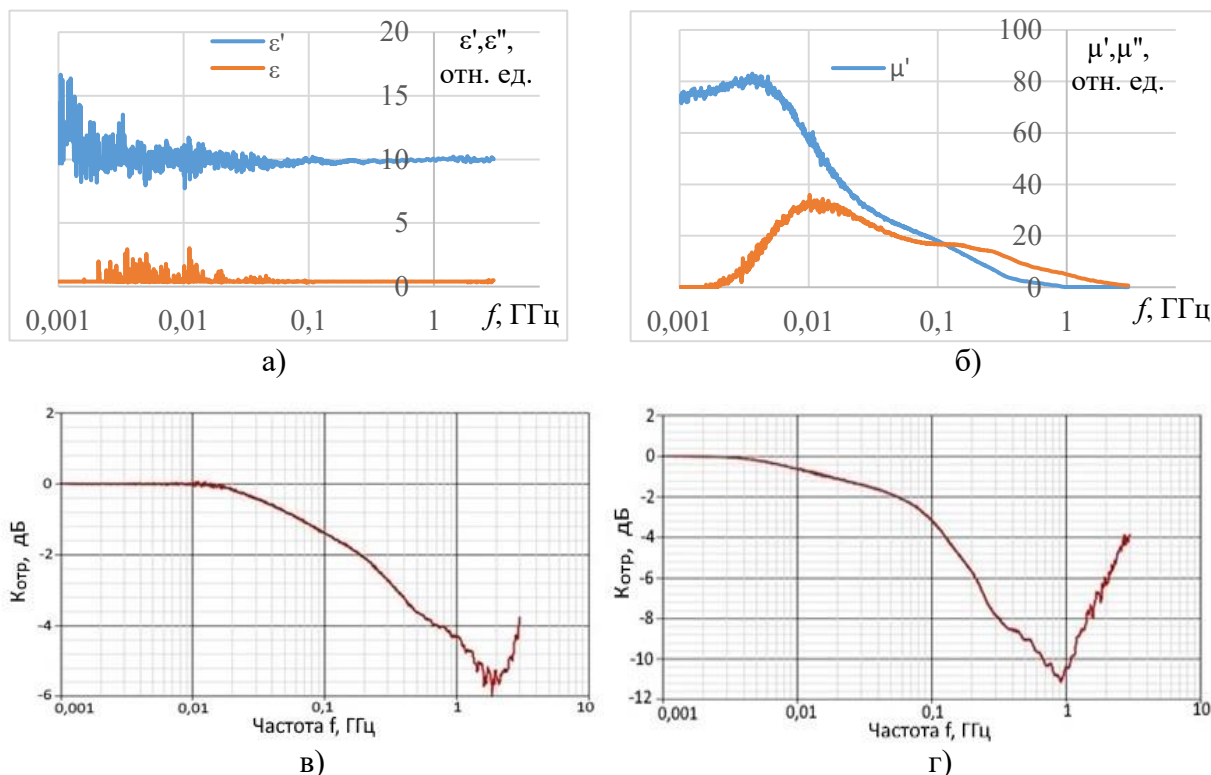


Рисунок 2 – Электромагнитные и радиопоглощающие характеристики поликристаллических ферритов $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, полученных методом РТС: а) комплексная диэлектрическая проницаемость; б) комплексная магнитная проницаемость; в) и д) – коэффициент отражения на металлической пластине; а), б) и д) – $T_{сп}=1450^\circ\text{C}$; $t_{сп}= 30$ мин; в) $T_{сп}=1300^\circ\text{C}$; $t_{сп}= 60$ мин

На рис. 2 представлены частотные зависимости электромагнитных (действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей диэлектрической проницаемости (а), действительной μ' и мнимой μ'' частей магнитной проницаемости (б)) и радиопоглощающих характеристик (коэффициента отражения на металлической пластине $K_{отр}$) ЖИГ, полученных методом РТС. Как видно из рис. 4 а), действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ' объектов исследования почти на всем протяжении спектра равна 10, что реально соответствует диэлектрической проницаемости ЖИГ.

С ростом $T_{сп}$ РТС от 1300°C до 1450°C интенсивность пика отражения образца $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ на металлической пластине падает от $-5,4$ дБ до $-11,6$ дБ, а частотное положение максимума $K_{отр}$ сдвигается с $f_{\max K_{отр}} = 2,0$ ГГц до $f_{\max K_{отр}} = 0,9$ ГГц. График зависимости $f_{\max K_{отр}} = f(T_{сп})$ для полученных в настоящей работе объектов исследования $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ представлен на рис. 5.

Полученный при определенных технологических режимах методом РТС поликристаллический $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ может использоваться, как радиопоглощающий материал в диапазоне частот $0,7$ ГГц – $1,2$ ГГц. Полученные результаты позволили нам получить НОУ-ХАУ на способ получения радиопоглощающего ЖИГ.

В работе проведено также исследование влияния температуры спекания на магнитные, электромагнитные и радиопоглощающие характеристики ферритов-шпинелей марок 1000НН ($\text{Ni}_{0,36}\text{Zn}_{0,66}\text{Fe}_{1,98}\text{O}_4$) и 2000НН ($\text{Ni}_{0,32}\text{Zn}_{0,68}\text{Fe}_2\text{O}_4$). Температура спекания варьировалась от 1200 до 1400°C с шагом 50°C , время спекания составляло 2 часа.

На рис. 10 представлены частотные зависимости действительной диэлектрической проницаемости ϵ' , действительной мнимой проницаемости ϵ'' , действительной магнитной

проницаемости μ' , мнимой магнитной проницаемости и коэффициента отражения на металлической пластине $K_{отр}$ ферритов-шпинелей 2000НН, полученных при разных температурах спекания. По графикам частотной зависимости ϵ' и ϵ'' (рис. 3, а и б) видно, что для ферритов 2000НН (как и для ферритов 1000НН) в частотном диапазоне 0,05 ГГц-7,0 ГГц имеет место релаксационный процесс, связанный с поляризацией на границе раздела фаз «кристаллические зерна-межзеренная граница».

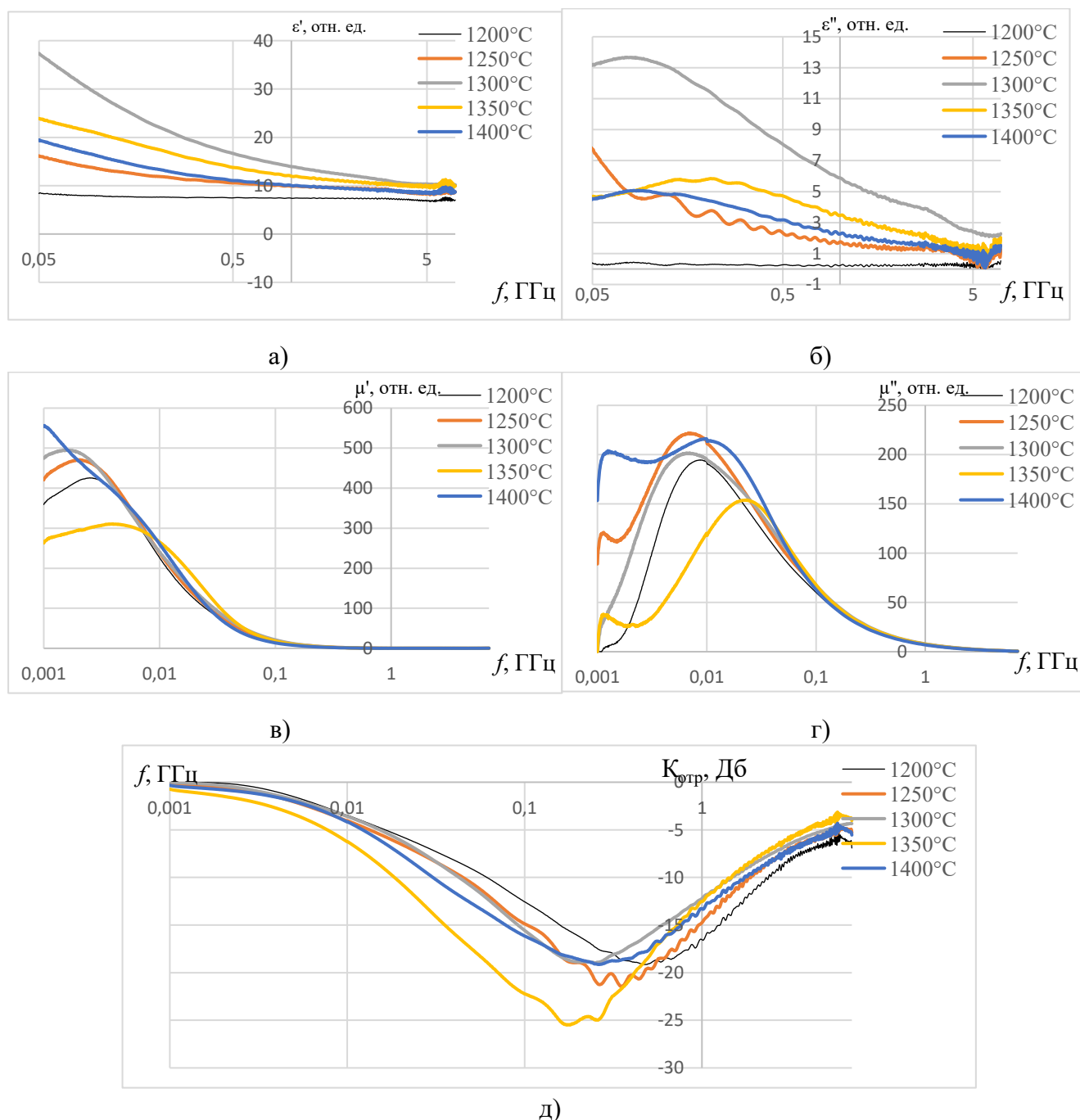


Рисунок 3 – Электромагнитные и радиопоглощающие характеристики поликристаллов 2000НН, полученных при разных температурах спекания: а) и б) – действительная и мнимая диэлектрическая проницаемость; в) и г) – действительная и мнимая магнитная проницаемость; д) коэффициент отражения на металлической пластине

По частотным зависимостям комплексной магнитной проницаемости (μ' и μ'') Ni-Zn ферритов 2000НН (рис. 3, в и г) видно, что в интервале частот от 0,001 до 7 ГГц можно выделить два вида потерь: потери на РДГ и потери на ЕФМР. Из магнитных спектров μ'' видно, что для феррита 2000НН после температуры спекания 1250 °С происходит явное разделение максимумов пиков, относящихся к разным механизмам магнитных потерь. Характерной особенностью является тот факт, что магнитные спектры μ'' ферритов 2000НН (рис. 3, г) являются более широкими, но менее интенсивными по сравнению с магнитными спектрами μ'' ферритов 1000НН.

В настоящей работе обнаружен интересный эффект: и для ферритов 1000НН, и для ферритов 2000НН, полученных при разных температурах спекания, зависимость максимума частотного положения пика отражения от ширины пика на уровне (-10 дБ) является прямой линией. Для феррита 1000НН уравнение зависимости $f_{\max}K_{\text{отр}} = f(\Delta f_{K_{\text{отр}}}(-10 \text{ дБ}))$ имеет вид прямой линии $y = 0,5041x - 0,4265$, а для 2000НН - вид $y = 0,344x - 0,2924$.

Таким образом, в настоящей работе подтвержден тот факт, что NiZn-поликристаллические ферриты 1000НН и 2000НН являются эффективными радиопоглощающими материалами в диапазоне частот от 0,03 ГГц до 2,0 ГГц. Изменяя температуру спекания от 1200 °С до 1400 °С, можно изменять интенсивность пика отражения на металлической пластине, его частотное положение и ширину.

В главе 3 изучены также электромагнитные (комплексная диэлектрическая проницаемость, комплексная магнитная проницаемость) и радиопоглощающие (коэффициент отражения на металлической пластине) свойства чистых полимеров ПВС, Ф2М и Ф42 в диапазоне частот $f = 0,01 \text{ ГГц} - 7,0 \text{ ГГц}$. Измеренная диэлектрическая проницаемость у всех трех полимеров – близка к табличным значениям, магнитная проницаемость – близка к единице, максимальный коэффициент отражения на металлической пластине $K_{\text{отр}}$ составляет «-1 дБ», «-2 дБ» и «-2,5 дБ», соответственно, и обусловлен чисто диэлектрическими потерями.

В 4-й главе представлены результаты исследования электромагнитных (комплексная диэлектрическая проницаемость, комплексная магнитная проницаемость) и радиопоглощающих (коэффициент поглощения на металлической пластине) свойств феррит-полимерных композитов ПВС-YIG, Ф2М-YIG, Ф42-YIG, ПВС-2000НН, Ф2М-2000НН и Ф42- 2000НН с концентрацией наполнителя 20%, 40%, 60% и 80% масс.

В качестве примера на рис. 4 представлены частотные зависимости электромагнитных свойств (комплексной диэлектрической и комплексной магнитной проницаемостей) магнитных полимерных композитов Ф42-YIG при разном содержании в % масс. наполнителя. Как видно из рис. 4, с увеличением содержания наполнителя кривые частотной зависимости действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' в диапазоне частот 0,05–7,0 ГГц спектры ϵ' с увеличением концентрации ферритового наполнителя поднимаются вверх. Рост концентрации ферритового наполнителя в данном композите прямо пропорционально влияет на положение кривых ϵ' . Никаких «аномалий» в поведении кривых не наблюдается. На протяжении всего измеряемого частотного диапазона спектры ϵ' монотонно убывают. С ростом частоты f кривые же частотной зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости опускаются вниз (рис. 4.11). Если говорить о поведении мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'' композитов Ф42-YIG, то с частоты 0,05 ГГц до 0,135 ГГц имеет место дисперсия ϵ'' . Далее, - с 0,135 ГГц до

7,0 ГГц, имеет место медленное монотонное убывание ϵ'' с ростом частоты f , на которое накладывается интерференция.

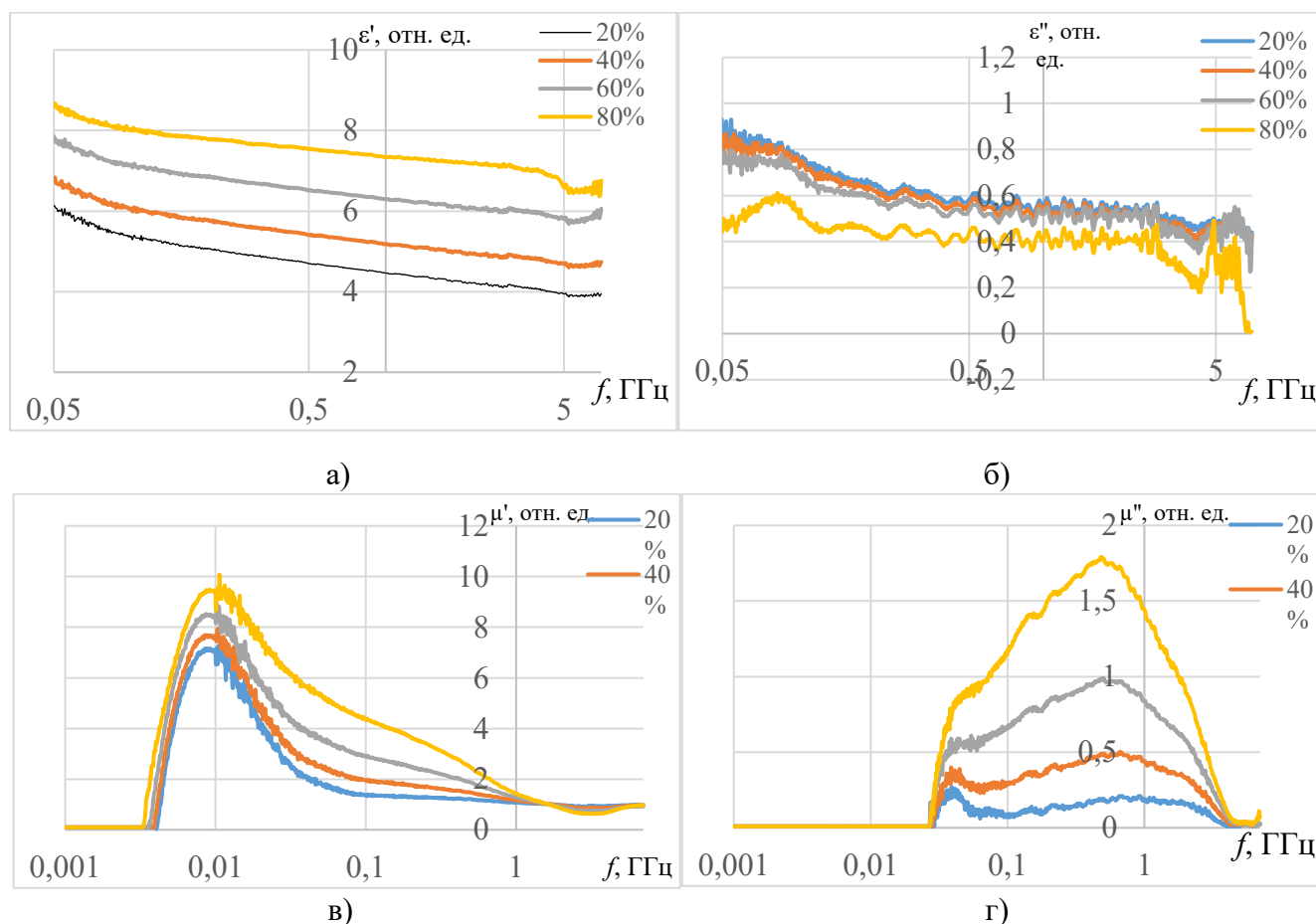


Рисунок 4 – Частотные зависимости электромагнитных свойств магнитных полимерных композитов Ф42-YIG при разном содержании в % масс. наполнителя :а) действительная часть ϵ' комплексной диэлектрической проницаемости; б) мнимая часть ϵ'' комплексной диэлектрической проницаемости; в) действительная часть μ' комплексной магнитной проницаемости; г) мнимая часть μ'' комплексной магнитной проницаемости.

С ростом частоты f кривые же частотной зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости опускаются вниз (рис. 4, б). Если говорить о поведении мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'' композитов Ф42-YIG, то с частоты 0,0199 ГГц до 0,134 ГГц имеет место сильная дисперсия ϵ'' . Далее, - с 0,134 ГГц до 7,0 ГГц, имеет место медленное монотонное уменьшение ϵ'' с ростом частоты f , на которое накладывается интерференция.

Как видно из рис. 4(в и г), с увеличением содержания магнитного наполнителя спектры действительной части и мнимой части магнитной проницаемости поднимаются вверх. На спектре $\mu'' = f$ (f , ГГц) уже при 20% масс. наполнителя наблюдается явное разделение механизмов поглощения электромагнитных волн за счет РДГ и за счет ЕФМР. С ростом концентрации наполнителя, имеет место слияние пиков, ответственных за РДГ и ЕФМР.

Характерно, что частотное положение максимума, ответственного за РДГ, - $f_{\max} = 0,0487$ ГГц; это значение не меняется для всех значений содержания магнитного наполнителя YIG. Что касается пика, обусловленного ЕФМР на зависимости $\mu'' = f$ (f , ГГц), то частотное положение максимума этого пика с ростом концентрации магнитного наполнителя смещается в область

меньших частот (см. рис. 4.12). Так, для $C_{mYIG} = 20\%$ масс. $f_{\max \mu''} = 0,938$ ГГц, для $C_{mYIG} = 40\%$ масс. $f_{\max \mu''} = 0,694$ ГГц, для $C_{mYIG} = 60\%$ масс. $f_{\max \mu''} = 0,442$ ГГц.

На рис. 5 представлены спектры отражения на металлической пластине композитов Ф42-YIG при разном содержании наполнителя.

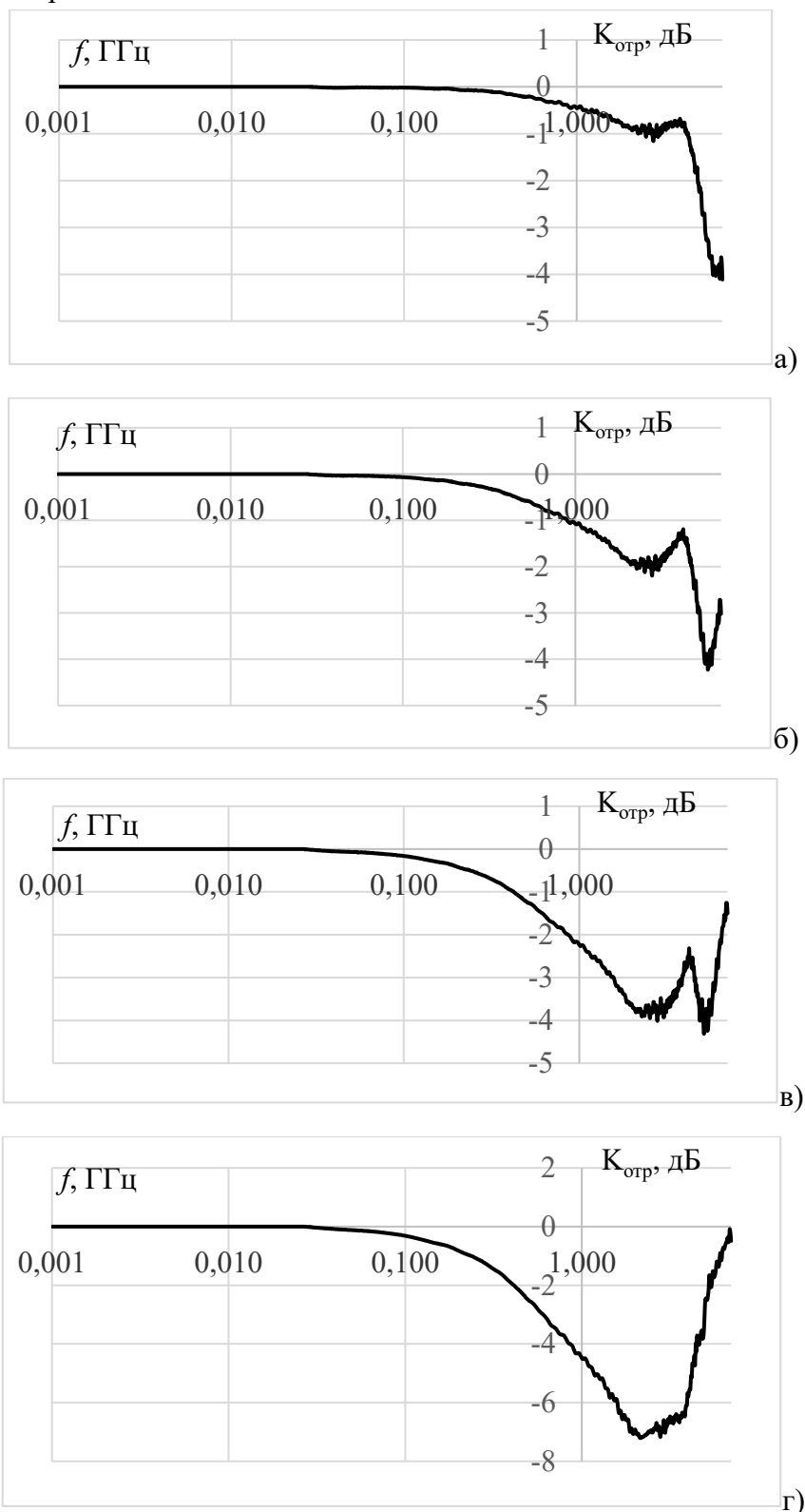


Рисунок 5 – Спектры отражения на металлической пластине композитов Ф42-YIG при разном содержании в % масс. наполнителя: а) 20% ; б) 40% ; в) 60% ; г) 80 % .

Проведенные исследования фазового состава феррит-полимерных композитов, содержащих наполнитель в виде феррита 2000НН (химический состав $\text{Ni}_{0,32}\text{Zn}_{0,68}\text{Fe}_2\text{O}_4$) показали отсутствие промежуточных фаз и присутствие только фаз полимерной матрицы и феррита. Из полученных результатов следует, что воздействие температуры ($\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высокого давления (до 15,0 МПа) на операции термопрессования не приводит к изменениям фазового состава или появления новых соединений в процессе изготовления феррит-полимерных композитов. Следовательно, в процессе производства феррит-полимерных композитов методом термопрессования можно пренебречь возможными химическими или фазовыми превращениями и процессами формирования новых химических соединений.

На рис. 6 представлены частотные зависимости электромагнитных (комплексная диэлектрическая проницаемость ε^* и комплексная магнитная проницаемость μ^*) и радиопоглощающих свойств магнитных полимерных композитов ПВС-2000НН с разным содержанием ферритового наполнителя.

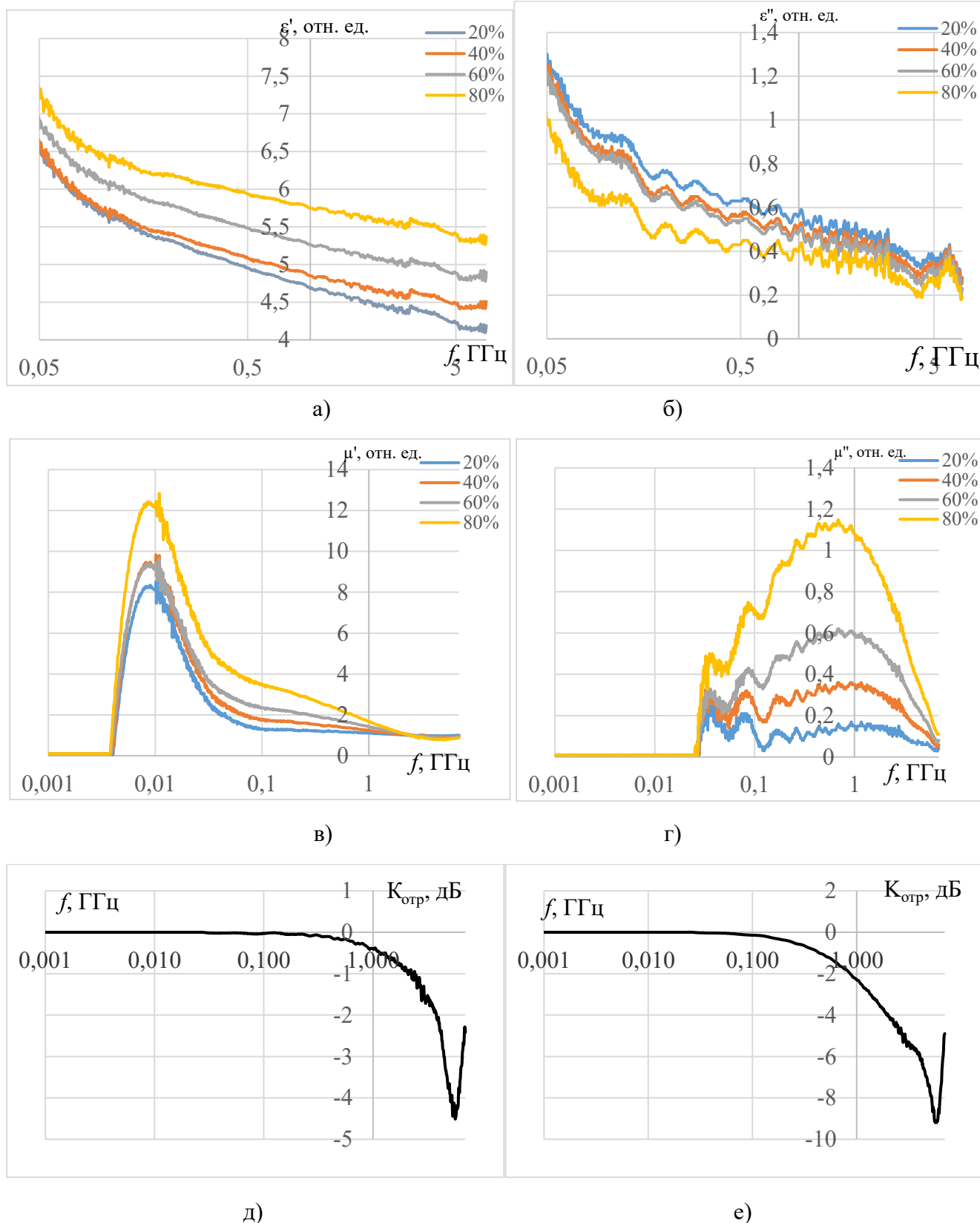


Рисунок 6- Электромагнитные и радиопоглощающие свойства полимерных композитов ПВС-2000НН при разном содержании (в % масс.) ферритового наполнителя: а) спектры ϵ' ; б) спектры ϵ'' ; в) спектры μ' ; г) спектры μ'' ; д) $K_{отр}$ на металл. пластине ($C_m=20\%$); е). $K_{отр}$ на металл. пластине ($C_m=80\%$).

Как видно из рис. 6, характер спектров ϵ' в случае всех концентраций наполнителя одинаковый – монотонно убывающий. Кривые расположены "веером" - чем выше концентрация, тем выше значения ϵ' на всех частотах. При этом стоит отметить, что повышение концентрации наполнителя с 20% до 40% незначительно влияет на характер кривой ϵ' . Однако рост концентрации до 60% и дальнейших 80% оказывает более существенное влияние на кривые ϵ' . Наблюдается минимальная дисперсия характеристик на всем рассматриваемом диапазоне частот. График демонстрирует типичное поведение диэлектрической проницаемости в дисперсных системах - уменьшение с ростом частоты из-за релаксационных процессов.

Для мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'' имеет место сильная дисперсия в диапазоне частот от 0,05 ГГц до 0,08 ГГц (см. рис. 6). С 0,08 ГГц до 7,0 ГГц наблюдается медленное монотонное уменьшение ϵ'' с ростом частоты f , на которое накладывается явление интерференции. С увеличением концентрации наполнителя от 20% масс. до 80 % масс. максимальное значение мнимой диэлектрической проницаемости ϵ'' (значение в максимуме) падает от 1,21 до 1,01 (на 19,5%). $\epsilon''_{\max} = 1,21$ и реализуется на частоте $f_{\max} = 0,05$ ГГц для композита ПВС-2000НН с 20%-м наполнением ферритом 2000НН. $\epsilon''_{\min} = 1,01$ и реализуется также на частоте $f_{\min} = 0,05$ ГГц для композита ПВС-2000НН с 80%-м наполнением ферритом 2000НН.

С увеличением содержания наполнителя интенсивность кривых действительной части магнитной проницаемости μ' растет (рис. 6в). В диапазоне частот от $f = 0,003773$ ГГц до $f = 0,04012$ ГГц имеет место сильная дисперсия μ' . От 0,04012 ГГц и далее (вплоть до 7,0 ГГц) имеет место монотонное медленное уменьшение μ' с ростом частоты f . С увеличением концентрации наполнителя от 20% масс. до 80 % масс. максимальное значение диэлектрической проницаемости μ' (значение в максимуме) растет от 8,2 до 12,33 (более, чем на 50%). $\mu'_{\max} = 12,33$ и реализуется на частоте $f_{\max} = 0,008829$ ГГц для композита ПВС-2000НН с 80%-м наполнением ферритом. $\mu'_{\min} = 8,2$ и реализуется на частоте $f_{\max} = 0,0093931$ ГГц для композита ПВС-2000НН с 20%-м наполнением ферритом 2000НН.

По всему диапазону частот регистрации μ'' (от $f = 0,002670$ ГГц до $f = 7,0$ ГГц) имеет место сильная дисперсия μ'' (рис. 6г). Складывается впечатление, что уже при 20%-м содержании наполнителя на спектре μ'' фиксируется разделение механизмов магнитных потерь, - потерь за счет РДГ, и потерь за счет ЕФМР. То есть, на зависимости $\mu'' = f(f, \text{ГГц})$ мы наблюдаем два пика: 1-й пик $\mu''_{1\max} = 0,24$ при $f_{\max1} = 0,04120$ ГГц и второй пик $\mu''_{2\max} = 0,16$ при $f_{\max2} = 1,1914$ ГГц. Но поскольку, на указанную картину накладывается интерференционная картина, уверенно утверждать об этом нельзя.

С увеличением концентрации наполнителя от 20% масс. до 80 % масс. максимальное значение магнитной проницаемости μ'' (значение в максимуме) растет от 0,16 до 13,13 (более, чем в 7 раз). $\mu''_{\max} = 13,13$ и реализуется на частоте $f_{\max} = 0,719$ ГГц для композита ПВС-2000НН с 80%-м наполнением ферритом 2000НН. $\mu''_{\min} = 0,16$ и реализуется на частоте $f_{\max} = 1,1914$ ГГц для композита ПВС-2000НН с 20%-м наполнением ферритом 2000НН.

На рис. 6 (д и е) представлены спектры отражения на металлической пластине композитов ПВС-2000НН при концентрации феррита $C_m = 20\%$ масс. (д) и концентрации феррита $C_m = 80\%$ масс. (е). На рис. 19 представлены зависимости интенсивности и частотного положения максимума $K_{\text{отр}}$ полимерных композитов ПВС-2000 от концентрации C_m в % масс. феррита. Как

видно из рис. 6 (д,е) и рис. 7, с увеличением концентрации наполнителя (феррита 2000НН), величина потерь на отражение растет. Зависимость $K_{отр} = f(C_m, \%)$, где m – массовая доля наполнителя в % - близка к линейной. В соответствии с полученными данными, минимальный коэффициент отражения на металлической пластине ($K_{отр} = -9,36$ дБ) достигается при $C_m = 60\%$ феррита 2000НН (см. рис. 7, а). Близка к линейной также зависимость частотного положения максимума $K_{отр}$ (см. рис. 7, б).

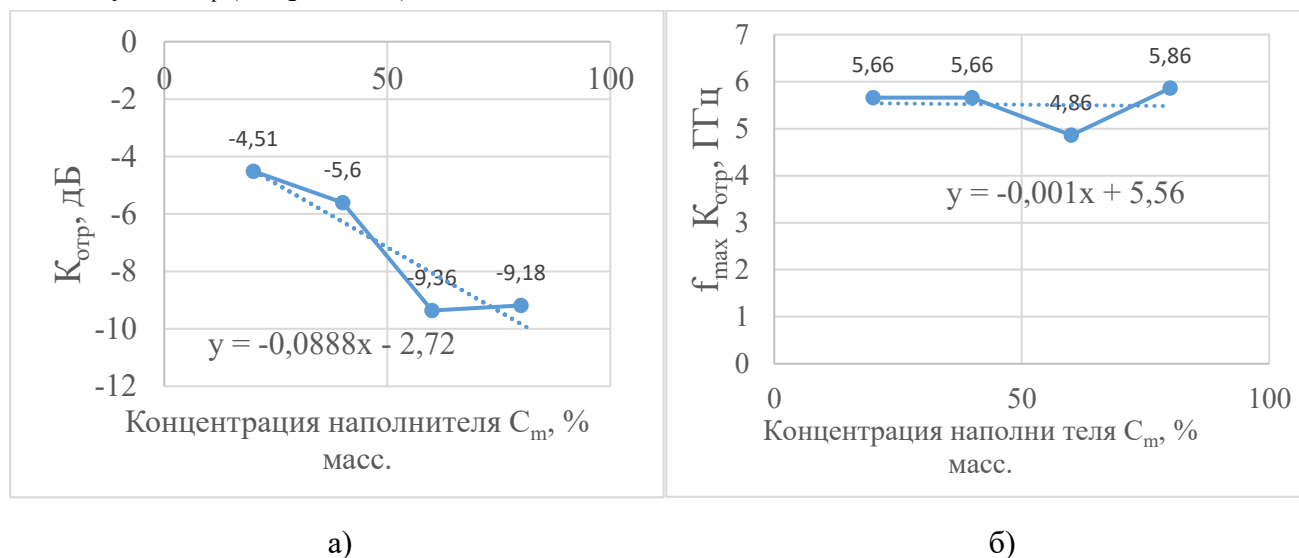


Рисунок 7 – Зависимость параметров коэффициента отражения на металлической пластине композитов ПВС-2000НН от массовой доли наполнителя: а). зависимость величины $K_{отр}$; б). зависимость частотного положения максимума $K_{отр}$.

Следует отметить, что величина потерь на отражение композитов ПВС-2000НН – недостаточна для их использования в качестве РПМ.

На рис. 8 представлены частотные зависимости электромагнитных (комплексная диэлектрическая проницаемость ϵ^* и комплексная магнитная проницаемость μ^*) и радиопоглощающих свойств магнитных полимерных композитов Ф2М-2000НН с разным содержанием ферритового наполнителя в матрице.

Как видно из рис. 8а, характер спектров ϵ' в случае всех концентраций наполнителя одинаковый – монотонно убывающий. Кривые расположены "веером" - чем выше концентрация, тем выше значения ϵ' на всех частотах. При этом стоит отметить, что повышение концентрации наполнителя с 20% до 80% пропорционально влияет на характер спектров ϵ' (кривые располагаются заметно выше с каждым шагом концентрации в отличие от композита ПВС-2000НН). Наблюдается минимальная дисперсия характеристик на всем рассматриваемом диапазоне частот. Аналогично спектрам для композита ПВС-2000НН график демонстрирует типичное поведение диэлектрической проницаемости в дисперсных системах - уменьшение с ростом частоты из-за релаксационных процессов.

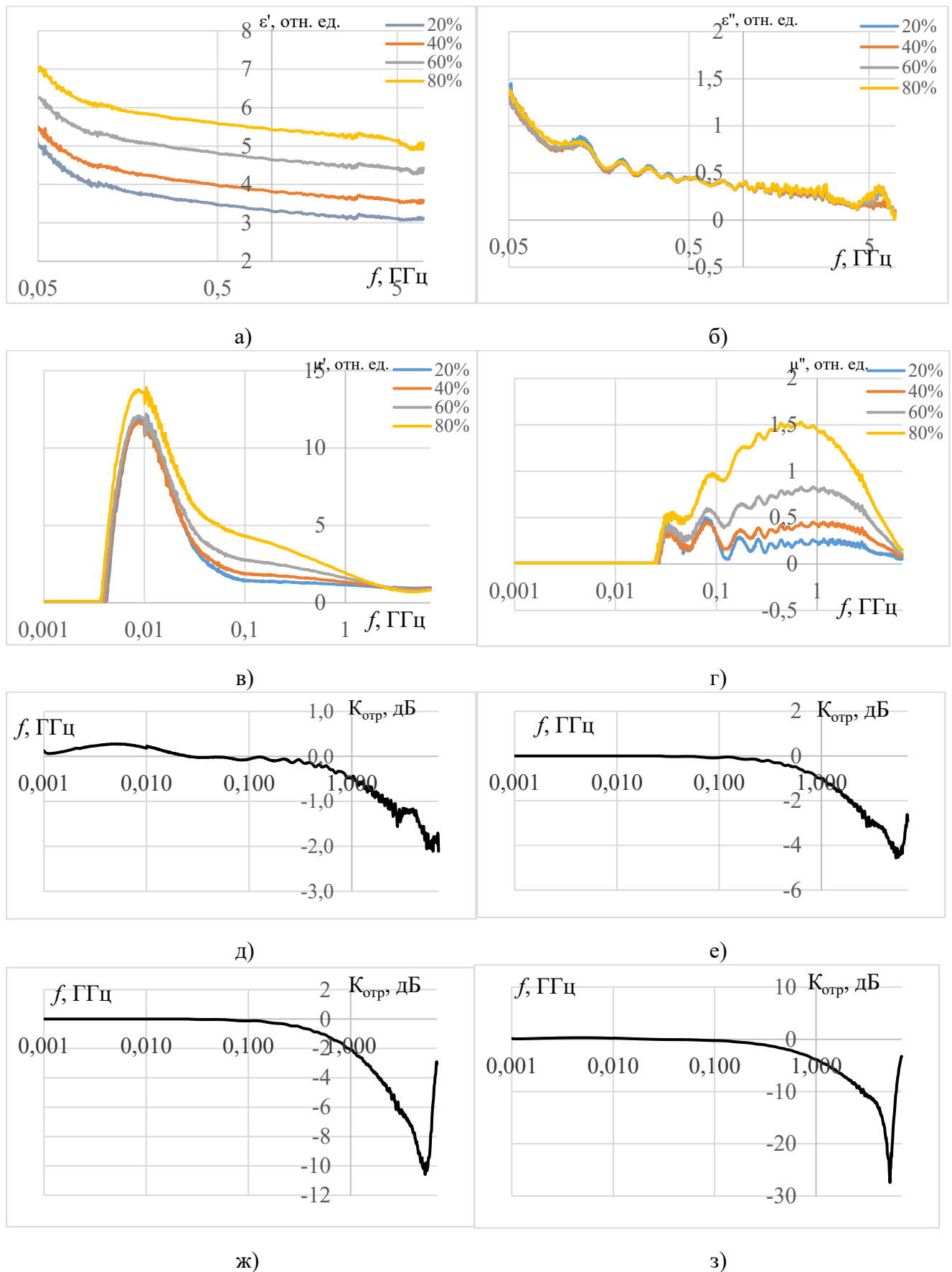


Рисунок 8 - Электромагнитные и радиопоглощающие свойства полимерных композитов Ф2М-2000НН при разном содержании (в % масс.) ферритового наполнителя
а) спектры ϵ' ; б) спектры ϵ'' ; в) спектры μ' ; г) спектры μ'' ; д) $K_{отр}$ на металл. пластине ($C_m=20\%$); е) $K_{отр}$ на металл. пластине ($C_m=40\%$); ж) $K_{отр}$ на металл. пластине ($C_m=60\%$); з) $K_{отр}$ на металл. пластине ($C_m=80\%$).

Легко заметить, что диэлектрический спектр ϵ'' композита Ф2М-2000НН практически не изменяется с ростом концентрации ферритового наполнителя. Фактически, спектры ϵ'' для всех значений C_m практически сливаются. Следует отметить, что для мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'' имеет место дисперсия в диапазоне частот от 0,05 ГГц до 0,5 ГГц (см. рис. 20б). С 0,5 ГГц до 7,0 ГГц наблюдается медленное монотонное уменьшение ϵ'' с ростом частоты f , на которое накладывается явление интерференции.

С увеличением содержания наполнителя интенсивность кривых действительной части магнитной проницаемости μ' растет (рис. 20в). В диапазоне частот от $f = 0,003773$ ГГц до $f = 0,04012$ ГГц имеет место сильная дисперсия μ' . От 0,04012 ГГц и далее (вплоть до 7,0 ГГц) имеет место монотонное медленное уменьшение μ' с ростом частоты f . С увеличением концентрации наполнителя от 20% масс. до 80 % масс. максимальное значение диэлектрической проницаемости μ' (значение в максимуме) растет от 8,2 до 12,33 (более, чем на 50%). $\mu'_{\max} = 12,33$ и реализуется на частоте $f_{\max} = 0,008829$ ГГц для композита Ф2М-2000НН с 80%-м наполнением ферритом. $\mu'_{\min} = 8,2$ и реализуется на частоте $f_{\max} = 0,0093931$ ГГц для композита Ф2М-2000НН с 20%-м наполнением ферритом 2000НН.

С увеличением концентрации наполнителя от 20% масс. до 80 % масс. максимальное значение магнитной проницаемости μ'' (значение в максимуме) растет от 0,24 до 1,51 (в 6,3 раз). $\mu''_{\max} = 1,51$ и реализуется на частоте $f_{\max} = 0,71929$ ГГц для композита Ф2М-2000НН с 80%-м наполнением ферритом 2000НН. $\mu''_{\min} = 0,24$ и реализуется на частоте $f_{\max} = 1,1914$ ГГц для композита Ф2М-2000НН с 20%-м наполнением ферритом 2000НН.

Как видно из рис. 20(д, е, ж и з), с увеличением концентрации наполнителя (феррита 2000НН), величина потерь на отражение растет. Зависимость $K_{\text{отр}} = f(C_m, \%)$, где m – массовая доля наполнителя в % - близка к линейной. В соответствии с полученными данными, минимальный коэффициент отражения на металлической пластине ($K_{\text{отр}} = -27,42$ дБ) достигается при $C_m = 80\%$ феррита 2000НН (см. рис. 20(з и е), и рис. 21(а и б)). Чисто линейной является зависимость частотного положения максимума $K_{\text{отр}}$ (см. рис. 21, б).

Следует отметить, что композит Ф2М-2000НН является хорошим радиопоглощающим материалом. Уже при концентрации феррита $C_m = 60\%$ в диапазоне частот $\Delta f = 5,089$ ГГц – 5,66 ГГц коэффициент отражения данного композита $K_{\text{отр}} = (-10 \div -10,6)$. При концентрации в композите Ф2М-2000НН феррита 2000НН величиной $C_m = 80\%$ масс. в диапазоне частот $\Delta f = (2,86 \div 6,18)$ ГГц $K_{\text{отр}} < -10$ дБ с минимальным коэффициентом отражения $K_{\text{отр}} = -27,42$ дБ при $f = 5,367$ ГГц (см. рис. 4.24). На разработку получено НОУ-ХАУ.

Следует отметить, что композит Ф42-2000НН также является хорошим РПМ. Уже при концентрации феррита $C_m = 60\%$ в диапазоне частот $\Delta f = 4,38$ ГГц – 6,24 ГГц коэффициент отражения данного композита $K_{\text{отр}} = (-10 \div -18,3)$ ГГц (см. рис. 22 и). При концентрации в композите Ф42-2000НН феррита 2000НН величиной $C_m = 80\%$ масс. в диапазоне частот $\Delta f = (2,5 \div 5,92)$ ГГц $K_{\text{отр}} < -10$ дБ с минимальным коэффициентом отражения $K_{\text{отр}} = -20,52$ дБ при $f = 5,0$ ГГц (см. рис. 22, й). На разработку получено НОУ-ХАУ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны эффективные радиопоглощающие ферриты и феррит-полимерные композиты (а также способы их получения), позволяющие достигать поглощения электромагнитных волн на уровне лучших отечественных и мировых аналогов. В частности:

- разработан «Способ получения радиопоглощающего ЖИГ» (НОУ-ХАУ №12-219-2025 ОИС от «18» сентября 2025 г., зарегистрировано в Депозитарии но-хау НИТУ МИСИС);

- определены оптимальные технологические режимы получения Ni-Zn-ферритов-шпинелей 1000НН и 2000НН с максимальными значениями потерь на отражение -21,47 дБ и -25,5 дБ, соответственно; показано, что изменение температуры спекания данных ферритов от 1200 °С до 1400 °С позволяет варьировать интенсивность, частотное положение и частотную ширину пика отражения;

- разработан феррит-шпинель $\text{Li}_{0.37}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$, являющийся эффективным РПМ в диапазоне частот от 0,8 ГГц до 3,5 ГГц с максимумом потерь на отражение -23 дБ при $f_{\text{max}} = 1,2$ ГГц (патент РФ № 2759859);

- разработан феррит-полимерный композит Ф2М-2000НН, позволяющий при концентрации наполнителя $C_m = (60 - 80)\%$ масс достичь в диапазоне частот $\Delta f = (2,86 \div 6,18)$ ГГц $K_{\text{отр}} < -10$ дБ с минимальным коэффициентом отражения $K_{\text{отр}} = -27,42$ дБ при $f = 5,367$ ГГц (НОУ-ХАУ №10-219-2025 ОИС от «18» сентября 2025 г., зарегистрировано в Депозитарии но-хау НИТУ МИСИС);

- разработан феррит-полимерный композит Ф42-2000НН, позволяющий при концентрации наполнителя $C_m = (60 - 80)\%$ масс. достичь в диапазоне частот $\Delta f = (2,5 \div 5,92)$ ГГц $K_{\text{отр}} < -10$ дБ с минимальным коэффициентом отражения $K_{\text{отр}} = -20,52$ дБ при $f = 5,0$ ГГц (НОУ-ХАУ №38-219-2022 ОИС от «29» декабря 2022 г., зарегистрировано в Депозитарии но-хау НИТУ МИСИС).

- в диапазоне частот 0,001 ГГц-7,0 ГГц изучено поведение комплексной диэлектрической проницаемости, комплексной магнитной проницаемости и коэффициента отражения на металлической пластине всех полученных объектов исследования;

- изучено влияние концентрации ферритового наполнителя ($C_m = 20\%$ масс., $C_m = 40\%$ масс., $C_m = 60\%$ масс. и $C_m = 80\%$ масс.) на электромагнитные и радиопоглощающие свойства исследованных феррит-полимерных композитов.

2. Впервые методом РТС получены поликристаллические образцы $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, изучена их кристаллическая и магнитная структура, электрофизические свойства, параметры петли магнитного гистерезиса, электромагнитные и радиопоглощающие свойства. Определены оптимальные технологические режимы получения качественных образцов $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ методом РТС. На примере ЖИГ в очередной раз подтверждена высокая энерго- и временная эффективность технологии РТС по сравнению с технологией КТ.

Установлено влияние технологических режимов РТС на характеристики пика $K_{\text{отр}}$.

3. Впервые установлено, что с увеличением концентрации ионов галлия в поликристаллических ферритах $\text{Y}_3\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ ($x=0$; $x=0,38$; $x=0,63$ и $x=1,03$ форм. ед.) частотное положение пика отражения $f_{\text{max}}K_{\text{отр}}$ на металлической пластине смещается с 1,26 до 0,154 ГГц, а его интенсивность изменяется от $|K_{\text{отр}}| = 9,0$ дБ до $|K_{\text{отр}}| = 0,63$ дБ.

4. Изучено влияние легкоплавкой добавки Bi_2O_3 (содержание 1 % масс. и 2 % масс.) на магнитные, электромагнитные и радиоглощающие свойства ферритов-шпинелей $\text{Mn}_{0,15}\text{Mg}_{0,34}\text{Zn}_{0,51}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Установлено, что добавки Bi_2O_3 в 3-4 раза увеличивают относительную магнитную проницаемость μ и комплексную магнитную проницаемость μ^* . При этом уменьшается диэлектрическая проницаемость и незначительно уменьшается коэффициент отражения на металлической пластине.

Исследования показали, что легируемый висмут распределяется вдоль границ зерен феррита, активируя процессы спекания и обеспечивая формирование крупнозернистой структуры.

5. Предложена модель, позволяющая оценить влияние на магнитную проницаемость феррит-полимерных композитов значений магнитных проницаемостей полимерной матрицы и феррита, размеров частиц ферритового наполнителя и толщины прослойки полимерной матрицы между частицами феррита.

6. Установлено, что использование в составе феррит-полимерного композита с ферритовым наполнителем марки 2000НН полярных полимерных матрицы Ф42 и Ф2М обеспечивает более высокий уровень радиопоглощающих свойств в частотном интервале $0,1 \div 7$ ГГц по сравнению с использованием в качестве матрицы ПВС.

7. Наличие двух пиков на спектрах отражения композитов с наполнителем из порошка $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ обусловлено явлением интерференции, а минимум ($f_{\min} = 4,226$ ГГц) между 1-м и 2-м пиками $K_{\text{отр}}$ соответствует нулевому узлу интерференционной картины.

8. Интенсивность коэффициента отражения композитов «полимер-YIG» – недостаточна для их использования в качестве радиопоглощающих материалов в частотном диапазоне $0,001 - 7,0$ ГГц.

9. Изучены электромагнитные и радиопоглощающие свойства чистых полимеров ПВС, Ф2М и Ф42 в диапазоне частот $f = 0,01$ ГГц – $7,0$ ГГц.

10. Эффективными РПМ показали себя исследованные феррит-полимерные композиты с наполнителями из NiZn-ферритов и полимеров Ф2М и Ф42. Достигнутые значения коэффициента ослабления мощности отраженного сигнала позволяют получить на их основе магнитные экраны, средства индивидуальной защиты в диапазоне частот $0,1 \div 7$ ГГц.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. В. Г. Костишин, А. Г. Налогин, С. В. Щербаков, М. П. Мезенцева, М. А. Михайленко, М. В. Коробейников, Д. В. Салогуб, А. А. Брызгин. Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 1 (26). - С. 124-133.

2. В.Г. Костишин, В.В. Коровушкин, А.Г. Налогин, С.В. Щербаков, И.М. Исаев, А.А. Алексеев, А.Ю. Миронович, Д.В. Салогуб. Особенности магнитной структуры поликристаллов $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, синтеризованных методом радиационно-термического спекания. ФТТ. 2020, том 62, вып. 7. – С. 1028-1035.

3. В.Г. Костишин, Р.И. Шакирзянов, А.Г. Налогин, С.В. Щербаков, И.М. Исаев, М.А. Немирович, М.А. Михайленко, М.В. Коробейников, М.П. Мезенцева, Д.В. Салогуб. Электрофизические и диэлектрические свойства поликристаллов железо-иттриевого феррита-

граната, полученных по технологии радиационно-термического спекания. ФТТ. 2021, том 63, вып. 3. – С. 356-362.

4. Исаев И.М., Салогуб Д.В., Скибо Б.М., Маташнев Е.О., Костишин В.Г. Способ получения радиопоглощающего ЖИГ. НОУ-ХАУ. Зарегистрировано в депозитарии ноу-хау НИТУ МИСИС №12-219-2025 от 18 сентября 2025 г.

5. И.М. Исаев, В.Г. Костишин, В.В. Коровушкин, Д.В. Салогуб, Р.И. Шакирзянов, А.В. Тимофеев, А.Ю. Миронович. Магнитные и радиопоглощающие свойства поликристаллического феррита-шпинели $\text{Li}_{0,33}\text{Fe}_{2,29}\text{Zn}_{0,21}\text{Mn}_{0,17}\text{O}_4$. Журнал технической физики, 2021, том 91, вып. 9.- С. 1376 – 1380.

6. Исаев И.М., Костишин В.Г., Коровушкин В.В., Шипко М.Н., Тимофеев А.В., Миронович А.Ю., Салогуб Д.В., Шакирзянов Р.И. Кристаллохимия и магнитные свойства поликристаллических ферритов-шпинелей. ЖУРНАЛ НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ. 2021, т. 66, №12. – С. 1792-1800.

7. Патент РФ 2759859. МПК H01F1/34 C22C29/12 C04B35/26. Радиопоглощающий феррит. Исаев И. М., Костишин В. Г., Коровушкин В. В., Шакирзянов Р. И., Тимофеев А. В., Салогуб Д. В. 18.11.2021, Бюл. №32.

8. Костишин В.Г., Шакирзянов Р.И., Исаев И.М., Каюмова А.Р., Скибо Б.М., Салогуб Д.В. Изучение радиопоглощающих характеристик композитов полимер/феррит-шпинель в диапазоне частот 500-5000 МГц. Материалы XXIX Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования). –М.: Издательство МЭИ, 2021. – С. 111-120.

9. Костишин В.Г., Шакирзянов Р.И., Исаев И.М., Салогуб Д.В. Исследование радиопоглощающих характеристик полимерных композитов с ферритовыми наполнителями. Заводская лаборатория. Диагностика Материалов. 2022, т. 88, №6. – С. 31-45.

10. Костишин В.Г., Исаев И.М., Шакирзянов Р.И., Салогуб Д.В., Каюмова А.Р., Олицкий В.К. Радиопоглощающие свойства феррит-полимерных композитов поливиниловый спирт/Ni-Zn-феррит. Журнал технической физики. 2022, т. 92, вып. 1. – С. 131-137.

11. Костишин В.Г., Исаев И.М., Шакирзянов Р.И., Салогуб Д.В., Миронович А.Ю., Скибо Б.М. Радиопоглощающие магнитные полимерные композиты с наполнителями из ферритов-шпинелей. Материалы XXV Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах». Москва, РТУ МИРЭА, 1-6 июля 2024 г. Секция 1. – С. 7-10.

12. Kostishin V., Isaev I., Salogub D. Radio-Absorbing Magnetic Polymer Composites Based on Spinel Ferrites: A Review. Polymers 2024, v. 16, N. 1003. - P. 2-19.

13. Исаев И.М., Салогуб Д.В., Скибо Б.М., Маташнев Е.О., Костишин В.Г. Радиопоглощающий магнитный полимерный композит на основе промышленного феррита 2000НН. НОУ-ХАУ. Зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау НИТУ МИСИС №10-219-2025 ОИС от 15 сентября 2022 г.

14. Исаев И.М., Шакирзянов Р.И., Салогуб Д.В., Кожитов Л.В., Дедушенко С.К., Маренкин С.Ф., Подгорная С.В., Костишин В.Г. Радиопоглощающий магнитный полимерный композит на основе промышленного феррита 2000НН. НОУ-ХАУ. Зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау НИТУ МИСИС №38-219-2022 ОИС от 29 декабря 2022 г.