

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ И НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ им. Н.С. КУРНАКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИОНХ РАН)

119991, г. Москва, Ленинский проспект, 31. Тел. (495) 952-0787, факс (495) 954-1279, E-mail: info@igic.ras.ru



Директор ИОНХ РАН,
академик РАН, д.х.н., проф.
В.К.Иванов

Утверждаю

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова
Российской академии наук (ИОНХ РАН)

на диссертационную работу Салогуба Дмитрия Владимировича
«Электромагнитные и радиопоглощающие свойства феррит-полимерных композитов на
основе наполнителей из магнитомягких ферритов со структурой граната и шпинели»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3
– Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники

Отзыв подготовлен главным научным сотрудником ИОНХ РАН, д.х.н, Маренкиным
Сергеем Федоровичем

Актуальность темы диссертационного исследования

Современное развитие радиоэлектроники, беспроводных технологий связи и радиолокации сопровождается значительным ростом уровня электромагнитного загрязнения. Электромагнитные помехи приводят к сбоям в работе чувствительной аппаратуры и могут оказывать неблагоприятное воздействие на биологические объекты. В этой связи разработка новых эффективных радиопоглощающих материалов (РПМ) является важной научно-технической задачей.

Особый интерес представляют композиционные материалы на полимерной основе, наполненные магнитными компонентами. Сочетание технологичности и эластичности полимерной матрицы с высокими магнитными потерями ферритовых наполнителей позволяет

смещает пик поглощения в область низких частот (с 2,0 до 0,9 ГГц), а полученный ЖИГ может использоваться как РПМ в диапазоне 0,7–1,2 ГГц.

2. Замещенные гранаты $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$: Установлено, что увеличение содержания галлия (x от 0 до 1,03) приводит к снижению интенсивности пика отражения (с -9,0 до -0,63 дБ) и смещению его в низкочастотную область (с 1,26 до 0,154 ГГц) из-за ослабления обменных взаимодействий.
3. Ni-Zn-ферриты-шпинели (1000НН, 2000НН): Изучено влияние температуры спекания (1200–1400 °С) на их свойства. Впервые обнаружена линейная зависимость между частотой максимума пика отражения и его шириной, что позволяет прогнозировать свойства материала.
4. Li-феррит $Li_{0,37}Fe_{2,29}Zn_{0,21}Mn_{0,17}O_4$: Разработан новый состав феррита-шпинели, демонстрирующий высокие потери на отражение (до -23 дБ на частоте 1,2 ГГц).
5. Полимерные матрицы: Исследованы электромагнитные свойства чистых полимеров ПВС, Ф2М и Ф42.

В **четвертой главе** проведено комплексное исследование феррит-полимерных композитов. Показано, что интенсивность поглощения композитов с наполнителем $Y_3Fe_5O_{12}$ недостаточна для практического применения. Установлено, что наличие двух пиков на спектрах отражения этих композитов обусловлено интерференцией, а минимум между ними соответствует нулевому узлу интерференционной картины. Наибольшая эффективность достигнута для композитов на основе полярных полимеров Ф2М и Ф42 с наполнителем из Ni-Zn-феррита 2000НН. Композит Ф2М-2000НН с 80% наполнителя обеспечивает $K_{отр} = -27,42$ дБ на частоте 5,37 ГГц с шириной полосы поглощения (-10 дБ) более 3 ГГц, что превосходит многие известные аналоги.

В **заключении** сформулированы основные итоги работы.

Научная новизна диссертационной работы

1. Впервые методом радиационно-термического спекания (РТС) получены поликристаллические ферриты $Y_3Fe_5O_{12}$ и установлено влияние технологических режимов РТС на их электромагнитные и радиопоглощающие свойства. Показана высокая энергоэффективность метода РТС для получения ЖИГ.
2. Впервые для ферритов-гранатов $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ установлены аналитические зависимости интенсивности и частотного положения пика отражения от концентрации ионов Ga^{3+} .
3. Впервые для Ni-Zn-ферритов марок 1000НН и 2000НН обнаружена и описана линейная корреляция между частотой максимума пика отражения и шириной этого пика на уровне -10 дБ, что имеет важное прогностическое значение.
4. Впервые в широком диапазоне частот (0,001–7 ГГц) проведено систематическое исследование электромагнитных и радиопоглощающих свойств композитов на основе полимеров ПВС, Ф2М, Ф42 с различной концентрацией (20–80 мас.%) ферритовых наполнителей $Y_3Fe_5O_{12}$ и 2000НН. Выявлены оптимальные составы, обеспечивающие рекордные показатели поглощения.

Практическая значимость работы

1. Разработаны и оптимизированы технологические режимы получения высококачественных ферритов-гранатов $Y_3Fe_5O_{12}$ методом РТС, позволяющие сократить время спекания и снизить энергозатраты.
2. Разработан новый состав радиопоглощающего феррита-шпинели $Li_{0,37}Fe_{2,29}Zn_{0,21}Mn_{0,17}O_4$, защищенный патентом РФ № 2759859.

создавать эффективные покрытия для широкого диапазона частот. Среди магнитных наполнителей ключевую роль играют магнитомягкие ферриты со структурой шпинели (обладающие высокой магнитной проницаемостью в области до 1 ГГц) и граната (эффективные на более высоких частотах).

Несмотря на имеющиеся исследования, системные данные о влиянии технологии синтеза ферритов (в том числе перспективного метода радиационно-термического спекания), природы полимерной матрицы и концентрации наполнителя на комплекс электромагнитных и радиопоглощающих свойств композитов в широком частотном диапазоне (0,05–7 ГГц) представлены недостаточно. В связи с этим диссертационная работа Салогуба Д.В., направленная на установление этих закономерностей и разработку составов эффективных РПМ, является актуальной и имеет существенное значение для развития электронной техники.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 238 страницах машинописного текста, содержит 168 рисунков и 20 таблиц. Список литературы включает 175 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен подробный аналитический обзор кристаллохимических особенностей, магнитных и электрических свойств ферритов со структурой шпинели и граната. Особое внимание уделено частотным спектрам магнитной и диэлектрической проницаемостей, механизмам потерь (резонанс доменных границ, естественный ферромагнитный резонанс) и подходам к созданию радиопоглощающих материалов и композитов на их основе. На основе анализа сформулированы цели и задачи исследования.

Вторая глава посвящена методологии эксперимента. Подробно описаны керамическая технология и метод радиационно-термического спекания (РТС) для получения ферритов, а также методика термопрессования для изготовления феррит-полимерных композитов. Представлены методики исследования фазового состава (рентгенофазовый анализ), магнитных свойств (вибромагнитометрия), а также электрофизических и радиопоглощающих характеристик с использованием векторного анализатора цепей в диапазоне 0,001–7 ГГц.

В **третьей главе** представлены результаты изучения свойств исходных компонентов композитов:

1. Ферриты-гранаты $Y_3Fe_5O_{12}$ (ЖИГ): Впервые систематически исследовано влияние режимов РТС на структуру и свойства ЖИГ. Установлены оптимальные режимы, позволяющие получать материалы с плотностью и характеристиками, не уступающими керамической технологии, но за значительно меньшее время. Показано, что увеличение температуры РТС

3. Созданы эффективные радиопоглощающие композиты Ф2М-2000НН и Ф42-2000НН с коэффициентом отражения до $-27,4$ дБ, что позволяет использовать их для создания электромагнитных экранов и средств индивидуальной защиты в диапазоне частот $0,05-7$ ГГц. Разработки защищены ноу-хау.
4. Результаты диссертации могут быть использованы в организациях, занимающихся разработкой материалов для электромагнитной совместимости, таких как АО «НИИП» (г. Лыткарино), АО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино), а также в учебном процессе НИТУ «МИСИС» и других профильных вузах.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов

Достоверность результатов обеспечивается использованием комплекса современных и взаимодополняющих методов исследования (рентгенофазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия, вибромагнитометрия, векторный анализ цепей), применением сертифицированного оборудования, воспроизводимостью результатов и их согласием с теоретическими моделями. Основные положения диссертации опубликованы в 7 статьях в журналах, индексируемых в Scopus и WoS (включая журнал Q1), апробированы на международных конференциях и подтверждены патентом РФ.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы:

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к использованию в научно-исследовательских и производственных организациях, специализирующихся в области создания функциональных материалов для СВЧ-электроники и защиты от электромагнитного излучения: АО «НИИП» (г. Лыткарино), АО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино), АО «Российские космические системы» (г. Москва).

Замечания по диссертационной работе:

1. При исследовании влияния температуры спекания Ni-Zn-ферритов автор убедительно демонстрирует изменение их свойств. Однако, из текста неясно, проводилась ли оценка влияния этих режимов на долговременную стабильность (старение) полученных материалов.
2. В четвертой главе для композитов на основе полимеров Ф2М и Ф42 и наполнителя 2000НН достигнуты впечатляющие результаты по поглощению (до -27 дБ). Было бы полезно провести сравнение этих результатов с теоретическим пределом эффективности для данного класса материалов (например, с пределом Сноэка или условием идеального согласования импедансов) для более глубокого понимания достигнутого потенциала.
3. В тексте диссертации встречаются отдельные опечатки и стилистические погрешности, не влияющие на понимание материала, но требующие редакционной правки.

Указанные замечания не снижают общей высокой научной и практической ценности диссертационной работы и носят рекомендательный характер.

Отзыв, диссертация и автореферат рассмотрены на семинаре лаборатории полупроводниковых и диэлектрических материалов Института общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова РАН, протокол №2 от 25.02.2026.

Заключение

Диссертационная работа Салогуба Дмитрия Владимировича «Электромагнитные и радиопоглощающие свойства феррит-полимерных композитов на основе наполнителей из

