

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-12-44-52>

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ 2000НН/2000НМ С СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ И ПОЛИМЕРНЫМИ МАТРИЦАМИ

© **Владимир Григорьевич Костишин***, **Рафаэль Иосифович
Шакирзянов**, **Игорь Магомедович Исаев**,
Елена Сергеевна Савченко, **Борис Михайлович Скибо**

НИТУ «МИСиС», Россия, Москва, 117409, Ленинский пр., д. 4; *e-mail: drvgekostishyn@mail.ru

*Статья поступила 5 октября 2023 г. Поступила после доработки 13 октября 2023 г.
Принята к публикации 25 октября 2023 г.*

В работе представлены результаты исследования электрофизических свойств феррит-диэлектрических композитов, в которых в качестве включений выбраны Mn-Zn- и Ni-Zn-ферриты-шпинели с одинаковой начальной магнитной проницаемостью (марки 2000НМ и 2000НН соответственно), но разными электрическими сопротивлениями. В качестве матриц для композитов использовали полимерные и керамические диэлектрики с различным значением диэлектрической проницаемости: полистирол (ПС525), поливинилиденфторид (марка Ф2МВ), цирконат-титанат свинца (ЦТС-21), титанат бария (ТБК-3). Экспериментальные образцы композитов получали методом горячего (если матрица — полимер) или холодного прессования со связкой (если матрица — керамический сегнетоэлектрик). Показано, что радиопоглощающие свойства полученных композитов во многом зависят от электрофизических свойств диэлектрической матрицы и удельного электросопротивления наполнителя. Наибольшее ослабление электромагнитных волн 25 – 27 дБ в диапазоне частот 4 – 5 ГГц наблюдали для феррит-полимерных композитов с полупроводниковым наполнителем 2000НМ при толщине радиопоглощающего материала 6 мм. Для композитов с наполнителем Mn-Zn-феррит также фиксировали выраженный сдвиг области дисперсии магнитной проницаемости, что в свою очередь меняло частотное положение пикового радиопоглощения. Для композитов с сегнетоэлектрической матрицей область рабочих частот для обоих наполнителей смещалась в низкочастотную область (1 – 4 ГГц) с максимальным ослаблением до 22 дБ при той же толщине материала. Экспериментально было установлено, что при массовой концентрации феррита $C_m = 40\%$ с увеличением диэлектрической проницаемости матрицы уменьшается частота центра минимума поглощения $f_{\text{ц}}$ и минимальное значение коэффициента отражения на металлической пластине $K_{\text{отр}}^{\text{мин}}$ для наполнителя с высоким электросопротивлением 2000НН. В случае композитов с наполнителем 2000НМ зависимость $K_{\text{отр}}^{\text{мин}}$ (ϵ' матрицы) проходит через минимум. Полученные композиты можно рассматривать как эффективные радиопоглощающие материалы для диапазона частот 1 – 6 ГГц с пиковым ослаблением электромагнитной волны в диапазоне 14 – 27 дБ и рабочей полосой частот (менее 10 дБ) в диапазоне 1,1 – 2,5 ГГц.

Ключевые слова: феррит-диэлектрические композиты; Ni-Zn-ферриты-шпинели 2000НН; Mn-Zn-ферриты-шпинели 2000НМ; радиопоглощающие материалы; матрица; наполнитель; магнитная проницаемость; диэлектрическая проницаемость; удельное электросопротивление.

ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF 2000NN/2000NM COMPOSITES WITH FERROELECTRIC AND POLYMER MATRICES

© **Vladimir G. Kostishin***, **Rafael I. Shakirzyanov**, **Igor M. Isaev**,
Elena S. Savchenko, **Boris M. Skibo**

National Research Technological University “MISIS”, 4, Leninsky pr., Moscow, 119049, Russia;
*e-mail: drvgkostishyn@mail.ru

Received October 5, 2023. Revised October 13, 2023. Accepted October 25, 2023.

The results of studying the electrical properties of ferrite-dielectric composites containing inclusions of Mn-Zn and Ni-Zn spinel ferrites with the same initial magnetic permeability (grades 2000NM and 2000NN, respectively) and different electrical resistance are presented. Four matrix materials, polymer and ceramic dielectrics with a different dielectric permittivity were used in the experiments: polystyrene (PS525), polyvinylidene fluoride (grade F2MB), lead zirconate titanate (ZTS-21), and barium titanate (TBK-3). Experimental samples of composites were obtained by hot (for a polymer matrix) or cold pressing with a binder (in case of ferroelectric ceramic matrix). It has been shown that the microwave-absorbing properties of the resulting composites significantly depend on the electrical properties of the dielectric matrix and the electrical resistivity of the filler. The highest attenuation of electromagnetic waves of 25–27 dB in the frequency range 4–5 GHz is observed for ferrite-polymer composites with a semiconductor filler of 2000NM with a thickness of microwave-absorbing material of 6 mm. For composites with Mn-Zn ferrite filler, a pronounced shift in the dispersion region of magnetic permeability is also observed, which in turn changes the frequency position of peak radio absorption. For the composites with a ferroelectric matrix, the operating frequency range for both fillers shifted to the low-frequency region 1–4 GHz with a maximum attenuation of up to 22 dB at the same thickness. It was experimentally confirmed that at a concentration of ferrite $C_m = 40$ % wt., the value of the frequency of absorption peak center f_c and the minimum value of the reflection loss K_{ref} for a filler with high electrical resistance of 2000NN decrease with an increase in the dielectric constant of the matrix. As for the composites with a 2000NM filler, the K_{ref}^{min} (ϵ' of the matrix) dependence passes through a minimum. The obtained composites can be considered as effective microwave-absorbing materials for the frequency range 1–6 GHz with peak attenuation of the electromagnetic wave in the range 14–27 dB and frequency band (less than 10 dB) in the range 1.1–2.5 GHz.

Keywords: ferrite-dielectric composites; Ni-Zn-ferrite-spinel 2000NN; Mn-Zn-ferrite-spinel 2000NM; radio-absorbing materials; matrix; filler; magnetic permeability; permittivity; electrical resistivity.

Введение

Задача получения композитных материалов актуальна вследствие необходимости разработки новых материалов с уникальными функциональными и конструкционными свойствами [1, 2]. Одни из доминирующих в производстве и изучении композиционных материалов — полимерные композиционные материалы (ПКМ), в которых полимеры выступают в качестве матриц, связывающих различные армирующие или функциональные наполнители в виде сфер, эллипсоидов, нитей, пластин, волокон и др. [1–3]. Результирующие характеристики ПКМ зависят от большого количества технологических параметров получения и отдельных свойств компонентов, но в первом приближении можно выделить следующие: распределение включений по объему матрицы и концентрация включений.

Необходимость получения ПКМ, способных поглощать или экранировать электромагнитное излучение (ЭМИ), очевидна из-за проблем с электромагнитной совместимостью компонентов в электронной аппаратуре, электромагнитным загрязнением окружающей среды и др. [3, 4]. Функциональные свойства радиопоглощающих ПКМ в СВЧ-диапазоне ЭМИ (ослабление, полоса поглощения, пиковое значение ослабления) зависят от таких физических параметров, как комплексные диэлектрическая ϵ^* и магнитная μ^* проницаемости, электропроводность σ . Анализируя частотные спектры данных параметров,

можно с приемлемой точностью прогнозировать радиопоглощающие характеристики материала. Отметим, что высокие значения ϵ^* и μ^* могут указывать на интенсивные процессы поляризации и намагничивания, при которых часть электромагнитной энергии расходуется на переориентацию диполей. Высокое значение σ может обуславливать возникновение вихревых токов в материале, что также способствует улучшению радиопоглощающих характеристик.

Радиопоглощающие характеристики ПКМ меняются при наличии включений. Так, включение в состав ПКМ магнитных окислов — ферритов [4, 5] — значительно повышает магнитные потери, особенно при частоте естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР). Ферритовая керамическая технология позволяет получать большую номенклатуру различных составов с широким диапазоном магнитных свойств [6], что дает возможность создавать огромное количество радиопоглощающих композитов (РПК) с включениями из ферритов. С использованием керамической технологии могут производиться как порошки, так и объемные изделия, которые можно измельчать (например, бракованные изделия). Кроме того, наночастицы или ультрадисперсные частицы ферритов [7, 8] также могут использоваться в качестве включений в РПК на основе полимеров. Заметим, что синтез наноматериалов в большинстве случаев достаточно сложен, а их практическое применение ограничено из-за до-

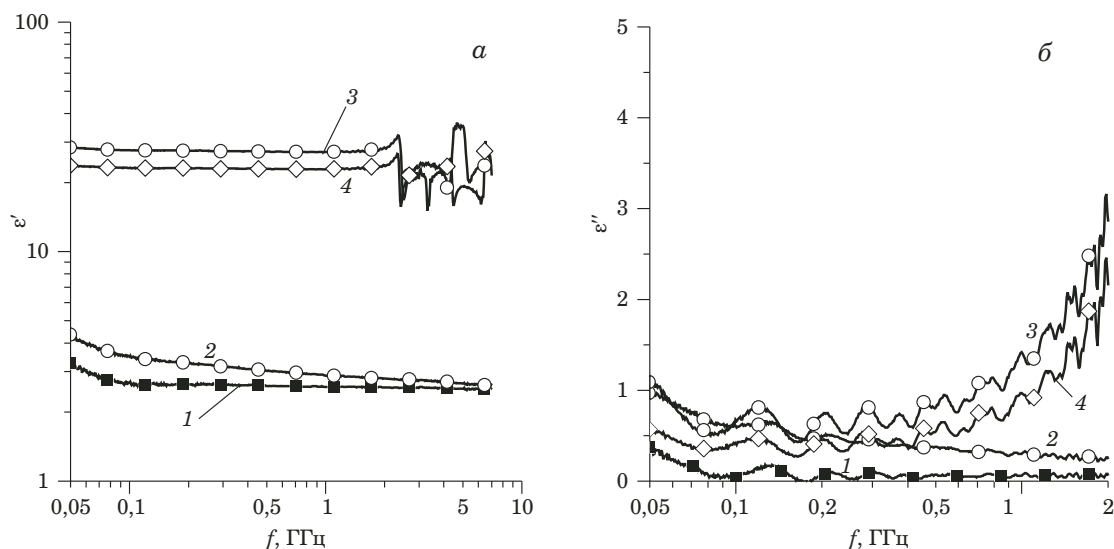


Рис. 1. Высокочастотные спектры действительной ϵ' (а) и мнимой ϵ'' (б) частей диэлектрической проницаемости диэлектриков ПС525 (1), Ф2МВ (2), ЦТС (3), ТВК-3 (4)

Fig. 1. High-frequency spectra of the real ϵ' (a) and imaginary ϵ'' (b) parts of the dielectric permittivity of PS525 (1), F2MV (2), CTS (3), TBK-3 (4) dielectrics

роговизны и сложности процессов получения наполнителей.

Ферриты — высокостабильные, стойкие к атмосферным воздействиям и электромагнитному излучению материалы. В качестве полимерных матриц часто применяют термо- (полистирол, полиэтилен, поливинилхлорид, полипропилен, поливиниловый спирт) и реактопластичные (эпоксидная смола) полимеры с низкой электропроводностью и выраженной гидрофобностью и стойкостью к внешним воздействиям соответственно.

Эффективным наполнителем для РПК могут служить оксидные сегнетоэлектрики, например, титанат бария BaTiO_3 [9, 10]. В таких материалах существование электрических диполей обуславливает процессы поляризации, которые могут давать существенный вклад в диэлектрические потери. При смешивании магнитных или электропроводящих добавок с сегнетоэлектрическими включениями возможно возникновение синергетического эффекта повышенного радиопоглощения.

Поиск оптимальных соотношений комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей осуществляют математически [11]. Вместе с тем экспериментальные данные зависимостей радиопоглощающих характеристик от диэлектрической проницаемости представляют интерес прежде всего с практической точки зрения.

Цель работы — исследование влияния массовой доли ферритового наполнителя, его электрических свойств на электромагнитные и радиопоглощающие свойства феррит-диэлектрических композитов.

Материалы, методика

В качестве исходных компонентов использовали промышленные ферриты марок 2000НН и 2000НМ (химические составы: $\text{Ni}_{0,32}\text{Zn}_{0,68}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и $\text{Mn}_{0,58}\text{Zn}_{0,26}\text{Fe}_{0,16}\text{Fe}_2\text{O}_4$), в качестве матриц для композитов — полистирол ПС525, поливинилиденфторид (ПВДФ) Ф2МВ и сегнетоэлектрическую керамику ТВК-3 (состав: $\text{Ba}_{0,9}\text{Ca}_{0,1}\text{TiO}_3 + 0,5\text{CoO}$) и ЦТС-21 (состав: $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,4}\text{Ti}_{0,6})\text{O}_3$). Отметим, что сополимер ПВДФ марки Ф2МВ (состав: $-\text{[CH}_2\text{-CF}_2\text{]}_n\text{-[CF}_2\text{-CF}_2\text{]}_m\text{-}$, где $n = 71$, $m = 29$), как полимерный материал, широко применяют при разработке композитов, поскольку он, помимо сегнетоэлектрических свойств, обладает высокими конструкционными характеристиками [12 – 15].

Электромагнитные и радиопоглощающие свойства композитов исследовали на образцах в виде колец (внешний и внутренний диаметры — 16 и 7 мм, толщина — 6 мм). Кольца с матрицами из полимеров изготавливали следующим образом: порошки полимеров и феррита смешивали механически до получения однородной смеси, смесь после загрузки в пресс-форму из нержавеющей стали прессовали до давления 100 МПа и прогревали в течение 10 мин при температуре 200 °С (для полистирола — 90 °С). В случае композитов, в которых роль матрицы выполнял порошок сегнетоэлектрика, порошки пьезокерамики и феррита смешивали со связкой из водного раствора поливинилового спирта. Полученную смесь также прессовали (без воздействия температуры) с последующей сушкой при 60 °С.

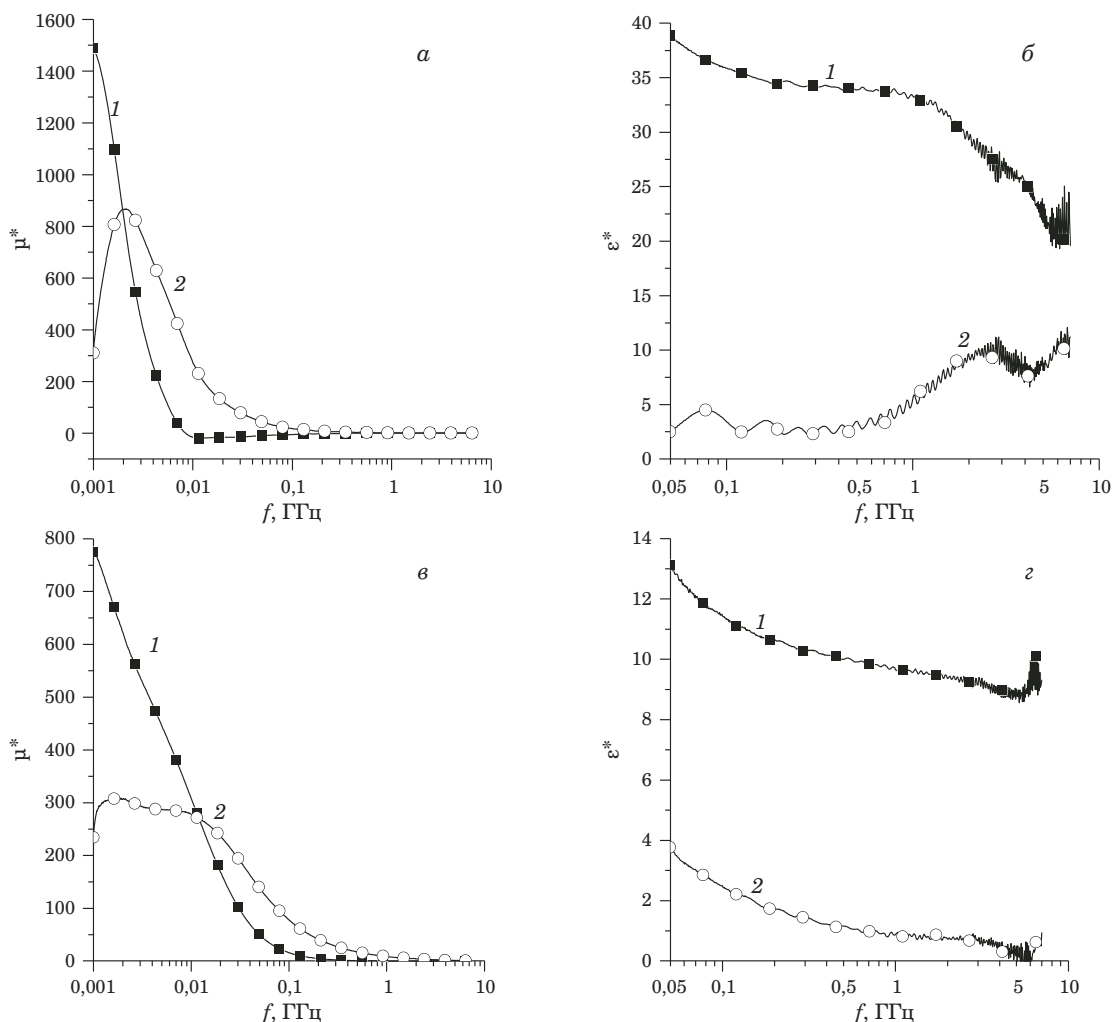


Рис. 2. Высокочастотные спектры комплексных магнитной μ^* и диэлектрической ε^* проницаемостей (действительная (1) и мнимая (2) части) ферритмагнетиков 2000NM (а, б) и 2000NN (в, г) соответственно

Fig. 2. High-frequency spectra of complex magnetic μ^* and dielectric ε^* permittivity (real (1) and imaginary (2) parts) of ferrimagnets 2000NM (a, b) and 2000NN (c, d), respectively

Обсуждение результатов

В качестве матриц использовали диэлектрические материалы — изоляторы (ПС525 — неполярный диэлектрик со слабым дипольным моментом) и сегнетоэлектрики (Ф2МВ, ТВК, ЦТС). Оксиды со структурой перовскита имеют выраженные сегнетоэлектрические свойства (после поляризации керамики), высокое значение диэлектрической проницаемости и точку Кюри $\sim 120^\circ\text{C}$ [16].

Частотные спектры диэлектрической проницаемости применяемых диэлектриков показаны на рис. 1. Видно, что значение диэлектрической проницаемости полимеров в 10 раз меньше, чем у керамических оксидных сегнетоэлектриков из-за наличия диполей в кристаллической решетке, созданных ее искажением. В рассматриваемом диапазоне частот выраженной дисперсии диэлектрической проницаемости не наблюдали. Как известно, релаксационная поляризация (ди-

польная, тепловая) в сегнетоэлектриках и полимерах приходится на диапазон $1 - 10^6$ Гц. По этой причине отсутствуют заметные частотные изменения значений ε' . Изменение диэлектрической проницаемости в диапазоне $2 - 7$ ГГц у образцов ТВК-3 и ЦТС-21 связано с резонансными процессами в измерительной ячейке.

Анализ спектров магнитной и диэлектрической проницаемостей показывает, что электрические свойства ферритового наполнителя и концентрация наполнителя влияют на вид частотных спектров композитов и значения ε^* , μ^* . Эти особенности, в свою очередь, определяют радиопоглощающие характеристики композитов.

Электрические свойства наполнителей характеризуются тем, что применяемый Mn-Zn-феррит можно отнести к полупроводникам (электропроводность на постоянном токе — 1 См/м), а Ni-Zn-феррит — к диэлектрикам (электропроводность на постоянном токе — $1,7 \cdot 10^{-7} \text{ См/м}$). Это

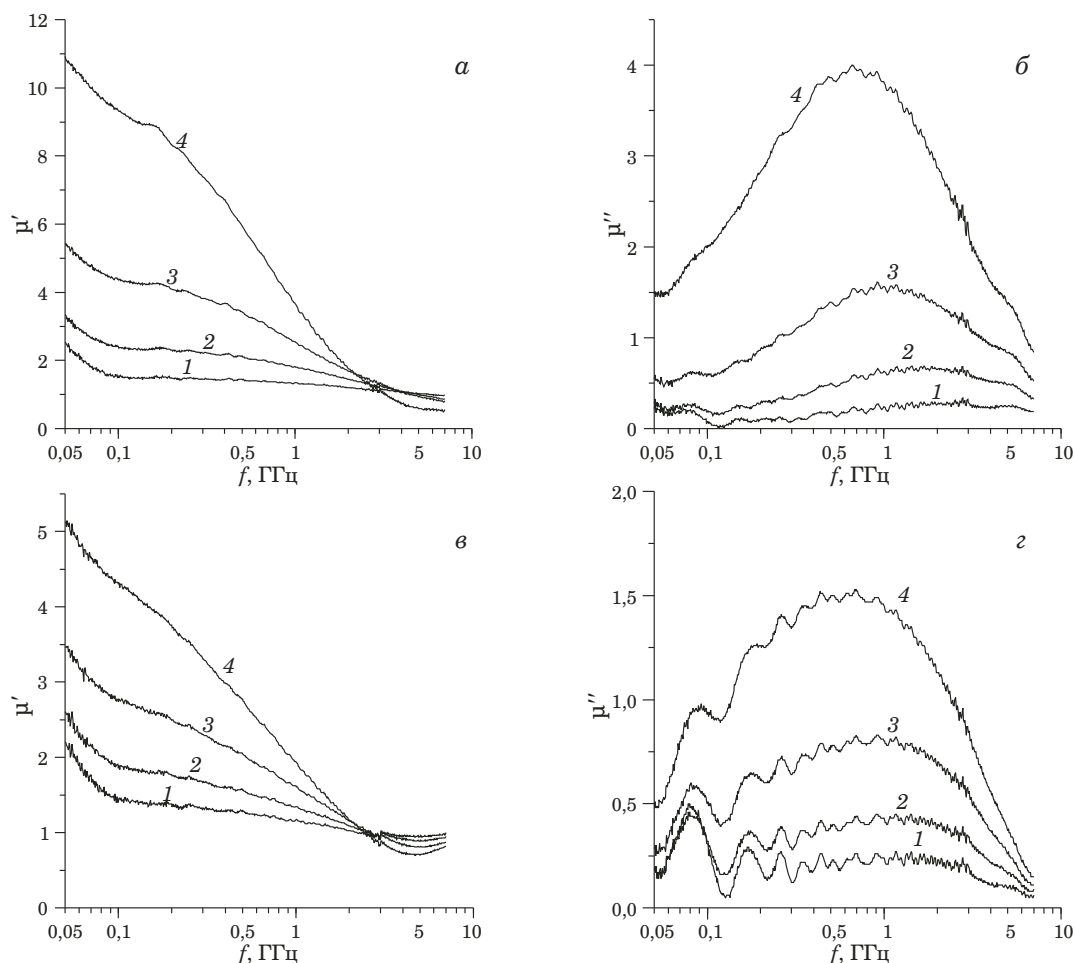


Рис. 3. Частотные зависимости действительной μ' и мнимой μ'' частей магнитной проницаемости композитов Ф2МВ/2000НМ (а, б) и Ф2МВ/2000НН (в, г) (концентрация — 20 (1), 40 (2), 60 (3), 80% (4))

Fig. 3. Frequency dependences of the real μ' and imaginary μ'' parts of the magnetic permeability of composites F2MV/2000NM (a, b) and F2MV/2000NN (c, d) (concentration — 20 (1), 40 (2), 60 (3), 80% (4))

связано с наличием в составе Mn-Zn-феррита ионов Fe^{2+} , которые увеличивают проводимость (прыжковый механизм Вервея) [17].

На рис. 2 приведены спектры диэлектрической и магнитной проницаемостей ферритовых колец 2000НМ и 2000НН. Несмотря на одинаковые значения начальной проницаемости, высокочастотные магнитные проницаемости сильно различаются. Уменьшение магнитной проницаемости с увеличением частоты ЭМИ связано с отставанием следования магнитных моментов за переменным полем. Особенно выражен спад при резонансном процессе (ЕФМР и резонансе доменных границ).

Измеренная начальная магнитная проницаемость на керамических кольцах 2000НМ и 2000НН составила 1755 и 2041 (коэрцитивная сила по индукции — ~ 15 А/м, индукция насыщения — 0,24 и 0,16 Тл). Резкий спад диэлектрической проницаемости ϵ' для феррита 2000НМ может быть вызван влиянием вихревых токов или превышением частоты перескоков между ионами

Fe^{2+} и Fe^{3+} [18]. Поскольку ферритовая керамика характеризуется такими параметрами, как начальная магнитная проницаемость, индукция насыщения, коэрцитивная сила, можно утверждать, что использовались ферритовые материалы с практически одинаковыми магнитными характеристиками.

Отметим, что по сравнению со спектрами магнитной проницаемости ферритовой керамики в композитах наблюдается частотный сдвиг области дисперсии $\mu^*(f)$. В композитах с включениями из Mn-Zn-феррита при высоких концентрациях ($C_m > 60\%$) также фиксируется слабо выраженная дисперсия $\epsilon^*(f)$ [19 – 22].

Спектры магнитной проницаемости для составов Ф2МВ/2000НМ и Ф2МВ/2000НН представлены на рис. 3. Видно, что для композита с магнитными включениями из 2000НМ (см. рис. 3, б) частота дисперсии, оцениваемая по максимуму значения μ'' , заметно смещается в область низких частот. Заметим, что для композитов с ПС525 особенности частотных спектров

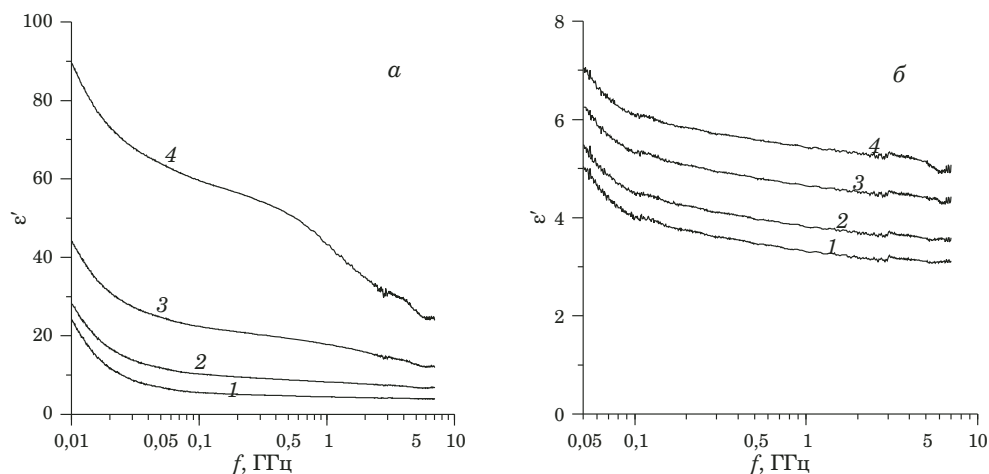


Рис. 4. Частотные спектры диэлектрической проницаемости ϵ' композитов Ф2МВ/2000НМ (а) и Ф2МВ/2000НН (б) (концентрация — 20 (1), 40 (2), 60 (3), 80 % (4))

Fig. 4. Frequency spectra of the dielectric permittivity ϵ' of composites F2MB/2000NM (a) and F2MB/2000NN (b) (concentration — 20 (1), 40 (2), 60 (3), 80% (4))

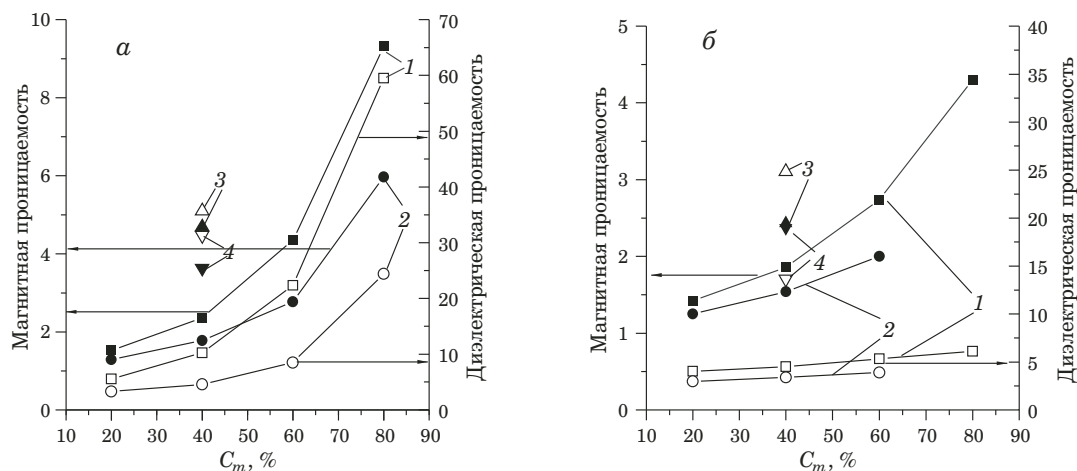


Рис. 5. Зависимости магнитной и диэлектрической проницаемостей от концентрации C_m в композитах Ф2МВ (1), ПС525 (2), ЦТС-21 (3) и ТВК-3 (4) на частоте $f = 100$ МГц (наполнитель — феррит 2000НМ (а) и 2000НН (б))

Fig. 5. Dependences of the magnetic and dielectric permittivity on the concentration C_m in composites F2MV (1), PS525 (2), CTS-21 (3) and TVK-3 (4) at a frequency of $f = 100$ MHz (filler — ferrite 2000NM (a) and 2000NN (b))

схожи, однако имеется различие в значении магнитной проницаемости.

Электрические свойства ферритовых включений могут влиять на вид спектров диэлектрической проницаемости. Как показано на рис. 4, частотные зависимости для Ф2МВ/2000НМ демонстрируют слабовыраженную зависимость от частоты в диапазоне 1 – 7 ГГц. Особенно это проявляется для высоких концентраций.

Зависимости магнитной и диэлектрической проницаемостей от концентрации на частоте 100 МГц представлены на рис. 5. Для комплексной магнитной проницаемости композитов можно отметить, что значения μ' различаются при фиксированных концентрациях из-за разного заполнения объема включениями и особенностей

распределения компонентов. При выбранном способе смешения не удастся полностью избежать соприкосновения между собой ферритовых включений, что приводит к электрической и магнитной перколяции. Вследствие этого количество сквозных каналов через толщину композита может быть разным, что влияет на значения проницаемостей в СВЧ-области. Из-за более высоких значений ϵ' Mn-Zn-феррита в композитах с его добавлением наблюдается более выраженный рост этого параметра с увеличением концентрации.

На рис. 6 показаны спектры коэффициента отражения на металлической пластине полученных композитов (толщина — 6 мм). Для композита ПС525/2000НН ослабление не превышает

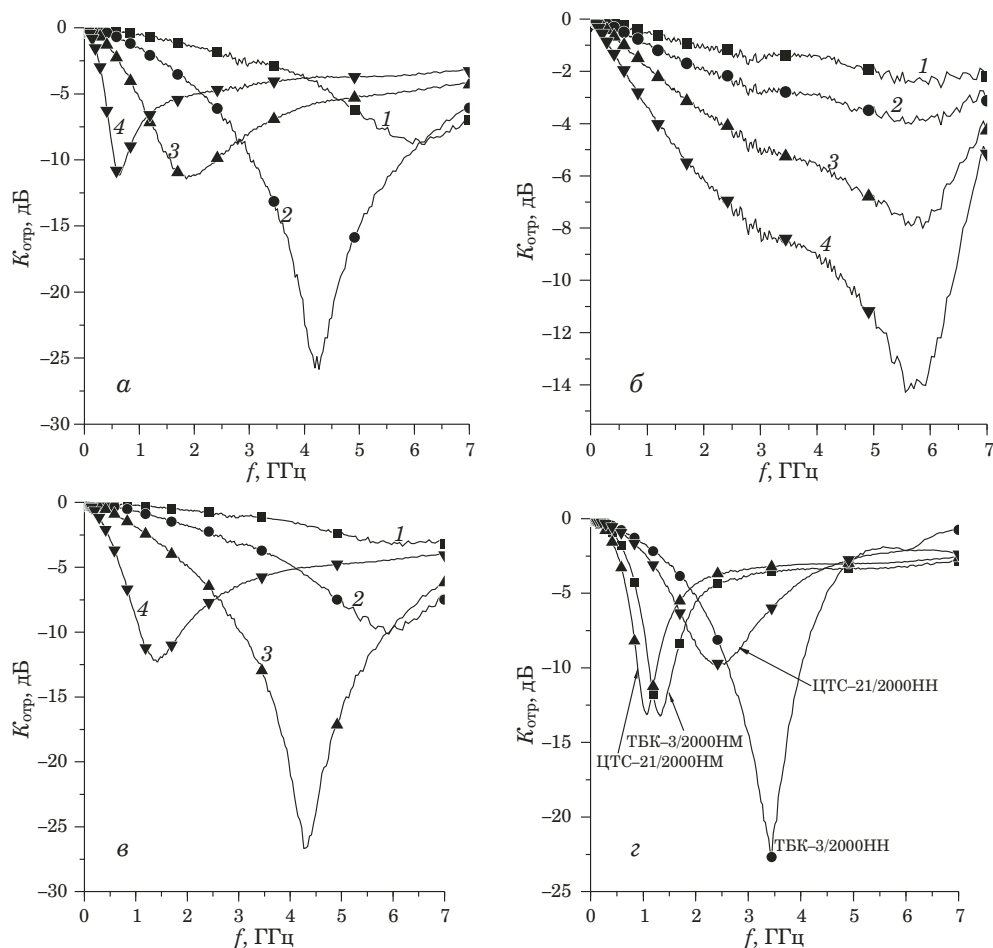


Рис. 6. Частотные спектры коэффициента отражения $K_{отр}$ композитов Ф2МВ/2000НМ (а), Ф2МВ/2000НН (б), ПС525/2000НМ (в), ТВК-3 и ЦТС-21 при $C_m = 40\%$ (г) (концентрация — 20 (1), 40 (2), 60 (3), 80% (4))

Fig. 6. Frequency spectra of the reflection coefficient of composites F2MV/2000NM (a), F2MV/2000NN (b), PS525/2000NM (c), ТВК-3 and CTS-21 at $C_m = 40\%$ (d) (concentration — 20 (1), 40 (2), 60 (3), 80% (4))

5 дБ для всех концентраций, поэтому спектры $K_{отр}(f)$ не приводятся.

Получили, что наиболее выраженными радиопоглощающими характеристиками обладают композиты: Ф2МВ/2000НМ, $C_m = 40\%$ ($K_{отр}^{мин} = -26$ дБ, $f_{ц} = 4,1$ ГГц, $\Delta f(-10$ дБ) = 2,5 ГГц); Ф2МВ/2000НН, $C_m = 80\%$ ($K_{отр}^{мин} = -14$ дБ, $f_{ц} = 5,8$ ГГц, $\Delta f(-5$ дБ) = 5,5 ГГц); ПС525/2000НМ, $C_m = 60\%$ ($K_{отр}^{мин} = -27,5$ дБ, $f_{ц} = 4,3$ ГГц, $\Delta f(-10$ дБ) = 2,5 ГГц); ТВК-3/2000НН ($K_{отр}^{мин} = -23$ дБ, $f_{ц} = 3,5$ ГГц, $\Delta f(-10$ дБ) = 1,1 ГГц). Схожие спектры коэффициента отражения имеют композиты ПС525/2000НМ и Ф2МВ/2000НМ при $C_m = 40$ и 60% соответственно. Однако определение кажущейся плотности колец показало, что плотность композита Ф2МВ/2000НМ составляет 3,08, в то время как ПС525/2000НМ — 3,4 г/см³. Учитывая это, можно утверждать, что, как радиопоглощающий материал (РПМ), выгоднее использовать композит с матрицей из Ф2МВ, поскольку для РПМ предпочтительно быть максимально легковесными. Отметим также смеще-

ние центра пика $f_{ц}$ для композитов с проводящим Mn-Zn-ферритом с увеличением концентрации. В случае Ni-Zn-феррита смещение пика не наблюдалось.

С использованием спектров коэффициента отражения на металлической пластине для колец композитов получали зависимости некоторых параметров этих спектров от диэлектрической проницаемости матрицы. Зависимости $K_{отр}^{мин}$, $K_{отр}$ при фиксированной частоте 0,1 ГГц и положения центра минимума поглощения $f_{ц}$ от диэлектрической проницаемости ϵ' матрицы приведены на рис. 7 ($C_m = 40\%$). Видно, что пиковое значение $K_{отр}^{мин}$ проходит через минимум, однако положение минимума различно для композитов с Mn-Zn- и Ni-Zn-ферритом. Для зависимости $f_{ц}$ в случае композитов с включениями из 2000НМ падение кривой более выражено. Отметим также, что в композитах с Ni-Zn-ферритом $K_{отр}$ при частотах >3 ГГц слабо зависит от ϵ' матрицы, а для композитов с Mn-Zn-ферритом наблюдается спад кривой $K_{отр}(\epsilon')$ при частотах до 1 ГГц.

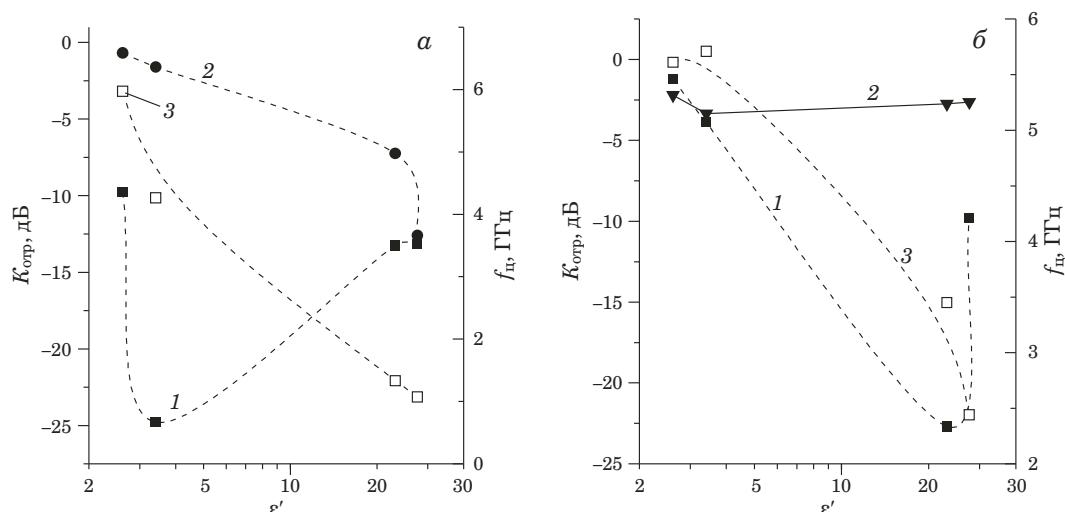


Рис. 7. Зависимости параметров спектров $K_{\text{отр}}(f)$ от диэлектрической проницаемости ϵ' матрицы (наполнитель 2000NM (а) и 2000NN (б)): 1 — $K_{\text{отр}}^{\text{мин}}$; 2 — $K_{\text{отр}}$ при фиксированной частоте 0,1 ГГц; 3 — положение минимума поглощения $f_{\text{ц}}$

Fig. 7. Dependences of the parameters of $K_{\text{ref}}(f)$ spectra on the dielectric permittivity ϵ' of the matrix (filler 2000NM (a) and 2000NN (b)): 1 — $K_{\text{ref}}^{\text{min}}$; 2 — K_{ref} at a fixed frequency 0.1 GHz; 3 — position of the minimum absorption f_c

Заключение

Анализ электрофизических и радиопоглощающих свойств феррит-диэлектрических композитов показывает, что электромагнитные свойства таких композитов в значительной степени определяются электрофизическими свойствами ферритовых включений. Высокая электропроводность Mn-Zn-феррита обуславливает выраженную зависимость ϵ' от концентрации включений и частотный сдвиг области дисперсии магнитной проницаемости. Данные особенности электромагнитных характеристик, в свою очередь, влияют на радиопоглощение в полученных образцах. Вместе с тем радиопоглощающие свойства композитов зависят также от диэлектрических свойств матрицы. Можно утверждать, что для композиций с 2000NN и 2000NM имеется определенное значение диэлектрической проницаемости матрицы, позволяющее максимизировать радиопоглощающие характеристики. Для композитов с наполнителем из Mn-Zn-феррита при диэлектрической проницаемости матрицы 2,5 – 3 и массовой концентрации $C_m = 40 - 60 \%$ пиковое ослабление может достигать 25 дБ на частоте 4,2 ГГц. С увеличением концентрации феррита марки 2000NM и ростом диэлектрической проницаемости матрицы радиопоглощающие свойства композитов ухудшаются. Для композитов на основе 2000NN при значениях ϵ' матрицы 2,5 – 3 выраженными радиопоглощающими свойствами характеризуются только композиты с $C_m = 80 \%$. Отличными характеристиками обладает композит ТВК-3/2000NN, у которого минимальный коэффициент отражения достигает – 22 дБ на частоте 3,5 ГГц. Таким образом, серии полученных

композитов можно рассматривать как радиопоглощающие материалы для диапазона частот 1 – 6 ГГц с максимальным ослаблением электромагнитного излучения в диапазоне 14 – 27 дБ и рабочей полосой частот (менее 10 дБ) в диапазоне 1,1 – 2,5 ГГц.

Финансирование

Работа выполнена за счет средств проекта К7-2022-053 (программы развития НИТУ «МИСИС» на 2021 – 2030 гг. и стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. — СПб.: Научные основы и технологии, 2010. — 822 с.
2. Михайлин Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы. — СПб.: Научные основы и технологии, 2008. — 660 с.
3. Sankaran S., Deshmukh K., Ahamed M., Khadheer Pasha S. Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of metal and carbon filler reinforced flexible polymer composites: a review / Compos. — A: Appl. Sci. 2018. Vol. 114. P. 49 – 71. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.08.006
4. 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. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-6-31-45
5. Houbi A., Aldashevich Z., Atassi Y., et al. Microwave absorbing properties of ferrites and their composites: a review / J. Magn. Magn. Mater. 2021. Vol. 529. P. 167839. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.167839
6. Лелюк Л. М., Костишин В. Г., Гончар А. Н. Технология ферритовых материалов магнитоэлектроники. — М.: МИСИС, 2005. — 352 с.

7. **Pullar R. C.** Hexagonal ferrites: a review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics / *Prog. Mater. Sci.* 2012. Vol. 57. N 7. P. 1191 – 1334. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2012.04.001
8. **Narang S., Pubby K.** Nickel Spinel Ferrites: a review / *J. Magn. Magn. Mater.* 2021. Vol. 519. P. 167163. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167163
9. **Meng X., Zhang X., Lu C., et al.** Enhanced absorbing properties of three-phase composites based on a thermoplastic-ceramic matrix (BaTiO₃ + PVDF) and carbon black nanoparticles / *J. Mater. Chem. A.* 2014. Vol. 2. P. 18725. DOI: 10.1039/C4TA04493B
10. **Mandal A., Kumar Das C.** Effect of BaTiO₃ on the Microwave Absorbing Properties of Co-Doped Ni-Zn Ferrite Nanocomposites / *J. Appl. Polym. Sci.* 2014. Vol. 131. P. 39926. DOI: 10.1002/app.39926
11. **Kim S. S., Jo S. B., Gueon K. I., et al.** Complex Permeability and Permittivity and Microwave Absorption of Ferrite-Rubber Composite in X-band Frequencies / *IEEE Trans. Magn.* 1991. Vol. 6. N 27. P. 5462 – 5464. DOI: 10.1109/20.278872
12. **Кочервинский В. В.** Структура и свойства блочного поливинилиденфторида и систем на его основе / *Усп. хим.* 1996. Т. 10. С. 936 – 987. DOI: 10.1070/rc1996v065n10abeh000328
13. **Saxena P., Shukla P.** A comprehensive review on fundamental properties and applications of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) / *Adv. Compos. Hybrid. Mater.* 2021. Vol. 4. P. 8 – 26. DOI: 10.1007/s42114-021-00217-0
14. **Ruan L., Yao X., Chang Y., et al.** Properties and Applications of the β Phase Poly(vinylidene fluoride) / *Polymers.* 2018. Vol. 10. P. 228. DOI: 10.3390/polym10030228
15. **Martins P., Lopes A., Lanceros-Mendez S.** Electroactive phases of poly(vinylidene fluoride): Determination, processing and applications / *Prog. Polym. Sci.* 2014. Vol. 39. P. 683 – 706. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.07.006
16. **Panda P., Sahoo B.** PZT to Lead Free Piezo Ceramics: A Review / *Ferroelectrics.* 2015. Vol. 474. N 1. P. 128 – 143. DOI: 10.1080/00150193.2015.997146
17. **Крупичка С.** Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. Т. 2. — М.: Мир, 1976. — 491 с.
18. **Parashar J., Saxena V., Bhatnagar D., Sharma K.** Dielectric behaviour of Zn substituted Cu nano-ferrites / *J. Magn. Magn. Mater.* 2015. Vol. 394. P. 105 – 110. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.06.044
19. **Лопатин А., Казанцева Н., Казанцев Ю. и др.** Эффективность использования магнитных полимерных композитов в качестве радиопоглощающих материалов / *Радиотехника и электроника.* 2008. Т. 53. № 5. С. 517 – 526. DOI: 10.1134/S106422690805001X
20. **Kazantseva N. E.** Magnetic particle-filled polymer microcomposites / *Polymer Composites.* 2012. P. 613 – 672.
21. **Tsutaoka T.** Frequency dispersion of complex permeability in Mn-Zn and Ni-Zn spinel ferrites and their composite materials / *J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 93. N 5. P. 2789 – 2796. DOI: 10.1063/1.1542651
22. **Исаев И. М., Костишин В. Г., Шакирязов Р. И. и др.** Радиопоглощающие и радиоэкранирующие характеристики феррит-полимерных композитов Mn-Zn феррит/П (ТФЭ-ВДФ) / *ЖТФ.* 2022. Т. 92. № 3. С. 462 – 471. DOI: 10.21883/JTF.2022.03.52142.242-21
2018. Vol. 114. P. 49 – 71. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.08.006
4. **Kostishin V. G., Shakirzyanov R. I., Isaev I. M., Salogub D. V.** Study of radar absorbing characteristics of polymer composites with ferrite fillers / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2022. Vol. 88. N 6. P. 31 – 45 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-6-31-45
5. **Houbi A., Aldashevich Z., Atassi Y., et al.** Microwave absorbing properties of ferrites and their composites: a review / *J. Magn. Magn. Mater.* 2021. Vol. 529. P. 167839. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.167839
6. **Letyuk L. M., Kostishin V. G., Gonchar A. N.** Technology of ferrite materials of magnetoelectronics. — Moscow: MISiS, 2005. — 352 p. [in Russian].
7. **Pullar R. C.** Hexagonal ferrites: a review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics / *Prog. Mater. Sci.* 2012. Vol. 57. N 7. P. 1191 – 1334. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2012.04.001
8. **Narang S., Pubby K.** Nickel Spinel Ferrites: a review / *J. Magn. Magn. Mater.* 2021. Vol. 519. P. 167163. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167163
9. **Meng X., Zhang X., Lu C., et al.** Enhanced absorbing properties of three-phase composites based on a thermoplastic-ceramic matrix (BaTiO₃ + PVDF) and carbon black nanoparticles / *J. Mater. Chem. A.* 2014. Vol. 2. P. 18725. DOI: 10.1039/C4TA04493B
10. **Mandal A., Kumar Das C.** Effect of BaTiO₃ on the Microwave Absorbing Properties of Co-Doped Ni-Zn Ferrite Nanocomposites / *J. Appl. Polym. Sci.* 2014. Vol. 131. P. 39926. DOI: 10.1002/app.39926
11. **Kim S. S., Jo S. B., Gueon K. I., et al.** Complex Permeability and Permittivity and Microwave Absorption of Ferrite-Rubber Composite in X-band Frequencies / *IEEE Trans. Magn.* 1991. Vol. 6. N 27. P. 5462 – 5464. DOI: 10.1109/20.278872
12. **Kochervinsky V. V.** Structure and properties of block polyvinylidene fluoride and systems based on it / *Russ. Chem. Rev.* 1996. Vol. 65. P. 865. DOI: 10.1070/rc1996v065n10abeh000328
13. **Saxena P., Shukla P.** A comprehensive review on fundamental properties and applications of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) / *Adv. Compos. Hybrid. Mater.* 2021. Vol. 4. P. 8 – 26. DOI: 10.1007/s42114-021-00217-0
14. **Ruan L., Yao X., Chang Y., et al.** Properties and Applications of the β Phase Poly(vinylidene fluoride) / *Polymers.* 2018. Vol. 10. P. 228. DOI: 10.3390/polym10030228
15. **Martins P., Lopes A., Lanceros-Mendez S.** Electroactive phases of poly(vinylidene fluoride): Determination, processing and applications / *Prog. Polym. Sci.* 2014. Vol. 39. P. 683 – 706. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.07.006
16. **Panda P., Sahoo B.** PZT to Lead Free Piezo Ceramics: A Review / *Ferroelectrics.* 2015. Vol. 474. N 1. P. 128 – 143. DOI: 10.1080/00150193.2015.997146
17. **Krupichka S.** Physics of ferrites and related magnetic oxides. — Moscow: Mir, 1976. — 491 p. [in Russian].
18. **Parashar J., Saxena V., Bhatnagar D., Sharma K.** Dielectric behaviour of Zn substituted Cu nano-ferrites / *J. Magn. Magn. Mater.* 2015. Vol. 394. P. 105 – 110. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.06.044
19. **Lopatin A., Kazantseva N., Kazantsev Yu., et al.** The efficiency of application of magnetic polymer composites as radio-absorbing materials / *J. Commun. Technol. Electron.* 2008. Vol. 53. N 5. P. 487 – 496. DOI: 10.1134/S106422690805001X
20. **Kazantseva N. E.** Magnetic particle-filled polymer microcomposites / *Polymer Composites.* 2012. P. 613 – 672.
21. **Tsutaoka T.** Frequency dispersion of complex permeability in Mn-Zn and Ni-Zn spinel ferrites and their composite materials / *J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 93. N 5. P. 2789 – 2796. DOI: 10.1063/1.1542651
22. **Isaev I. M., Kostishin V. G., Shakirzyanov R. I., et al.** Radar absorbing and shielding characteristics in ferrite-polymer composites Mn-Zn ferrite/P(TFE-VDF) / *J. Tech. Phys.* 2022. Vol. 92. N 3. P. 462 – 471 [in Russian]. DOI: 10.21883/TP.2022.03.53269.242-21

REFERENCES

1. **Mikhailin Yu. A.** Structural polymer composite materials. — St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2008. — 822 p. [in Russian].
2. **Mikhailin Yu. A.** Special polymer composite materials. — St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2008. — 660 p. [in Russian].
3. **Sankaran S., Deshmukh K., Ahamed M., Khadheer Pasha S.** Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of metal and carbon filler reinforced flexible polymer composites: a review / *Compos.* — A: Appl. Sci.