

11 Радиопоглощающие свойства феррит-полимерных композитов поливиниловый спирт/Ni–Zn феррит

© В.Г. Костишин, И.М. Исаев, Р.И. Шакирзянов, Д.В. Салогуб, А.Р. Каюмова, В.К. Олицкий

Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“,
119049 Москва, Россия
e-mail: drvgkostishyn@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 июля 2021 г.
В окончательной редакции 1 сентября 2021 г.
Принято к публикации 2 сентября 2021 г.

Изучены электромагнитные и радиопоглощающие свойства композитов с матрицей из поливинилового спирта с ферритовыми и токопроводящими включениями. В качестве основного наполнителя использовали порошок Ni–Zn-феррита шпинели марки 2000НН состава $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$. Показано, что полученные композиты обладают эффективным радиопоглощением в диапазоне частот 2–5 GHz с пиковыми значениями коэффициента отражения на металлической пластине менее –20 dB. На основе анализа спектров диэлектрической проницаемости, спектров магнитной проницаемости и рассчитанных спектров коэффициента отражения установлены критические факторы поглощения электромагнитных волн в полученных композитах.

Ключевые слова: полимерный композит, радиопоглощение, никель-цинковый феррит, поливиниловый спирт.

DOI: 10.21883/JTF.2022.01.51862.217-21

Введение

Широкое использование спутникового вещания, мобильной связи и телекоммуникационных систем в повседневной жизни человека создает повышенный уровень электромагнитного излучения (ЭМИ). Электромагнитные помехи (ЭМП) и электромагнитное загрязнение, вызванные повышенным фоном ЭМИ, являются наиболее актуальными проблемами XXI века. ЭМП могут понизить срок службы и долговечность электронных устройств, а электромагнитное загрязнение способно негативно влиять на жизнедеятельность живых организмов [1,2]. Для решения проблем с ЭМП активно разрабатываются материалы, поглощающие или экранирующие ЭМИ. Феррит-полимерные композиты, в особенности на основе ферритов-шпинелей, являются хорошими кандидатами на материалы, поглощающие ЭМИ [3,4]. Ферромагнетики обладают высокой намагниченностью насыщения, высокой диэлектрической и магнитной проницаемостями, что увеличивает потери композитных материалов и улучшает радиопоглощающие характеристики. Композиты с полимерной матрицей, содержащие ферриты, полупроводники (графен, металлические наночастицы), обладают выраженными радиопоглощающими и радиоэкранирующими свойствами благодаря сочетанию различных механизмов поглощения: естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР), резонанса движения доменных границ (РДГ), потери на вихревые токи, на переполяризацию, многократные отражения [5,6]. Поскольку частота ЕФМР ферритов-шпинелей лежит в радиодиапазоне, который совпадает с рабочими частотами гражданских излучателей ЭМИ, ожидается, что композиты с ферритовыми включениями

будут эффективными поглотителями в гражданском секторе [7–12]. Кроме того, микроструктурные особенности магнитных композитов на основе полимеров могут сильно влиять на спектры поглощения: размер, форма и концентрация магнитных и проводящих композитов могут изменять тип частотной дисперсии диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемости, что влияет на частотное положение пика поглощения [13].

Поливиниловый спирт (ПВС) является полукристаллическим полимером с ненулевым дипольным моментом и высокой диэлектрической проницаемостью [14]. Ввиду своих уникальных свойств ПВС широко распространен. В современных исследованиях он часто используется в качестве биосовместимой полимерной матрицы, способной инкапсулировать наночастицы от сегрегации. Исследования, посвященные радиопоглощающим свойствам композитов на основе ПВС, проводились ранее. Так, в [15] композиты ПВС/восстановленный оксид графена/карбонильное железо получены смешиванием измельченного порошка железа с ПВС и оксидом графена. Данные композиты показывают отличные поглощающие свойства в микроволновом диапазоне (коэффициент отражения на металлической пластине $R_l = -35$ dB на частоте 12 GHz и полоса поглощения (ниже –10 dB) ~ 8 GHz), которые обусловлены присутствием карбонильного железа (магнитные потери) и равномерно распределенным оксидом графена (диэлектрические потери). В других работах, посвященных композитам ПВС/углерод/Fe [16,17], показано, что возможно получение материалов с высокими потерями на отражение в диапазоне частот 4–8 GHz с коэффициентом $R_l \sim -(20-30)$ dB. Выраженные экранирующие свойства наблюдались в гибком композите с нанодиска-

ми гексаферрита бария и сажей, внедренными в матрицу ПВС [18]. Эти композиты демонстрируют ослабление электромагнитных волн на 99.5% на интервале частот 8–18 GHz с преобладающими диэлектрическими и магнитными потерями.

В настоящей работе исследуются электромагнитные характеристики феррит-полимерного композита на основе ПВС и порошка феррита-шпинели марки 2000НН. Также производится анализ факторов, влияющих на поглощающие характеристики.

1. Объекты и методики экспериментальных исследований

Экспериментальные образцы были получены прессованием смеси порошков с нагревом. В качестве наполнителя для композитов использовали феррит-шпинель марки 2000НН с химическим составом $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Спеченные изделия Ni–Zn-феррита измельчали в мельнице до получения порошка феррита фракции $< 45 \mu\text{m}$. В качестве матрицы использовался полимерный порошок марки ПВС 16/1. Порошки предварительно перемешивали до получения однородной смеси и загружали в пресс-форму. Образцы получали в виде колец с внешним диаметром 16 mm, внутренним диаметром 7 mm и высотой $d = 5\text{--}7.5 \text{ mm}$ путем выдержки в течение 5 min при 150 МПа и температуре 190 °С.

Комплексная магнитная проницаемость μ_r^* , диэлектрическая проницаемость ϵ_r^* и спектры коэффициента отражения на металлической пластине R_I в диапазоне частот 0.01–7 GHz были измерены с помощью коаксиальной ячейки и векторного анализатора Rohde & Schwartz ZVL-13.

Состав полученных образцов представлен в табл. 1. Медная фольга и графит марки ГК-1 (сопротивление $4.5 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$) были использованы как проводящая добавка для композитов с массовыми долями 60 и 80% соответственно. Медная фольга, полученная деляминацией пленок толщиной $\sim 2 \mu\text{m}$ со стеклянных подложек, добавлялась в смесь порошков феррита и полимера в количестве 3% по массовой доле. Массовая доля графита ГК-1 составляла 5%.

Таблица 1. Состав экспериментальных образцов

Состав	Массовая доля феррита, %	Объемная доля феррита, %
ПВС/Ni–Zn	20	5
ПВС/Ni–Zn	40	13
ПВС/Ni–Zn	60	25
ПВС/Ni–Zn	80	47
ПВС/Ni–Zn/Cu	60	25
ПВС/Ni–Zn/графит	80	47

2. Результаты эксперимента

На рис. 1 показаны спектры диэлектрической проницаемости $\epsilon_r'(f)$ экспериментальных композитных образцов, чистого ПВС и феррита Ni–Zn. Видно, что с увеличением концентрации феррита увеличивается действительная часть диэлектрической проницаемости. Для всех экспериментальных образцов выраженной дисперсии спектров диэлектрической проницаемости в области 0.05–7 GHz не обнаружено. Ниже этой области можно заметить „хвост“, который может принадлежать разным механизмам поляризации. Известно, что кристаллы с ионной связью, подобные ферритам шпинели MeFe_2O_4 , имеют два механизма ионной поляризации: за счет смещения заряда и по прыжковому механизму (перемещение межузельного иона). Первый возникает на высоких частотах $10^{12}\text{--}10^{15} \text{ GHz}$ и характеризует свойства материала [19]. Второй механизм связан с дефектной структурой кристаллической решетки, когда межузельные ионы могут перемещаться на большое расстояние (порядка расстояния между атомами) под действием тепловых флуктуаций кристаллической решетки. Этот механизм работает на более низких частотах ($10^4\text{--}10^7 \text{ Hz}$) и должен проявляться в ферритной керамике из-за наличия дефектов Френкеля и комплексной структуры (поликристаллические зерна и стеклообразные границы зерен). Более вероятно, что молотый феррит (после процесса измельчения) будет иметь большую концентрацию дефектов по сравнению с исходной ферритовой керамикой, что будет определять высокие диэлектрические потери, но спектры тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan \delta_\epsilon = \epsilon_r''/\epsilon_r'$ на вставке рис. 1) показывают противоположные результаты. Для всех композитов значение тангенса угла диэлектрических потерь не превышает 0.2, а для неизмельченного керамического объемного образца Ni–Zn оно достигает почти 0.6.

Сложная структура керамического феррита дает возможность образования объемных зарядов между высокоомными границами зерен и низкоомными зернами. Из-за прыжкового механизма проводимости в ферритах между ионами Me^{2+} и Me^{3+} (позиции А и В) электроны или дырки накапливаются на границах раздела между зернами и границами зерен и образуют объемные заряды [20,21]. В этой ситуации в области низких частот (ниже нескольких МГц) происходит релаксационный процесс Максвелла–Вагнера. Некоторые исследования показывают, что дисперсия диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 1–10 МГц может быть связана с другим механизмом, когда частота скачка электронов между Fe^{2+} и Fe^{3+} совпадает с частотой приложенного поля, как в Cu–Zn- или Mn–Zn-ферритах (и, вероятно, в ферритовой керамике $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$, рассматриваемой в настоящей работе) [22,23]. В случае высокоомных композитов ПВС/Ni–Zn-феррита из спектров диэлектрической проницаемости можно сделать вывод, что в области 0.05–7 GHz релаксационные процессы не про-

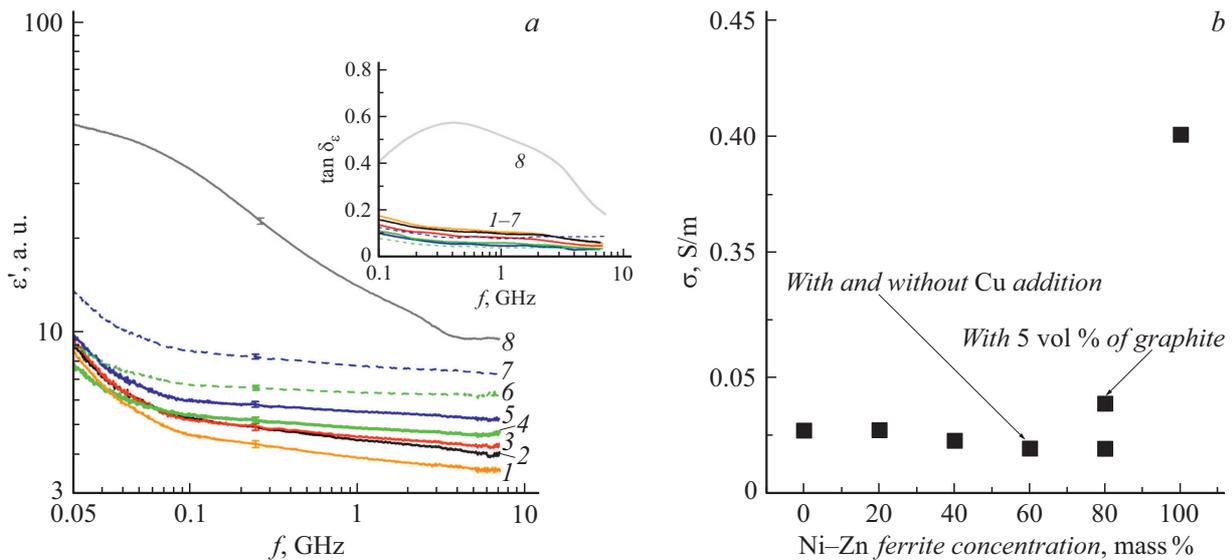


Рис. 1. *a* — спектры диэлектрической проницаемости, *b* — зависимость проводимости от концентрации феррита; на вставке — спектры тангенса угла диэлектрических потерь. 1 — ПВХ, 2 — 20% ПВХ/Ni-Zn, 3 — 40% ПВХ/Ni-Zn, 4 — 60% ПВХ/Ni-Zn, 5 — 80% ПВХ/Ni-Zn, 6 — 60% ПВХ/Ni-Zn и Cu, 7 — 80% ПВХ/Ni-Zn, 8 — объемный спеченный керамический феррит.

исходят. Для исходного спеченного объемного образца Ni-Zn-феррита форма спектров диэлектрической проницаемости и высокое значение тангенса угла диэлектрической проницаемости можно объяснить указанными выше механизмами. В случае полукристаллической матрицы ПВХ все молекулярно-динамические релаксационные процессы имеют место в области низких частот и их признаки отсутствуют в области 0.05–7 GHz [24].

График зависимости проводимости на частоте 1 GHz от концентрации феррита представлен на рис. 1, *b*. Видно, что нет существенной разницы в величине проводимости от концентрации феррита, но добавление графита увеличивает значение σ вдвое. Относительно высокая проводимость неизмельченной ферритовой керамики 2000НН объясняется наличием выраженных релаксационных процессов. Следует отметить, что небольшая добавка микрофольги Cu в композит ПВХ/Ni-Zn не увеличивает проводимость, что, скорее всего, связано с малой толщиной фольги и малой концентрацией (намного ниже порога перколяции).

Спектры магнитной проницаемости $\mu'_r(f)$, $\mu''_r(f)$ (рис. 2) также показывают, что с увеличением концентрации феррита среднее значение комплексной проницаемости увеличивается. Для всех составов в диапазоне частот 0.1–1 GHz спектры проницаемости характеризуются выраженной дисперсией, связанной с двумя механизмами: резонансом движения доменной стенки (низкочастотная область) и вращением спина (собственный естественный ферромагнитный резонанс, высокая частота) [25]. Существенные различия магнитной проницаемости композитов с массовым содержанием 20 и 80% (и чистого объемного керамического феррита) объясняются разрывом магнитного потока в композитах с малой концентрацией. С увеличением концентрации

феррита магнитный поток в композите усиливается, что увеличивает значение магнитной проницаемости. Следует отметить, что добавки с высокой проводимостью не изменяют значение магнитной проницаемости. Другой заметной особенностью спектров $\mu'_r(f)$, $\mu''_r(f)$ является большая разница в частотах дисперсии между ферритовой керамикой и композитами (рис. 2, *a* и вставка). Во-первых, малый размер ферритовых частиц в композите не содержит большого количества магнитных доменов в своем объеме, поэтому низкочастотные максимумы на $\mu''_r(f)$, вызванные движением доменных стенок, не проявляются в спектрах композитов. Во-вторых, собственная резонансная частота, описываемая формулой $\omega_{\max} = H_{\text{eff}} \cdot 4\pi M_s$, сильно зависит от магнитной анизотропии или от эффективного поля магнитной анизотропии H_{eff} [26]. Основными факторами, влияющими на значение H_{eff} , являются магнитокристаллическая анизотропия, магнитно-дипольная анизотропия (поля размагничивания), анизотропия упругих напряжений (магнитоупругая анизотропия или магнестрикционная анизотропия), анизотропия формы, поверхностная магнитная анизотропия и т.д. [27]. Сдвиг частоты ЕФМР в высокочастотную область можно объяснить влиянием полей размагничивания, возникающих при введении немагнитной прослойки между магнитными частицами. Эти собственные поля размагничивания изменяют распределение намагниченности в объеме материала и увеличивают H_{eff} .

Тангенс угла магнитных потерь $\text{tg } \delta_\mu = \mu''_r / \mu'_r$ показан на вставке рис. 2, *b* в полосе частот 1–7 GHz. Видно, что при высоком содержании феррита Ni-Zn (60 и 80 mass.%) в композитах значение $\text{tg } \delta_\mu$ достигает 0.6–0.8, а в исходной ферритовой керамике его значение снижается с 10 до 1. Из спектров проницаемости можно

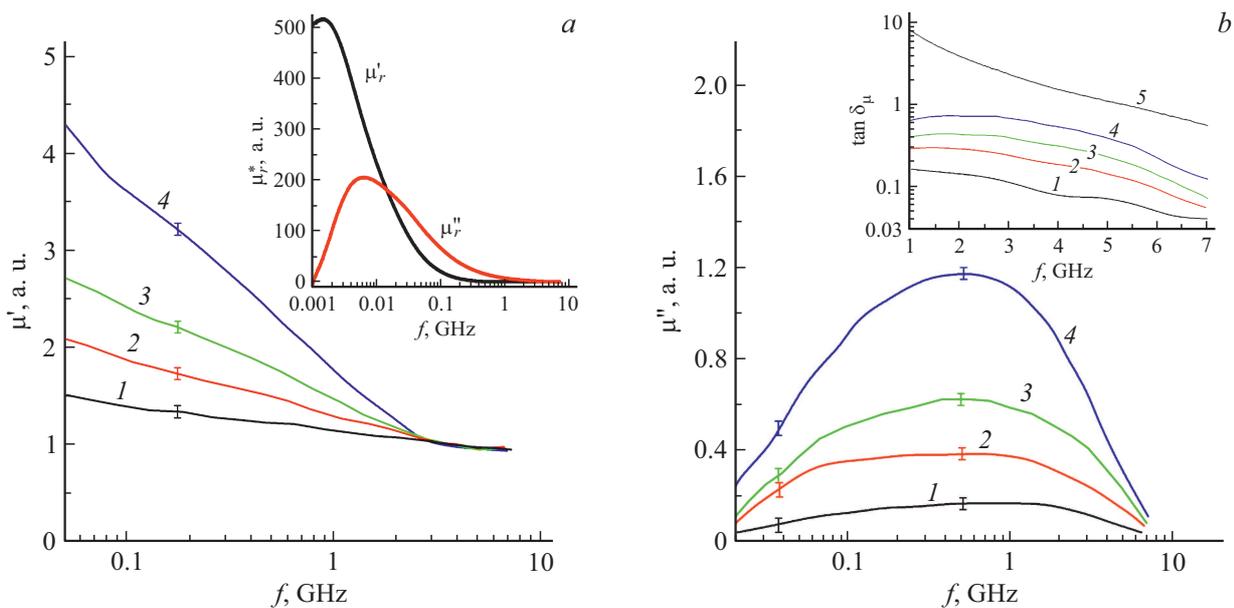


Рис. 2. Спектры действительной части магнитной проницаемости (а) и мнимой части магнитной проницаемости (b); на вставках — комплексные спектры проницаемости для спеченного керамического феррита Ni–Zn и спектры тангенса угла магнитных потерь. 1 — 20% ПВС/Ni–Zn, 2 — 40% ПВС/Ni–Zn, 3 — 60% ПВС/Ni–Zn, 4 — 80% ПВС/Ni–Zn, 5 — керамический объемный Ni–Zn-феррит.

сделать вывод, что высокое содержание магнитной фазы увеличивает магнитные потери в материале. По этой причине $\tan \delta_\mu$ ферритовой керамики значительно выше, чем для композитов ПВС/Ni–Zn. Сравнивая значения $\tan \delta_\mu$ и $\tan \delta_\epsilon$ в диапазоне 1–7 GHz, можно утверждать, что магнитные потери в полученных композитах ПВС/Ni–Zn являются доминирующими.

Все вышеперечисленные процессы поляризации и магнитных резонансов обуславливают потери энергии электромагнитного излучения в композитах. Оценка поглощающих свойств композитов проводилась по величине коэффициента отражения на металлической пластине R_l . Расчетные спектры R_l получены по формулам (1) и (2) с использованием спектров диэлектрической и магнитной проницаемости:

$$R_l = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|, \quad (1)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r^*}{\epsilon_r^*}} \tanh \left[j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r^* \epsilon_r^*} \right], \quad (2)$$

где Z_0 — импеданс свободного пространства, d — толщина поглотителя, c — скорость света.

Трехмерные поверхности коэффициента на металлической пластине R_l показаны на рис. 3. Как видно из рис. 3, а, б, значительных потерь не наблюдается в композитах с 20% и 40% массовой доли феррита при варьировании толщины в пределах 4–10 mm. Интересный результат был получен для композита ПВС/Ni–Zn с 60%. Введение малой концентрации медной фольги увеличивает пиковое поглощение с –14.6 до –18.3 dB.

Не исключено, что наличие 2D-проводящих объектов в структуре композита может создавать локальные области, в которых формируются множественные отражения, что создает дополнительные потери энергии электромагнитных волн. Аналогичные результаты получены в [28], где полые микросферы (ценосферы), покрытые наночастицами Ag, вводились в полипиррольную матрицу. Композиты ПВС/Ni–Zn и ПВС/Ni–Zn/графит с 80 mass.% феррита показывают хорошие поглощающие свойства при толщинах 8–10 и 6–10 mm соответственно. Очень важно снизить массогабаритные параметры поглотителей, особенно для применений, связанных с военной техникой. По этой причине композит ПВС/Ni–Zn/графит более выгоден для практического применения, поскольку при толщине 5–10 mm этот композит имеет низкие значения коэффициента отражения на металлической пластине — менее –10 dB.

Чтобы установить факторы, влияющие на потери при отражении на металлической пластине, было проведено сравнение спектров $R_l(f)$ для разных образцов (табл. 2). Результаты показывают, что в поглотителях с большим $|R_l^{\max}|$ выполняется условие согласования импедансов ($Z_{in}/Z_0 = 1$) и толщины интерференции $t_m \approx d$ [29,30]. Сильное поглощение в композитах вызвано магнитными потерями, а также согласованием импедансов и толщины $t_m = c/4f \sqrt{|\mu_r^* \epsilon_r^*|}$ (когда толщина поглотителя равна расчетной интерференционной толщине $t_m \sim \lambda/4$). При выполнении этих условий угловая разность фаз электромагнитных волн, отраженных от поверхности образца и отраженных от поверхности металла, составляет $\pi/2$. Как видно из табл. 2, для композитов ПВС/Ni–Zn с

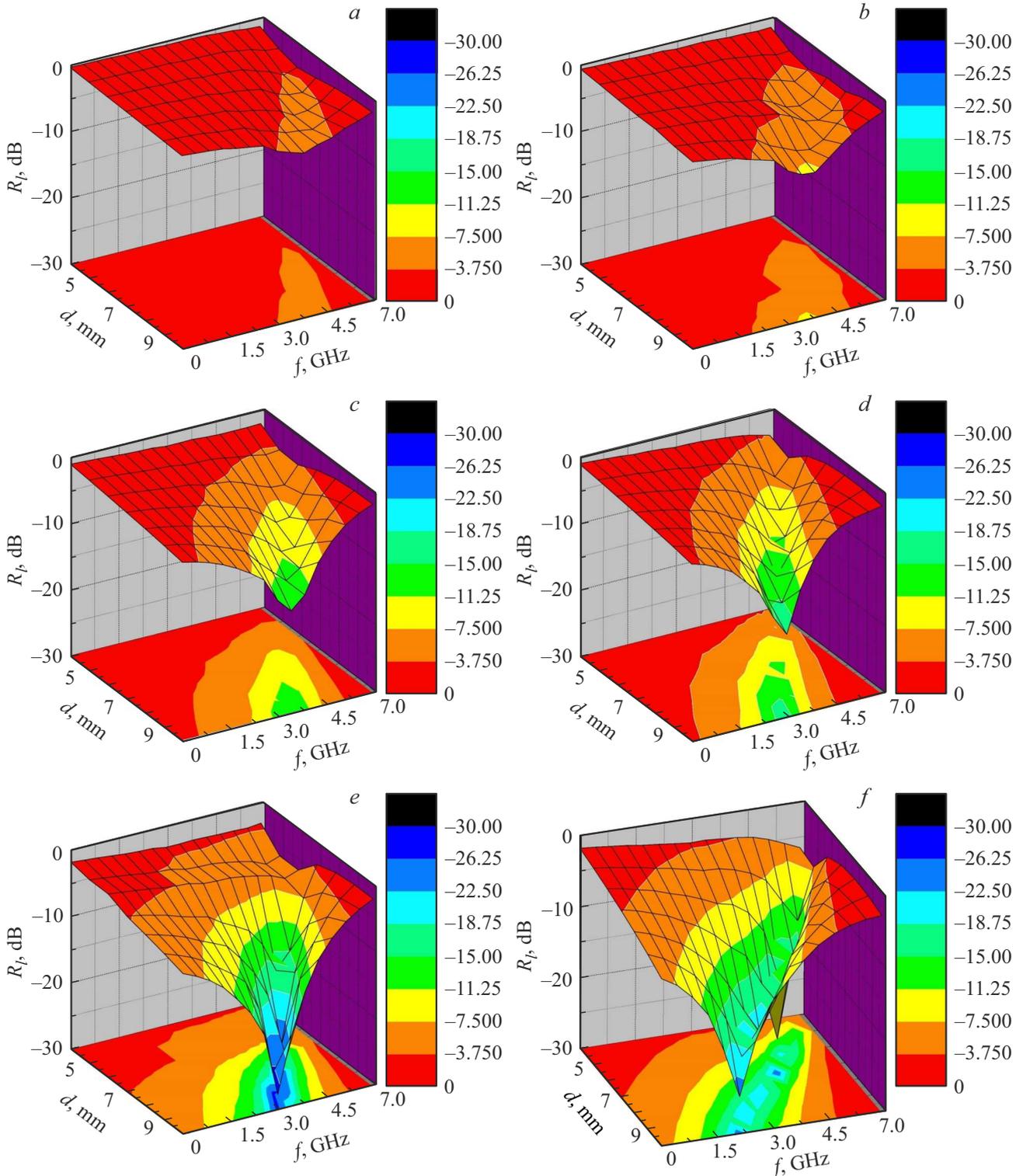


Рис. 3. Трехмерные поверхности коэффициента отражения на металлической пластине полученных композитов: *a* — 20% ПВХ/Ni–Zn, *b* — 40% ПВХ/Ni–Zn, *c* — 60% ПВХ/Ni–Zn, *d* — 60% ПВХ/Ni–Zn и Cu, *e* — 80% ПВХ/Ni–Zn, *f* — 80% ПВХ/Ni–Zn и графит.

содержанием 20, 40% ни одно из этих условий не выполняется, что является причиной низкого значения коэффициента отражения. Также стоит отметить довольно большое значение полосы поглощения Δf на

уровне -10 dB (поглощение 90% энергии) для полученных композитов. Для расчетных спектров композитов с 80% содержанием феррита это значение составляет ~ 2.3 GHz. При введении токопроводящих включений в

Таблица 2. Сравнение параметров поглощения экспериментального и расчетного спектров $R_l(f)$ с нормированным импедансом и интерференционной толщиной

Образец	Массовая доля феррита, %	d , mm	Z_{in}/Z_0	t_m , mm	f_0 , GHz	$ R_l^{max} $, dB	Δf , GHz
ПВС/Ni–Zn	20	7.0	3.38	6.50	5.65	4.5	–
ПВС/Ni–Zn	40	6.0	2.91	6.50	5.65	5.6	–
ПВС/Ni–Zn	60	7.0	1.80	6.15	5.86	9.2	–
ПВС/Ni–Zn	80	7.0	1.14	7.76	4.46	22.6	2.4
PVA/Ni–Zn	60	10.0	1.47	10.3	3.71	14.6	1.2
ПВС/Ni–Zn/Cu	60	10.0	1.33	10.4	2.76	18.4	1.2
ПВС/Ni–Zn/Графит	80	6.0	1.02	6.0	5.13	33.7	2.3

композиты с ферритом Ni–Zn возможно увеличение $|R_l|$ и уменьшение толщины согласования. Этот факт можно описать увеличением потерь на проводимость (вихревые токи) в композите ПВС/Ni–Zn/графит. Кроме того, с увеличением концентрации феррита частота максимума поглощения f_0 смещается в сторону более низких частот.

Заключение и выводы

Полученные композиты ПВС/Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe₂O₄ были охарактеризованы высокочастотными измерениями диэлектрической и магнитной проницаемости. Спектры диэлектрической проницаемости показывают, что в диапазоне 0.05–7 GHz выраженной дисперсии, вызванной процессами диэлектрической релаксации, не наблюдается. При измерениях динамической магнитной проницаемости была обнаружена дисперсия от процессов ЕФМР и РДГ. Высокое пиковое значение коэффициента отражения на металлической пластине менее –10 dB в диапазоне частот 2–5 GHz при толщине 6–10 mm было рассчитано для композитов с высоким содержанием феррита (60, 80%). В полученных композитах исключительно с ферритом Ni–Zn преобладают магнитные потери. Введение проводящих добавок в композиты ПВС/Ni–Zn может улучшить поглощающие характеристики из-за потерь на вихревые токи и множественные отражения. Показано, что высокие характеристики поглощения в композитах определяются условием согласования импедансов и соответствием толщины поглотителя расчетной толщине интерференции.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (соглашение № 19-19-00694 от 06.05.2019 г.).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Wanasinghe, F. Aslani. *Composites Part B*, **176**, 107207 (2019). DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107207
- [2] E.V. Yakushko, L.V. Kozhitov, D.G. Muratov, E.Yu. Korovin, A.A. Lomov, A.V. Popkova. *Russ. Phys. J.*, **63** (12), 2226 (2021). DOI: 10.1007/s11182-021-02292-8
- [3] D. Kumar, A. Moharana, A. Kumar. *Mater. Today Chem.*, **17**, 100346 (2020). DOI: 10.1016/j.mtchem.2020.100346
- [4] S.B. Narang, K. Pubby. *J. Magn. Magn.*, **519**, 167163 (2021). DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167163
- [5] X. Zeng, X. Cheng, R. Yu, G.D. Stucky. *Carbon*, **168**, 606 (2020). DOI: 10.1016/j.carbon.2020.07.028
- [6] Z.W. Li, G.Q. Lin, Linfeng Chen, Y.P. Wu, C.K. Ong. *J. Appl. Phys.*, **98**, 094310 (2005). DOI: 10.1063/1.2128688
- [7] V.G. Andreev, S.B. Menshova, A.N. Klimov, R.M. Vergazov, S.B. Bibikov, M.V. Prokofiev. *J. Magn. Magn.*, **394**, 1 (2015). DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.06.007
- [8] Р.И. Шакирзянов, В.Г. Костишин, А.Т. Морченко, И.М. Исаев, В.В. Козлов, В.А. Астахов. *Журн. неорг. химии*, **65** (6), 758 (2020). DOI: 10.31857/S0044457X20060197 [R.I. Shakirzyanov, V.G. Kostishyn, A.T. Morchenko, I.M. Isaev, V.V. Kozlov, V.A. Astakhov. *Russ. J. Inorg. Chem.*, **65** (6), 829 (2020). DOI: 10.1134/S0036023620060194]
- [9] В.Г. Костишин, Р.М. Вергазов, С.Б. Меньшова, И.М. Исаев, А.В. Тимофеев. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, **87** (1), 30 (2021). DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-1-30-34
- [10] В.Г. Костишин, Р.М. Вергазов, С.Б. Меньшова, И.М. Исаев. *Рос. технол. журн.* **8** (6), 87 (2020). DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-6-87-108
- [11] И.М. Исаев, В.Г. Костишин, В.В. Коровушкин, Д.В. Салогуб, Р.И. Шакирзянов, А.В. Тимофеев, А.Ю. Миронович. *ЖТФ*, **91** (9), 1376 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.09.51217.74-21
- [12] M.A. Almessiere, Y. Slimani, A.V. Trukhanov, A. Baykal, H. Gungunes, E.L. Trukhanova, S.V. Trukhanov, V.G. Kostishin. *J. Ind. Eng. Chem.*, **90**, 251 (2020). DOI: 10.1016/j.jiec.2020.07.020
- [13] A.V. Lopatin, N.E. Kazantseva, Y.N. Kazantsev, O.A. D'yakonova, J. Vilčková, P. Sába. *J. Commun. Technol. Electron.*, **53** (5), 487 (2008). DOI: 10.1134/S106422690805001X
- [14] M. Aslam, M.A. Kalyar, Z.A. Raza. *Polym. Eng. Sci.*, **58**, 2119 (2018). DOI: 10.1002/pen.24855

- [15] Zhang Qi, Liu Chunbo, Wu Zhuang, Yang Yang, Xie Zhiyong, Zhou Haikun, Chen Chudong. *J. Magn. Magn.*, **479**, 337 (2019). DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.11.129
- [16] Y.K. Lahsmin, H. Heryanto, S. Ilyas, A.N. Fahri, B. Abdullah, D. Tahir. *Opt. Mater.*, **111**, 110639 (2021). DOI: 10.1016/j.optmat.2020.110639
- [17] B. Abdullah, S. Ilyas, D. Tahir. *J. Nanomater.*, **2018**, 9823263 (2018). DOI: 10.1155/2018/9823263
- [18] S. Kumar, G. Datt, A.S. Kumar, A.C. Abhyankar. *J. Appl. Phys.*, **120**, 164901 (2016). DOI: 10.1063/1.4964873
- [19] M.T. Sebastian. *Dielectric Materials for Wireless Communication* (Elsevier, Amsterdam, Boston, 2008)
- [20] R. Metselaar, P.K. Larsen, in *Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi* (1978), v. 70, p. 417.
- [21] В.Г. Костишин, Р.И. Шакирзянов, А.Г. Налогин, С.В. Щербakov, И.М. Исaев, М.А. Немирович, М.А. Михайленко, М.В. Коробейников, М.П. Мезенцева, Д.В. Салогуб. *ФТТ*. **63** (3), 356 (2021). DOI: 10.21883/FTT.2021.03.50586.230 [V.G. Kostishin, R.I. Shakirzyanov, A.G. Nalagin, S.V. Shcherbakov, I.M. Isaev, M.A. Nemirovich, M.A. Mikhailenko, M.V. Korobeinikov, M.P. Mezentseva, D.V. Salogub. *Phys. Solid State*, **63**, 435 (2021). DOI: 10.1134/S1063783421030094]
- [22] J. Parashar, V.K. Saxena, J. Sharma, D. Bhatnagar, K.B. Sharma. *Macromol. Symp.* **357** (1), 43 (2015). DOI: 10.1002/masy.201400184
- [23] P. Pengfei, Z. Ning. *J. Magn. Magn.* **416**, 256 (2016). DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.05.018
- [24] N. Ghorbel, A. Kallel, S. Boufi. *Composites Part A*, **124**, 105465 (2019). DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.05.033
- [25] S.B. Narang, K. Pubby. *J. Magn. Magn.*, **519**, 167163 (2021). DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167163
- [26] S. Chikazumi, C.D. Graham. *Physics of Ferromagnetism, 2nd ed.* (Clarendon Press, Oxford University Press, Oxford, NY., 1997)
- [27] V. Babayan, N.E. Kazantseva, R. Moučka, I. Sapurina, Yu.M. Spivak, V.A. Moshnikov. *J. Magn. Magn.*, **324** (2), 161 (2012). DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.08.002
- [28] R. Panigrahi, S. Srivastava. *Sci. Rep.*, **5**, 7638 (2015). DOI: 10.1038/srep07638
- [29] B. Wang, J. Wei, L. Qiao, T. Wang, F. Li. *J. Magn. Magn.*, **324**, 761 (2012). DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.09.011
- [30] Tao Wang, Rui Han, Guoguo Tan, Jianqiang Wei, Liang Qiao, Fashen Li. *J. Appl. Phys.*, **112**, 104903 (2012). DOI: 10.1063/1.4767365