

Электромагнитные свойства полимерных композитов $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4/\text{П(ВДФ-ТФЭ)}$ в области частот 100–7000 МГц

© И.М. Исаев, В.Г. Костишин[¶], Р.И. Шакирзянов, А.Р. Каюмова, Д.В. Салогуб

Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“,
119049 Москва, Россия

[¶] E-mail: drvgkostishyn@mail.ru

Принята в Редакцию 19 августа 2021 г.

В окончательной редакции 9 сентября 2021 г.

Принята к публикации 9 сентября 2021 г.

Рассмотрены электромагнитные и радиопоглощающие свойства полимерного композита с добавкой из литиевого феррита-шпинели состава $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ в диапазоне частот 100–7000 МГц. Показано, что образцы с массовой долей феррита 60, 80% имеют выраженные радиопоглощающие свойства, измеренные с помощью коэффициента отражения на металлической пластине. Для композита с 80% феррита минимальное значение коэффициента отражения составило –37.5 дБ на частоте 2.71 ГГц с шириной поглощения на уровне –10 дБ ~ 3 ГГц. Высокие значения показателей поглощения напрямую связаны с использованием сегнетоэлектрического полимера П(ВДФ-ТФЭ) в качестве связующего, что выражается в совместном действии механизмов поглощения магнитной и сегнетоэлектрической фаз.

Ключевые слова: литиевый феррит, полимерный композит, поливинилиденфторид, радиопоглощающий материал.

DOI: 10.21883/FTP.2022.01.51821.9728

1. Введение

Ферриты $\text{Me}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ со структурой шпинели являются известными магнитными полупроводниками. Эти материалы активно изучаются исследователями по всему миру ввиду большого потенциала для варьирования их физических свойств. Путем введения изоморфных замещений можно добиться изменения намагниченности насыщения, коэрцитивной силы, электропроводности, константы магнитострикции, магнитных потерь, каталитических, магнитокалорических и др. свойств [1,2]. Это обуславливает достаточно внушительный список применений и направлений исследования феррошпинелей в биомедицине и медицинской диагностике [3], в качестве компонент микроволновых приборов (циркуляторы, вентили), устройств электроники, магнитоэлектроники (магнитные полупроводники) [4,5], газовых сенсоров [6], электронных компонентов и компонент электрических схем, радиопоглощающих материалов и даже в технологиях очистки воды [7]. В настоящее время освоен большой спектр методов получения ферритов, но одним из самых широко распространенных остается метод керамической технологии ввиду его высокой технологичности и освоенности промышленностью. Поскольку остро стоит проблема электромагнитной совместимости и электромагнитного загрязнения, ведутся работы по созданию технологий экранирования или подавления уровня электромагнитного излучения [8]. Ферриты и полимерные композиты на их основе прекрасно подходят для роли радиопоглощающих материалов, поскольку являются материалами с выраженными магнитными свойствами с высоким или средним удельным сопротивлением [9–12]. Последнее

особенно важно, поскольку проводники, как правило, имеют высокое значение коэффициента отражения, что затрудняет их использование как радиопоглощающих материалов. Большой интерес для исследователей представляют ферриты-шпинели, допированные Li, поскольку литиевые шпинели могут иметь высокие значения намагниченности насыщения [13,14] за счет нестандартного распределения катионов по подрешеткам, частоты отсечки ~ 500 МГц [15], низкие значения температуры спекания 880–920 °С [16], значения электропроводности на постоянном токе ~ 10^{-12} – 10^{-5} Ом⁻¹·см⁻¹, диэлектрические потери в широком диапазоне частот [17], низкую ширину линии резонанса 1–10 Э [18].

Ранее в [19] было показано, что Li-Mn-Zn феррит с химическим составом $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ характеризуется как радиопоглощающий материал в области частот 0.05–7 ГГц. Коэффициент отражения на металлической пластине у образцов с температурой спекания 1050–1100 °С составлял –22.52 дБ на частоте 1.34 ГГц. Было показано, что один из минимумов коэффициента отражения совпадает по частотному положению с естественным ферромагнитным резонансом. Также диэлектрические потери в рассматриваемом диапазоне частот для феррита $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ отсутствовали. Был сделан вывод о том, что электромагнитные потери в Li-Mn-Zn феррите обуславливались магнитными потерями на резонанс доменных границ (РДГ) и естественный ферромагнитный резонанс (ЕФМР). В данной работе изучаются радиопоглощающие свойства композитов поли(винилиденфторид-тетрафторэтилен)/Li-Mn-Zn феррит. Выбор электрически активного сополимера ПВДФ обусловлен наличием в нем сегнетоэлектрической фазы, которая может давать дополнительный вклад

в высокочастотные потери электромагнитной энергии за счет процессов переполаризации.

2. Экспериментальная часть

В качестве исходных материалов использовались сополимер поливинилиденфторида (марка Ф2М) $-(\text{CF}_2\text{-CH}_2)_n\text{-(CF}_2\text{-CF}_2)_m\text{-}$ в соотношении мономеров в цепи $n = 96$, $m = 4$ и феррит-шпинель химического состава $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$. Получение ферритовой керамики описано ранее в работе [19]. Размер частиц порошков составлял < 45 мкм, что позволяло получать однородную механическую смесь в ступке. Однородность смеси оценивалась косвенно по изменению цвета. Далее, смесь загружали в пресс-форму с нагревателем, которые устанавливались под гидравлический пресс. Нагрев производился под постоянным давлением ~ 12 МПа до температуры 190°C . При данной температуре производилась выдержка в течение 10 мин, после которой пресс-форма охлаждалась на воздухе до комнатной температуры. Образцы получали в виде колец с внешним диаметром 16 мм, внутренним диаметром 7 мм и высотой 6 мм. Для сравнения электрофизических характеристик также измерялся образец керамического спеченного ферритового изделия аналогичных состава и геометрических размеров. Дифрактограммы получали с использованием рентгеновского дифрактометра Дифрей (излучение $\text{CrK}\alpha$). Параметр решетки определялся по формуле для кубического кристалла:

$$\frac{1}{d(hkl)} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}, \quad (1)$$

где d — межплоскостное расстояние рефлекса (hkl) , a — параметр решетки.

Размер кристаллитов оценивался по формуле Шеррера:

$$D = \frac{\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (2)$$

где β — ширина на полувысоте рефлекса.

Микроснимки сканирующей электронной микроскопии получали с помощью электронного микроскопа ThermoFisher Arpeo. Электромагнитные спектры (комплексная диэлектрическая проницаемость, комплексная магнитная проницаемость) измерялись с помощью коаксиальной ячейки и векторного анализатора цепей Rohde & Shwartz ZVL-13.

3. Результаты и обсуждение

Рентгенофазовый анализ исходных порошков и композитов показывает, что во время процесса термопрессования сторонних фаз не образуется (рис. 1). В исходном порошке феррита обнаружено содержание фазы $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Фазовый анализ производился с помощью программы Match!3. Для этого использовались дифракционные

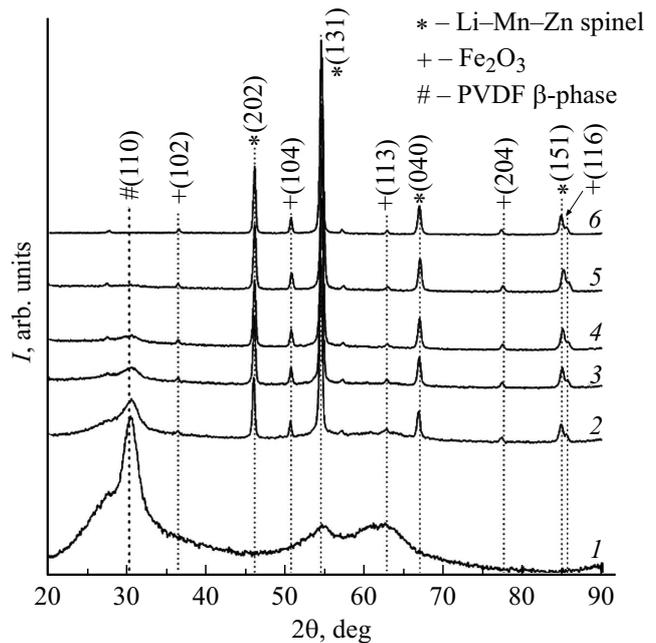


Рис. 1. Дифрактограммы рентгенофазового анализа (РФА) исходных компонентов и композитов: 1 — П(ВДФ-ТФЭ); 2 — композит с массовой долей 20%, 3 — композит с массовой долей 40%, 4 — композит с массовой долей 60%, 5 — композит с массовой долей 80%; 6 — порошок Li-Mn-Zn-феррита.

карты базы COD № 96-153-3269 ($\text{Li}_{0.25}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{2.25}\text{O}_4$, шпинельная фаза) и № 96-900-0140 (Fe_2O_3 , гематитная фаза). Определение параметра решетки порошка феррита по формуле (1) дает значение для шпинельной элементарной ячейки 8.3344 \AA , а средний размер кристаллита D по формуле (2) — 36.91 нм . Для спеченного феррита $a = 8.3601 \text{ \AA}$, $D = 108.8 \text{ нм}$. Данные рентгеноструктурного анализа могут говорить о разной микроструктуре ферритового порошка и спеченного феррита: ферритовый порошок имеет в среднем меньший размер зерен (и размер кристаллитов) по сравнению со спеченной ферритовой керамикой, что коррелирует с результатами работ [20,21]. Как будет показано далее, этот факт может в сильной степени влиять на вид спектров электромагнитных характеристик образцов измельченного порошка и спеченного изделия. Также стоит отметить, что разложение рефлекса сополимера ПВДФ на составляющие, относящиеся к упорядоченной сегнетоэлектрической β -фазе (110) и параэлектрической фазе, показывает, что с введением массовой доли феррита, равной 20%, наблюдается увеличение размера кристаллита в композите с 7.28 до 10.82 нм. Это может указывать на возрастание степени кристалличности полимера при введении ферритовых включений, как описывалось в других исследованиях по композитам феррит-шпинель/ПВДФ [22,23].

На рис. 2, *a* и *b* показаны спектры комплексной магнитной проницаемости изучаемых образцов. По спек-

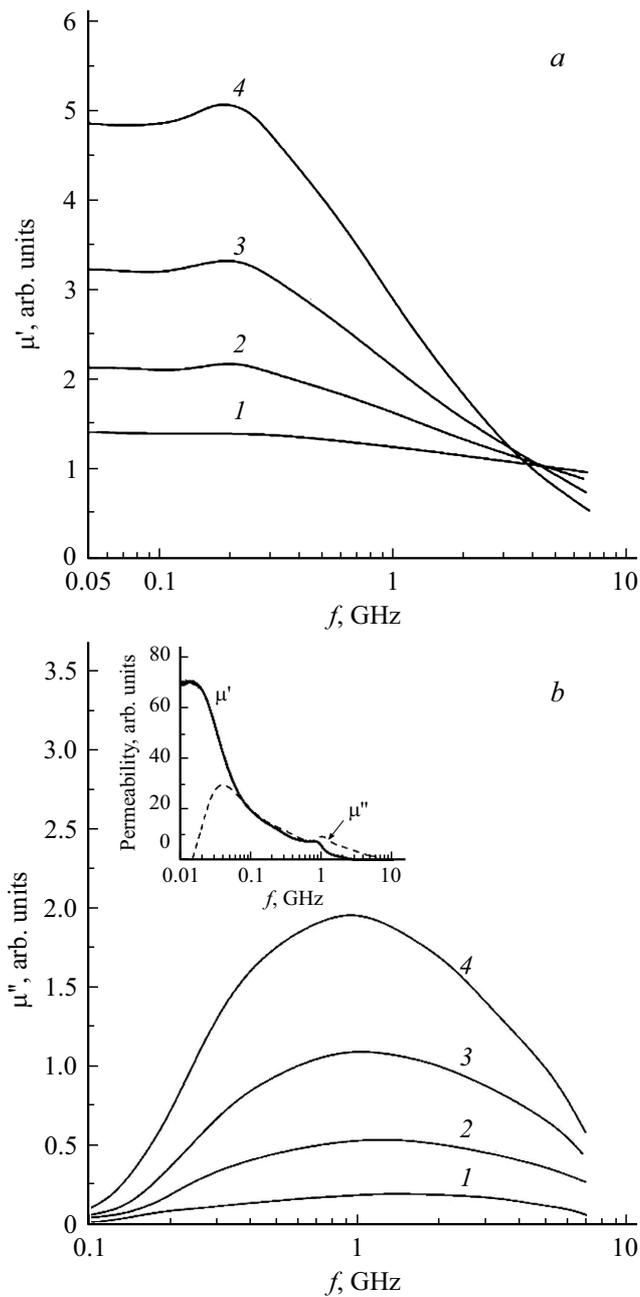


Рис. 2. *a* — спектры действительной части магнитной проницаемости композитов состава П(ВДФ-ТФЭ)/ $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ с различной массовой долей феррита. *b* — спектры мнимой части магнитной проницаемости композитов состава П(ВДФ-ТФЭ)/ $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ с различной массовой долей феррита. На вставке — спектр керамического изделия $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$, %: 1 — 20, 2 — 40, 3 — 60, 4 — 80.

трам магнитной проницаемости керамического ферритового изделия можно отметить две четко различимые области, на которых происходит перегиб по $\mu'(f)$, а зависимость $\mu''(f)$ проходит через максимум. Этот факт можно объяснить различными частотами ЕФМР и РДГ в $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ -феррите. Максимум

μ'' на частоте соответствует процессу вращения спина или ЕФМР, а максимум на частоте 0.04 ГГц — РДГ. В композитах на основе Li-Mn-Zn-феррита вклад РДГ заметно снижен, поскольку частицы достаточно малы, чтобы содержать большое количество доменов. Косвенно на это указывает уменьшение размера кристаллитов D , поскольку с уменьшением размеров зерен вклад вращения намагниченности в магнитных доменах будет меньше. Количество доменных стенок уменьшается и низкочастотное значение μ'' также уменьшается. Согласно соотношению Крамерса–Кронига, при уменьшении значений мнимой части комплексной величины происходит уменьшение действительной части. По этой причине действительная часть магнитной проницаемости также значительно уменьшается. С другой стороны, уменьшение консервативной части магнитной проницаемости μ' связано с уменьшением магнитной индукции внутри материала из-за наличия немагнитных полимерных прослоек. Также можно отметить, что частотное положение максимума μ'' в композитах сдвигается в область высоких частот по мере увеличения концентрации полимера. Так, для 60 и 80% композитов положение μ''_{max} составляет ~ 0.95 ГГц, а для 40 и 20% — 1.23 и 1.49 ГГц соответственно. Смещение максимума зависимости $\mu''(f)$ происходит при изменении внутреннего магнитного поля внутри композита. Как описывалось выше, вклад от РДГ в спектр $\mu''(f)$ достаточно мал. В связи с этим вид спектра определяется процессом ЕФМР. При наличии немагнитных прослоек между частицами феррита возникают дополнительные поля внутренних размагничивающих факторов, которые могут изменять значение внутреннего поля H_{eff} [24]. Хотя расчет внутреннего поля внутри композита сложная задача, заслуживающая отдельного исследования, в случае со спектрами, рассматриваемыми в данной работе, можно утверждать, что если учесть, что резонансная частота ЕФМР в феррите задается соотношением $f_r = \gamma H_{\text{eff}}$, то внутреннее поле возрастает, поскольку частота ЕФМР в наименее концентрированном композите — максимальна.

На рис. 3 представлены спектры действительной части диэлектрической проницаемости. С увеличением концентрации феррита ϵ' композитов возрастает, что коррелирует с теоретическими представлениями эффективной среды, в которой эффективная диэлектрическая проницаемость гетерогенной среды есть функция от проницаемостей отдельных компонентов [25]. Такое утверждение верно, поскольку, как видно из рисунка, диэлектрическая проницаемость полимера Ф2М составляет ~ 3.5 , а у Li-Mn-Zn-феррита ~ 6 . Стоит отметить практически идентичное значение диэлектрической проницаемости композита с массовой долей 80% магнитных включений и спеченного образца $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$. Данный факт можно объяснить, если принять во внимание, что при данной концентрации матрица и наполнитель меняются местами, т.е. в матрице феррита однородно распределены прослойки полимера П(ВДФ-ТФЭ), причем не все частицы инкапсулированы полимером. Это можно

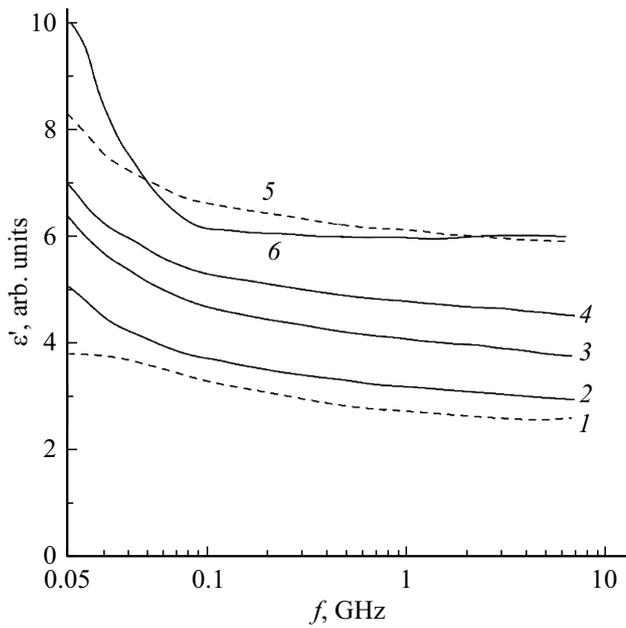


Рис. 3. Зависимости действительной части диэлектрической проницаемости исследуемых образцов с разной массовой долей феррита: 1 — П(ВДФ-ТФЭ); 2 — 20, 3 — 40, 4 — 60, 5 — 80%; 6 — керамический образец $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$.

видеть на снимках сканирующей электронной микроскопии (рис. 4), из которых заметно, что отдельные частицы включений соприкасаются и образуют кластеры. В этом случае происходит электрическая перкаляция, из-за которой проходящий высокочастотный ток идет исключительно по каналам, образованным частицами феррита. В таком случае диэлектрическая проницаемость композита может быть равной проницаемости феррита. Для спектров мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'' было обнаружено, что значение проницаемости не зависит от концентрации включений и монотонно убывает с ~ 0.6 до ~ 0.18 в частотном диапазоне 100–7000 МГц.

Радиопоглощающие свойства оценивались по спектрам коэффициента отражения на металлической пластине R_l , который экспериментально измерялся для колец с толщиной 6 мм на короткозамкнутой ячейке (рис. 5). Для анализа факторов, приводящих к высокому поглощению, использовались формулы расчета коэффициента отражения R_l и нормализованного импеданса Z_{in}/Z_0 :

$$R_l = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|, \quad (3)$$

$$\frac{Z_{in}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu_r^*}{\epsilon_r^*}} \tanh \left[j \frac{2\pi f h}{c} \sqrt{\mu_r^* \epsilon_r^*} \right], \quad (4)$$

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

Было обнаружено, что наименьшим значением коэффициента отражения характеризуется композит с 60%

феррита с минимальным значением $R_l = -35$ дБ. Следует также отметить, что полученный спектр характеризуется достаточно большой шириной поглощения Δf на уровне 10 дБ порядка ~ 4 ГГц. Как видно из формул (1), (2), максимальное поглощение (минимальное значение коэффициента отражения) в геометрии с идеальным отражателем за поглотителем возможно при равенстве импедансов Z_{in} и Z_0 (или $Z_{in}/Z_0 = 1$), которые характеризуют входной импеданс на образце и импеданс свободного пространства соответственно. Если нормализованный импеданс близок к единице, то выполняется условие идеального согласования [26], при котором волны, отраженные от границы раздела

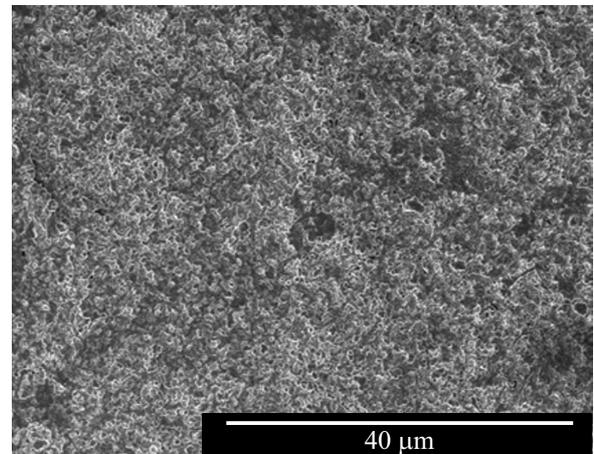


Рис. 4. Микроснимок сканирующей электронной микроскопии композита с массовой долей 80%.

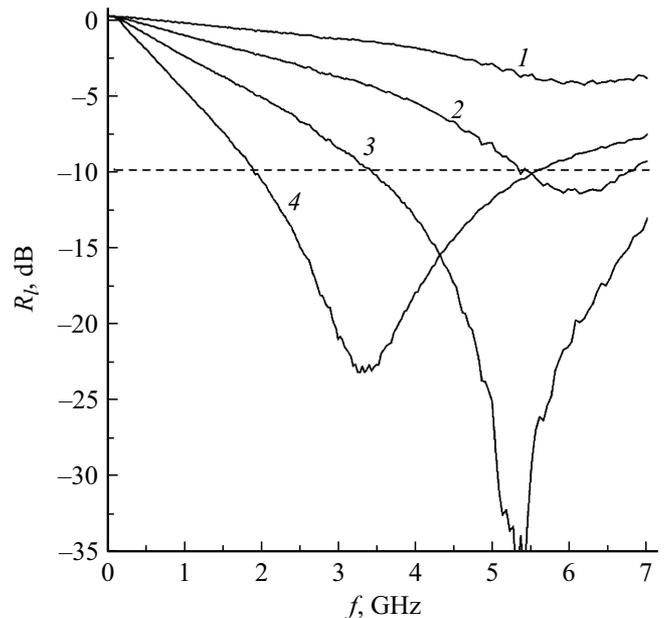


Рис. 5. Спектры отражения на металлической пластине композитов толщиной 6 мм состава Ф2М- $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ с различной массовой долей феррита, %: 1 — 20, 2 — 40, 3 — 60, 4 — 80.

Сравнение параметров поглощения экспериментальных и расчетных спектров R_l

$C_m, \%$	$h, \text{мм}$	$f_0, \text{ГГц}$	$R_l^{\text{max}}, \text{дБ}$	$\Delta f, \text{ГГц}$	Z_{in}/Z_0	$t_{\lambda/4}, \text{мм}$	$\tan \delta_e$	$\tan \delta_\mu$
20	6*	6.18*	-4.5*	—	1.96	7	0.05	0.17
40	6*	6.13*	-11.6*	—	1.65	6.3	0.05	0.37
60	6*	5.37*	-33.8*	4.2*	1.02	6.3	0.05	0.74
60	7	4.26	-25.0	3.6	1.13	7.4	0.04	0.69
60	8	3.60	-21.9	2.8	1.18	8.3	0.04	0.69
80	5	4.49	-17.7	4.0	0.77	5.8	0.03	1.19
80	6*	3.35*	-23.2*	3.7*	0.88	6.9	0.04	1.12
80	7	2.71	-37.5	3.0	0.98	7.9	0.04	1.06
80	8	2.29	-30.1	2.4	1.07	8.8	0.04	0.99

Примечание. R_l^{max} — пиковое значение коэффициента отражения, f_0 — частотное положение пика, Δf — ширина поглощения на уровне -10 дБ, Z_{in}/Z_0 — нормализованный импеданс, $t_{\lambda/4}$ — интерференционная толщина. * — экспериментальные данные.

воздух/поглотитель и от металлической пластины, интерферируют, имея равные амплитуды. Положение пика также связано с интерференционной толщиной, которую можно рассчитать согласно четвертьволновой модели согласования [27] по уравнению:

$$t_{\lambda/4} = nc / (4f_0 \sqrt{|\varepsilon^* \mu^*|}), \quad (5)$$

где n — нечетное натуральное число 1, 3, 5 ..., f_0 — частота электромагнитного излучения (ЭМИ), c — скорость света.

Из уравнения (2) можно видеть, что значение нормализованного импеданса зависит от значений комплексных магнитной и диэлектрической проницаемостей. В таком случае определенный „набор“ значений действительных и мнимых частей проницаемостей может определять значение $Z_{\text{in}}/Z_0 = 1$, а следовательно, низкое отражение. Расчетные диаграммы для определения условий идеального согласования для радиопоглощающего материала (РПМ) на идеальном отражателе представлены, например, в [28]. Несмотря на подобный подход описания радиопоглощающих характеристик, нужно понимать, что „удачную“ комбинацию значений проницаемости определяют физические процессы в материалах. В случае рассматриваемых композитов это процессы переполяризации диполей в полимере, феррите и резонансное поглощение электромагнитной волны при вращении магнитного момента, движении магнитных доменных стенок. Более того, их одновременное действие может результировать в возникновении синергетического эффекта, при котором ослабление электромагнитных волн (ЭМВ) значительно возрастает. В работе [29] представлены результаты, что композиты на основе электрически активной матрицы ПВДФ показывают более высокое ослабление электромагнитной энергии по сравнению с матрицами из линейных диэлектриков. Таким образом, можно заключить, что высокое поглощение в концентрированных композитах может быть связано с сегнетоэлектрическими свойствами матрицы (связующего). Тем не менее, если рассматривать расчетные значения тангенсов магнитных $\tan \delta_\mu = \mu''/\mu'$, и диэлектрических потерь $\tan \delta_e = \varepsilon''/\varepsilon'$,

основной вклад в потери электромагнитной энергии в полученных образцах вносят магнитные потери, так как значения $\tan \delta_\mu$ во много раз превосходят значения тангенса диэлектрических потерь. С увеличением концентрации магнитной фазы растут значения $\tan \delta_\mu$ и $|R_l|$. Сводные данные по анализу факторов радиопоглощения приведены в таблице. Можно отметить, что расчетные значения $t_{\lambda/4}$ не всегда совпадают с реальной или заданной толщиной поглотителя. Это можно связать размытостью пика отражения, при которой неоднозначно определяется частота f_0 . С другой стороны, в некоторых работах отмечается, что формула (5) дает только качественное объяснение и не всегда согласуется с экспериментальными данными.

4. Заключение

Полученные в работе феррит-полимерные композиты состава П(ВДФ-ТФЭ)/ $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ были изготовлены с массовой долей феррита 20, 40, 60, 80%. Показано, что с увеличением концентрации феррита значения комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости возрастают, причем в случае магнитной проницаемости наблюдается сдвиг дисперсии в область низких частот. Выраженные радиопоглощающие свойства, измеренные через спектры коэффициента отражения на металлической пластине, обнаружены в композитах с массовой долей 60, 80%. Для композита с массовой долей 60% при толщине 6 мм минимальный коэффициент отражения составил $R_l = -33.8$ дБ на частоте $f_0 = 5.37$ ГГц с шириной поглощения на уровне -10 дБ около $\Delta f = 4$ ГГц, а для композита с массовой долей 80% те же показатели при толщине 7 мм составили -37.5 дБ, 2.71 ГГц, 3 ГГц соответственно. Показано, что поглощение в композитах обусловлено согласованием импедансов, магнитными потерями на ЕФМР и РДГ, а также возможным синергетическим эффектом от диэлектрических и магнитных потерь от сегнетоэлектрической и магнитной фаз.

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] S.B. Narang, K. Pubby. *J. Magn. Magn. Mater.*, **519**, 167163 (2021).
- [2] P. Thakur, D. Chahar, S. Taneja, N. Bhalla, A. Thakur. *Ceram. Int.*, **46** (10, pt B), 15740 (2020).
- [3] K.K. Kefeni, T.A.M. Msagati, T.T. Nkambule, B.B. Mamba. *Mater. Sci. Eng. C*, **107**, 110314 (2020).
- [4] Л.М. Летюк, В.Г. Костишин, А.В. Гончар. *Технология ферритовых материалов магнитоэлектроники* (М., МИСиС, 2005) с. 352.
- [5] P.B. Belavi, G.N. Chavan, L.R. Naik, R. Somashekar, R.K. Kotala. *Mater. Chem. Phys.*, **132** (1), 138 (2012).
- [6] V. Manikandan, J.H. Kim, A. Mirzaei, S.S. Kim, S. Vignesevan, M. Singh, J. Chandrasekaran. *J. Mol. Struct.*, **1177**, 485 (2019).
- [7] S. Rana, J. Rawat, R.D.K. Misra. *Acta Biomaterialia*, **1** (6), 691 (2005).
- [8] E.V. Yakushko, L.V. Kozhitov, D.G. Muratov, E.Y. Korovin, A.A. Lomov, A.V. Popkova. *Rus. Phys. J.*, **63** (12), 2226 (2021).
- [9] X. Zeng, X. Cheng, R. Yu, G.D. Stucky. *Carbon*, **168**, 606 (2020).
- [10] N.N. Ali, Y. Atassi, A. Salloum, A. Charba, A. Malki, M. Jafarian. *Mater. Chem. Phys.*, **211**, 79 (2018).
- [11] Z. Jiao, Z. Yao, J. Zhou, K. Qian, Y. Lei, B. Wei, W. Chen. *Ceram. Int.*, **46** (16, pt A), 25405 (2020).
- [12] P. Saha, T. Debnath, S. Das, S. Chatterjee, S. Sutradhar. *Mater. Sci. Eng. B*, **245**, 17 (2019).
- [13] M. Arana, P.G. Bercoff, S.E. Jacobo. *Procedia Mater. Sci.*, **1**, 620 (2012).
- [14] M. Arana, V. Galvan, S.E. Jacobo, P.G. Bercoff. *J. Alloys Compd.*, **568**, 5 (2013).
- [15] F. Xie, Y. Chen, M. Bai, P. Wang. *Ceram. Int.*, **45** (14), 17915 (2019).
- [16] X. Wang, Y. Li, Z. Chen, H. Zhang, H. Su, G. Wang, Y. Liao, Z. Zhong. *J. Alloys Compd.*, **797**, 566 (2019).
- [17] Y. Gao, Z. Wang, R. Shi, J. Pei, H. Zhang, X. Zhou. *J. Alloys Compd.*, **805**, 934 (2019).
- [18] P. Baba, G. Argentina, W. Courtney, G. Dionne, D. Temme. *IEEE Trans. Magn.*, **8** (1), 83 (1972).
- [19] 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). [I.M. Isaev, V.G. Kostishyn, V.V. Korovushkin, D.V. Salogub, R.I. Shakirzyanov, A.V. Timofeev, A.Yu. Mironovich. *Tech. Phys.*, **66** (9), 1344 (2021)]
- [20] T. Ungár, G. Tichy, J. Gubicza, R. Hellmig. *Powder Diffr.*, **20** (4), 366 (2005).
- [21] R. Singh Yadav, I. Kuřitka, J. Vilcakova, J. Havlica, J. Masilko, L. Kalina, J. Tkacz, J. Švec, V. Enev, M. Hajdúchová. *Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechnol.*, **8**, 045002 (2017).
- [22] Р.И. Шакирзянов, В.Г. Костишин, А.Т. Морченко, И.М. Исаев, В.В. Козлов, В.А. Астахов. *ЖНХ*, **65** (6), 758 (2020). [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]
- [23] P. Martins, C.M. Costa, S. Lanceros-Mendez. *Appl. Phys. A*, **103**, 233 (2011).
- [24] V. Babayan, N.E. Kazantseva, R. Moučka, I. Sapurina, Yu.M. Spivak, V.A. Moshnikov. *J. Magn. Magn.*, **324** (2), 161 (2012).
- [25] V.A. Astakhov, R.I. Shakirzyanov, A.T. Morchenko, Z.V. Mingazheva, S.P. Kurochka. *J. Nano-Electron. Phys.*, **8** (3), 03044 (2016).
- [26] B. Wang, J. Wei, L. Qiao, T. Wang, F. Li. *J. Magn. Magn. Mater.*, **324**, 761 (2012).
- [27] B. Wang, J. Wei, Y. Yang, T. Wang, F. Li. *J. Magn. Magn. Mater.*, **323** (8), 1101 (2011).
- [28] H.M. Musal, D.C. Smith. *IEEE Trans. Magn.*, **26** (5), 1462 (1990).
- [29] V.V. Kochervinskii. *Bull. Rus. Acad. Sci., ser. phys.*, **84** (2), 144 (2020).

Редактор Г.А. Оганесян

Electromagnetic properties of polymer composites $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4/\text{P}(\text{VDF-TFE})$ in the frequency range 100–7000 MHz

I.M. Isaev, V.G. Kostishyn, R.I. Shakirzyanov, A.R. Kayumova, D.V. Salogub

National University of Science and technology „MISIS“, 119049 Moscow, Russia

Abstract The article describes electromagnetic and microwave properties of the polymer composite with the lithium spinel ferrite inclusion of composition $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ in the frequency range 100–7000 MHz. It is shown that samples with a mass fraction of ferrite 60, 80% have pronounced radio-absorbing properties, measured using the reflection coefficient on a metal plate (return losses). For a composite with 80% ferrite, the minimum return loss was -37.5 dB at 2.71 GHz with an absorption width at -10 dB of 3 GHz. High absorption characteristics are directly related to the use of ferroelectric polymer P(VDF-TFE) as a binder, which is expressed in the combined action of the absorption mechanisms of the magnetic and ferroelectric phases.