

УДК 621.372.853.2

КОМПОЗИЦИОННЫЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВЧ УСТРОЙСТВ

© 2020 г. С. В. Серебрянников¹, *, А. П. Черкасов¹, С. С. Серебрянников¹,
А. В. Долгов¹, Л. Л. Еремцова¹, П. И. Коньшин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

*E-mail: SerebriannikSV@mpei.ru

Поступила в редакцию 02.12.2019 г.

После доработки 23.12.2019 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Композиты на основе ферритов способны существенно ослаблять падающую энергию электромагнитного излучения, уменьшая отражение на границе между композитами и свободным пространством. Исследованы магнитные и диэлектрические свойства композитов, состоящих из ферритовых наполнителей и эпоксидной смолы, и параметры СВЧ-поглощения. Приведены зависимости магнитной и диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 1 до 3 ГГц.

DOI: 10.31857/S0367676520050312

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного развития техники и технологии распространение аппаратуры, создающей и принимающей электромагнитное излучение, достигло высоких уровней. Усиление электромагнитного излучения (ЭМИ) в специализированных устройствах заставляет все чаще обращаться к средствам экранирования и поглощения такого излучения. Несмотря на установленные строгие международные стандарты по допустимым уровням фоновых излучений, все чаще встает проблема изготовления специальных радиопоглощающих материалов.

Экранирующие и поглощающие ЭМИ материалы применяются, в основном, для целей защиты аппаратуры от разнообразных фоновых СВЧ излучений, для развязки узлов аппаратуры, маскировки, для обеспечения электромагнитной совместимости систем, для экранирующей защиты от утечки компьютерной информации.

В последнее время поглотители электромагнитных волн широко применяются в измерительной и контрольной технике, технике связи, радиолокации и других областях науки и техники.

При разработке поглощающих материалов их радиотехнические характеристики должны обеспечиваться при условии, что толщина и вес материала минимальны. Невозможно одновременно снижать оба эти параметра при сохранении рабочего диапазона частот. Если более важной задачей является снижение веса, целесообразно использовать поглотители электромагнитных волн (ПЭВ) с диэлектрическими потерями, если же более важным является уменьшение толщины по-

глотителя, предпочтительно использовать ПЭВ с магнитодиэлектрическими потерями. Это связано с тем, что на металлической поверхности электрическое поле обращается в нуль, в то время как магнитное поле достигает максимальной величины. Необходимо отметить также, что ПЭВ на основе материалов с магнитодиэлектрическими потерями менее чувствительны к отклонению толщины от заданной как по всей площади поглотителя, так и на отдельных участках.

По принципу действия поглощающие ПЭВ, используют преобразование энергии электромагнитной волны в тепловую, за счет диэлектрических (ϵ'') и магнитных (μ'') потерь материала.

Однослойные материалы со специальными частотными зависимостями комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей являются поглотителями интерференционного типа, представляющими собой модификацию широко известного четвертьволнового поглотителя. Ширина диапазона поглощения в данном случае достигается благодаря тому, что из-за частотной дисперсии ϵ'' и μ'' условия эффективного поглощения выполняются в каждой точке рабочего диапазона частот. То есть для всего рабочего диапазона частот входное сопротивление однослойного материала на металлической поверхности, имеющее вид [1]:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z_1 - iZ_2 \operatorname{tg}(k_2 d)}{Z_2 - iZ_1 \operatorname{tg}(k_2 d) Z_2}$$

должно быть равно волновому сопротивлению свободного пространства. Здесь Z_1 – волновое сопротивление металла, Z_2 – волновое сопротив-

ление материала, k_2 – волновой вектор в материале, d – толщина слоя материала.

Необходимо отметить, что в настоящее время востребованными широкополосными поглотителями являются оксидные ферритмагнетики на основе гексагональной структуры, такие как гексаферриты бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}(\text{M})$, отличающиеся как высоким значением поля кристаллографической анизотропии, так и высокой стабильностью магнитных характеристик в широком температурном интервале. Этот ферритмагнетик и легированные системы на его основе применяются в качестве активных компонентов в радиопоглощающих устройствах СВЧ-диапазона. Максимальное поглощение энергии ЭМИ у них наблюдается в диапазоне частот естественного ферромагнитного резонанса, которое определяется величиной поля анизотропии и микроструктурой материала. Изменение структурных и магнитных свойств ферритов осуществляется с помощью легирования исходного состава ионами различной валентности таких как NiO , TiO_2 , CoO , ZnO .

Использование этих оксидов позволяет за счет создания материала с близкими значениями μ и ϵ обеспечить небольшое различие между характеристическими сопротивлениями применяемого материала и свободного пространства [2], а за счет больших потерь – эффективное поглощение.

Зависимости эффективных значений действительной части диэлектрической и магнитной проницаемости и коэффициента потерь от частоты чувствительны к соотношению между электрофизическими параметрами дисперсионной фазы и от формы включений. Многокомпонентные среды обладают более разнообразными свойствами и отличаются оригинальной текстурой. В этом случае в основной фазе имеется не один, а несколько видов включений, которые различаются физическими параметрами, размерами и взаимным расположением в образце. Исследования таких образцов позволяют установить условия, при которых существует дисперсия диэлектрической и магнитной проницаемости, и дают возможность изучить частотную спектроскопию композиционных сред. В настоящее время экспериментально устанавливаются факты, показывающие, что релаксационные процессы композиционно неоднородных материалов зависят от числа компонентов, из которых они составлены. Возрастающая эффективная диэлектрическая проницаемость гексаферритов можно получить в результате увеличения содержания оксида железа выше стехиометрического. Отсюда следует, что при взаимодействии реальных материалов с электромагнитным полем возникают потери как за счет магнитных потерь μ'' , так и за счет потерь, связанных с токами проводимости, что обусловлено мнимой частью диэлектрической проницаемости ϵ'' .

Увеличение диэлектрической проницаемости в этом случае можно объяснить частичным восстановлением ионов железа Fe^{3+} до Fe^{2+} . В результате увеличения содержания ионов Fe^{2+} повышается электропроводность зерен феррита при сохранении диэлектрических свойств границ зерен.

ЭКСПЕРИМЕНТ

К ферритам, используемым в волноводной технике, предъявляют ряд технических требований:

1) высокая плотность материала, обеспечивающая низкие магнитные потери энергии за пределами ферромагнитного резонанса;

2) малые активные электрические потери энергии за счет высокого удельного электрического сопротивления (10^{11} Ом · см);

3) температурная стабильность в исследуемом интервале температур.

Повышение плотности ферритов может быть достигнуто повышением температуры и времени спекания, однако при этом возможна нежелательная рекристаллизация, которая приводит к укрупнению зерна и потере механической прочности. Размер зерна в спеченных материалах существенен для физико-химических и механических показателей готовых изделий. В этом случае необходимо управлять процессом рекристаллизации. Для ее прекращения в синтезируемую массу вводят малые добавки, нерастворимые в основном материале. В этом случае, расположившись по границам зерен, они будут препятствовать вторичной рекристаллизации. Для бариевых ферритов такими добавками являются V_2O_3 и B_2O_3 . В исходный состав эти оксиды вводились в количестве не более 3%. В этом случае размер кристаллитов составлял не более 3 мкм. Управление величинами намагниченности насыщения, температуры Кюри и магнитокристаллической анизотропии осуществлялось с помощью увеличения концентрации замещения гексаферритов катионами Co^{2+} и Ti^{4+} . Было установлено снижение исследуемых величин, что связано с уменьшением числа магнитных катионов.

На рис. 1 приведены магнитные спектры частотных зависимостей ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' и $\text{tg}\delta$ синтезированных материалов. Из рис. 1 видно, что образцы обладают низкими и близкими значениями магнитной и диэлектрической проницаемостей. Равенства между относительной диэлектрической и магнитной проницаемостями во всем диапазоне исследуемых частот достичь не представляется возможным. Полученные материалы представляют собой композиционную поликристаллическую структуру, обладающую реальными как диэлектрическими, так и магнитными потерями, которые определяются частичным восстановлением ионов железа Fe^{3+} до Fe^{2+} . В результате этого перехода изменяется содержание ионов Fe^{2+} ,

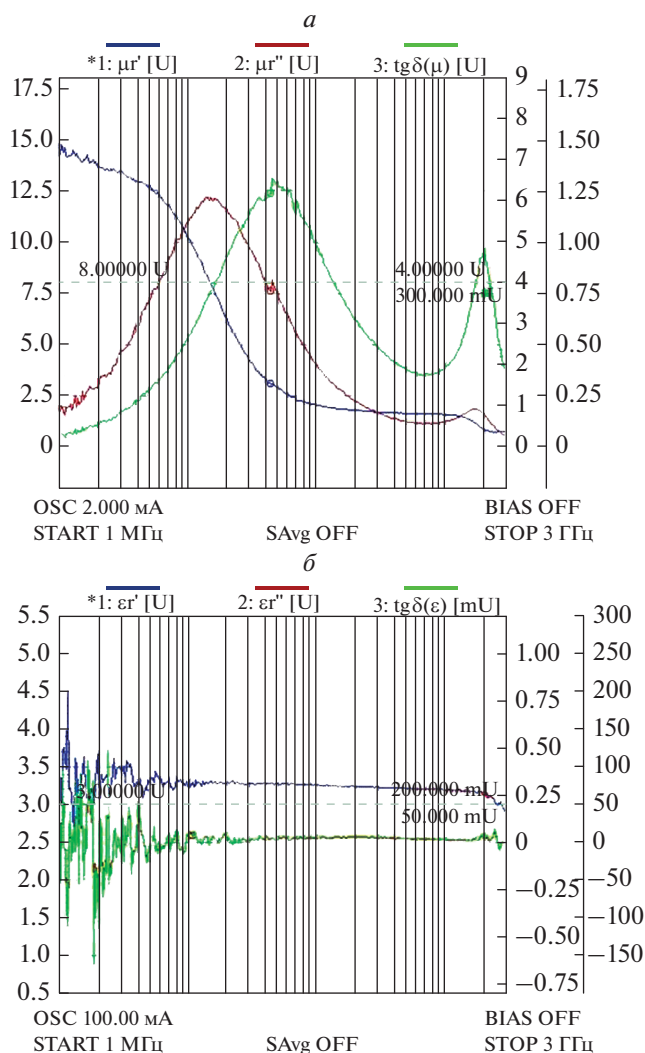


Рис. 1. Частотная зависимость магнитной (а) и диэлектрической (б) проницаемости композиционного гексаферрита Ba(TiCo)_{1.0}M.

влияющее на электропроводность зерен феррита при сохранении диэлектрических свойств границ зерен.

Изменение содержания железа Fe³⁺ в системе BaFe_{12-x}(TiCo)_xO₁₉ авторы [3–6], обосновали снижением энергии косвенного обменного взаимодействия Fe³⁺–O²⁻–Fe³⁺.

Приведенные замещения существенно влияют на константу анизотропии. Из рис. 2 видно, что даже сравнительно небольшие количества ионов Ti⁴⁺ и Co²⁺ достаточно резко понижают первую константу анизотропии. При увеличении содержания в соединении BaFe_{12-x}(TiCo)_xO₁₉ ионов Ti⁴⁺, Co²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺ одноосная кристаллографическая магнитная анизотропия перейдет в плоскость легкого намагничивания [7–9].

Следует отметить, что для гексаферрита бария замещение части ионов железа Fe³⁺ комплексом

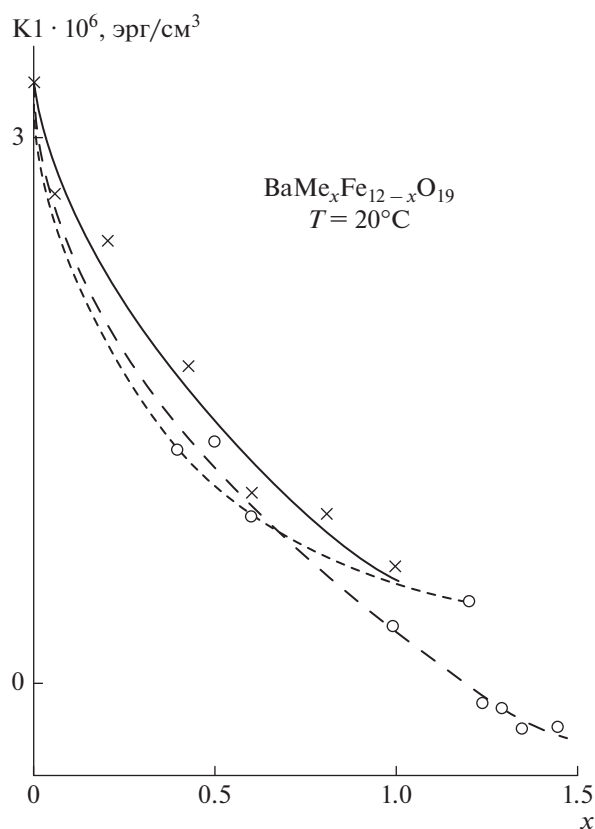


Рис. 2. Зависимость константы анизотропии K1 гексаферрита типа М от содержания ионов: × – Ni²⁺, o – (Ti⁴⁺–Co²⁺), □ – Zn²⁺.

Co²⁺ + Ti⁴⁺ приводит к сдвигу частоты естественного ферромагнитного резонанса.

Известно [6, 10–12], что пик поглощения гексагонального феррита бария BaFe₁₂O₁₉ располагается в области 47–60 ГГц, тогда как замещение ионов железа парамагнитными ионами сдвигает максимум поглощения на несколько ГГц в сторону снижения частоты. Контролируя степень замещения ионов железа, можно управляемо смещать пик максимума поглощения гексагонального феррита. Исследование частотных характеристик гексаферритовых образцов проводилось при комнатной температуре на приборе Agilent E4991A после калибровки в диапазоне частот от 1 МГц до 3 ГГц [13].

На рис. 3 приведена частотная зависимость поглощения ЭМИ составов а) Ba(TiCo)_{1.1}M; б) Ba(TiCo)_{1.3}M. Видно, что в интервале частот до 40000 МГц наблюдается интенсивное поглощение электромагнитной волны, обусловленное явлением ЕФМР состава Ba(TiCo)_{1.1}M, однако при увеличении концентрации легирования до состава Ba(TiCo)_{1.3}M пик поглощения смещается в область 18000 МГц. Таким образом, изменяя содержание ионов Ti⁴⁺ и Co²⁺ в исходном составе гек-

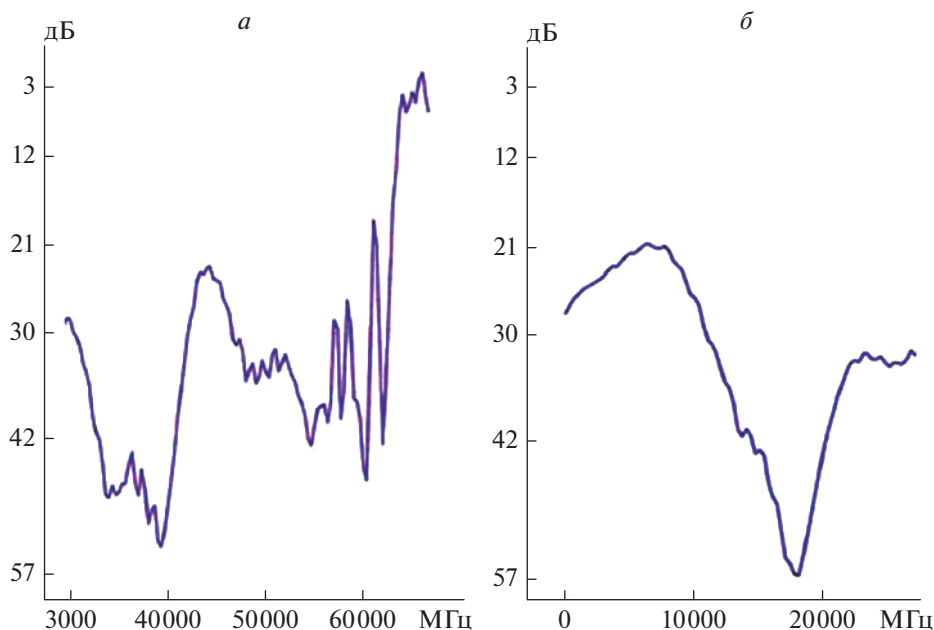


Рис. 3. Частотная зависимость поглощения составов: а – $\text{Ba}(\text{TiCo})_{1.1}\text{M}$; б – $\text{Ba}(\text{TiCo})_{1.3}\text{M}$.

саферрита, можно целенаправленно управлять уровнем и частотой поглощения ЭМИ.

Именно это обстоятельство обуславливает определенные требования к полученным материалам, которые можно сформулировать как:

- малые активные потери;
- магнитная проницаемость в области частот от 1 МГц–3 ГГц $\mu' \rightarrow 2.4$;
- диэлектрическая проницаемость в области частот от 1 МГц–3 ГГц $\epsilon' \rightarrow 3.3$;
- температурный диапазон от -100 до $+100^\circ\text{C}$;
- импеданс в области частот от 1 МГц–3 ГГц; $\mu/\epsilon < 2$.

ВЫВОДЫ

Из полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Для создания композиционных материалов с заданной диэлектрической и магнитной проницаемостью при сохранении низких диэлектрических и магнитных потерь в микроволновом диапазоне волн возможно использовать гексаферриты типа М.

2. Приведены направления получения легированных гексаферритов с заданной диэлектрической и магнитной проницаемостью, при сохранении высокой степени поглощения в диапазоне от 20 до 40 ГГц.

3. Показано, что при изготовлении композитов гексаферритов можно целенаправленно управлять величиной диэлектрической и магнитной проницаемостью феррита.

4. Отмечено, что с повышением легирования исходного состава положение пика максимального поглощения ЭМИ сдвигается в область пониженных частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lagarkov A. N., Rozanov K. N. // J. Magn. Magn. Mater. 2009. V. 321. № 14. P. 2082.
2. Cruickshank D. Microwave materials for wireless applications. Artech House, 2011. 221 p.
3. Helszajn J., James D. // IEEE Trans. Microwave. Theory Tech. 1978. V. MTT-26. P. 95.
4. Linkhart D. Microwave circulator design. Artech House, 2014. 364 p.
5. <https://www.skyworksinc.com>.
6. Труханов С.В., Труханов А.В., Васильев А.Н. и др. // ЖЭТФ. 2010. Т. 138. № 2. С. 236.
7. Hua Z.H., Li S.Z., Han Z.D. et al. // Mater. Sci. Engin. 2007. V. A 448. P. 326.
8. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 496 с.
9. Левин Б.Е., Третьяков Ю.Д., Летюк Л.М. Физико-химические основы получения, свойства и применение ферритов. М.: Металлургия, 1979. 472 с.
10. Labeyrie M., Mage J. C., Simonet W. // IEEE. Trans. Magn. 1984. P. 1224.
11. Chen D., Liu Y., Li Y. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2013. V. 337–338. P. 65.
12. Чепарин В.П., Черкасов А.П. // Неорг. матер. 1972. № 8. С. 196.
13. Серебрянников С.В., Черкасов А.П., Серебрянников С.С., Кошкин П.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 1030; Serebryannikov S.V., Cherkasov A.P., Serebryannikov S.S., Konshin P.I. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 8. P. 928.