ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2022, том 86, № 9, с. 1264–1267

УДК 537.622:537.86

ИМПЕДАНСНО-СОГЛАСОВАННЫЕ С ВАКУУМОМ МАТЕРИАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕРРОШПИНЕЛЕЙ

© 2022 г. С. В. Серебрянников[1, *], С. С. Серебрянников[1], А. В. Долгов[1], Л. Л. Еремцова[1], А. З. Славинский[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет МЭИ", Москва, Россия*

**E-mail: SerebriannikSV@mpei.ru*

Поступила в редакцию 18.04.2022 г.
После доработки 13.05.2022 г.
Принята к публикации 23.05.2022 г.

Рассматривается создание и исследование композиционных магнитных материалов на основе керамики со структурой шпинели, которые могут быть использованы в различных устройствах, выполняя сенсорные, антенные и радиопоглощающие функции. Представлены результаты синтеза и частотных исследований в области до 3 ГГц композитных материалов на основе феррита со структурой шпинели $2Ti_{14}Fe_{1.4}Co_{0.4}(Al_2O_3)$.

DOI: 10.31857/S0367676522090253

ВВЕДЕНИЕ

Материалы на основе ферритов со структурой шпинели были первыми, которые применялись в СВЧ-технике [1]. Феррошпинели имеют общую химическую формулу $MeFe_2O_4$, где в качестве Me используется двухвалентный ион переходных металлов. Подобные материалы со структурой шпинели активно применяются в высокомощных устройствах – фазовращателях, антеннах и вентилях. В диапазонах частот от 7 до 15 ГГц успешно применяют магниево-марганцевые (Mg–Mn), никелевые (Ni) и литиевые (Li) ферриты [2, 3]. Современные тенденции развития телекоммуникаций и усложнение электромагнитной обстановки вокруг объектов, вовлеченных в создание небольшой беспроводной сети между множеством электронных устройств, требует поиска новых материалов или композиций для обеспечения совместной надежной работы таких устройств. Примером могут служить системы беспроводной связи, использующие диапазон частот 2.4 и 5 ГГц, которые не требуют лицензирования регулирующими органами большинства стран мира [4]. Для работы таких радиосистем создается антенное полотно с излучателями плоской формы. В этом случае требуется создать определенный уровень развязки между различными каналами передачи в рамках единого приемо-передающего полотна. В связи с этим остро стоит задача уменьшения связи между излучателями. Решением ее может служить использование импедансно-согласованных с вакуумом материалов, основные параметры которых – действительная и мнимая части диэлектрической и магнитной проницаемости – равны [5]. Свое название "импедансно-согласованные с вакуумом" материалы получили потому, что для плоской волны импеданс этой среды равняется импедансу для плоской волны вакуума. Это означает, что плоская волна не будет отражаться от границы "материал-вакуум" [6, 7]. В качестве материалов с такими свойствами предлагается использовать керамические материалы, основу которых составляют феррошпинели.

При относительно большом числе работ по исследованию и применению гексагональных ферритов материалы на основе феррошпинели остаются малоизученными. Эксплуатационные возможности материалов на основе шпинели достаточно высоки, особенно в диапазоне частот до 3 ГГц. При разработке подобных материалов необходимо учитывать различные механизмы их функционирования, взаимодействие в готовых изделиях и конструкциях различных по электрофизическим свойствам материалов. Недостатком многих материалов, которые применяются в настоящее время в аналогичных конструкциях, является то, что в них присутствуют компоненты, способные согласованно работать только в одной из составляющих электромагнитного излучения, либо в электрической, либо в магнитной. Более того структура этих материалов не предполагает

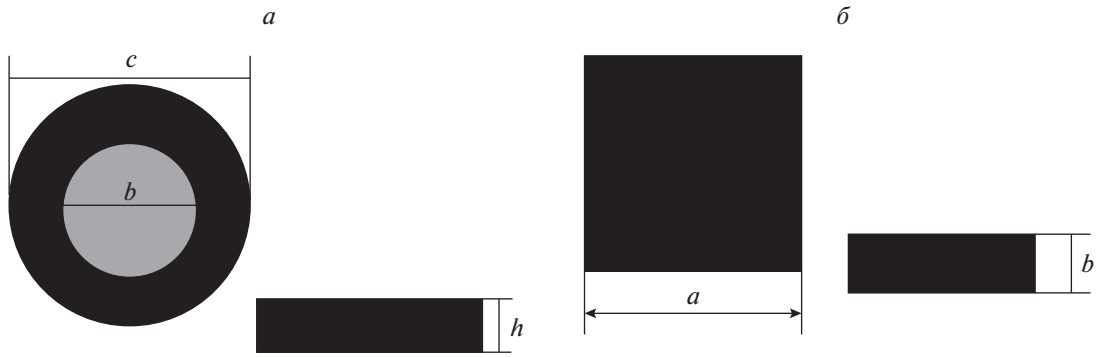

Рис. 1. Формы образцов для исследования диэлектрической (*а*) и магнитной проницаемостей (*б*) материалов.

проявление квантовых эффектов. Поэтому актуальной задачей является синтез такого композиционного материала, который позволил бы увеличить верхний предел частоты, что в значительной мере определяется резонансной частотой. Смещение резонансной частоты в область 5 ГГц позволяет расширять область применения ферритов со структурой шпинели.

Керамические материалы на основе феррошпинелей редко рассматриваются при создании импедансно-согласованных с вакуумом материалов. Существует целый ряд факторов, которые влияют на это. Главное – это сильная зависимость их показателей свойств от соотношения Крамерса–Кронинга [8], связывающего диссипацию энергии в материале с наличием частотной дисперсии, а также имеющиеся ограничения пределом Снука [9]. В то же время установлено, что возможности материалов на основе шпинели достаточно перспективны, особенно в диапазоне до 3 ГГц [10].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследован керамический материал на основе феррита со структурой шпинели, имеющий химическую формулу $2Ti_{14}Fe_{1.4}Co_{0.4}(Al_2O_3)$. Первоначально порошки материала изготавливали в планарной мельнице в течение 4 часов. Затем полученная смесь подвергалась прокаливанию при температуре порядка 1000°C, а после термической обработки вновь измельчалась. Полученные порошки подвергались сухому прессованию в матрице из нержавеющей стали. Прессованные гранулы и тороидальные образцы спекали в печи в течение 5 ч в атмосфере воздуха при температуре 1100°C.

Измерение параметров свойств материалов проводились на анализаторе импеданса производства Agilent Technologies с использованием специальных дополнительных приставок того же производителя. Измерительные приставки позволяют осуществлять измерения действительных и мнимых частей диэлектрической (ε_r' и ε_r'') и магнитной (μ_r' и μ_r'') проницаемостей в диапазоне частот от 1 МГц до 3 ГГц, что достаточно при исследовании ферритов со структурой шпинели. Каждая из приставок перед применением обязательно проходила трехступенчатый алгоритм калибровки, указанный в [11].

Экспериментальные образцы для исследования параметров магнитной проницаемости (рис. 1*а*) представляют собой шайбу, имеющую внешний диаметр *c*, который должен быть не более 20 мм, и внутренний диаметр *b* не более 3.1 мм. Высота образца *h* в виде шайбы не превышала 8.5 мм.

Исследование параметров диэлектрической проницаемости проводились на образцах иной формы (рис. 1*б*). Они имели вид параллелепипеда толщиной до 4 мм с квадратом в основании, сторона которого составляла не более 30 мм.

Получены экспериментальные частотные зависимости не только реальных и мнимых частей диэлектрической и магнитной проницаемостей, но и тангенсов угла диэлектрических $\mathrm{tg}\,\delta(\varepsilon)$ и магнитных потерь $\mathrm{tg}\,\delta(\mu)$ композиционного керамического материала на основе феррита $2Ti_{14}Fe_{1.4}Co_{0.4}(Al_2O_3)$ со структурой шпинели. Зависимости представлены на рис. 2.

Показано, что диэлектрические потери материалов на основе феррошпинели ниже, чем в других известных аналогичных структурах. При этом значения мнимой части диэлектрической проницаемости материалов в СВЧ диапазоне (гигагерцы) частот возрастают с увеличением частоты. Эффективная составляющая диэлектрической проницаемости сохраняет достаточно стабильное значение во всем исследованном диапазоне частот.

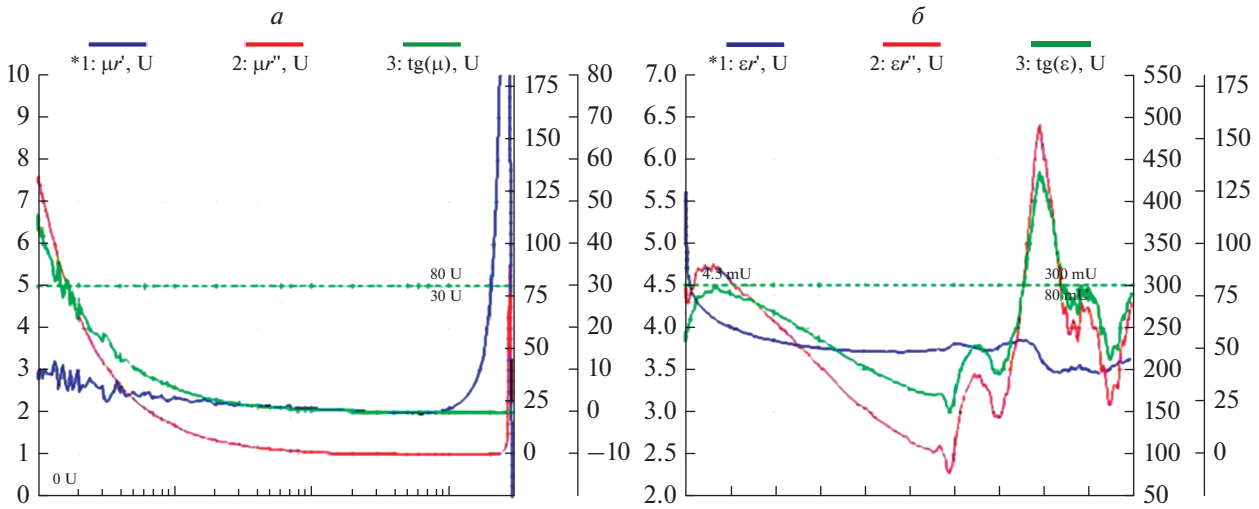

Рис. 2. Частотная зависимость магнитных (*а*) и диэлектрических (*б*) параметров исследованной феррошпинели.

Магнитная проницаемость исследуемого феррита со структурой шпинели имеет достаточно низкое и стабильное значение. Выше частоты 2 ГГц действительная часть магнитной проницаемости резко увеличивается, а в области частоты 3 ГГц также резко возрастают магнитные потери.

В то же время значения магнитной и диэлектрической проницаемостей исследуемого композиционного материала, имеющие величину порядка 2 и 4, соответственно, можно назвать близкими. Это свидетельствует о том, что на базе таких материалов при проведении дальнейших работ, прежде всего в области синтеза новых композиций, возможно получение импедансно-согласованных с вакуумом материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментальных работ по синтезу композиционных керамических материалов получены ферриты со структурой шпинели, имеющие общую формулу $2Ti_{14}Fe_{1.4}Co_{0.4}(Al_2O_3)$. Исследованы основные электромагнитные параметры свойств материалов – диэлектрическая и магнитная проницаемости, а также диэлектрические и магнитные потери в диапазоне частот 1МГц–3 ГГц. Установлено, что синтезированный материал имеет достаточно низкие значения магнитной и диэлектрической проницаемостей в исследованном СВЧ диапазоне. В области частот до 1 ГГц значения реальных частей магнитной и диэлектрической проницаемости являются близкими и составляют величины 2 и 4, соответственно. Дальнейшие модификации синтезированного керамического материала на основе феррошпинели могут позволить его использовать в различных устройствах, требующих сочетания материалов с согласованными сопротивлениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Яковлев Ю., Генеделев С.* Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. М.: Советское радио, 1975. 360 с.
2. *Cruickshank D.* Microwave materials for wireless application. Artech House, 2011. 221 p.
3. *Chen P. Y., Argyropoulos C., Alu A.* // IEEE Trans. Antenn. Propag. 2013. V. 61. No. 4. P. 1528.
4. *Naik G., Liu J., Park J.M.J.* // IEEE Commun. Surv. Tutor. 2018. V. 20. No. 3. P. 1777.
5. *Климов К.Н.* // Сб. тр. XIII Межд. научно-практ. конф. “Инновац. Информ. Коммун. Технол.” М.: Асс. вып. и сотр. ВВИА им. проф. Жуковского. 2016. С. 515.
6. *Stratton J.A.* Electromagnetic Theory. N.Y., London: McGraw Hill Book Company, 1941.
7. *Schantz H.G.* // Proc. Antenna Appl. Symp. (Allerton Park, 2014). Art. No. 25.
8. *Shinichi K., Tomoya Y., Akira I., Katsumi O.* Antenna apparatus. US Patent No. 7482977B2, cl. A45C11/00, H01Q1/38. 2004.
9. *Rozanov K.N., Starostenko S.N.* // J. Commun. Technol. Electron. 2003. V. 48. No. 6. P. 652.
10. *Mahalakshmi S., Jayasri R., Nithiyanatham S. et al.* // Appl. Surface Sci. 2019. V. 494. P. 51.
11. *Serebryannikov S.V., Cherkasov A.P., Serebryannikov S.S. et al.* // Proc. SPIE. 2018. V. 10800. Art. No. 108000J.

Impedance-matched with vacuum materials using ferrospinels

S. V. Serebryannikov[a, *], S. S. Serebryannikov[a], A. V. Dolgov[a], L. L. Yeremtsova[a], A. Z. Slavinskiy[a]

[a] *National Research University "MPEI", Moscow, 111250 Russia*

**e-mail: SerebriannikSV@mpei.ru*

The creation and research of composite magnetic materials based on ceramics with a spinel structure which can be used in various devices, performing sensor, antenna, and radio-absorbing functions, is considered. The results of synthesis and frequency studies in the field up to 3 GHz of ferrite-based composite materials with spinel structure $2Ti_{14}Fe_{1.4}Co_{0.4}(Al_2O_3)$ are presented.