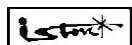




Посвящается
70-летию РНТОРЭС



КрымМуКо 2015 CriMiCo

**25-я Международная Крымская конференция
СВЧ-техника
и телекоммуникационные технологии
Материалы конференции**

**6—12 сентября 2015 г.
Севастополь, Крым, Россия**

**2015 25th International Crimean Conference
Microwave &
Telecommunication Technology
Conference Proceedings**

**September 6—12, 2015
Sevastopol, Crimea, Russia**

**В двух томах
In Two Volumes**

**Том 1
Volume 1**

Moscow • Minsk • Sevastopol
2015

УДК 621.3.029.62+621.39
ББК 32я431
С255

Организаторы:

Российское научно-техническое общество радиотехники,
электроники и связи (РНТОРЭС) им. А. С. Попова
Крымский научно-технологический центр
им. проф. А. С. Попова (Севастополь)
Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ)
Севастопольский государственный университет
Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники (Минск)
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
НП ОАО «Фаза» (Ростов-на-Дону)
ОАО «НПП "Исток" им. Шокина» (Фрязино)
ЗАО «Микроволновые системы» (Москва)
НПП «Системные ресурсы» (Москва)
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
НПФ «Микран» (Томск)
ООО «Радиокомп» (Москва)
Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург)
Keysight Technologies (Москва)
SD Solutions (Санкт-Петербург)
Крымский федеральный университет
им. проф. В. И. Вернадского (Симферополь)
НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» (Кацивели)

Информационная поддержка:

Журнал «Вестник электроники»

25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). Севастополь, 6—12 сентября 2015 г. : материалы конф. в 2 т. — Севастополь, 2015. — Т. 1: 666 с. (1—596) + 70 с.: ил. — ISBN 978-1-4673-9414-7.

В 1-й том сборника материалов включены 277 из 588-ти прошедших рецензирование и включенных в программу конференции докладов, которые будут представлены на секциях: Материалы и технология СВЧ-приборов; Нанотехнологии и наноматериалы; Наноэлектроника; Нанотехнологии и наноэлектроника; СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты; Радиационная стойкость материалов и ЭКБ; Электромагнитная стойкость материалов и ЭКБ; Измерение параметров цепей и сигналов; Измерение параметров материалов и технологических процессов; Антенные измерения; Обработка результатов измерений и другие приложения; Контроль и управление в технологических процессах; СВЧ-технологии в задачах мониторинга окружающей среды; Радиофотоника; Микроволновые технологии в биологии и медицине; Радиоастрономия и распространение радиоволн в атмосфере Земли; Методы и средства ДЗЗ; Моделирование и реализация комплексов и систем. Авторами представленных на конференции докладов являются 1216 ученых и специалистов 194-х университетов и предприятий 14-ти стран: Беларуси, Великобритании, Дании, Ирака, Казахстана, Канады, Кореи, Польши, России, Румынии, Украины, Швеции, ЮАР и Японии.

Материалы конференции изданы также на компакт-диске.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области СВЧ-техники и телекоммуникационных технологий. Сборник также будет полезен студентам и аспирантам телекоммуникационных, радиотехнических и радиофизических факультетов вузов.

УДК 621.3.029.62+621.39
ББК 32я431

IEEE Catalog Number CFP15788-PRT
ISBN 978-1-4673-9413-0 (CD)
ISBN 978-1-4673-9414-7

© Оргкомитет КрыМиКо'2015
© КНТЦ им. Попова, 2015

ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON THE MIXTURE OF HEXAFERRITE AND CARBON NANOSTRUCTURES IN A POLYMER MATRIX

Korovin E. Yu., Pavlova A. A., Puchkov E. S.
Tomsk State University
Lenina Avenue 36, Tomsk, 634050, Russian Federation
Ph.: (3822) 413973, e-mail: korovin_ey@mail.tsu.ru

Abstract — Spectra of reflectance, transmittance and absorption of electromagnetic radiation of composites based on W hexaferrite and their mixture with carbon nanostructures in polymer matrix were determined experimentally and theoretically. Addition of carbon nanostructures into magnetic material leads to decrease of reflectance in the case of lower thickness. Addition of carbon nanostructures leads to better electromagnetic compatibility of free space impedance and impedance of material.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕСИ ГЕКСАФЕРРИТА И УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ

Коровин Е. Ю., Павлова А. А., Пучков Е. С.
Национальный исследовательский Томский государственный университет
пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия
тел.: (3822) 413973, e-mail: korovin_ey@mail.tsu.ru

Аннотация — Экспериментально и теоретически определены частотные зависимости коэффициента отражения, прохождения и поглощения электромагнитных волн композиционными материалами на основе гексаферрита W типа и его смеси с углеродными наноструктурами в полимерной матрице. Показано, что добавление углеродных наноструктур в магнитный материал приводит к снижению коэффициента отражения при более низкой толщине. Отмечается, что при добавлении углеродных наноструктур приводит к лучшему согласованию волнового сопротивления свободного пространства с волновым сопротивлением материала.

I. Введение

В основе создания материалов с заданными электромагнитными параметрами лежит функциональная связь электродинамических характеристик с химическим составом, кристаллографической структурой и технологией изготовления. Необходимость разработки таких материалов возникает, в частности, при освоении терагерцового диапазона для разработки мобильной аппаратуры со сниженными весогабаритными характеристиками. Успехи нанотехнологии, достигнутые в последнее время, доказали эффективность применения углеродных наноструктур в разработанные ранее смесями [1]. Применение ферритов вместо искусственных магнитоэлектриков на основе металлических порошков позволило существенно снизить толщины поглощающих слоев и их вес [2]. В настоящее время отмечается достижение предела в использовании чистых ферритовых материалов, поэтому представляет интерес разработать композиционный материал на основе ферритов с добавками углеродных наноструктур, которые могли бы эффективно работать как в свободном пространстве так и на металлической поверхности.

II. Основная часть

Для достижения поставленной цели были синтезированы порошки гексаферритов W типа по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Этот метод является менее энергозатратным и позволяет получать гексаферриты, частицы которых имеют узкие распределения по размерам и форме. Сверхвысокочастотным плазменным методом получены углеродные наноструктуры, дополнительно

подвергнутые ультразвуковой обработке. При расчете электромагнитных параметров материалов использовались соотношения полученные в [3]. Для выбора оптимальных концентрационных соотношений использовалась формула Максвелла – Гарнетта. Измерения магнитной и диэлектрической проницаемости проведены в ЦКП «Центр радиоизмерений ТГУ» с использованием векторного анализатора цепей резонансным и волноводным методами.

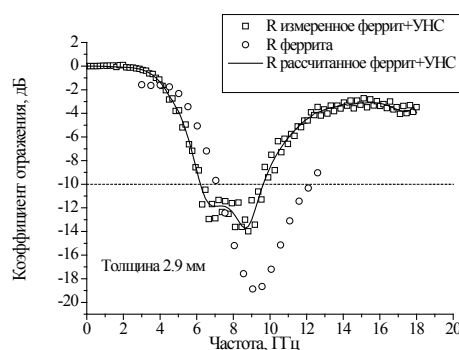


Рис. 1. Коэффициент отражения композиционного материала на основе гексаферрита и УНС в полимерной матрице (толщина 2.9 мм).

Fig. 1. The reflection coefficient of the composite material based on the carbon nanostructures and hexaferrite in the polymer matrix (thickness 2.9 mm)

Для исследования электромагнитных характеристик композиционных материалов на основе смеси гексаферрит и УНС были изготовлены материалы с указанной выше концентрацией с заранее определенными толщинами (2.9 мм; 2.5 мм; 2.2 мм).

Выбор данных толщин обусловлен многозначностью возможных вариантов построения конструкций

из материалов, эффективно взаимодействующих с электромагнитным излучением. 2.9 мм – соответствует оптимальной толщине конструкции из композита на основе гексаферрита. 2.5 мм – соответствует случаю, когда минимальный коэффициент отражения композита гексаферрит-УНС расположен вблизи частоты с минимальным отражением для материала на основе чистого гексаферрита. Результаты измерений и моделирования представлены на Рис. 1 – 3.

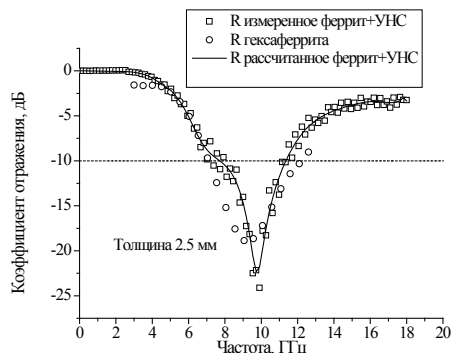


Рис. 2. Коэффициент отражения композиционного материала на основе гексаферрита и УНС в полимерной матрице (толщина 2.5 мм).

Fig. 2. The reflection coefficient of the composite material based on the carbon nanostructures and hexaferrite in the polymer matrix (thickness 2.5 mm)

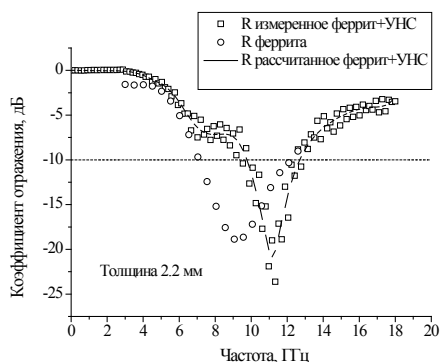


Рис. 3. Коэффициент отражения композиционного материала на основе гексаферрита и УНС в полимерной матрице (толщина 2.2 мм).

Fig. 3. The reflection coefficient of the composite material based on the carbon nanostructures and hexaferrite in the polymer matrix (thickness 2.2 mm)

Из рис. 1 видно, что при одинаковых толщинах минимум коэффициента отражения сдвинут по частоте и имеет два горба, связанные с несимметрией резонансной кривой.

На рис. 2 показано, что композиционный материал на основе гексаферрита и УНС имеет более низкий коэффициент отражения (на 5 дБ) при меньшей толщине. Дальнейшее изменение толщины приводит к уменьшению абсолютной величины коэффициента отражения и сдвигу минимума в область высоких частот, что обусловлено интерференцией волн в материале.

Для сравнения коэффициентов поглощения композиционного материала на основе гексаферрита и УНС с материалом на основе чистых УНС в полимерной матрице проведен расчет при одинаковых толщинах. Полученные результаты представлены на Рис. 9. Видно, что все частотные зависимости коэффициентов для композита содержащего гексаферрит и УНС монотонны. Вероятно, этот факт вызван лучшим согласованием волнового сопротивления материала со свободным пространством.

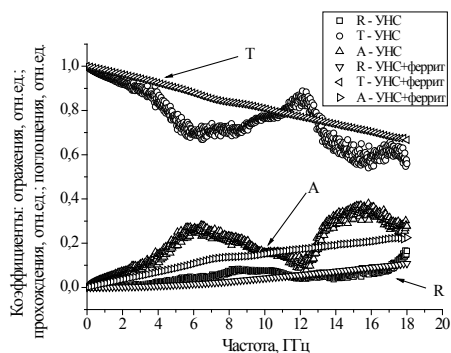


Рис. 4. Коэффициенты прохождения, отражения, поглощения композиционного материала на основе гексаферрита и УНС в полимерной матрице.

Fig. 4. The transmission, reflection, absorption coefficients of the composite material based on the hexaferrite and carbon nanostructures in the polymer matrix

III. Заключение

Измерения и моделирование электромагнитных характеристик композитов на основе смеси гексаферрит – УНС и «чистого» гексаферрита показали, что при одинаковой толщине материал гексаферрит – УНС имеет двугорбый коэффициент отражения, который сдвинут по частоте. Наличие второго горба на частотной зависимости коэффициента отражения вызвано несимметрией резонансной кривой комплексной магнитной проницаемости. Уменьшение толщины исследуемого материала до 2.5 мм привело к смещению минимума коэффициента отражения до частоты 10 ГГц. Таким образом добавление УНС в магнитный материал приводит к снижению коэффициента отражения (для данного материала на 5 дБ) при более низкой толщине. Дальнейшее уменьшение толщины исследуемого материала приводит к смещению минимума в область высоких частот.

Анализ рассчитанных коэффициентов отражения, прохождения и поглощения композиционного материала на основе гексаферрита и УНС с материалом на основе чистых УНС в полимерной матрице показал, что все частотные зависимости коэффициентов для композиционного материала содержащего гексаферрит и УНС монотонны. Частотные зависимости этих же коэффициентов для «чистого» УНС не монотонны. Монотонность частотных зависимостей коэффициентов отражения, прохождения и поглощения композиционного материала на основе гексаферрита и УНС связана с согласованием волновых сопротивлений свободного пространства с волновым сопротивлением материала.

Таким образом, из выше сказанного можно заключить, что синтезированный материал может эффективно использоваться для снижения интенсивности электромагнитного излучения, обладая при этом относительно низкими коэффициентами отражения и прохождения.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации МК-6957.2015.8

IV. References

- [1] Mazov I.N., Kuznetsov V.L., Moseenkov S.I. Structural and physical properties of MWNT/polyolefine composites. *Fullerenes, nanotubes, and carbon nanostructures*, 2010, Vol. 18, pp. 505-515.
- [2] Naiden E.P., Zhuravlev V.A., Itin V.I., et al. Structure and static and dynamic magnetic properties of Sr(Co_xTi_{1-x})Fe₁₂-2xO₁₉ hexaferrites produced by self-propagating high-temperature synthesis. *Russian physics journal*, 2013, Vol. 55, No. 8, pp. 869-877.
- [3] Brekhovskikh L.M. *Volny v sloistykh sredakh* [Waves in layered media]. Moscow, Academy of sciences, 1957. 501 p.