

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ВИДА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ

Д.Ю. Кравченко, Н.В. Насонова

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки 6, Минск 220013, Беларусь, darya.kravchenka@gmail.com, nasonovan@bsuir.by

В работе представлены результаты исследования электрофизических характеристик композиционных материалов с различными типами функциональных наполнителей в диапазоне частот 8-12 ГГц. Показано, что варьирование концентрации и типа наполнителя позволяет управлять диэлектрическими и магнитными параметрами. Особое внимание уделено эффекту перколяции, обеспечивающему резкий рост проводимости и диэлектрических потерь при достижении критической концентрации. Изучены свойства композитов с порошками никеля, карбонильного железа, $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{TiO}_2$, диоксида титана, углеродного волокна и влагосодержащих материалов. Результаты использованы для численного моделирования электромагнитных характеристик многослойных радиопоглощающих структур. Полученные данные демонстрируют потенциал различных композитов в создании адаптивных радиопоглотителей для защиты радиоэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова: радиопоглощающие материалы; электрофизические характеристики; перколяция; композиты; диэлектрическая проницаемость; магнитная проницаемость; многослойные структуры.

RESEARCH OF THE DEPENDENCE OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS ON THE TYPE OF FUNCTIONAL FILLERS AND COMPONENT CONCENTRATION

Darya Y. Kravchenko, Natallia V. Nasonova

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Brovki Str., 220013 Minsk, Belarus, darya.kravchenka@gmail.com, nasonovan@bsuir.by

The paper presents the results of a study on the electrophysical properties of composite materials with various types of functional fillers. The research focuses on how the type and concentration of fillers affect the dielectric and magnetic parameters of the composites in the frequency range of 8–12 GHz. A key emphasis is placed on the percolation effect, where a sharp increase in electrical conductivity and dielectric losses occurs upon reaching a critical filler concentration, significantly enhancing electromagnetic energy absorption. The materials studied include composites based on nickel powder, carbonyl iron, a mixture of Fe_3O_4 and TiO_2 , titanium dioxide, carbon fiber, and water-containing sorbents. Nickel-filled composites exhibit strong percolation characteristics and combined dielectric-magnetic loss mechanisms. Carbonyl iron provides a balanced response without sharp conductivity transitions, while TiO_2 - and Fe_3O_4 -based composites demonstrate high dielectric permittivity with low loss, making them suitable for use as dielectric layers. Special attention is given to composites with water-containing matrices. Due to orientational polarization of water molecules under microwave fields, such materials exhibit strong dispersion of dielectric properties. An increase in moisture content from 10 wt.% to 50 wt.% results in a rise in the real part of the permittivity from 3 to 30 and in the imaginary part from 0.5 to 10. The obtained data were used for numerical modeling of multilayer absorbing structures. These findings confirm the potential of functional composites for developing efficient, broadband, and adaptive electromagnetic shielding systems.

Keywords: microwave absorbing materials; electrophysical properties; percolation; composites; dielectric permittivity; magnetic permeability; multilayer structures.

Введение

Взаимодействие электромагнитного излучения (ЭМИ) с веществом лежит в основе разработки средств защиты радио-

электронных устройств, систем связи и радиолокации. Радиопоглощающие материалы (РПМ) являются ключевым элементом таких систем [1].

Наибольшее внимание в данной работе уделено изучению взаимодействия ЭМИ с композиционными материалами, обладающими диэлектрическими потерями, магнитной проницаемостью и электропроводностью. Понимание взаимосвязи этих параметров с концентрацией и типом наполнителя открывает широкие возможности для инженерного проектирования многослойных и градиентных радиопоглотителей с заданными электромагнитными характеристиками.

Материалы и методы исследования

Для оценки электрофизических характеристик композитов использован алгоритм Николсона-Росса-Вейера, на основе измерений коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот 8-12 ГГц с применением векторного анализатора цепей. Изучались образцы с различными концентрациями наполнителей (от 10 мас.% до 90 мас.%) в полимерных матрицах (эпоксидной, полиуретановой, кремнийорганической).

Результаты и их обсуждение

Наиболее ярко выраженные проводящие и магнитные свойства были получены для композитов с порошком никеля. При максимальной концентрации (около 50 мас.% в эпоксидной матрице) наблюдается рост ϵ'' до 2.4, что связано с эффектом перколяции: формированием непрерывных цепочек проводящих частиц, обеспечивающих эффективное поглощение энергии за счет омических потерь. При этом μ' возрастает с 2.7 до 3.8. В полиуретановой матрице аналогичные концентрации приводят к более высоким значениям μ' (до 4.9) при меньших потерях ($\epsilon'' \approx 1.2$), что объясняется более равномерным распределением частиц и меньшей агломерацией. Магнитная проницаемость у никелевых композитов также повышается: μ' достигает 1.58, а $\mu'' - 0.62$, что создает комбинированный эффект диэлектрического и магнитного поглощения. Эти материалы особенно эффективны для широкополосных

РПМ и конструкций на металлических подложках, включая четвертьволновые поглотители типа Солсбери [2, 3].

Композиты с наполнителем $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{TiO}_2$ при концентрации 50 мас.% демонстрируют высокую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon' = 5.7$) при умеренных потерях ($\epsilon'' = 0.7$) и практически отсутствующем магнитном отклике в этом диапазоне частот ($\mu' \approx 1$, $\mu'' \approx 0$). Это свидетельствует о доминировании диэлектрического механизма поглощения, что делает данные материалы перспективными в качестве диэлектрических слоев в многослойных РПМ, особенно при необходимости обеспечения высокой ϵ' при минимальной проводимости [4].

Диоксид титана, обладающий высокой собственной диэлектрической проницаемостью на низких частотах [5], при концентрации до 90 мас.% сохраняет ϵ' на уровне 2.8 при $\epsilon'' \leq 0.1$. Тангенс диэлектрических потерь не превышает 0.018, однако механические свойства при таких концентрациях ухудшаются.

Карбонильное железо в кремнийорганическом связующем обеспечивает сбалансированный рост диэлектрических и магнитных параметров без выраженного порога перколяции. При концентрации 50 мас.% ϵ' достигает 4.2, $\epsilon'' - 0.6$, $\mu' - 1.3$, а $\mu'' - 0.2$, при этом $\tan \delta$ составляет около 0.2, обеспечивая преобразование энергии ЭМИ в тепловую. Такие композиты применимы в качестве универсальных радиопоглотителей, в том числе в слоях, совмещающих диэлектрическое и магнитное поглощение в одной структуре [6].

Композиты с углеродным волокном демонстрируют умеренный рост ϵ' (до 1.8) и ϵ'' (до 0.2) с увеличением концентрации до 70 мас.%. Эти материалы подходят для создания узкополосных радиопоглотителей и в качестве вспомогательных слоев в радиопоглащающих конструкциях, где важна малая толщина и стабильность параметров [7].

Особый интерес представляет применение влагосодержащих композиционных

материалов в качестве слоев с высокой диэлектрической проницаемостью. Ориентационная поляризация молекул воды в условиях воздействия сверхвысокочастотного электромагнитного излучения обуславливает высокие значения диэлектрической проницаемости влагосодержащих материалов. С увеличением влагосодержания (от остаточного в размере 10 масс. % до 50 масс. %) влагосодержащего порошкового сорбента наблюдается равномерный рост комплексной диэлектрической проницаемости: с 3 до 30 для ϵ' и с 0.5 до 10 для ϵ'' .

Полученные электрофизические характеристики композитов были использованы для разработки моделей многослойных радиопоглотителей с минимальным коэффициентом отражения в диапазоне частот 8-12 ГГц.

Характеристика коэффициента отражения достигается выбором конструкции радиопоглотителя, количества и комбинации слоев, их толщины и электрофизических параметров. На рисунке 1 показана характеристика коэффициента отражения трехслойного радиопоглотителя со ступенчатым увеличением диэлектрических свойств слоев, с минимальным значением коэффициента отражения -37.3 dB на частоте 11.63 ГГц и шириной рабочей полосы частот (с величиной коэффициента отражения менее -10 dB) 2.16 ГГц.

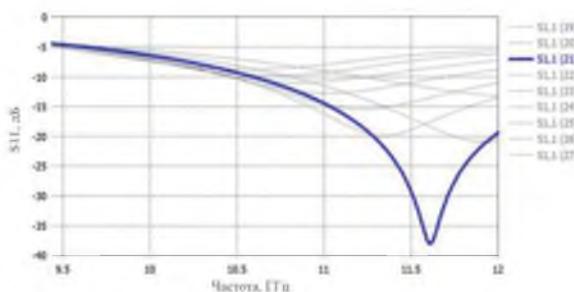


Рис. 1. Характеристика коэффициента отражения модели многослойного радиопоглощающего материала при изменении величины диэлектрической проницаемости второго слоя с 5 до 20 (шаг 2), $\epsilon'_1=3$; $\epsilon'_3=30$. Выделенная линия – $\epsilon'_2 = 9$

Заключение

Проведенный анализ показал, что варьирование состава композиционных материалов позволяет управлять механизмами поглощения электромагнитного излучения. Полученные данные использованы для моделирования многослойных радиопоглощающих структур с прогнозируемыми характеристиками. Представленные материалы могут быть эффективно применены в различных конфигурациях радиопоглотителей, включая широкополосные и узкополосные системы, в зависимости от требуемого диапазона частот и условий эксплуатации.

Работа выполнена при поддержке государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 6.2.10).

Библиографические ссылки

1. Богуш В.А., Лыньков Л.М., Насонова Н.В., Прищепа С.Л., Белоусова Е.С., Бойправ О.В., Давыдов Г.В., Попов В.А., Потапович А.В., Пухир Г.А. Исследования и разработки в области создания материалов, технологий и средств обеспечения безопасности. *Доклады БГУИР* 2024; 22(2): 42-54.
2. Zhang X., Zhang L., Zhang X., Yin X., Cheng L. Recent progress in microwave absorbing materials based on polymers and carbonaceous nanomaterials. *Carbon* 2021; 171: 422-448.
3. Li Y., Huang Y., Li Y., et al. Design of broadband electromagnetic wave absorbers based on composite materials: a review. *Composites Part B: Engineering* 2022; 237: 109870.
4. Wu W., He Q., Jiang C. Magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis and surface functionalization strategies. *Nanoscale Res Lett* 2008; 3(11): 397-415.
5. Сидоров Л.Н., Юровская М.А., Борщевский А.Я. Композиты на основе диоксида титана для микроволнового экранирования. *Физика и техника полупроводников* 2021; 55(2): 215-220.
6. Yang Z., Yao L., Zeng H. Broadband absorption of lightweight carbonyl iron/graphene composite. *Journal of Alloys and Compounds* 2021; 850: 156699.
7. Гуськов А.В., Колесников И.М., Соловьев А.В. Композиты на основе углеродного волокна для радиопоглощающих покрытий. *Физика и техника полупроводников* 2020; 54(3): 357-362.