

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ И МАГНИТНАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕГО НАНОКОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Ю. Ву, С.Л. Прищепа

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники», Минск, Беларусь*

Аннотация. Рассматривается радиопоглощающий материал на основе углеродных нанотрубок с инкорпорированными наночастицами ферромагнитного металла. Эффективность поглощения электромагнитного излучения в этом случае определяется не только диэлектрической проницаемостью, но и магнитной составляющей нанокompозита. Предлагается модельная структура для описания свойств подобных нанокompозитов. С учетом экспериментальных данных учитывается возможность окисления поверхности ферромагнитных наночастиц. В силу этого каждая наночастица представляется в виде сложной структуры типа ядро/оболочка. Приводятся выражения, описывающие вклад магнитной и диэлектрической составляющих в экранирующие свойства нанокompозита. При этом уравнения записаны в удобной для расчетов форме и включают в себя необходимые материальные параметры. Это позволит в будущем оценить коэффициент распространения плоской электромагнитной волны в нанокompозите на основе УНТ, коэффициенты поглощения и отражения, что даст возможность моделировать эффективность экранирования электромагнитного излучения в широком диапазоне частот.

Ключевые слова: радиопоглощающие материалы; нанокompозиты; углеродные нанотрубки; ферромагнетики; наночастицы; магнитная проницаемость; диэлектрическая проницаемость; структура ядро/оболочка; разупорядоченная структура; проводимость.

DIELECTRIC AND MAGNETIC COMPONENTS OF A RADIO-ABSORBING NANOCOMPOSITE BASED ON CARBON NANOTUBES

Y. Wu, S.L. Prischepa

*Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics",
Minsk, Belarus*

Abstract. A radio-absorbing material based on carbon nanotubes with embedded ferromagnetic metal nanoparticles is considered. The efficiency of electromagnetic radiation absorption in this case is determined not only by the permittivity, but also by the magnetic component of the nanocomposite. A model structure is proposed to describe the properties of such nanocomposites. Taking into account experimental data, the possibility of oxidation of the surface of ferromagnetic nanoparticles is taken into account. Due to this, each nanoparticle is represented as a complex core/shell structure. Expressions are given that describe the contribution of the magnetic and dielectric components to the shielding properties of the nanocomposite. The equations are written in a form convenient for calculations and include the actual material parameters. This will make it possible to estimate the propagation coefficient of a plane electromagnetic wave in a CNT-based nanocomposite, the absorption and reflection coefficients, which will subsequently make it possible to model the efficiency of shielding electromagnetic radiation in a wide frequency range.

Keywords: radio-absorbing materials; nanocomposites; carbon nanotubes; ferromagnets; nanoparticles; magnetic permeability; permittivity; core/shell structure; disordered structure; conductivity.

Введение

Радиопоглощающие материалы (РПМ) находят широкое применение в радиолокационной технике и различных средствах технической защиты информации. В последние годы большое значение уделяется наноструктурированным композитам, способным обеспечивать высокую степень поглощения и/или экранирования электромагнитного излучения на различных частотах. К таковым можно отнести нанометаллы и сплавы, наноксиды, наноферриты, графит, SiC , SiN , наноструктурированные проводящие полимеры и углеродные нанотрубки (УНТ). Среди перечисленных наноструктурированных материалов УНТ являются весьма перспективными компонентами РПМ [1,2]. Они обладают высокой прочностью, а также электро- и теплопроводностью. Исследования поглощения СВЧ излучения нанокompозитами на основе УНТ получили большой импульс благодаря особенностям их синтеза. УНТ формируются методом химического парового осаждения (ХПО) с применением катализатора на основе ферромагнитных 3d металлов. Поглощающие свойства нанокompозитов на основе УНТ в первую очередь определяются омическими и диэлектрическими потерями. Однако интеркаляция магнитных наночастиц в матрицу УНТ приводит к увеличению поглощающих свойств нанокompозитов из-за магнитных потерь. Эффективность экранирования материала при этом возрастает [3,4].

В данной работе проведена адаптация метода Грановского и др. [5] для описания поглощающих свойств нанокompозита на основе УНТ с инкорпорированными наночастицами ферромагнетика.

Результаты

Рассмотрим разупорядоченную структуру, содержащую магнитные проводящие наночастицы в проводящей среде. Схематически модельный образец представлен на рисунке 1. Каждая наночастица представляет собой структуру типа металлическое ядро/диэлектрическая оболочка. Индексы 1 на рисунке 1 относятся к материалу матрицы (в данном случае УНТ), индексы 2 – к материалу ферромагнитной наночастицы, индексы 3 – к оболочке.

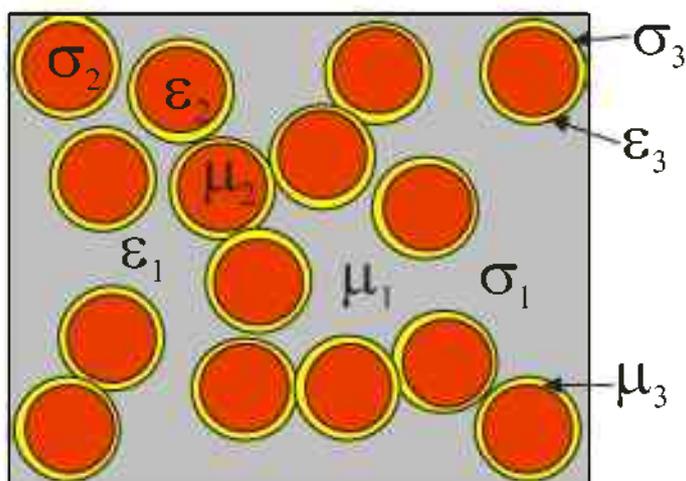


Рис. 1. Схематическое представление модельного образца
Fig. 1. Schematic representation of the model sample

Исходное уравнение для разупорядоченной структуры нанокompозита в форме, удобной для вычисления значений магнитной проницаемости запишется как

$$-2Q_{\mu}\mu^2(\omega) + \mu(\omega)[(3c_v - 1) - \mu_1 Q_{\mu}(3c_v - 2)] + \mu_1 = 0, \quad (1)$$

где параметр Q_{μ} характеризует воздействие свойств наночастицы и ее оболочки на магнитную проницаемость,

$$Q_{\mu} = \frac{1}{\mu_2} - \frac{i\omega \cdot a\mu_0}{2\rho_s}. \quad (2)$$

Уравнение (1) получено адаптируя результаты работы [5] для нанокомпозита, состоящего из проводящей матрицы с хаотично расположенными ферромагнитными наночастицами со структурой типа ядро/оболочка. В уравнениях (1) и (2) μ_1 – относительная магнитная проницаемость среды УНТ, μ_2 – относительная магнитная проницаемость наночастиц, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, a – характерный размер наночастиц, $\rho_s = \rho_{s0}(1 + ik\omega_0/\omega)$ – поверхностное сопротивление оболочки, которая окружает проводящую наночастицу, ρ_{s0} – сопротивление этой оболочки на постоянном токе, ω – циклическая частота электромагнитного излучения, ω_0 – циклическая частота квазимагнитного резонанса в упорядоченной структуре, k – отношение мнимой части ρ_s к ее реальной части на частоте ω_0 . Как правило, величина k зависит от свойств среды УНТ и включенных наночастиц.

Решение уравнения (1) запишем в виде, содержащем функцию только одного параметра, что представляет удобство для проведения практических расчетов,

$$\mu(\omega) = \sqrt{\mu_1/2Q_{\mu}} \eta \phi(\eta), \quad (3)$$

где функция

$$\phi(\eta) = \left(1 + \sqrt{1 + \eta^{-2}}\right) \quad (4)$$

зависит от параметра

$$\eta = \frac{[(3c_v - 1) - \mu_1 Q_{\mu}(3c_v - 2)]}{\sqrt{8\mu_1 Q_{\mu}}}. \quad (5)$$

Для диэлектрической проницаемости получено следующее уравнение,

$$\varepsilon(\omega) = \sqrt{\varepsilon_1(1 + \beta M^2)/2Q_{\varepsilon}} \xi \phi(\xi), \quad (6)$$

где функция $\phi(\xi)$ определяется уравнением (4) и параметр ξ выражается как

$$\xi = \frac{(3c_v - 1) - \varepsilon_1(1 + \beta M^2)Q_{\varepsilon}(3c_v - 2)}{\sqrt{8\varepsilon_1(1 + \beta M^2)Q_{\varepsilon}}}. \quad (7)$$

Характерной особенностью полученных уравнений (3) и (6) является наличие материальных параметров нанокомпозита, которые определяют его диэлектрическую и магнитную проницаемости. В частности, из уравнений (1) – (7) следует, что магнитная

и диэлектрическая проницаемости магнитного нанокompозита сложным образом зависят от концентрации и размеров наночастиц, диэлектрической и магнитной проницаемостей среды УНТ и наночастиц, а также сопротивления оболочки наночастиц.

Заключение

Проведенный анализ позволяет оценить коэффициент распространения плоской электромагнитной волны в нанокompозите на основе УНТ, коэффициенты поглощения и отражения, что в последующем даст возможность моделировать эффективность экранирования электромагнитного излучения в широком диапазоне частот.

References

1. Gupta S., Tai N. (2019) Carbon Materials and their Composites for Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness in X-band. *Carbon*. 152, 159–187.
2. Wu G., Chen Y., Zhan H., Chen H.T., Lin J.H., Wang J.N., et al. (2020) Ultrathin and Flexible Carbon Nanotube/Polymer Composite Films with Excellent Mechanical Strength and Electromagnetic Interference Shielding. *Carbon*. 158, 472–480.
3. Labunov V. A., Danilyuk F. L., Prudnikava A. L., Komissarov I., Shulitski B. G., Speisser C., et al. (2012) Microwave Absorption in Nanocomposite Material of Magnetically Functionalized Carbon Nanotubes. *Journal of Applied Physics*. 112 (2), 024302.
4. Çakmakçı N., Kim G., Song H., Shin M., Jung Y., Jeong Y. (2023) Ferrite-decorated Ultrathin and Lightweight Carbon Nanotube Film for Electromagnetic Interference Shielding. *ACS Applied Nano Materials*. 6 (19), 18229–18237.
5. Granovsky A. B., Bykov I. V., Ganshina E. A., Gushchin V. S., Inoue M., Kalinin Yu. E., et al. (2003) Magnetorefractive Effect in Magnetic Nanocomposites. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 96 (4), 1104–1112.

Сведения об авторах

Бу Ю., магистрант кафедры защита информации. Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (БГУИР).
ilmsiaoms@gmail.com.
Прищепа С.Л., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры защита информации БГУИР.
prischepa@bsuir.by.

Information about the authors

Wu Y., Master Student. Department of Information Security. Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics" (BSUIR).
ilmsiaoms@gmail.com.
Prischepa S.L., Dr. of Sci. (Phys. and Math.). Professor. Professor at the Department of Information Security, BSUIR.
prischepa@bsuir.by.