

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 537.622.4

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.005

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ Ni–Zn ФЕРРИТАХ

Светлана Евгеньевна Игошина^{1†}, Денис Александрович Мухаев², Егор Игоревич Крупкин³,
Андрей Андреевич Карманов⁴

^{1, 2, 3, 4} Пензенский государственный университет, ул. Красная, 40, 440026, Пенза, Россия

¹ sigoshina@mail.ru[†], <https://orcid.org/0009-0001-7636-7461>

² muxaev008778@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0892-8903>

³ egor.krupkin99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0027-4744>

⁴ starosta07km1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8318-8149>

Аннотация. Никель-цинковые (Ni–Zn) и магний-цинковые ферриты (Mg–Zn), а также композиты на их основе, являются одним из наиболее перспективных радиопоглощающих материалов, которые могут эффективно поглощать электромагнитное излучение в диапазоне частот от нескольких МГц до единиц ГГц. Многие вопросы, связанные с радиопоглощающими свойствами данных материалов, остаются открытыми до сих пор, что является следствием влиянием параметров образца, как на частотные зависимости магнитной и диэлектрической проницаемости, так и на параметры доменных стенок. В рамках настоящей работы предложена математическая модель процесса распространения электромагнитных волн в радиопоглощающих Ni–Zn ферритах. Поставлены граничные и начальные условия, учитывающие геометрию и микроструктуру образцов. Решение сформулированной краевой задачи на отрезке с использованием метода разделения переменных или метода Фурье показало, что амплитуда электромагнитной волны значительно уменьшается, пройдя половину толщины образца, что отвечает высоким радиопоглощающим свойствам исследуемых Ni–Zn ферритов. Проведен численный анализ отражения плоской поляризованной волны от двухслойной структуры Ni–Zn феррит/металлическая пластина в области частот до 100 МГц. Результаты моделирования верифицированы экспериментальными данными по радиопоглощающим свойствам Ni–Zn ферритов марки 1000НН. Показано, что использование предположения об экспоненциальном характере зависимостей диэлектрической и магнитной проницаемости от нормированной координаты применимы только в узком частотном диапазоне до 3 МГц, для которого экспериментальные данные и результаты численного анализа находятся в хорошем согласии.

Ключевые слова: радиопоглощающие ферриты, распространение электромагнитных волн, волновое уравнение, коэффициент отражения, частотная зависимость.

Благодарности: Авторы выражают благодарность д.т.н., профессору Андрееву В.Г. за помощь в постановке граничных и начальных условий, а также предоставленные экспериментальные данные по частотной зависимости магнитной проницаемости и коэффициенту отражения электромагнитных волн от двухслойной структуры Ni–Zn феррит/металлическая пластина.

Для цитирования: Игошина С.Е., Мухаев Д.А., Крупкин Е.И., Карманов А.А. Моделирование процесса распространения электромагнитных волн в радиопоглощающих Ni–Zn ферритах // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 3. С. 329–337. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.005.

Original article

SIMULATION OF PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN RADIO-ABSORBING Ni–Zn FERRITES

Svetlana E. Igoshina^{1†}, Denis A. Muchaev², Egor I. Krupkin³, Andrey A. Karmanov⁴^{1,2,3,4} Penza State University, Krasnaya Str., 40, Penza, 440026, Russia¹ sigoshina@mail.ru[†], <https://orcid.org/0009-0001-7636-7461>² muxaev008778@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0892-8903>³ egor.krupkin99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0027-4744>⁴ starosta07km1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8318-8149>

Abstract. Nickel-zinc (Ni–Zn) and magnesium-zinc ferrites (Mg–Zn), as well as composites based on them, are one of the most promising radio absorbing materials that can effectively absorb electromagnetic radiation in the frequency range from several MHz to units of GHz. Many questions related to the radio-absorbing properties of these materials still remain open, which is a consequence of the influence of the sample parameters, both on the frequency dependences of the magnetic and dielectric permittivity, and on the parameters of the domain walls. Within the framework of this work, a mathematical model of the process of propagation of electromagnetic waves in radio-absorbing Ni–Zn ferrites is proposed. Boundary and initial conditions are set that take into account the geometry and microstructure of the samples. The solution of the formulated boundary value problem on a segment using the method of separation of variables or the Fourier method showed that the amplitude of the electromagnetic wave decreases significantly after passing half the thickness of the sample, which corresponds to the high radio absorbing properties of the investigated Ni–Zn ferrites. A numerical analysis of the reflection of a plane polarized wave from a two-layer structure Ni–Zn ferrite/metal plate in the frequency range to 100 MHz was carried out. The simulation results are verified by experimental data on the radio absorbing properties of Ni–Zn ferrites of the 1000NN brand. It is shown that the use of the assumption of the exponential nature of the dependences of the dielectric and magnetic permeability on the normalized coordinate is applicable only in a narrow frequency range up to 3 MHz, for which the experimental data and the results of numerical analysis are in good agreement.

Keywords: radio absorbing ferrites, propagation of electromagnetic waves, wave equation, reflection coefficient, frequency dependence.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to Doctor of Technical Sciences, Professor Andreev V.G. for help in setting the boundary and initial conditions, as well as providing experimental data on the frequency dependence of magnetic permeability and the coefficient of reflection of electromagnetic waves from a two-layer structure of Ni–Zn ferrite/metal plate.

For citation: Igoshina, S. E., Muchaev, D. I., Krupkin, E. I. & Karmanov, A. A. (2023). Simulation of propagation of electromagnetic waves in radio-absorbing Ni–Zn ferrites. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(3), 329–337. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.005.

Введение

Интерес к разработке новых и совершенствованию известных радиопоглощающих и радиоэкранирующих материалов не уменьшается с течением времени, о чем свидетельствуют многочисленные публикации в ведущих мировых изданиях [1–3]. Данный факт с одной стороны объясняется широтой сферы их практического применения, а с другой стороны известными ограничениями по диапазону частот, в котором они могут использоваться эффективно. Сегодня радиопоглощающие материалы стали не только основой для обеспечения электромагнитной совместимости изделий вычисли-

тельной техники, но и рассматривается их применение в медицинских приложениях [4–5]. В частности, была продемонстрирована возможность значительного снижения коэффициента удельного поглощения биомедицинской имплантируемой антенной системы за счет использования ферритовых пластин [6].

К одним из наиболее перспективных радиопоглощающих материалов относятся никель-цинковые (Ni–Zn) и магний-цинковые (Mg–Zn) ферриты, а также композиты на их основе, которые могут эффективно поглощать электромагнитное излучение в диапазоне частот от нескольких МГц до единиц ГГц. Так, например, в работе [7] предложено использование

радиопоглощающих Ni-Zn ферритов, полученных методом порошковой металлургии, для создания практически не отражающего (коэффициент ослабления мощности сигнала не менее 15 Дб) радиоволны покрытия в интервале частот от 30 МГц до 830 МГц. В рамках [8] продемонстрировано, что увеличение среднего размера зерна приводит к уменьшению частоты резонанса доменных границ Ni-Zn ферритов, расширению интервала поглощения электромагнитной энергии (до 1,3 ГГц) и уменьшению коэффициента отражения до 20 Дб и ниже.

При теоретическом описании радиопоглощающих свойств рассматриваемых ферритов преимущественно учитываются интерференционные эффекты при отражении электромагнитных волн, а также два основных резонансных явления [9]: естественный ферромагнитный резонанс и резонанс доменных границ, описываемый уравнением Деринга. Для Ni-Zn ферритов показано, что в зависимости от микроструктуры образца, естественный ферромагнитный резонанс играет ключевую роль в поглощении электромагнитных волн преимущественно при частотах более 300-500 МГц, а при более низких частотах важная роль отводится резонансу доменных стенок. Учет указанных резонансных явлений позволяет оценивать радиопоглощающие свойства Ni-Zn ферритов, однако только качественно и зачастую только на одной фиксированной частоте излучения [10]. Это, прежде всего, связано с тем, что изменение параметров образцов (состава, микроструктура и т.д.) оказывает влияние не только на параметры доменных стенок, но и на частотные зависимости магнитной и диэлектрической проницаемости [11, 12].

Поскольку Ni-Zn феррит в общем случае можно рассматривать, как неоднородную анизотропную среду, непосредственное решение задачи по отражению и поглощению электромагнитных волн для широкого диапазона частот сильно затруднено. Наклонное падение плоской электромагнитной волны из свободного пространства на феррит рассматривалось в работах [13-15], получены выражения для коэффициентов отражения и пропускания. При этом предполагалось, что заранее известны не только компоненты тензоров магнитной и диэлектрической проницаемости, но и закон распространения электромагнитных волн в феррите. В рамках [16] проводился анализ отражений от анизотропного слоя феррита с неоднородной прецессией намагниченности. Используя гра-

ничные условия, полученные исходя из непрерывности тангенциальных составляющих электрического и магнитных полей, найдены частотные зависимости коэффициентов отражения и поглощения. Предполагалось, что напряженность электрического и магнитного поля в анизотропном слое феррита подчиняются гармоническому временному закону, а компоненты тензора магнитной проницаемости, в свою очередь, описываются в рамках естественного ферромагнитного резонанса.

В рамках настоящей работы для теоретического изучения распространения электромагнитных волн в радиопоглощающих Ni-Zn ферритах развивается подход, основанный на использовании граничных условий, учитывающих микроструктуру и геометрию реальных образцов.

Решение задачи распространения электромагнитного поля в Ni-Zn феррите

Пусть в плоскости декартовой системы координат (x,y) расположена прямоугольная пластина из радиопоглощающего Ni-Zn феррита (рис. 1), имеющая толщину l и поперечный размер d . Падающая из воздуха на пластину под углом θ к нормали электромагнитная волна E -поляризации имеет только одну составляющую вектора напряженности электрического поля $\mathbf{E}_s = [0, 0, E_{sz}]$ и две составляющие вектора напряженности магнитного поля $\mathbf{H}_s = [-H_{sx}, H_{sy}, 0]$.

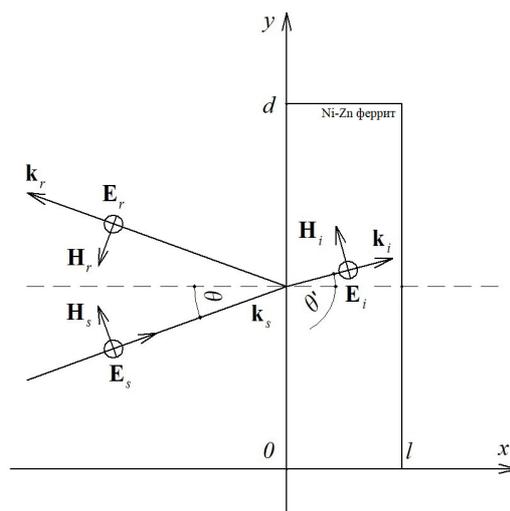


Рис.1. Падение электромагнитной волны E -поляризации на пластину из радиопоглощающего Ni-Zn феррита

Fig.1. The incidence of an electromagnetic wave of e-polarization on a plate of radio-absorbing Ni-Zn ferrite

Кроме падающей волны существует также основная отраженная волна, имеющая z -компоненту напряженности электрического поля $E_r = [0, 0, E_r z]$, а также x -компоненту и y -компоненту напряженности магнитного поля $\mathbf{H}_s = [-H_{sx}, -H_{sy}, 0]$.

Рассматриваемая среда обладает электропроводностью, так, что в ней могут возникать токи проводимости. Избыточные заряды отсутствуют. Непосредственно прямоугольной пластине из радиопоглощающего Ni-Zn феррита соответствует распространяющаяся в материале волна, которая имеет одну составляющую вектора напряженности электрического поля $\mathbf{E}_i = [0, 0, E_{iz}]$ и две составляющие вектора напряженности магнитного поля $\mathbf{H}_i = [-H_{ix}, H_{iy}, 0]$. Здесь и далее будем полагать малость угла θ , а также выполнение условия $d \gg l$, т.е. толщина пластины существенно меньше ее поперечного размера. Анализ будем проводить в отношении вектора напряженности электрического поля в Ni-Zn феррите, для удобства опустив нижний индекс.

С учетом всего вышеизложенного, волновое уравнение может быть записано в следующей форме:

$$E_{xx} + E_{yy} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2} E_{tt} - \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} E_t = 0, \quad (1)$$

где c – скорость света, σ – удельная электропроводность.

Исходя из непрерывности тангенциальных составляющих напряженностей полей, выполнения условия $d \gg l$, а также рассматривая Ni-Zn феррит как неоднородную анизотропную среду, будем полагать, что уравнение (1) для $0 \leq x \leq l$, $0 \leq y \leq d$ удовлетворяет граничным условиям:

$$\left\{ \begin{array}{l} E(0, y, t) = E_0(1 - R_e) \\ E\left(\frac{l}{2}, y, t\right) = E_0 \frac{z_0}{z_t} T_e \\ E(x, 0, t) = 0 \\ E(x, d, t) = 0 \\ E_x(0, y, t) = (-1)^n E_x(l, y, t) \\ E_y(x, 0, t) = E_y(x, d, t) \end{array} \right., \quad (2)$$

и начальным условиям:

$$\left\{ \begin{array}{l} E(x, y, 0) = \frac{E_0}{\varepsilon} \\ E_t(x, y, 0) = 0 \end{array} \right., \quad (3)$$

где R_e и T_e – коэффициенты отражения и прохождения в случае электромагнитной волны E -поляризации, соответственно, E_0 – начальная напряженность электрического поля, z_0 и z_t – волновое сопротивление в вакууме и в Ni-Zn феррите соответственно, $n \in \mathbb{N}$.

При этом величины z_0 и z_t определяются как:

$$z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}, \quad z_t = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\varepsilon_0 \varepsilon}},$$

где μ_0 – магнитная постоянная, ε_0 – электрическая постоянная.

Для решения поставленной нами краевой задачи применим метод Фурье или метод разделения переменных. Используя указанные методы, получим решение волнового уравнения (1), как функцию $E(x, y, t)$, соответствующую граничным условиям (2) и начальным условиям (3). Для этого поставим основную вспомогательную задачу: найти решение уравнения (1), не равное тождественно нулю и представимое в виде произведения:

$$E(x, y, t) = v(x, y)T(t). \quad (4)$$

Подставляя (4) в (1) и разделяя переменные, для функции $v(x, y)$ получим следующую краевую задачу:

$$\left. \begin{array}{l} v_{xx} + v_{yy} + \lambda v = 0 \\ v(0, y) = E_0(1 - R_e) \\ v\left(\frac{l}{2}, y\right) = E_0 \frac{z_0}{z_t} T_e \\ v(x, 0) = 0 \\ v(x, d) = 0 \\ v_x(0, y) = (-1)^n v_x(l, y) \\ v_y(x, 0) = v_y(x, d) \end{array} \right\},$$

для решения которой также применим метод разделения переменных, полагая что:

$$v(x, y) = X(x)Y(y).$$

Нетривиальные решения поставленной задачи возможны лишь при значениях

$$\lambda = \lambda_{n,m} = \left(\frac{\pi n}{l}\right)^2 + \left(\frac{\pi m}{d}\right)^2.$$

Собственным значениям $\lambda_{n,m}$ соответствуют собственные функции:

$$v_{n,m}(x,y) = X_n(x)Y_m(y) = \left[E_0(1-R_e) \cos \frac{\pi n}{l} x + \frac{E_0 \frac{z_0}{z_t} T_e}{\sin \frac{\pi n}{2}} \sin \frac{\pi n}{l} x \right] \sin \left(\frac{\pi m}{d} y \right).$$

На следующем этапе рассмотрим уравнение для $T(t)$, получаемое при подстановке (4) в (1):

$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2} T_{tt} + \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} T_t + \lambda T = 0.$$

Исходя из определенных ранее собственных значений $\lambda_{n,m}$, решением данного уравнения являются функции

$$T_{n,m}(t) = C_1 \exp(k_1 t) + C_2 \exp(k_2 t),$$

где

$$k_1 = -\frac{2\pi}{\varepsilon} \sigma + \sqrt{\frac{4\pi^2}{\varepsilon^2} \sigma^2 - \frac{\lambda}{\varepsilon\mu} c^2},$$

$$E(x,y,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[E_0(1-R_e) \cos \frac{\pi n}{l} x + \frac{E_0 \frac{z_0}{z_t} T_e}{\sin \frac{\pi n}{2}} \sin \frac{\pi n}{l} x \right] \sin \left(\frac{\pi m}{d} y \right) \times \frac{8 \cdot (1 - \cos \pi n) \sin \frac{\pi n}{2}}{\pi^2 n \cdot m \cdot \varepsilon (1 - R_e)} \left[\frac{k_2}{k_2 - k_1} \exp(k_1 t) + \frac{k_1}{k_1 - k_2} \exp(k_2 t) \right], \quad (4)$$

Следует отдельно отметить, что величины k_1 и k_2 можно интерпретировать, как определяющие характеристическое время затухания электромагнитной волны в Ni-Zn феррите [12]. Параметр λ определяет собственные значения, при которых существуют нетривиальные решения поставленной нами краевой задачи.

Результаты численного моделирования распространения электромагнитного поля в Ni-Zn феррите

При проведении численного моделирования использовались следующие параметры Ni-Zn ферритов: толщина пластины $l = 0,008$ м, поперечный размер $d = 0,06$ м, начальная магнитная проницаемость $\mu = 1150$, начальная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 10$, удельная электропроводность $\sigma = 10^{-6}$ См/м, начальная напряженность электрического поля электромагнитной волны E-поляризации $E_0 = 0,1$ В/м, частота волны в вакууме $\gamma = 10^6$ Гц. Для уточнения результатов расчетов использовались экспериментальные данные по частотной зави-

$$k_2 = -\frac{2\pi}{\varepsilon} \sigma - \sqrt{\frac{4\pi^2}{\varepsilon^2} \sigma^2 - \frac{\lambda}{\varepsilon\mu} c^2},$$

В силу линейности и однородности уравнения (1) сумма частных решений

$$E(x,y,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} v_{n,m}(x,y) T_{n,m}(t),$$

также удовлетворяет этому уравнению и граничным условиям (2).

Тогда, искомое решение уравнения (1) с учетом начальных условий (3) имеет вид:

симости магнитной проницаемости Ni-Zn марки 1000НН (рис.2).

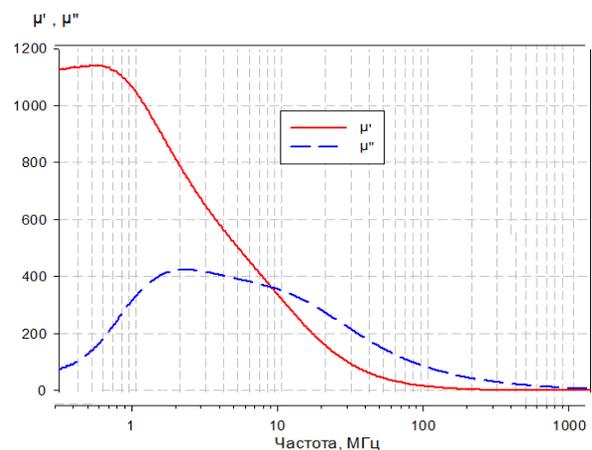


Рис.2. Спектр комплексной магнитной проницаемости образца Ni-Zn феррита 1000НН

Fig.2. Spectrum of the complex magnetic permeability of a sample of Ni-Zn ferrite 1000НН

Результаты моделирования процесса распространения электромагнитной волны E-поляризации в Ni-Zn феррите представлены на рис.2-4. Зависимость $E(x,y)$, описываемая за-

коном (5), для момента времени $t=5$ мкс показана на рис.3, а функции $E(x,t)$ и $E(y,t)$ для $y=d/2$ и для $x=l/2$ соответственно отражены на рис.4 и рис.5.

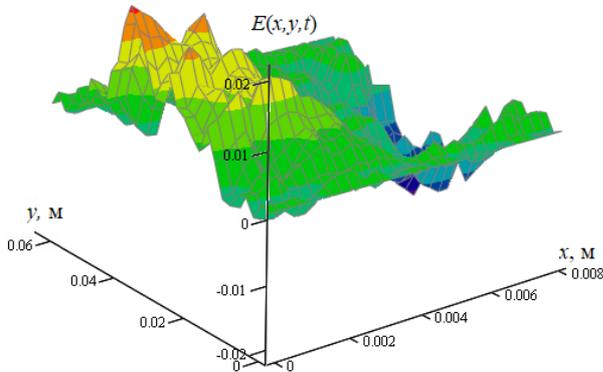


Рис.3. Распространение электромагнитной волны в Ni-Zn феррите для момента времени $t=5$ мкс

Fig.3. Electromagnetic wave propagation in Ni-Zn ferrite for time $t=5$ μ s

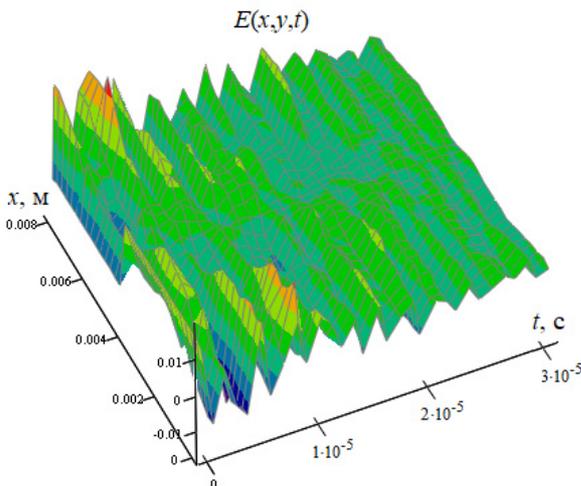


Рис.4. Распространение электромагнитной волны в Ni-Zn феррите (двумерный случай для $y = d / 2$)

Fig.4. Propagation of an electromagnetic wave in Ni-Zn ferrite (two-dimensional case for $y = d / 2$)

Анализ представленных зависимостей показывает, что амплитуда электромагнитной волны значительно уменьшается, пройдя половину толщины образца, что отвечает высоким радиопоглощающим свойствам исследуемых Ni-Zn ферритов.

Типичное время затухания электромагнитной волны E -поляризации в Ni-Zn феррите составляет порядка 30 мкс, что отвечает высоким значениям k_1 и k_2 .

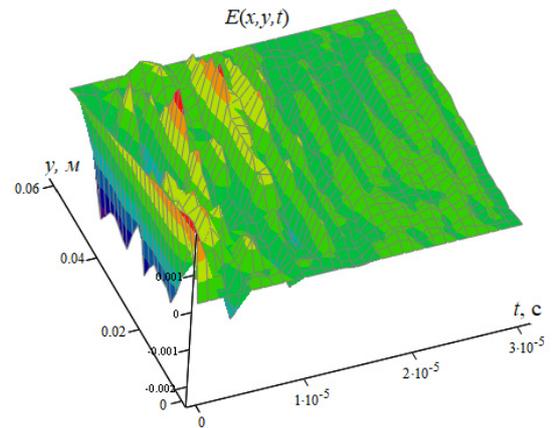


Рис.5. Распространение электромагнитной волны в Ni-Zn феррите (двумерный случай для $x = l / 2$)

Fig.5. Propagation of an electromagnetic wave in Ni-Zn ferrite (two-dimensional case for $x = l / 2$)

Численный анализ отражения плоской поляризованной волны от двухслойной структуры Ni-Zn феррит/металлическая пластина

На следующем этапе работы рассматривалось взаимодействие электромагнитной волны E -поляризации с двухслойной структурой Ni-Zn феррит/металлическая пластина.

Использовались результаты работы [17], где было получено уравнение для коэффициента отражения $R_e(\xi)$ для усеченного слоя, в предположении, что слева от рассматриваемой плоскости декартовой системы координат (x,y) магнитоэлектрик (в нашем случае Ni-Zn феррит) отсутствует:

$$\frac{\partial R_e}{\partial \xi} = \frac{1}{2 \cos \theta} [\{1 - R_e\}^2 \cos^2 \theta \cdot A_1^e - A_2^e \{1 + R_e\}^2], \quad (5)$$

где $\xi = x/l$ – нормированная координата, θ – угол наклонного падения электромагнитной волны с E -поляризацией на слой неоднородного магнитоэлектрика, $A_1^e(\xi) = -iK\mu(\xi)$ и $A_2^e(\xi) = -iK \left[\varepsilon(\xi) - \frac{\sin^2 \theta}{\mu(\xi)} \right]$, K – нормированное волновое число.

Нелинейное уравнение (6) представляет собой комплексное уравнение Риккати и численно интегрируется до $\xi = 0$ с начальными условиями следующего вида:

$$R_e(1) = \frac{z_t - z_0}{z_t + z_0}.$$

Значение $R_e(0)$ позволяет определить истинную величину коэффициента отражения электромагнитной волны E -поляризации.

Применительно к рассматриваемой задаче основная сложность численного анализ отражения электромагнитной волны E -поляризации от двухслойной структуры Ni-Zn феррит/металлическая пластина заключается в нахождении $\varepsilon(\xi)$ и $\mu(\xi)$, т.е. их зависимостей от нормированной координаты, которые в общем случае определяются, как геометрией, так и микроструктурой образцов [16, 18]. Кроме того, диэлектрическая и магнитная проницаемости имеют как действительную, так и мнимую составляющие, зависящую от частоты, в результате чего характер поведения $\varepsilon(\xi)$ и $\mu(\xi)$ для различных частот может быть различен.

В рамках настоящей работы, предполагались экспоненциальные зависимости $\varepsilon(\xi)$ и $\mu(\xi)$, задаваемые следующим образом:

$$\begin{aligned}\varepsilon(\xi) &= \varepsilon(0)\exp(\beta\xi), \\ \mu(\xi) &= \mu(0)\exp(-\beta\xi),\end{aligned}$$

где $\varepsilon(0)$ и $\mu(0)$ – начальные значения диэлектрической и магнитной проницаемости на поверхности Ni-Zn феррита, β – параметр определяемый геометрией и микроструктурой образца.

Результаты численного анализ отражения электромагнитной волны E -поляризации от двухслойной структуры Ni-Zn феррит/металлическая пластина представлены на рис.6. Маркерами отмечены экспериментальные данные для Ni-Zn ферритов марки 1000НН.

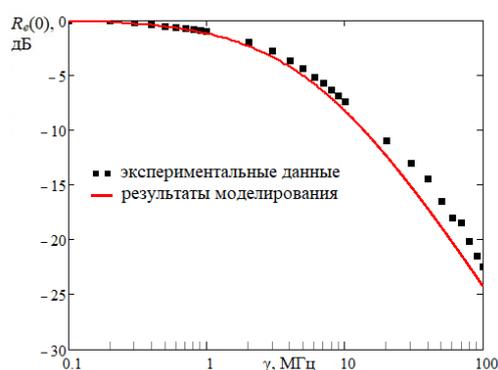


Рис.6. Частотная зависимость коэффициента отражения

Fig.6. Frequency dependence of the reflection coefficient

Анализ представленной на рис.6 зависимости показывает хорошее согласие экспериментальных данных и результатов моделирования коэффициента отражения в узкой области частот до ≈ 3 МГц. В более широком диапазоне частот (до 10 МГц) можно говорить об удовле-

творительном согласии результатов измерения и теоретической кривой, соответствующей уравнению (5). Вне этого диапазона результаты численного анализа становятся менее достоверными, что, по всей видимости, объясняется вышеуказанными сложностями моделирования. В частности, из рис.3 видно, что действительная и мнимая части магнитной проницаемости за пределами указанного диапазона существенно изменяют свою частотную зависимость, что вероятно приводит к отличному от экспоненциального характеру $\varepsilon(\xi)$ и $\mu(\xi)$.

Заключение

Таким образом, в рамках настоящей работы предложена математическая модель процесса распространения электромагнитных волн в радиопоглощающих Ni-Zn ферритах. С учетом геометрии и микроструктуры образцов сформулированы начальные и граничные условия краевой задачи, для решения которой применим метод Фурье или метод разделения переменных. Показано, что амплитуда электромагнитной волны значительно уменьшается, пройдя половину толщины образца, что отвечает высоким радиопоглощающим свойствам исследуемых Ni-Zn ферритов.

Проведен численный анализ отражения электромагнитной волны E -поляризации от двухслойной структуры Ni-Zn феррит/металлическая пластина в области частот до 100 МГц. Результаты моделирования верифицированы экспериментальными данными по радиопоглощающим свойствам Ni-Zn ферритов марки 1000НН. Выяснено, что предположения об экспоненциальном характере зависимостей диэлектрической и магнитной проницаемости от нормированной координаты применимы только в узком частотном диапазоне до 3 МГц. Дальнейшее совершенствование рассматриваемых моделей, прежде всего, должно быть связано с установлением характера $\varepsilon(\xi)$ и $\mu(\xi)$, согласующегося с экспериментальными данными в широком диапазоне частот. Полученные результаты могут представлять значительный интерес при создании новых радиопоглощающих покрытий на основе никель-цинковых и магний-цинковых ферритов, используемых, в том числе, в биомедицинских приложениях.

Список литературы

1. Radon A., Hawelek L., Lukowiec D., et al. Dielectric and electromagnetic interference shield

- properties of high entropy (Zn, Fe, Ni, Mg, Cd)Fe₂O₄ ferrite // *Scientific reports*. 2019. V. 9, N 1. P. 1–13.
2. Iqbal A., Shahzad F., Hantanasirisakul K., et al. Anomalous absorption of electromagnetic waves by 2D transition metal carbonitride Ti₃CNT_x (MXene) // *Science*. 2020. V. 369, N 6502. P. 446–450.
 3. Fionov A., Kraev I., Yurkov G., et al. Radio-Absorbing Materials Based on Polymer Composites and Their Application to Solving the Problems of Electromagnetic Compatibility // *Polymers*. 2022. V. 14, N 15. P. 3026.
 4. Stoll J.A., Lachowicz D., Kmita A., et al. Synthesis of Manganese Zinc Ferrite Nanoparticles in Medical-Grade Silicone for MRI Applications // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. V. 24, N 6. P. 5685.
 5. Soliman M.M., Chowdhury M.E., Khandar A., et al. Review on medical implantable antenna technology and imminent research challenges // *Sensors*. 2021. V. 21, N 9. P. 3163.
 6. Mitra D., Das S., Paul S. SAR reduction for an implantable antenna using ferrite superstrate // 2019 International Workshop on Antenna Technology (iWAT). IEEE, 2019. P. 1–4.
 7. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г. и др. Влияние микроструктуры на свойства радиопоглощающих никель-цинковых ферритов // *Материала электронная техника*. 2010. № 4. С. 18–21.
 8. Andreev V.G., Menshova S.B., Klimov A.N., et al. Influence of microstructure on properties of Ni–Zn ferrite radio-absorbing materials // *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2015. V. 394. P. 1–6.
 9. Karanskij V.V., Smirnov S.V., Klimov A.S., et al. Gradient Structures of Ni–Zn Ferrites for Electromagnetic Radiation Protection Devices // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2021. V. 12. P. 1185–1190.
 10. Derakhshani M., Taheri-Nassaj E., Jazirehpour M., Masoudpanah S.M. Structural, magnetic, and gigahertz-range electromagnetic wave absorption properties Ni–Zn ferrite // *Scientific reports*. 2021. V. 11, N 1. P. 1–13.
 11. Куц Л.Е., Жевалев О.Ю., Котина Н.М., Родионов И.В. Влияние температуры на изменение давления кислорода в контакте феррит-металл // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2017. Т. 14, № 1. С. 84–87.
 12. Amiri G.R., Yousefi M.H., Abolhassani M.R., et al. Magnetic properties and microwave absorption in Ni–Zn and Mn–Zn ferrite nanoparticles synthesized by low-temperature solid-state reaction // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2011. V. 323, N 6. P. 730–734.
 13. Hurd R.A. Scattering by a Ferrite Quadrant // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 1989. V. 3, N 5. P. 463–479.
 14. Yin W.Y., Guo B., Dong X.T. Comparative study on the interaction of electromagnetic wave with multi-layer omega(chiro) ferrites slabs // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2003. V. 17. N. 1. P. 15–29–479.
 15. Jin X. W., Lin J. The contributions of Gilbert-damping and inhomogeneous exchange effects on the electromagnetic short waves propagation in saturated ferrite films // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. V. 514. P. 167192.
 16. Панин Д.Н., Никушин А.В. Анализ отражений от анизотропного слоя феррита с неоднородной прецессией намагниченности // *Методы и устройства передачи и обработки информации*. 2012. № 14. С. 60–65.
 17. Панин Д.Н. Численный анализ отражений плоской поляризованной волны электромагнитной волны // *Журнал радиоэлектроники*. 2007. № 2. С. 1–9.
 18. Pardavi-Horvath M. Ferrite-Based Electronic Bandgap Heterostructures and Metamaterials // *Modern Ferrites: Basic Principles, Processing and Properties*. 2022. V. 1. P. 457–472.

Информация об авторах

С. Е. Игошина – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нано- и микроэлектроники Пензенского государственного университета.

Д. А. Мухаев – студент кафедры нано- и микроэлектроники Пензенского государственного университета.

Е. И. Крупкин – студент кафедры нано- и микроэлектроники Пензенского государственного университета.

А. А. Карманов – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нано- и микроэлектроники Пензенского государственного университета.

References

1. Radon, A., Hawelek, L. & Lukowicz, D., et al. (2019). Dielectric and electromagnetic interference shield properties of high entropy (Zn, Fe, Ni, Mg, Cd)Fe₂O₄ ferrite. *Scientific reports*, 9(1), 1–13.

2. Iqbal, A., Shahzad, F. & Hantanasirisakul, K., et al. (2020). Anomalous absorption of electromagnetic waves by 2D transition metal carbonitride Ti₃CNT_x (MXene). *Science*, 369(6502), 446v450.

3. Fionov, A., Kraev, I. & Yurkov, G., et al. (2022). Radio-Absorbing Materials Based on Polymer Composites and Their Application to Solving the Problems of Electromagnetic Compatibility. *Polymers*, 14(15), 3026.
4. Stoll, J. A., Lachowicz, D. & Kmita, A., et al. (2023). Synthesis of Manganese Zinc Ferrite Nanoparticles in Medical-Grade Silicone for MRI Applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5685.
5. Soliman, M. M., Chowdhury, M. E. & Khandar, A., et al. (2021). Review on medical implantable antenna technology and imminent research challenges. *Sensors*, 21(9), 3163.
6. Mitra, D., Das, S. & Paul, S. (2019). SAR reduction for an implantable antenna using ferrite superstrate. 2019 International Workshop on Antenna Technology (iWAT). IEEE. P. 1–4.
7. Kostishin, V. G., Vergazov, R. M. & Andreev, V. G., et al. (2010). Influence of microstructure on properties of radio absorbing nickel-zinc ferrites. *Materiala elektronika*, (4), 18–21. (In Russ.).
8. Andreev, V. G., Menshova, S. B. & Klimov, A. N., et al. (2015). Influence of microstructure on properties of Ni–Zn ferrite radio-absorbing materials. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 394, 1–6.
9. Karanskij, V. V., Smirnov, S. V. & Klimov, A. S., et al. (2021). Gradient Structures of Ni–Zn Ferrites for Electromagnetic Radiation Protection Devices. *Inorganic Materials: Applied Research*, 12, 1185–1190.
10. Derakhshani, M., Taheri-Nassaj, E., Jazirehpour, M. & Masoudpanah, S. M. (2021). Structural, magnetic, and gigahertz-range electromagnetic wave absorption properties Ni–Zn ferrite. *Scientific reports*, 11(1), 1–13.
11. Kuts, L. E., Zhevaley, O. Yu., Kotina, N. M. & Rodionov, I. V. (2017). Influence of temperature on the change of oxygen pressure in the ferrite-metal contact. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 14(1), 84–87. (In Russ.).
12. Amiri, G. R., Yousefi, M. H. & Abolhasani, M. R., et al. (2011). Magnetic properties and microwave absorption in Ni–Zn and Mn–Zn ferrite nanoparticles synthesized by low-temperature solid-state reaction. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323(6), 730–734.
13. Hurd, R. A. (1989). Scattering by a Ferrite Quadrant. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 3(5), 463–479.
14. Yin, W. Y., Guo, B. & Dong, X. T. (2003). Comparative study on the interaction of electromagnetic wave with multi-layer omega(chiro) ferrites slabs. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 17(1), P. 15–29–479.
15. Jin, X. W. & Lin, J. (2020). The contributions of Gilbert-damping and inhomogeneous exchange effects on the electromagnetic short waves propagation in saturated ferrite films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 514, 167192.
16. Panin, D. N. & Nikushin, A. V. (2012). Analysis of reflections from an anisotropic ferrite layer with non-uniform magnetization precession. *Methods and devices for information transfer and processing*, (14), 60–65. (In Russ.).
17. Panin, D. N. (2007). Numerical analysis of reflections of a plane polarized electromagnetic wave. *Journal of Radioelectronics*, (2), 1–9. (In Russ.).
18. Pardavi-Horvath, M. (2022). Ferrite-Based Electronic Bandgap Heterostructures and Metamaterials. *Modern Ferrites: Basic Principles, Processing and Properties*, 1, 457–472.

Information about the authors

S. E. Igoshina – Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Nano- and Microelectronics, Penza State University.

D. A. Mukhaev – Student at the Department of Nano- and Microelectronics of Penza State University.

E. I. Krupkin – Student at the Department of Nano- and Microelectronics, Penza State University.

A. A. Karmanov – Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Nano- and Microelectronics, Penza State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; одобрена после рецензирования 03.07.2023; принята к публикации 17.07.2023.

The article was received by the editorial board on 21 June 23; approved after reviewing 03 July 23; accepted for publication 17 July 23.