

УДК 528.811; 537.87; 621.396.67

## ЭФФЕКТИВНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВЧ ОТКЛИКИ ЧАСТИЧНО НАМАГНИЧЕННОГО ДВУХКОМПОНЕНТНОГО МЕТАФЕРРИТА СО СФЕРИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

**О. Н. Рыбин, С. Н. Шульга, О. В. Багацкая**

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,*

*пл. Свободы, 4, Харьков, Украина, 61022.*

*e-mail: o\_rybin@yahoo.co.uk*

*Поступила в редакцию 20 мая 2016 г.*

В предлагаемой работе в СВЧ диапазоне изучены эффективные магнитные отклики частично намагниченного двухкомпонентного метаферрита в направлении намагничивания и перпендикулярно ему. Метаферрит представляет собой безграничную изотропную диэлектрическую среду с периодически встроенными в него ферромагнитными металлическими включениями сферической формы. Получены СВЧ приближения для частотных зависимостей эффективных относительных магнитных проницаемостей в направлении намагничивания и перпендикулярно ему. Проведен физический анализ соответствующих спектров для эффективных относительных магнитных проницаемостей и магнитных потерь в заданных направлениях распространения электромагнитной волны.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** метаматериалы, теория эффективной среды, ферриты, СВЧ, искусственные среды.

У пропонованій роботі в НВЧ діапазоні вивчені ефективні магнітні відклики частково намагніченого двокомпонентного метаферрита в напрямі намагнічування і перпендикулярно до нього. Метаферрит являє собою безграничне ізотропне діелектричне середовище з періодично вбудованими у нього ферромагнітними металевими включеннями сферичної форми. Отримано НВЧ наближення для частотних залежностей ефективних відносних магнітних проникностей в напрямі намагнічування і перпендикулярно до нього. Проведено фізичний аналіз відповідних спектрів для ефективних відносних магнітних проникностей і магнітних втрат у заданих напрямках поширення електромагнітної хвилі.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** метаматеріали, теорія ефективного середовища, ферити, НВЧ, штучні середовища.

Effective magnetic responds in the microwave range of the partially magnetized two-component metaferferrite in the direction of the magnetization and perpendicular to it are studied in this issue. Metaferferrite is a boundless isotropic dielectric medium with periodically embedded ferromagnetic metallic spherical inclusions in it. The microwave approximation for the frequency dependences of the effective relative magnetic permeability in the direction of the magnetization and perpendicular to it is obtained. A physical analysis of the appropriate spectrum for the effective relative magnetic permeability and magnetic losses in the specified directions of propagation of electromagnetic waves is presented.

**KEY WORDS:** metamaterials, effective medium theory, ferrites, microwave range, artificial medium.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование свойств частично намагниченных ферритных материалов в СВЧ диапазоне ведутся достаточно давно, например [1-5]. Это связано с их использованием при создании таких приборов, как циркуляторы [6-7], фазовращатели [8-9], перестраиваемые фильтры на основе железиттриевого граната [10-11] и т. д. Развитие технологий предъявляют новые требования к материалам и, в частности, к ферритам [12]. Данная проблема требует создания новых искусственных ферритов или, так называемых, метаферритов, [13]. Простейшим примером метаферрита СВЧ диапазона является двухкомпонентный метаматериал, который представляет собой изотропную диэлектрическую среду с периодически внедренными в нее металлическими ферритными включениями, намагниченными до насыщения внешним постоянным магнитным полем [14].

Данная работа посвящена исследованию эффективного СВЧ магнитного отклика метаферрита, который представляет собой изотропную диэлектрическую среду с периодически внедренными в нее металлическими ферритными включениями сферической формы. При этом предполагается, что включения частично намагничены внешним постоянным магнитным полем. В работе рассмотрено распространение монохроматической электромагнитной волны как в направлении намагничивания, так и перпендикулярно ему.

### ТЕНЗОР ЭФФЕКТИВНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЧАСТИЧНО НАМАГНИЧЕННОГО МЕТАФЕРРИТА

Рассмотрим композитную среду в виде безграничного изотропного диэлектрика (назовем его матрицей) с периодически встроенными в него ферромагнитными металлическими включениями в виде сфер. Рассматривая данную композитную среду как метаматериальную, выделим в ней элементарную ячейку, как это показано на рис. 1, где  $a$  – постоянная элементарной ячейки,  $\varepsilon_i$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала включения,  $\mu_i$  – относительная магнитная проницаемость материала включения,  $\varepsilon_m$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала матрицы,  $\mu_m$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала матрицы,  $\rho$  – радиус включений.

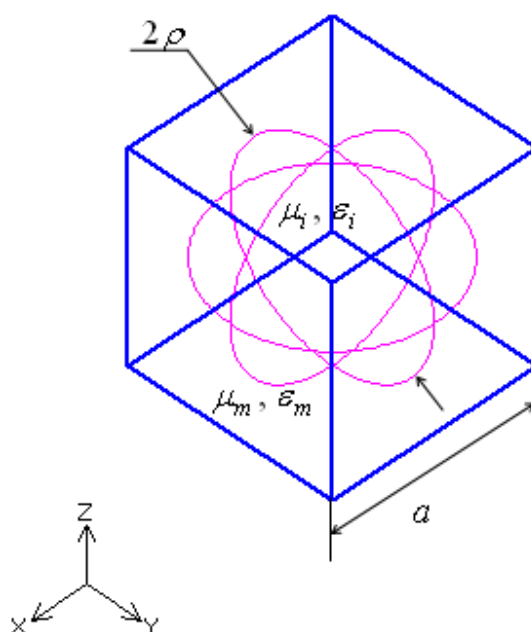


Рис. 1. Элементарная ячейка безграничной метаматериальной среды со сферическими включениями

Пусть включения рассматриваемого метаматериала частично намагничены под воздействием внешнего постоянного магнитного поля, направленного вдоль оси  $y$ . По аналогии с работой [14] будем называть данный метаматериал метаферритом. Тогда тензор эффективной магнитной проницаемости рассматриваемого метаферрита имеет вид [15]:

$$\hat{\mu}_{eff} = \begin{bmatrix} \mu & 0 & -ik \\ 0 & \mu_y & 0 \\ ik & 0 & \mu \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\mu = \frac{\mu_0}{3} + \frac{2}{3} \left[ \sqrt{\mu_+ \mu_-} \left( 1 - \langle \alpha_3 \rangle^2 \right) + \tilde{\mu} \langle \alpha_3 \rangle^2 \right], \quad (2)$$

$$k = \langle \alpha_3 \rangle \mu_0 F \frac{\omega_\Sigma}{\omega_0 + i\omega F \alpha_{in} - \omega}, \quad (3)$$

$$\mu_y = \mu_0 \left( 1 + F \frac{\omega_\Sigma (\omega_0 + i\omega F \alpha_{in})}{(\omega_0 + i\omega F \alpha_{in})^2 - \omega^2} \left( 1 - \langle \alpha_3 \rangle^2 \right) \right), \quad (4)$$

$$\mu_+ = \mu_0 \left( 1 + F \frac{\omega_\Sigma}{\omega_0 + i\omega F \alpha_{in} - \omega} \right), \quad (5)$$

$$\mu_- = \mu_0 \left( 1 + F \frac{\omega_\Sigma}{\omega_0 + i\omega F \alpha_{in} + \omega} \right), \quad (6)$$

$$\tilde{\mu} = \mu_0 \left( 1 + F \frac{\omega_\Sigma (\omega_0 + i\omega F \alpha_{in})}{(\omega_0 + i\omega F \alpha_{in})^2 - \omega^2} \right), \quad (7)$$

$$\langle \alpha_3 \rangle = \frac{M}{M_\Sigma}. \quad (8)$$

Здесь  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\omega$  – круговая частота первичной электромагнитной волны,  $\omega_e = \gamma\mu_0 H_e$  – ларморовская частота метаматериальной среды,  $\gamma$  – гиромагнитное отношение,  $M$  – намагниченность материала включений,  $H_e = H_0 - M_s/3$ , где  $H_0$  – напряженность внешнего магнитного поля [14],  $M_s$  – намагниченность насыщения материала включений,  $\omega_\Sigma = \gamma\mu_0 M_\Sigma$  – внутренняя частота прецессии метаматериальной среды,  $M_\Sigma$  – эффективная намагниченность насыщения, определяемая выражением, полученным в работе [14]:

$$M_\Sigma = \begin{cases} -\frac{1+2\mu_\zeta}{1+\mu_\zeta} H_e + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{1+2\mu_\zeta}{1+\mu_\zeta} \right)^2 H_e^2 + 4 \frac{4\mu_\zeta^3 - 3\mu_\zeta - 1}{1+\mu_\zeta} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\gamma^2}}, & \text{при } M \neq M_s, \\ M_s, & \text{при } M = M_s, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$\mu_\zeta(\omega) = \left( 1 + \frac{3F}{\frac{f(\theta) + 2\mu_m/\mu_i}{f(\theta) - \mu_m/\mu_i} - F} \right), \quad (10)$$

$$f(\theta) = \frac{2(\sin \theta - \theta \cos \theta)}{(\theta^2 - 1) \sin \theta + \theta \cos \theta}, \quad (11)$$

$\alpha_{in}$  – коэффициент затухания в материале включения или коэффициент феноменологических потерь,  $F = 4\pi\rho^3/3a^3$  – объемная доля металлических включений,  $\theta = (\omega/c)\rho\sqrt{\varepsilon_i\mu_i}$ ,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\sigma$  – проводимость материала включений.

Степень намагниченности рассматриваемого метаферритного материала определяется величиной  $\langle \alpha_3 \rangle$ .

Представляет интерес рассмотрение эффективных магнитных свойств предложенной метаферритной среды в направлении внешнего намагничивания и перпендикулярно ему, чему и посвящены следующие два параграфа.

### ВОЛНОВОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ В НАПРАВЛЕНИИ ВНЕШНЕГО НАМАГНИЧИВАНИЯ

Рассмотрим распространение монохроматической электромагнитной волны в направлении внешнего намагничивания включений метаферрита, т.е. в направлении оси  $y$ . Выражение для эффективной относительной магнитной проницаемости в этом случае определяется следующей формулой [16]:

$$\mu_{eff} = \mu \pm k, \tag{12}$$

где  $\mu$  и  $k$  определяются выражениями (2) и (3) соответственно, знак «+» соответствует первичной электромагнитной волне с правой круговой поляризацией (ВПКП), а знак «-» соответствует первичной волне с левой круговой поляризацией (ВЛКП).

На рис. 2 и рис. 4 приведены графики зависимости эффективной относительной магнитной проницаемости метаферритов  $\mu_{eff}$  от линейной частоты волны  $f$  для рассматриваемых поляризаций первичной волны для трех разных режимов намагниченности включений из отожженной стали: 1) случай максимального значения относительной магнитной проницаемости материала включений:  $H_0 = 120 \text{ A/m}$ ,  $\mu_i = 5500$ ,  $M = 6.5988 \cdot 10^5 \text{ A/m}$ ; 2) случай полного намагничивания материала включений:  $H_0 = 1.6 \cdot 10^5 \text{ A/m}$ ,  $\mu_i = 500$ ,  $M = 1.7189 \cdot 10^6 \text{ A/m}$ ; 3) промежуточный случай намагниченности материала включений:  $H_0 = 600 \text{ A/m}$ ,  $\mu_i = 1880$ ,  $M = 3.661 \cdot 10^5 \text{ A/m}$ . Для простоты рассмотрены воздушные матрицы ( $\epsilon_m = 1$ ,  $\mu_m = 1$ ), а также следующие параметры элементарной ячейки метаферрита:  $a = 0.001 \text{ м}$ ,  $\rho = 0.0004 \text{ м}$ . На рис. 3 и рис. 5 приведены соответствующие спектры магнитных потерь метаферрита  $\delta_m$ . Для определенности здесь и далее в работе рассматривается случай незначительных феноменологических потерь, когда  $\alpha_{in} = 0.5$ .

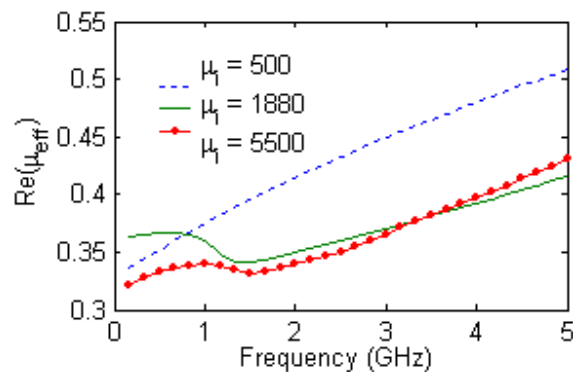


Рис. 2. Спектр действительной части эффективной относительной магнитной проницаемости для ВПКП, распространяющейся в направлении намагничивания

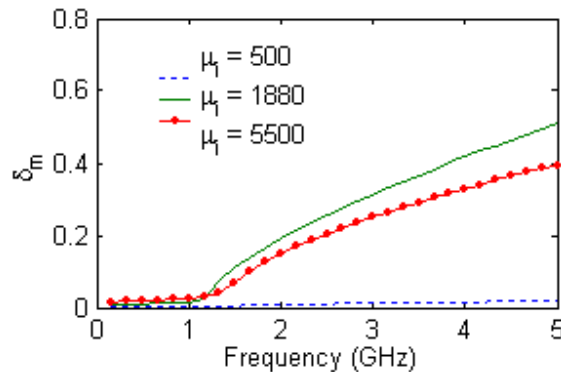


Рис. 3. Спектр магнитных потерь для ВПКП, распространяющейся в направлении намагничивания

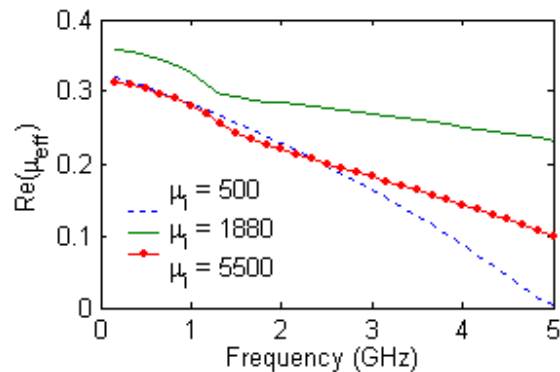


Рис. 4. Спектр действительной части эффективной относительной магнитной проницаемости для ВЛКП, распространяющейся в направлении намагничивания

Как видно из рис. 2-5, рассмотренная в данной статье метаматериальная среда с частичной намагнитченностью включений обладают малыми положительными значениями действительной части эффективной относительной магнитной проницаемости ( $\sim 10^{-1}$ ) и относительно малыми магнитными потерями ( $\sim 10^{-1}$ ) в случае распространения ВЛКП в направлении внешнего намагничивания. В случае распространения ВЛКП в направлении внешнего намагничивания магнитные потери на два порядка выше. В то же время магнитные потери данного метаферрита могут быть на несколько порядков ниже при полном намагничивании включений, что и было раньше показано в работе [14].

В работе [17] было показано, что в СВЧ диапазоне действительная часть относительной диэлектрической проницаемости исследуемого метаферрита является положительной величиной, незначительно превышающей единицу при рассмотренных значениях объемной доли металлических включений. Таким образом, в исследуемом диапазоне частот предложенный метаферрит с частично намагнитченными включениями и с «воздушной» матрицей при волновом распространении в направлении внешнего намагничивания характеризуются малыми значениями действительной части эффективного коэффициента преломления и может иметь большие потери.

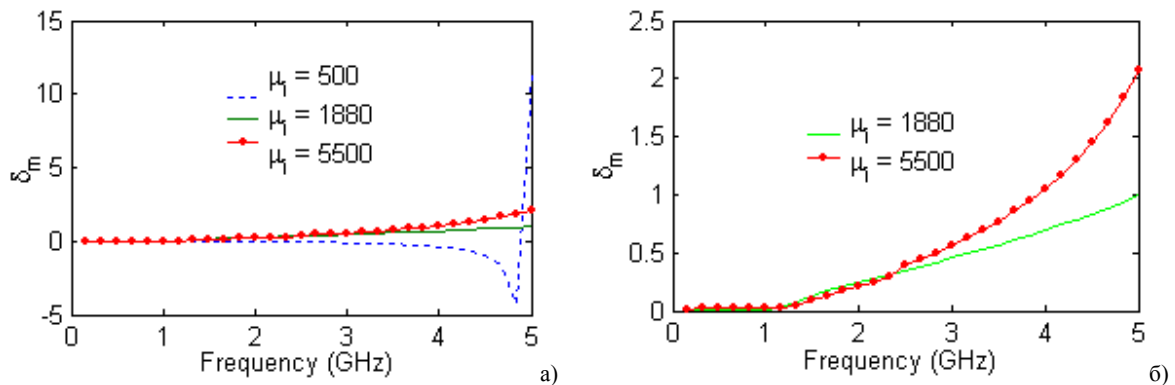


Рис. 5. Спектр магнитных потерь для ВЛКП, распространяющейся в направлении намагничивания

#### ВОЛНОВОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ В НАПРАВЛЕНИИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ НАПРАВЛЕНИЮ ВНЕШНЕГО НАМАГНИЧИВАНИЯ

Рассмотрим распространение монохроматической электромагнитной волны в направлении, перпендикулярном направлению внешнего намагничивания включений метаферрита, т.е. либо в направлении оси  $x$ , либо в направлении оси  $z$ , рис.1. Выражения для эффективной относительной магнитной проницаемости в этом случае будут определяться следующей формулой [16]:

$$\mu_{eff} = \begin{cases} \mu_y, & \text{при волновом распространении параллельно оси } x, \\ \frac{\mu^2 - k^2}{\mu}, & \text{при волновом распространении параллельно оси } z, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\mu$ ,  $\mu_y$  и  $k$  определяются выражениями (2), (4) и (3) соответственно. При этом если включения намагничены до насыщения, то  $\mu_y = 1$ , [16].

На рис. 6 и рис. 8 приведены графики зависимости эффективной относительной магнитной проницаемости метаферритов  $\mu_{eff}$  от линейной частоты волны  $f$  вдоль оси  $x$  и вдоль оси  $z$  соответственно, для тех же режимов намагниченности включений и тех же параметров элементарной ячейки, что были рассмотрены в предыдущем пункте. На рис. 7 и рис. 9 приведены соответствующие графики зависимостей спектров магнитных потерь метаферрита  $\delta_m$  при  $\alpha_{in} = 0.5$ .

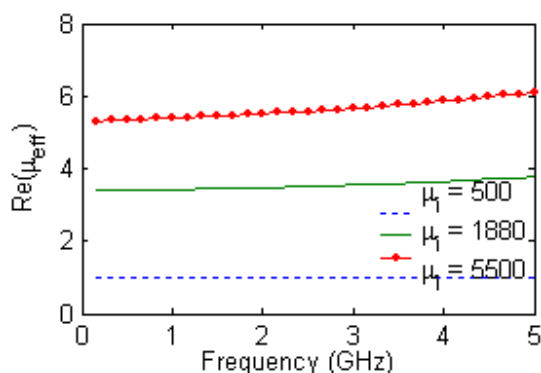


Рис. 6. Спектр действительной части эффективной относительной магнитной проницаемости для волны, распространяющейся параллельно оси  $x$

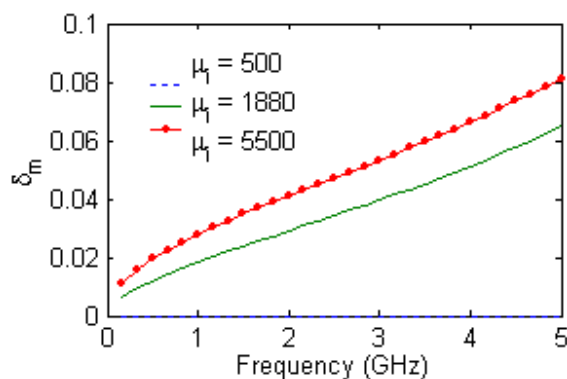


Рис. 7. Спектр магнитных потерь для волны, распространяющейся параллельно оси  $x$

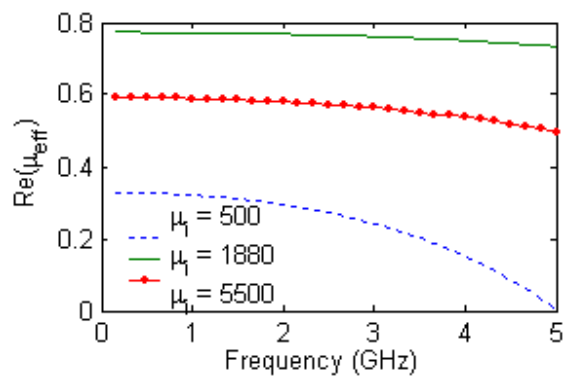


Рис. 8. Спектр действительной части эффективной относительной магнитной проницаемости для волны, распространяющейся параллельно оси  $z$

Как видно из рис. 6-9, волновое распространение в рассматриваемом метаферрите в направлении, перпендикулярном внешнему намагничиванию, заметно качественно и количественно отличается от предыдущего случая намагничивания. Так, при волновом распространении параллельно оси  $x$  наблюдается прирост значений действительной части эффективной относительной магнитной проницаемости (в сравнении с соответствующим значением относительной магнитной проницаемости матрицы), в то время как распространение в направлении оси  $z$  характеризуется малыми значениями действительной части эффективной относительной магнитной проницаемости. Кроме того, выбранные направления распространения волны характеризуются малыми магнитными потерями:  $\sim 10^2$ , чего не наблюдалось при волновом распространении в направлении внешнего намагничивания.

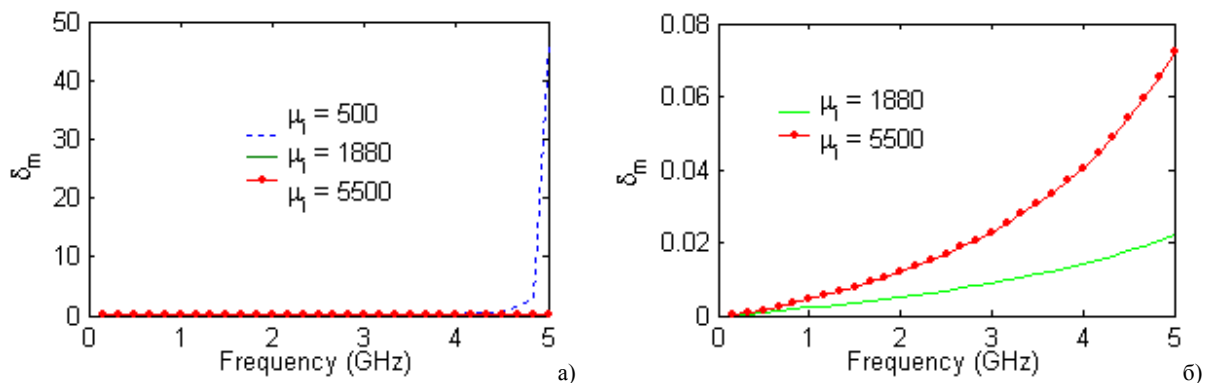


Рис. 9. Спектр магнитных потерь для волны, распространяющейся параллельно оси  $z$

Таким образом, в рассматриваемом диапазоне частот при волновом распространении в направлении, перпендикулярном внешнему намагничиванию, предложенный метаферрит может иметь как большие, так и малые значения действительной части эффективного коэффициента преломления и малые потери. Данные результаты делают привлекательным рассматриваемый материал с точки зрения приложений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был рассмотрен метаферрит, представляющий собой безграничный изотропный диэлектрик с периодически встроенными в него частично намагниченными металлическими ферромагнитными включениями сферической формы. В работе было показано, что в СВЧ диапазоне при распространении монохроматических электромагнитных волн в направлении внешнего намагничивания действительная часть эффективной относительной магнитной проницаемости может иметь малые положительные значения при волновом распространении перпендикулярно внешнему намагничиванию, в то время как при волновом распространении перпендикулярно внешнему намагничиванию действительная часть эффективной относительной магнитной проницаемости может иметь как малые, так и большие положительные значения. Более того, во втором случае волнового распространения имеют место малые магнитные потери, а в первом случае волнового распространения магнитные потери на несколько порядков больше.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rado G. T. Theory of the Microwave Permeability Tensor and Faraday Effect in Non-Saturated Ferromagnetic Materials / G. T. Rado // Physical Review. – 1953. – Vol. 89, Issue 2. – P. 529.
2. Schlomann Ernst. Microwave Behavior of Partially Magnetized Ferrites / Ernst Schlomann // Journal of Applied Physics. – 1970. – Vol. 41, № 1. – P. 204-214.
3. Green J. Microwave Characterization of Partially Magnetized Ferrites / J. Green, F. Sandy // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1974. – Vol. 22, Issue 6. – P. 641-645.
4. Schlomann Ernst. Theory of Low-Field Loss in Partially Magnetized Ferrites / Ernst Schlomann // IEEE Transactions on Magnetism. – 1992. – Vol. 28, № 5. – P. 3300-3302.
5. Mazur M. Propagation in a Ferrite Circular Waveguide Magnetized Through a Rotary Four-Pole Magnetic Field / M. Mazur, E. Sedek, J. Mazur // PIER. – 2007. – Vol. 68. – P. 1-13.
6. Helsen J. Resonant Frequencies, Q-Factor, and Susceptance Slope Parameter of Waveguide Circulators Using Weakly Magnetized Open Resonators / J. Helsen, J. Sharp // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1983. –

- Vol. MTT-31, Issue 6. – P. 434-441.
7. Peng Bin. Magnetic Field Alignment of Barium Ferrite Thick Films for Microwave Circulator Applications / Bin Peng, Yuanchao Wang, Wanli Zhang, Wenxu Zhang, Ke Tan // *Modern Physics Letters B*. – 2012. – Vol. 26, Issue 26. – P. 1250168.
  8. Dillon B. M. Analysis of Partial-Height Ferrite-Slab Differential Phase-Shift Sections / B. M. Dillon, A. A. P. Gibson // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2000. – Vol. 48, Issue 9. – P. 1577-1582.
  9. Zafar J. High Power Ferrite Shifter for Beam Steering Applications / J. Zafar, A. A. P. Gibson, H. Zafar // 3-rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2009), Berlin, Germany. – 2009. – P. 3029-3033.
  10. Helszajn J. YIG Resonators and Filters / J. Helszajn. – John Wiley & Sons, Inc., 1985. – 250 p.
  11. Wu J. Novel C-Band Tunable Bandpass Filter With Low Bias Magnetic Fields Using Partially Magnetized Ferrites / J. Wu, S. Beguhn, Z. Y. Zhou, J. Lou, N. X. Sun // *International IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest (MTT)*, Montreal, Quebec, Canada. – 2012. – P. 1-3.
  12. Kerner D. J. Metaferrites: Using Electromagnetic Bandgap Structures to Synthesize Metamaterial Ferrites / D. J. Kerner, D. H. Werner, M. Lisovich // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2005. – Vol. 53, Issue 4. – P. 1382-1389.
  13. Zouganelis Georgios. Two Layer Magnetodielectric Metamaterial with Enhanced Dielectric Constant as a New Ferrite Like Material / Georgios Zouganelis, Oleg Rybin // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2006. – Vol. 45, № 44. – L. 1175-1178.
  14. Rybin O. Effective Microwave Magnetic Response of Two-Component Metaferrite / O. Rybin // *The International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2012. – Vol. 40, № 3 – P. 185-193.
  15. Rybin O. Effective Permeability Tensor of Partially Magnetized Two-Component Metaferrites / O. Rybin // *Modern Physics Letters B*. – 2014. – Vol. 28, № 25 – P. 1450199.
  16. Pozar David M. *Microwave Engineering* / David M. Pozar. – John Wiley & Sons, Inc., 4<sup>th</sup> Edition, 2012. – 756 p.
  17. Rybin O. Unusual Microwave Effective Properties of Two-Component Metaferrites / O. Rybin // *The International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2014. – Vol. 46, № 3 – P. 519-526.