

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МИКРОВОЛНОВЫХ
КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОХОЖДЕНИЯ ВОЛНЫ ТИПА H_{10}
ЧЕРЕЗ ПЛАСТИНУ НАНОСТРУКТУРНОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ 3D-РЕШЕТКИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ
НАНОПРОВОЛОК В ВОЛНОВОДЕ¹**

Аннотация. *Актуальность и цели.* Магнитные нанокompозиты на основе ферромагнитных нанопроволок перспективны для применения в магнитоуправляемых устройствах СВЧ: циркуляторах, вентилях, фазовращателях, фильтрах, аттенуаторах, поглотителях и антеннах СВЧ. Цели работы: построение математической модели дифракции волноводных мод на образцах магнитных 3D-нанокompозитов, содержащих ферромагнитные нанопроволоки, с учетом обмена и граничных условий; разработка вычислительных алгоритмов, позволяющих рассчитать S -параметры матрицы рассеяния для 3D-магнитных наноструктур в волноводах. *Материалы и методы.* 3D-краевая задача дифракции электромагнитных волн на образцах магнитного нанокompозита на основе 3D-решетки ориентированных магнитных нанопроволок в прямоугольном волноводе решена методом автономных блоков с каналами Флоке (ФАБ). Матрицы рассеяния неоднородности – пластины магнитного 3D-нанокompозита на основе периодической 3D-решетки ориентированных магнитных нанопроволок в прямоугольном волноводе определяются как результат многоуровневой рекомпозиции ФАБ с использованием разработанного вычислительного алгоритма расчета матрицы проводимости ФАБ. *Результаты.* Получены результаты электродинамического расчета коэффициентов прохождения волны H_{10} через пластину анизотропного наноструктурного материала на основе 3D-решетки ферромагнитных нанопроволок (материал $Co_{80}Ni_{20}$) в прямоугольном металлическом волноводе в зависимости от величины и направления внешнего постоянного магнитного поля на частоте $f = 26$ ГГц при изменении периода решетки. *Выводы.* Из результатов численного моделирования следует, что положение и значение минимума коэффициента прохождения (максимума коэффициента отражения) управляются изменением величины и направления внешнего постоянного магнитного поля и зависят от геометрии и соотношения размеров магнитной нанорешетки (диаметра нанопроволок и периода решетки).

Ключевые слова: дифракция, коэффициент прохождения, волновод, магнитный нанокompозит, решетка, ферромагнитные нанопроволоки, автономные блоки.

O. A. Golovanov, G. S. Makeeva, D. N. Shirshikov, G. G. Gorlov

**ELECTRODYNAMIC CALCULATION OF MICROWAVE
TRANSMISSION COEFFICIENTS OF MODE H_{10} THROUGH
SLAB OF NANOSTRUCTURED MATERIAL BASED ON THE
3D-ARRAY OF FERROMAGNETIC NANOWIRES**

Abstract. *Background.* Magnetic nanocomposites based on ferromagnetic nanowires are promising for implementation in magnetically controlled microwave devices.

¹ Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 12-02-97025-р_поволжье_.

es: circulators, valves, phase shifters, filters, attenuators, absorbers and microwave antennas. The aim of the study is to construct a mathematical model of waveguide mode diffraction on the samples of magnetic 3D-nanocomposites with ferromagnetic nanowires, taking into account exchange and boundary conditions; to develop computational algorithms that calculate the S-parameter of a scattering matrix for magnetic 3D-nanostructures in waveguides. *Materials and methods.* The 3D-boundary problem of electromagnetic wave diffraction on the samples of magnetic nanocomposite based on 3D-lattice of oriented magnetic nanowires in a rectangular waveguide is solved by the method of autonomous units with Floquet channels (FAB). The scattering heterogeneity matrixes are the plates of 3D-magnetic nanocomposite based on a periodic 3D-lattice of oriented magnetic nanowires in a rectangular waveguide, that are defined as a result of the multi-level recomposition of FAB using the developed computational algorithm of calculating the conductivity matrix of FAB. *Results.* The obtained the results of the electrodynamic calculation of the transmission indexes of the wave H_{10} passage through the anisotropic nanostructured material plate based on a 3D-lattice of ferromagnetic nanowires (material $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$) in a rectangular metal waveguide, depending on the magnitude and direction of the external static magnetic field at the frequency $f = 26$ GHz with changing the lattice period. *Conclusions.* The results of numerical simulation show that the position and the minimum value of the transmission index (maximum reflection index) are controlled by changing the magnitude and direction of the external static magnetic field and depend on the geometry and the ratio of the magnetic nanolattice sizes (nanowire diameter and the lattice period).

Key words: diffraction, transmission index, waveguide, magnetic nanocomposite, lattice, ferromagnetic nanowires, self-contained units.

Введение

Магнитные нанокompозиты на основе ферромагнитных нанопроволок перспективны для применения в магнитоуправляемых устройствах СВЧ: циркуляторах, вентилях, фазовращателях, аттенюаторах [1–4] и антеннах СВЧ [5].

Для успешного применения магнитных нанокompонентов в управляемых магнитным полем устройствах и антеннах СВЧ необходимо добиться оптимальных условий взаимодействия электромагнитной волны с магнитными нанопроволоками в нанокompозите, чтобы обеспечить эффективность этого взаимодействия. Эту проблему можно успешно решить, используя математическое моделирование.

В настоящее время в моделировании наноструктурных материалов и устройств СВЧ на их основе существуют два подхода: первый – упрощение уравнений Максвелла и материальных уравнений при введении эффективных параметров (эффективной магнитной и диэлектрической проницаемостей) наноматериалов, что позволяет существенно упростить математические расчеты. Второй подход – решение 3D-краевых задач дифракции для уравнений Максвелла совместно с уравнениями движения в материальной среде без упрощения уравнений и граничных условий. Только этот второй подход позволяет достичь адекватности математических моделей реальным электродинамическим объектам для решения задач расчета микроволновых характеристик анизотропных наноструктурных материалов и устройств СВЧ на их основе.

В этой связи задача построения математических моделей дифракции волноводных мод на образцах магнитных 3D-нанокompозитов, содержащих

ферромагнитные нанопроволоки, с учетом обмена и граничных условий и разработки вычислительных алгоритмов, позволяющих рассчитать S -параметры матрицы рассеяния для 3D-магнитных наноструктур в волноводах, является актуальной.

1. Математическая модель

Построение математической модели дифракции и взаимодействия электромагнитных волн с образцами магнитных нанокомпозитов базируется на решении 3D-краевых задач дифракции для уравнений Максвелла

$$\operatorname{rot} H(t) = \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t} + \sigma \vec{E}(t); \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} E(t) = -\frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\vec{B}(t) = \vec{M}(t) + \mu_0 \vec{H}(t) \quad (3)$$

с соответствующими электродинамическими граничными условиями, дополненной уравнением Ландау – Лифшица [6]:

$$\frac{d\vec{M}(t)}{dt} = -\gamma (\vec{M}(t) \times \vec{H}_{\text{эф}}(t)) + \omega_r (\chi_0 \vec{H}(t) - \vec{M}(t)); \quad (4)$$

$$\vec{H}_{\text{эф}}(t) = \vec{H}(t) + \vec{H}_q(t); \quad (5)$$

$$\vec{H}_q(t) = q \nabla^2 \vec{M}(t). \quad (6)$$

Здесь $\vec{E}(t), \vec{H}(t)$ – векторы напряженности электрического и магнитного полей; $\vec{M}(t)$ – вектор намагниченности среды; $\vec{B}(t)$ – вектор магнитной индукции; $\vec{H}_{\text{эф}}(t)$ – суммарное эффективное поле, включающее $\vec{H}_q(t)$ – поле обменного взаимодействия; ∇ – оператор Лапласа; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды; σ – электропроводность среды; ϵ_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные; γ – гиромагнитное отношение; $\omega_r = \alpha \gamma H_0$ – частота релаксации, α – параметр диссипации; χ_0 – статическая восприимчивость; q – константа обменного взаимодействия.

Согласно уравнению Ландау – Лифшица (4) движение вектора намагниченности определяется эффективным магнитным полем $\vec{H}_{\text{эф}}(t)$, в котором находится магнитная наночастица. Эффективное поле $\vec{H}_{\text{эф}}(t)$ представляет собой сумму (5) поля анизотропии, локальных дипольных полей, поля обменного взаимодействия $\vec{H}_q(t)$.

3D-краевую задачу дифракции электромагнитных волн на образцах магнитного нанокомпозита на основе 3D-решетки ориентированных магнитных нанопроволок в прямоугольном волноводе (рис. 1) решаем методом автономных блоков с каналами Флоке (ФАБ) [7].

Математическую модель для расчета матрицы рассеяния $\mathbf{R}$ неоднородности – образца магнитного нанокompозита в волноводе (рис. 1), строим на основе декомпозиционного подхода [8]. Область магнитного нанокompозита расчленим условными границами на автономные блоки в виде прямоугольных параллелепипедов, содержащих магнитные нанопроволоки, и каналами Флоке на гранях (ФАБ) [7].

Ориентация
нанопроволок
в нанокompозите

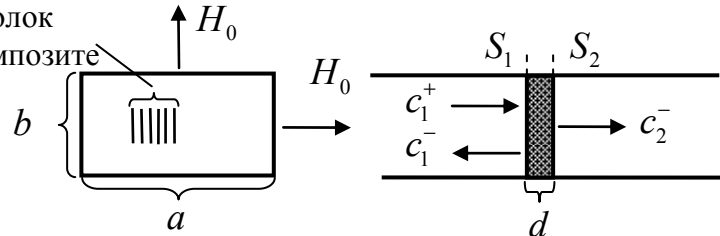


Рис. 1. Дифракция волны H_{10} на образце магнитного нанокompозита на основе 3D-решетки ориентированных магнитных нанопроволок в прямоугольном волноводе: c_1^+ , c_1^- , c_2^- – амплитуды падающей, отраженной и прошедшей волн типа H_{10} ; H_0 – поле подмагничивания, S_1 , S_2 – входные сечения; $a = 3,6$ мм; $b = 7,2$ мм; $d = 1,0$ мм

Вычислительный алгоритм определения дескриптора (матрицы проводимости $\mathbf{Y}$) ФАБ, содержащих магнитные нанопроволоки, разработан в [7] на основе решения краевой 3D-задачи дифракции проекционным методом Галеркина [9].

В декомпозиционной схеме моделирования дифракции волны H_{10} на пластине нанокompозита в волноводе (рис. 1) все автономные блоки являются однотипными, что позволяет использовать вычислительный алгоритм многоуровневой рекомпозиции ФАБ, который существенно сокращает время расчетов на компьютере. Два однотипных ФАБ объединяем в один (при этом два виртуальных канала Флоке на гранях этого ФАБ преобразуются в один), получаем ФАБ с шестью каналами на гранях и затем процесс повторяется.

В результате многоуровневой рекомпозиции ФАБ и преобразования каналов Флоке на гранях получаем результирующий ФАБ (с двумя входными сечениями (гранями) S_1, S_2 (рис. 1) как модель неоднородности (пластины магнитного нанокompозита) в волноводе. При этом на гранях исходных ФАБ, которые соприкасаются с боковой поверхностью прямоугольного металлического волновода (рис. 1), граничные условия типа «короткого замыкания» ($\vec{E}_\tau = 0$) не накладываются (для расчета матрицы проводимости $\mathbf{Y}$ они являются естественными).

Матрицу проводимости результирующего ФАБ, записанную в базисе собственных волн каналов Флоке, преобразуем в матрицу проводимости $\mathbf{Y}$ в базисе собственных волн прямоугольного волновода [10]. Затем, определив матрицу проводимости $\mathbf{Y}$, находим матрицу рассеяния $\mathbf{R} = (\mathbf{I} + \mathbf{Y})^{-1}(\mathbf{I} - \mathbf{Y})$ [7]. Из мат-

рицы рассеяния $\mathbf{R}$ неоднородности (пластины магнитного нанокompозита) в волноводе определяем амплитуды c_1^- , c_2^- отраженной и прошедшей волн типа H_{10} (амплитуда c_1^+ падающей волны типа H_{10} принята равной $c_1^+=1$). Коэффициент прохождения волны типа H_{10} определяется как

$$k_{\text{пр}} = \frac{c_2^-}{c_1^+}.$$

2. Результаты электродинамического моделирования дифракции волны H_{10} на пластине наноструктурного материала на основе 3D-решеток ориентированных магнитных нанопроволок в волноводе

При помощи разработанного вычислительного алгоритма на основе многоуровневой рекомпозиции ФАБ проведено математическое моделирование дифракции волны H_{10} на образцах анизотропных наноструктурных материалов на основе периодических 3D-решеток ориентированных ферромагнитных нанопроволок в волноводе (рис. 1) в зависимости от величины и направления поля подмагничивания H_0 в условиях магнитного резонанса в миллиметровом диапазоне волн.

Результаты электродинамического расчета зависимости относительного коэффициента прохождения d_m волны H_{10} через пластину магнитного нанокompозита на основе 3D-решетки ферромагнитных нанопроволок в волноводе (рис. 1) от напряженности внешнего постоянного магнитного поля H_0 на частоте $f = 26$ ГГц при изменении периодичности решетки a , b представлены на рис. 2, а, б для ориентации поля подмагничивания H_0 вдоль и ортогонально оси нанопроволок соответственно. Материал нанопроволок $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$ (намагниченность насыщения $4\pi M_s = 15356$ Гс, константа обменного взаимодействия $A = 1,5 \times 10^{-9}$ Э · см², параметр диссипации $\alpha = 0,005$); радиус нанопроволок $2r = 25$ нм, длина нанопроволок $l = 500$ нм.

Относительный коэффициент прохождения определялся как $d_m = \frac{k_{\text{пр}}^H - k_{\text{пр}}^0}{k_{\text{пр}}^0}$, где $k_{\text{пр}}^0$, $k_{\text{пр}}^H$ – коэффициент прохождения при отсутствии ($H_0 = 0$) и при приложении внешнего постоянного магнитного поля ($H_0 \neq 0$).

Из графиков на рис. 2 следует, что коэффициент прохождения имеет минимумы в точках максимума резонансного поглощения при значениях напряженности внешнего постоянного магнитного поля $H_{0\text{рез}}$, которые отличаются от поперечного ферромагнитного резонанса (ФМР) в сплошной ферромагнитной среде [6]

$$\omega_{\perp} = \gamma H_0 \sqrt{1 + \frac{4\pi M_0}{H_0}}$$

(на частоте $f = 26$ ГГц поперечный ФМР в неограниченной гиромагнитной среде наблюдается при $H_0 = 4342$ Э).

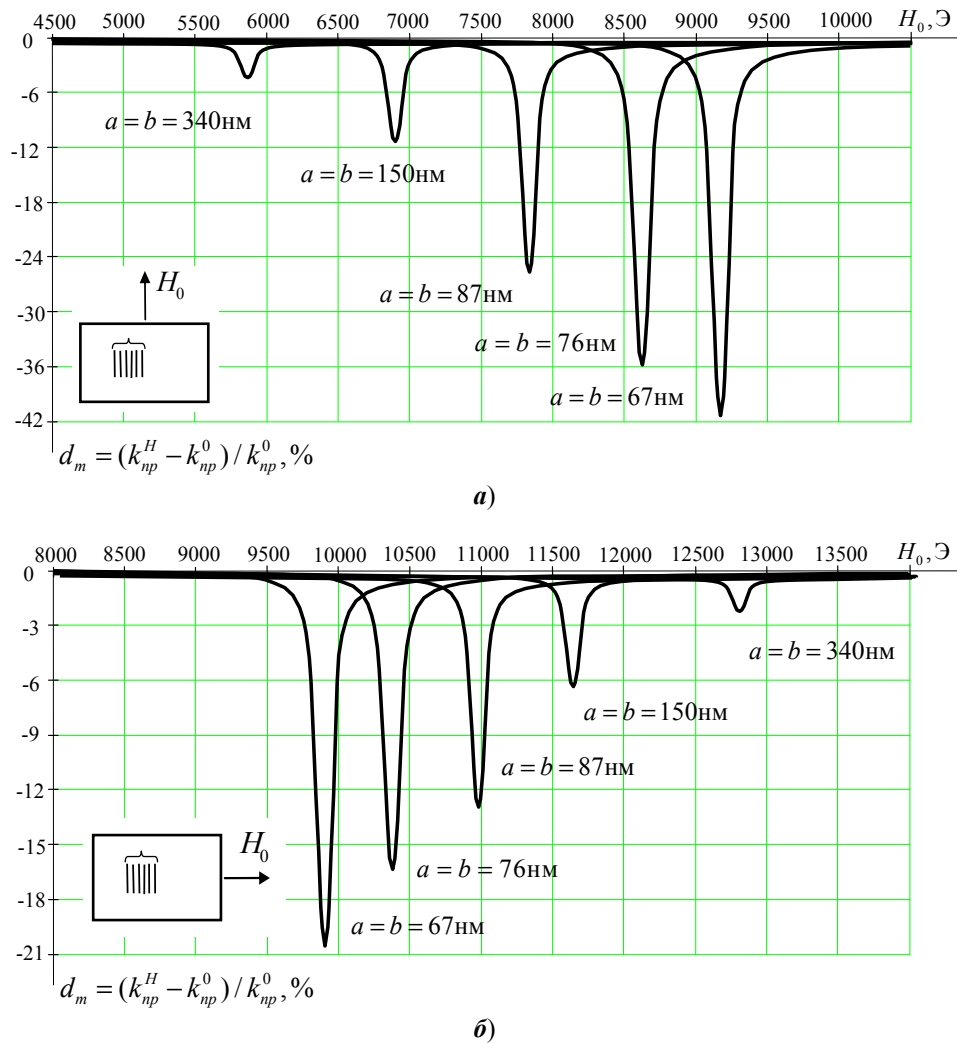


Рис. 2. Зависимости относительного коэффициента прохождения волны H_{10} через образец магнитного нанокompозита (3D-решетки ориентированных магнитных нанопроволок) в волноводе от напряженности внешнего постоянного магнитного поля H_0 при изменении периодичности решетки a, b : $f = 26$ ГГц; магнитные нанопроволоки $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$ ($4\pi M_s = 15356$ Гс, $\alpha = 0,005$, $\sigma = 1,0 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $A = 1,5 \times 10^{-9}$ Э); $2r = 25$ нм, $l = 500$ нм, $c = 525$ нм; $f = 26$ ГГц; ориентация H_0 вдоль (а) и ортогонально (б) оси нанопроволок

Положение и значения минимумов коэффициента прохождения (рис. 2) (максимумов резонансного поглощения) определяются эффективностью резонансного взаимодействия волны типа H_{10} с магнитным нанокompозитом на собственных частотах ФМР 3D-решетки магнитных нанопроволок и зависят от периода решетки.

Сравнивая полученные результаты математического моделирования резонансного взаимодействия волны H_{10} с магнитным наноккомпозитом при ориентации поля подмагничивания H_0 вдоль (рис. 2,а) и ортогонально (рис. 2,б) оси нанопроволок, видим, что характер изменения положения и значений минимумов коэффициента прохождения в зависимости от периода решетки a, b в этих двух случаях различен.

При уменьшении периода решетки (сокращении расстояния между магнитными нанопроволоками до длины обменного взаимодействия) при наличии сильной связи между ними, обусловленной обменными силами, магнитные нанорешетки с высокой плотностью упаковки (при расстояниях между нанопроволоками диаметром $2r = 25$ нм меньших, чем $a \leq 67$ нм)) приближаются по своим свойствам к квазисплошной ферромагнитной среде, при этом собственная частота ФМР однородного типа прецессии намагниченности 3D-решеток приближается к частоте ФМР в гиромангнитной среде [6]

$$\frac{\omega_0}{\gamma} = H_0$$

и в пределе $H_{0\text{рез}} = 9248$ Э для $a = b = 67$ нм (см. графики на рис. 2,а,б).

На частоте $f = 26$ ГГц магнитный резонанс в неограниченной гиромангнитной среде наблюдается при $H_0 = 9248$ Э.

В случае магнитных нанорешеток с малой плотностью упаковки (при расстояниях между нанопроволоками диаметром $2r = 25$ нм больших, чем $a \geq 340$ нм) собственная частота ФМР однородного типа прецессии намагниченности 3D-решетки ферромагнитных нанопроволок изменяется в пределе до собственной резонансной частоты продольно намагниченного цилиндра [6]

$$\frac{\omega_0}{\gamma} = (H_0 + 2\pi M_0)$$

при ориентации H_0 вдоль оси нанопроволок (см. графики на рис. 2,а для $a = b = 340$ нм) или до собственной резонансной частоты поперечно намагниченного цилиндра [6]

$$\left(\frac{\omega_0}{\gamma} \right)^2 = H_0(H_0 - 2\pi M_0)$$

при ориентации H_0 оси нанопроволок (см. графики на рис. 2,б для $a = b = 340$ нм).

3. Результаты моделирования резонансного взаимодействия электромагнитных волн с магнитным наноккомпозитом при введении эффективных параметров

Сравним резонансные значения постоянного магнитного поля $H_{0\text{рез}}$ при взаимодействии волны H_{10} с магнитным наноккомпозитом в волноводе с резонансными значениями магнитного поля $H_{0\text{рез}}$ при взаимодействии поперечных (и продольных) волн, распространяющихся в неограниченной ани-

зотропной наноструктурированной среде, с периодической 3D-решеткой ориентированных ферромагнитных нанопроволок на частоте $f = 26$ ГГц.

На рис. 3 приведены результаты электродинамического расчета действительной и мнимой частей комплексной поперечной эффективной магнитной проницаемости $\mu_{\perp}$ нанокompозита на основе 3D-решеток магнитных нанопроволок при поперечном подмагничивании (см. вставку к рис. 3) в зависимости от напряженности внешнего постоянного магнитного поля H_0 в условиях магнитного резонанса на частоте $f = 26$ ГГц.

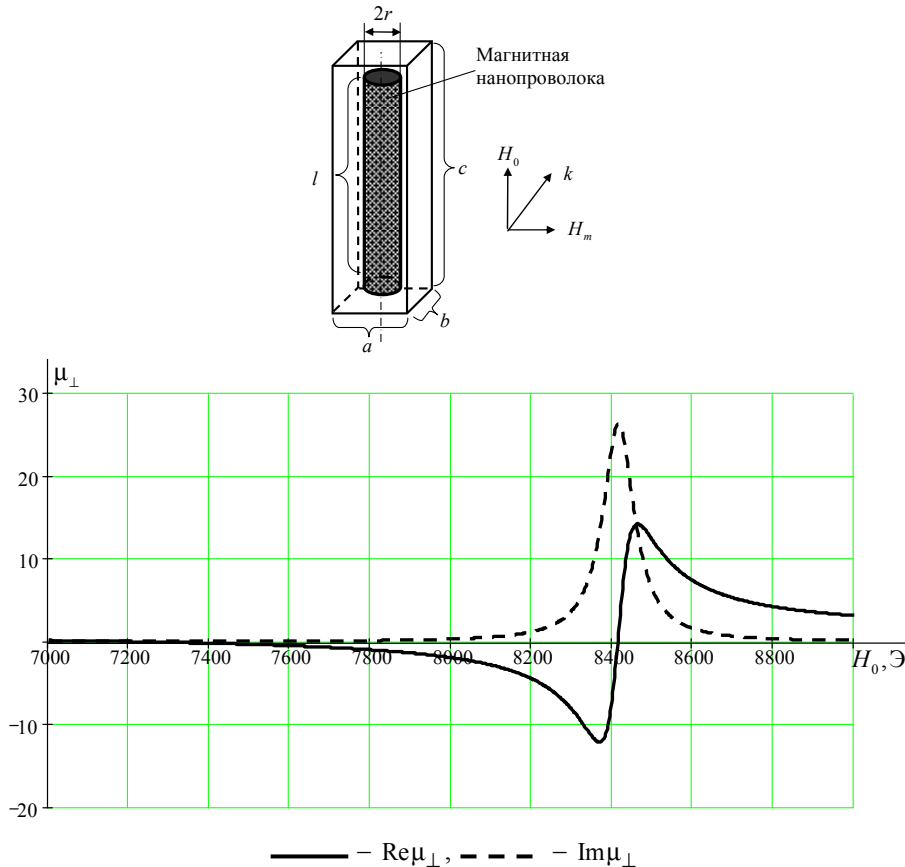


Рис. 3. Зависимости действительной и мнимой частей комплексной поперечной эффективной магнитной проницаемости $\mu_{\perp}$ магнитного 3D-нанокompозита (на основе периодической 3D-решетки ориентированных магнитных нанопроволок с поперечным подмагничиванием) от напряженности внешнего постоянного магнитного поля H_0 : материал нанопроволок $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$ ($4\pi M_s = 15356$ Гс, $\alpha = 0,005$, $\sigma = 1,0 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $A = 1,5 \cdot 10^{-9}$ Э); $2r = 25$ нм, $l = 500$ нм, $a = b = 76$ нм, $c = 525$ нм; $f = 26$ ГГц; ориентация H_0 вдоль оси нанопроволок

Результаты электродинамического расчета действительной и мнимой частей комплексной диагональной компоненты μ тензора эффективной магнитной проницаемости нанокompозита на основе 3D-решетки магнитных нанопроволок при продольном подмагничивании (см. вставку к рис. 4) в за-

висимости от напряженности внешнего постоянного магнитного поля H_0 в условиях магнитного резонанса на частоте $f = 26$ ГГц приведены на рис. 4.

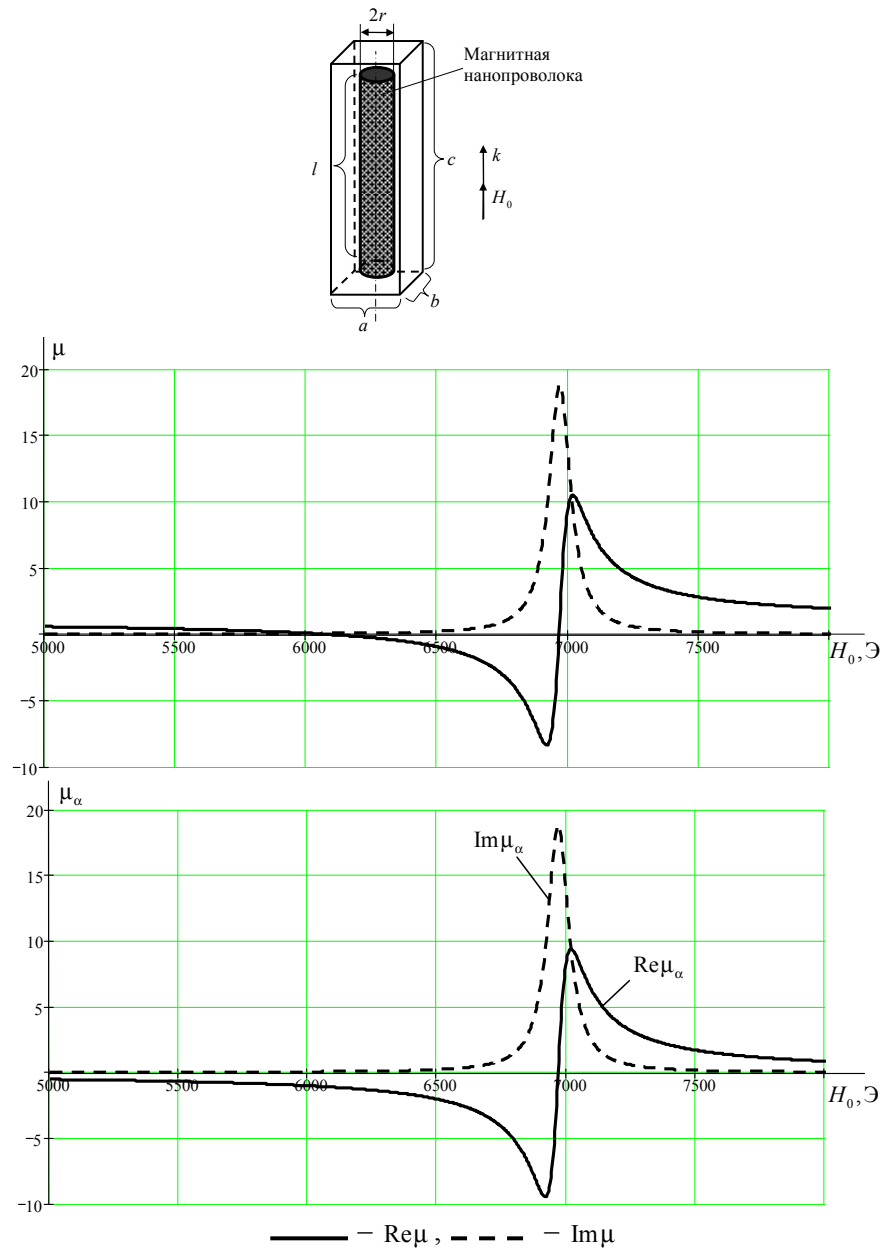


Рис. 4. Зависимости действительной и мнимой частей комплексной диагональной μ и недиагональной компонент тензора эффективной магнитной проницаемости $\vec{\mu}$ магнитного нанокompозита (на основе периодической 3D-решетки ориентированных магнитных нанопроволок с продольным подмагничиванием) от напряженности внешнего постоянного магнитного поля H_0 : материал нанопроволок $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$ ($4\pi M_s = 15356$ Гс, $\alpha = 0,005$, $\sigma = 1,0 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $A = 1,5 \times 10^{-9}$ Э); $2r = 25$ нм, $l = 500$ нм, $a = b = 76$ нм, $c = 525$ нм; $f = 26$ ГГц; ориентация H_0 вдоль оси нанопроволок

Из сравнения расчетных зависимостей (рис. 2–4) на частоте $f = 26$ ГГц следует, что резонансные значения постоянного магнитного поля $H_{0\text{рез}}$ при взаимодействии волны типа H_{10} с образцом магнитного нанокompозита в волноводе (рис. 2) отличаются от резонансных значений магнитного поля $H_{0\text{рез}}$ при взаимодействии как поперечных (рис. 3), так и продольных волн (рис. 4) с периодической 3D-решеткой ориентированных ферромагнитных нанопроволок (с тем же периодом $a = b = 76$ нм, $c = 525$ нм) и зависят от направления распространения волны по отношению к направлению поля подмагничивания H_0 , взаимной ориентации постоянного H_0 и высокочастотного H_m магнитных полей, ориентации поля подмагничивания H_0 к оси нанопроволок, а также периода решетки. При этом положение и значение минимума коэффициента прохождения (максимума коэффициента отражения) управляются изменением величины и направления внешнего постоянного магнитного поля H_0 и зависят от геометрии и соотношения размеров магнитной нанорешетки (диаметра нанопроволок и периода решетки) (рис. 2).

Полученные результаты математического моделирования (на электродинамическом уровне строгости) резонансного взаимодействия волны типа H_{10} с магнитным нанокompозитом в волноводе отличаются от результатов при использовании упрощенных моделей в рамках теории эффективной среды при введении эффективных параметров – эффективной магнитной и диэлектрической проницаемостей нанокompозитов на основе периодической 3D-решетки ориентированных углеродных нанотрубок с магнитными наночастицами и магнитных нанопроволок

Список литературы

1. **Spiegela, J.** Microwave Properties of Ferromagnetic Nanowires and Applications to Tunable Devices / J. Spiegela, I. Huynen // Solid State Phenomena. – 2009. – Vol. 152–153. – P. 389–393.
2. **Saib, A.** An Unbiased Integrated Microstrip Circulator Based on Magnetic Nanowired Substrate / A. Saib, M. Darques, L. Piroux, D. Vanhoenacker-Janvier, I. Huynen // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2005. – Vol. 53, № 6. – P. 2043.
3. **Kuanr, B. K.** Nonreciprocal microwave devices based on magnetic nanowires / B. K. Kuanr, V. Veerakumar, R. Marson, S. R. Mishra, R. E. Camley and Z. Celinski // Applied Physics Letters. – 2009. – Vol. 94. – P. 202505.
4. **Wang, J.** Design and simulation of self-biased circulators in the ultra high frequency band / J. Wang, A. Geiler, P. Mistry, D. R. Kaeli, V. G. Harris, C. Vittoria // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2012. – Vol. 324. – P. 991–994.
5. **Гуревич, А. Г.** Магнитные колебания и волны / А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков. – М. : Наука, 1994. – 464 с.
6. **Никольский, В. В.** Декомпозиционный подход к задачам электродинамики / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М. : Наука, 1983. – 304 с.
7. **Голованов, О. А.** Метод автономных блоков с магнитными нановключениями и каналами Флоке для математического моделирования магнитных наноструктур с учетом обмена и граничных условий / О. А. Голованов, Г. С. Макеева // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54, № 11. – С. 1421–1428.
8. **Никольский, В. В.** Проекционные методы в электродинамике : сб. науч.-метод. статей по прикладной электродинамике / В. В. Никольский. – М. : Высшая школа, 1977. – С. 4–23.

9. **Никольский, В. В.** Вариационные методы для внутренних задач электродинамики / В. В. Никольский. – М. : Наука, 1967. – 460 с.
10. **Макеева, Г. С.** Математическое моделирование распространения электромагнитных волн в наноструктурированных гиромангнитных средах методом автономных блоков с магнитными нановключениями и каналами Флоке / Г. С. Макеева, О. А. Голованов // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54, № 12. – С. 1455–1459.

References

1. Spiegela J., Huynen I. *Solid State Phenomena*. 2009, vol. 152–153, pp 389–393.
2. Saib A., Darques M., Piraux L., Vanhoenacker-Janvier D., Huynen I. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2005, vol. 53, no. 6, p. 2043.
3. Kuanr B. K., Veerakumar V., Marson R., Mishra S. R., Camley R. E. and Celinski Z. *Applied Physics Letters*. 2009, vol. 94, p. 202505.
4. Wang J., Geiler A., Mistry P., Kaeli D. R., Harris V. G., Vittoria C. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2012, vol. 324, pp. 991–994.
5. Gurevich A. G., Melkov G. A. *Magnitnye kolebaniya i volny* [Magnetic oscillations and waves]. Moscow: Nauka, 1994, 464 p.
6. Nikol'skiy V. V., Nikol'skaya T. I. *Dekompozitsionnyy podkhod k zadacham elektrodinamiki* [Decomposition approach to problems of electrodynamics]. Moscow: Nauka, 1983, 304 p.
7. Golovanov O. A., Makeeva G. S. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2009, vol. 54, no. 11, pp. 1421–1428.
8. Nikol'skiy V. V. *Proektsionnye metody v elektrodinamike. Sbornik nauchno-metodicheskikh statey po prikladnoy elektrodinamike* [Projecting methods in electrodynamics. Collected scientific and methodological articles on applied electrodynamics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1977, pp. 4–23.
9. Nikol'skiy V. V. *Variatsionnye metody dlya vnutrennikh zadach elektrodinamiki* [Variational methods for inner problems of electrodynamics]. Moscow: Nauka, 1967.
10. Makeeva G. S., Golovanov O. A. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2009, vol. 54, no. 12, pp. 1455–1459.

Голованов Олег Александрович

доктор физико-математических наук, профессор, кафедра общепрофессиональных дисциплин, Пензенский филиал Военной академии материально-технического обеспечения (Россия, г. Пенза-5)

E-mail: golovanovol@mail.ru

Golovanov Oleg Aleksandrovich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor, of general professional disciplines, Penza branch of the Military Academy of Maintenance Supplies (Penza-5, Russia)

Макеева Галина Степановна

доктор физико-математических наук, профессор, кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: radiotech@pnzgu.ru

Makeeva Galina Stepanovna

Doctor of physical and mathematical sciences, professor, sub-department of radio engineering and radio electronic systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ширшиков Дмитрий Николаевич

адъюнкт, Пензенский филиал Военной академии материально-технического обеспечения (Россия, г. Пенза-5)

E-mail: shirshikov1981@mail.ru

Shirshikov Dmitriy Nikolaevich

Postgraduate student, Penza branch of the Military Academy of Maintenance Supplies (Penza-5, Russia)

Горлов Геннадий Геннадьевич

адъюнкт, Пензенский филиал Военной академии материально-технического обеспечения (Россия, г. Пенза-5)

E-mail: mitsubisi-gor82@mail.ru

Gorlov Gennadiy Gennad'evich

Postgraduate student, Penza branch of the Military Academy of Maintenance Supplies (Penza-5, Russia)

УДК 538.95

Голованов, О. А.

Электродинамический расчет микроволновых коэффициентов прохождения волны типа H_{10} через пластину наноструктурного материала на основе 3D-решетки ферромагнитных нанопроволок в волноводе /
О. А. Голованов, Г. С. Макеева, Д. Н. Ширшиков, Г. Г. Горлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 162–173.