

Электродинамический анализ коэффициента прохождения волны H_{10} через пластины 3D-нанокompозитов, содержащих массивы углеродных нанотрубок с магнитными наночастицами, в волноводе в условиях ферромагнитного резонанса

Г.С. Макеева¹, О.А. Голованов², Д.Н. Ширшиков², Г.Г. Горлов²

¹ Пензенский государственный университет
440026, Российская Федерация, г. Пенза
ул. Красная, 40

² Филиал военной академии материально-технического обеспечения (г. Пенза)
440005, Российская Федерация, г. Пенза-5
ФВАМТО

Построена математическая модель дифракции волноводных мод на образцах магнитных 3D-нанокompозитов, содержащих массивы углеродных нанотрубок с магнитными наночастицами, с учетом обмена и граничных условий. На основе многоуровневой рекомпозиции автономных блоков с каналами Флоке разработан вычислительный алгоритм расчета S-параметров матрицы рассеяния для 3D-магнитной наноструктуры в волноводе.

Методом автономных блоков с каналами Флоке получены результаты электродинамического расчета коэффициента прохождения волны H_{10} через пластины наноматериалов на основе периодических 3D-решеток ориентированных углеродных нанотрубок с магнитными $Co_{80}Ni_{20}$ наночастицами в прямоугольном волноводе в зависимости от направления и величины внешнего постоянного магнитного поля, ориентации углеродных нанотрубок, взаимной ориентации постоянного и высокочастотного магнитных полей при различном числе инкапсулированных в углеродных нанотрубках с магнитными наночастицами в условиях ферромагнитного резонанса на частоте 26 ГГц.

Ключевые слова: дифракция, коэффициент прохождения, углеродные нанотрубки, магнитные наночастицы, пластины наноматериалов, автономные блоки, ферромагнитный резонанс.

Введение

Как показали исследования композитов [1–7], введение магнитных наночастиц (МНЧ) в углеродные нанотрубки (УНТ) приводит к улучшению поглощающих свойств наноматериалов за счет увеличения комплексных эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей. Магнитные наночастицы, инкапсулированные в УНТ (рис. 1), проявляют себя как материалы с магнитными потерями. При этом характер зависимости характеристик поглощения от частоты определяется как фазовым составом, так и формой МНЧ [9; 10]. Магнитные фазы, инкапсулированные в УНТ, обладают высокой анизотропией; кроме того, заполненные магнитными металлами УНТ могут проявлять чрезвычайно высокую коэрцитивную силу [3].

В [2] экспериментально исследовано взаимодействие электромагнитного излучения с массивом ориентированных многослойных УНТ, заполненных МНЧ (в виде фаз Fe_3C , α - γ Fe), в диапазоне частот от 53,5 до 78,3 ГГц и обнаружено

резонансное поглощение микроволн при ортогональной ориентации осей УНТ относительно вектора электрического поля волны в волноводе. Учитывая высокую анизотропию формы исследуемых УНТ, заполненных Fe_3C , можно только предположить, что наблюдаемые пики поглощения электромагнитного излучения в этих материалах [2] связаны с ферромагнитным резонансом (ФМР) во внутреннем эффективном поле магнитной анизотропии.

В таких случаях математическое моделирование позволяет правильно интерпретировать получаемые в эксперименте данные, которые являются неоднозначными из-за сложности эксперимента и усреднения величин в процессе измерения.

1. Математическая модель

Математическая модель дифракции электромагнитных волн и их взаимодействия с 3D-решетками УНТ, содержащих системы МНЧ, базируется на решении краевой 3D-задачи

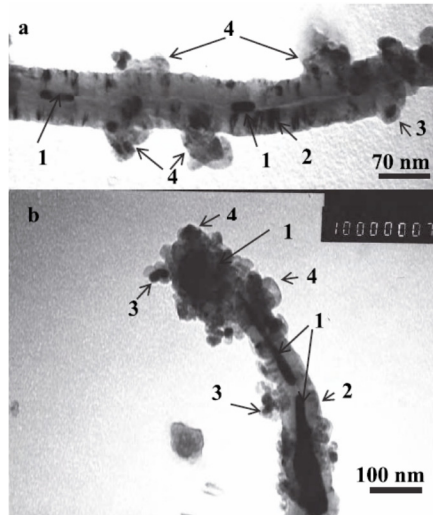


Рис. 1. ТЕМ-изображения УНТ, инкапсулированных МНЧ: а) отдельные УНТ; б) сочетание УНТ и капсулы; МНЧ: 1 – внутри канала; 2 – в стенках УНТ; 3 – на поверхности стенок сфер, инкапсулированных в УНТ; 4 – в неупорядоченном виде [6]

дифракции для системы уравнений Максвелла совместно с уравнением Ландау – Лифшица [11], которая для гармонических колебаний имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{H} = i\omega \epsilon_{\text{МНЧ}} \vec{E}; & (1) \\ \text{rot } \vec{E} = -i\omega \vec{M} - i\omega \mu_0 \vec{H}; & (2) \\ (\omega_r + i\omega) \vec{M} - \omega_r \chi_0 (\vec{H} + \vec{H}_q) + \\ + \gamma (\vec{M}_0 \times (\vec{H} + \vec{H}_q) + \vec{M} \times \vec{H}_0) = 0; & (3) \\ \mu_0 \vec{H}_q = q \text{grad div } \vec{M} - q \text{rot rot } \vec{M}, & (4) \end{cases}$$

где $\epsilon_{\text{МНЧ}} = \epsilon - i\sigma / \omega$. Здесь ω – частота; \vec{E} , \vec{H} – векторы напряженности электрического и магнитного полей; \vec{M} – вектор намагниченности среды; \vec{H}_0 – постоянное магнитное поле, \vec{M}_0 – постоянная намагниченность; \vec{H}_q – эффективное поле обменного взаимодействия; $\vec{H}_{\text{эфф}} = \vec{H} + \vec{H}_q$ – суммарное эффективное магнитное поле, действующее на магнитный момент МНЧ; ∇ – оператор Лапласа; ϵ – диэлектрическая проницаемость; σ – электропроводность среды; μ_0 – электрическая и магнитная постоянные; γ – гиромангнитное отношение; $\omega_r = \alpha \gamma H_0$ – частота релаксации; α – магнитные потери; $\chi_0 = M_0 / H_0$ – статическая восприимчивость; q – константа обменного взаимодействия.

Математическую модель для расчета матрицы рассеяния \mathbf{R} неоднородности – образца магнитного нанокompозита в волноводе (рис. 1) строим на основе декомпозиционного подхода [12]. Область магнитного нанокompозита расчленяем условными границами на автономные блоки в виде

прямоугольных параллелепипедов, содержащих УНТ с МНЧ, и каналами Флоке на гранях (ФАБ) [11].

Вычислительный алгоритм определения дескриптора (матрицы проводимости \mathbf{Y}) ФАБ, содержащих УНТ с МНЧ, разработан в [11] на основе решения краевой 3D-задачи дифракции проекционным методом Галеркина [14].

В декомпозиционной схеме моделирования пластины нанокompозита в волноводе (рис. 3) все ФАБ являются однотипными, что позволяет использовать вычислительный алгоритм многоуровневой рекомпозиции ФАБ, который существенно сокращает время расчетов на компьютере.

Матрицу проводимости результирующего ФАБ, записанную в базисе собственных волн каналов Флоке, преобразуем в матрицу проводимости \mathbf{Y} в базисе собственных волн прямоугольного волновода [14]. Затем, определив матрицу проводимости \mathbf{Y} , находим матрицу рассеяния $\mathbf{R} = (\mathbf{I} + \mathbf{Y})^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{Y})$ [12]. Из матрицы 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 $k_{np} = c_2^- / c_1^+$.

2. Результаты электродинамического моделирования дифракции волны H_{10} на пластине наноструктурного материала в волноводе

При помощи разработанного вычислительного алгоритма на основе многоуровневой рекомпозиции ФАБ проведено математическое моделирование дифракции волны H_{10} на пластинах нанокompозитов из массивов УНТ с МНЧ – в волноводе в зависимости от направления и величины внешнего постоянного магнитного поля H_0 , ориентации УНТ, взаимной ориентации постоянного H_0 и высокочастотного H_m магнитных полей при различном числе МНЧ, инкапсулированных в УНТ, в условиях ФМР в миллиметровом диапазоне.

2.1. Зависимости коэффициента прохождения от напряженности постоянного магнитного поля H_0 при ориентации H_0 вдоль оси УНТ с магнитными наночастицами

Результаты электродинамического расчета зависимостей относительного коэффициента

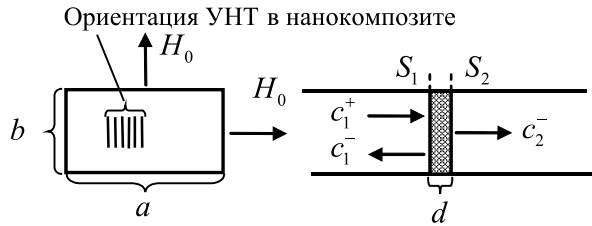


Рис. 2. Дифракции волны H_{10} на образце магнитного нанокompозита на основе 3D-решетки ориентированных УНТ с МНЧ в прямоугольном волноводе: c_1^+ , c_1^- , c_2^- – амплитуды падающей, отраженной и прошедшей волн типа H_{10} ; H_0 – поле подмагничивания; S_1 , S_2 – входные сечения; $a = 3,6$ мм; $b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

прохождения d_m волны H_{10} через пластину нанокompозита на основе 3D-решеток УНТ с МНЧ в волноводе (рис. 2) от напряженности внешнего постоянного магнитного поля H_0 на частоте $f = 26$ ГГц при различном числе n МНЧ в УНТ представлены на рис. 5. Поле подмагничивания H_0 приложено вдоль оси УНТ (рис. 2), заполненных МНЧ, при этом вектор H_0 перпендикулярен вектору высокочастотного магнитного поля H_m волны типа H_{10} ($\vec{H}_0 \perp \vec{H}_m$).

Магнитный нанокompозит состоит из периодической 3D-решетки ориентированных УНТ с МНЧ (радиус УНТ $2r = 25$ нм, длина УНТ $l = 500$ нм; толщина стенки $\Delta = 3$ нм; $\sigma = 2.5$ Ом $^{-1} \cdot$ м $^{-1}$, $\epsilon = 62$); материал МНЧ $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$ ($4\pi M_s = 15356$ Гс, $\alpha = 0,005$, $\sigma = 1,0 \cdot 10^7$ Ом $^{-1} \cdot$ м $^{-1}$, $A = 1,5 \cdot 10^{-9}$ Э); радиус наночастиц $2R = 19$ нм; период решетки $a = b = 76$ нм, $c = 550$ нм.

Из графиков (рис. 3) следует, что положение и значения минимумов коэффициента прохождения (максимумов резонансного поглощения) определяются эффективностью резонансного взаимодействия волны H_{10} с магнитным нанокompозитом в волноводе на собственных частотах ФМР 3D-решетки УНТ, зависят от числа n МНЧ, инкапсулированных в УНТ, диаметра МНЧ, их пространственного распределения внутри УНТ, а также периода решетки.

Минимальный коэффициент прохождения волны H_{10} через магнитный нанокompозит (при ориентации H_0 вдоль оси УНТ с МНЧ) на частоте $f = 26$ ГГц наблюдается при наименьших значениях резонансного магнитного поля $H_{0\text{рез}}$ при числе n МНЧ в УНТ, равном $n = 20$ (рис. 3). При этом собственная частота ФМР однородного типа прецессии намагниченности 3D-решетки УНТ, полностью заполненных ($n = 20$) МНЧ, изменяется в пределах до частоты ФМР 3D-решетки намагниченных вдоль оси магнитных нанопроволок с тем же периодом.

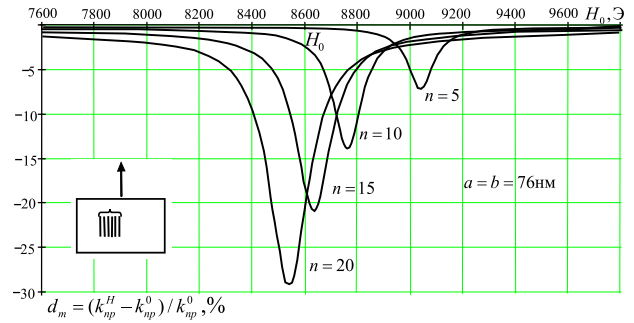


Рис. 3. Зависимости относительного коэффициента прохождения волны H_{10} через образец магнитного нанокompозита на основе УНТ в волноводе от постоянного магнитного поля H_0 при различном числе n МНЧ в УНТ: $f = 26$ ГГц; МНЧ $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$; УНТ ($\sigma = 2.5$ Ом $^{-1} \cdot$ м $^{-1}$, $\epsilon = 62$, $2r = 25$ нм, $l = 500$ нм, $\Delta = 3$ нм), $a = b = 76$ нм, $c = 525$ нм; $f = 26$ ГГц, ориентация H_0 вдоль оси УНТ

При уменьшении числа n МНЧ в УНТ при наличии сильной связи между МНЧ в решетке, обусловленной обменными силами, 3D-решетка УНТ, частично заполненных ($n = 5$) МНЧ, приближается по своим свойствам к квазиплоской ферромагнитной среде, при этом собственная частота ФМР однородного типа прецессии намагниченности решетки приближается к частоте ФМР в гиромагнитной среде [15] $\omega_0 / \gamma = H_0$ ($H_{0\text{рез}} = 9248$ Э) (рис. 3 $n = 5$).

2.2. Результаты моделирования при введении эффективной магнитной проницаемости (ориентация H_0 вдоль оси УНТ с магнитными наночастицами)

Для сравнения на рис. 4 приведены результаты электродинамического расчета по методике [16] действительной и мнимой частей комплексной поперечной эффективной магнитной проницаемости μ_{\perp} нанокompозита на основе 3D-решетки УНТ с различным числом n МНЧ в УНТ ($n = 20, 5$) при поперечном подмагничивании (см. вставку к рис. 4) в зависимости от напряженности внешнего постоянного магнитного поля H_0 (ориентация H_0 вдоль оси УНТ) в условиях ФМР на частоте $f = 26$ ГГц.

Результаты электродинамического расчета по методике [16] действительной и мнимой частей комплексной диагональной компоненты μ тензора эффективной магнитной проницаемости нанокompозита на основе 3D-решетки УНТ с различным числом n МНЧ в УНТ ($n = 20, 5$) при продольном подмагничивании (см. вставку к рис. 5) в зависимости от напряженности внешнего постоянного магнитного поля H_0 в условиях ФМР на частоте $f = 26$ ГГц приведены на рис. 5.

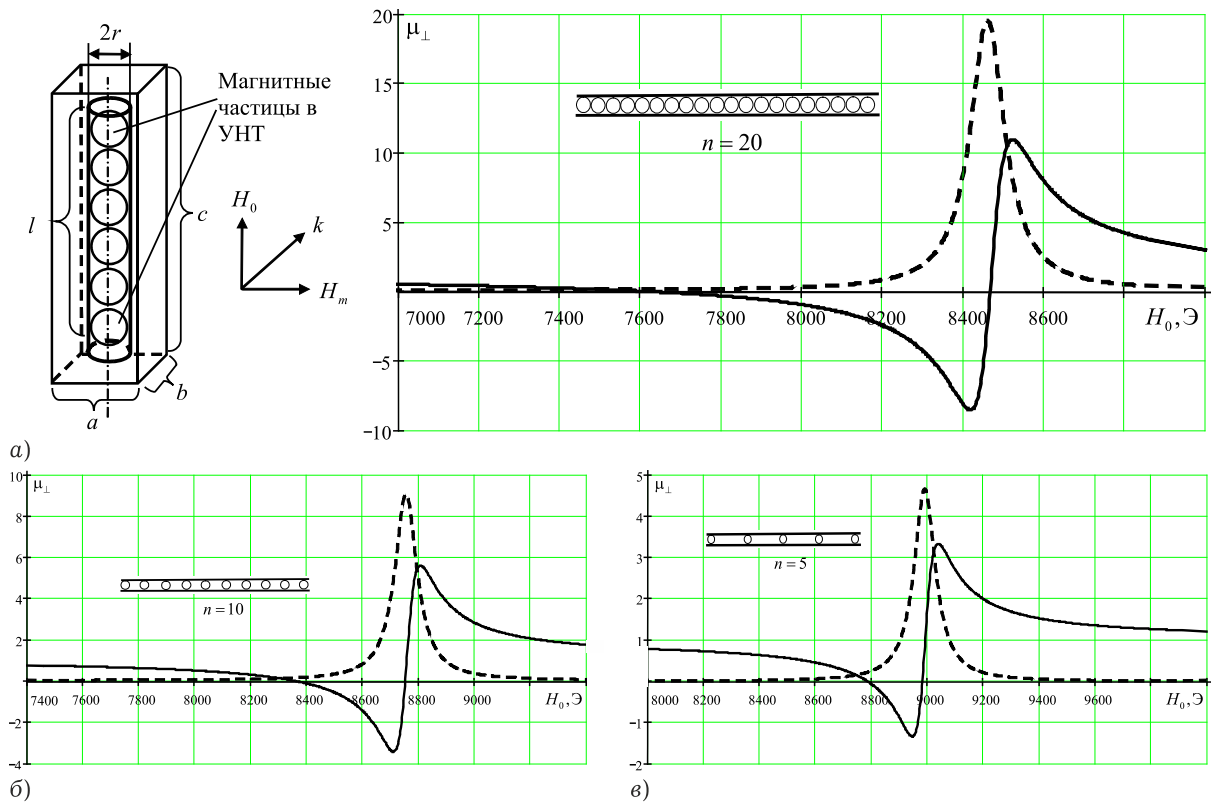


Рис. 4. Зависимости действительной и мнимой частей комплексной поперечной эффективной магнитной проницаемости μ_{\perp} 3D-нанокompозита (на основе 3D-решетки УНТ с различным числом n МНЧ с поперечным подмагничиванием) от постоянного магнитного поля H_0 ; материал наночастиц $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$; $a = b = 76$ нм, $c = 525$ нм; $f = 26$ ГГц; ориентация H_0 вдоль оси УНТ; а) $n = 20$; б) $n = 10$; в) $n = 5$; — — $\text{Re} \mu_{\perp}$, - - - $\text{Im} \mu_{\perp}$

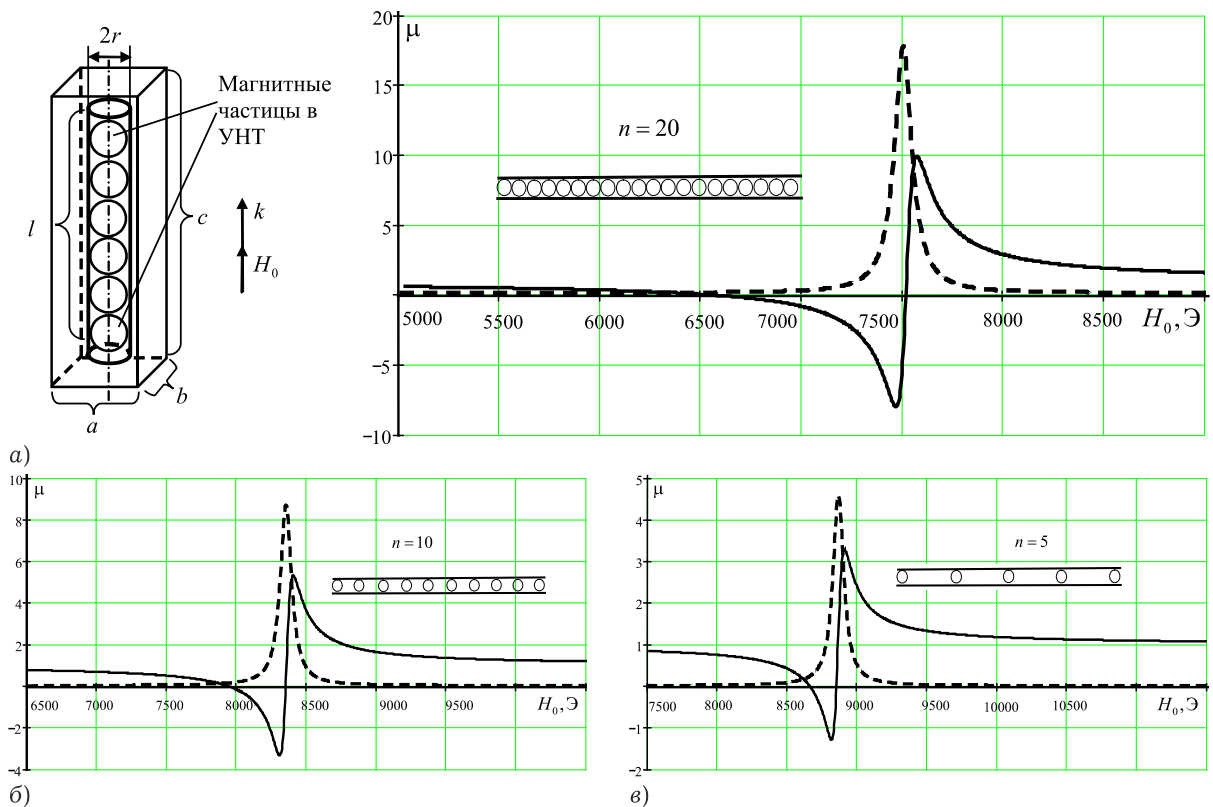


Рис. 5. Зависимости действительной и мнимой частей комплексной диагональной μ и недиагональной компоненты тензора эффективной магнитной проницаемости $\bar{\mu}$ нанокompозита (на основе 3D-решетки УНТ с различным числом n МНЧ с продольным подмагничиванием) от постоянного магнитного поля H_0 ; материал нанопроволок $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$; $a = b = 76$ нм, $c = 525$ нм; $f = 26$ ГГц; ориентация H_0 вдоль оси УНТ: а) $n = 20$; б) $n = 10$; в) $n = 5$; — — $\text{Re} \mu$, - - - $\text{Im} \mu$

Из графиков (рис. 5, 6) следует, что при увеличении числа n МНЧ в УНТ и сокращении расстояния между ними до длины обменного взаимодействия эффективная магнитная проницаемость нанокompозита возрастает. При переходе к масштабу порядка длины обменного взаимодействия имеет место дополнительный механизм потерь, связанный с возбуждением спинов в магнитных наночастицах, и в результате мнимая часть комплексной эффективной магнитной проницаемости (эффективный параметр диссипации) резко возрастает (рис. 4, 5). Таким образом, существенные изменения эффективной магнитной проницаемости вызываются изменением числа n МНЧ, инкапсулированных в УНТ, их расположения, концентрации, что обуславливает изменение пространственного распределения магнитного момента и, как следствие, неоднородного внутреннего магнитного поля (эффективного поля $\vec{H}_{эф}(t)$).

Из сравнения результатов математического моделирования (рис. 3–5) на частоте $f = 26$ ГГц следует, что резонансные значения внешнего постоянного магнитного поля $H_{0\text{рез}}$ при взаимодействии волны H_{10} с магнитным нанокompозитом в волноводе отличаются от $H_{0\text{рез}}$ при взаимодействии как поперечных (рис. 4), так и продольных волн (рис. 5) с 3D-решеткой УНТ с МНЧ (при одинаковом числе n МНЧ в УНТ и периоде решеток) 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, а также периода решетки.

2.3. Зависимости коэффициента прохождения от напряженности постоянного магнитного поля H_0 при ориентации H_0 ортогонально оси УНТ с магнитными наночастицами

Результаты электродинамического расчета зависимостей относительного коэффициента прохождения d_m волны H_{10} через пластину нанокompозита на основе 3D-решетки УНТ с МНЧ в волноводе от внешнего постоянного магнитного поля H_0 (вектор H_0 ортогонален оси УНТ (рис. 2)) на частоте $f = 26$ ГГц при различном числе n МНЧ в УНТ представлены на рис. 6. Поле подмагничивания H_0 приложено ортогонально оси УНТ, заполненных МНЧ (рис. 2), при этом вектор H_0 параллелен $\vec{H}_0 \parallel \vec{H}_m$ плоскости составляющих вектора высокочастотного магнитного поля H_m волны H_{10} .

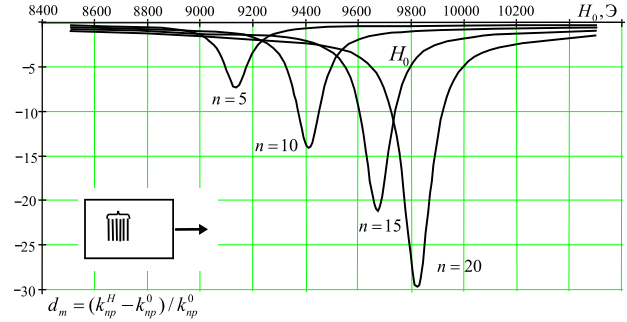


Рис. 6. Зависимости относительного коэффициента прохождения волны H_{10} через пластину магнитного нанокompозита на основе 3D-решетки ориентированных УНТ с МНЧ в волноводе от постоянного магнитного поля H_0 при различном числе n МНЧ в УНТ: $f = 26$ ГГц; МНЧ $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$; УНТ ($\sigma = 0,0125 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\varepsilon = 12,5$, $2r = 25 \text{ нм}$, $l = 500 \text{ нм}$, $\Delta = 3 \text{ нм}$), $a = b = 150 \text{ нм}$, $c = 550 \text{ нм}$; $f = 26$ ГГц; ориентация H_0 ортогонально оси УНТ

Параметры УНТ $\sigma = 2,5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\varepsilon = 62$, период решетки $a = b = 150 \text{ нм}$, остальные параметры магнитного 3D-нанокompозита те же, что и на рис. 3.

Сравнивая полученные результаты математического моделирования резонансного взаимодействия волны H_{10} с магнитным нанокompозитом при ориентации поля подмагничивания H_0 ортогонально (рис. 6) и вдоль (рис. 3) оси УНТ с МНЧ, видим, что характер изменения положения и значений минимумов коэффициента прохождения в зависимости от числа n МНЧ в УНТ в этих двух случаях различен.

При ориентации вектора H_0 ортогонально оси УНТ с МНЧ минимальный коэффициент прохождения волны H_{10} через магнитный нанокompозит на частоте $f = 26$ ГГц наблюдается при наибольших значениях резонансного внешнего постоянного магнитного поля $H_{0\text{рез}}$ при $n = 5$ (рис. 6). При уменьшении числа МНЧ в УНТ магнитная нанорешетка приближается по своим свойствам к квазиплоской ферромагнитной среде, при этом собственная частота ФМР однородного типа прецессии намагниченности решетки в пределе стремится к частоте ФМР в гиромангнитной среде [15] $\omega_0 / \gamma = H_0$ (в пределе $H_{0\text{рез}} = 9248 \text{ Э}$ рис. 6, z , $n = 5$).

При увеличении числа n МНЧ в УНТ при ориентации вектора H_0 ортогонально оси УНТ (рис. 6) собственная частота ФМР однородного типа прецессии намагниченности 3D-решетки УНТ, полностью заполненной ($n = 20$) МНЧ, так же как и 3D-решетки магнитных нанопроволок, стремится в пределе к собственной частоте ФМР поперечно намагниченного цилиндра [15]:

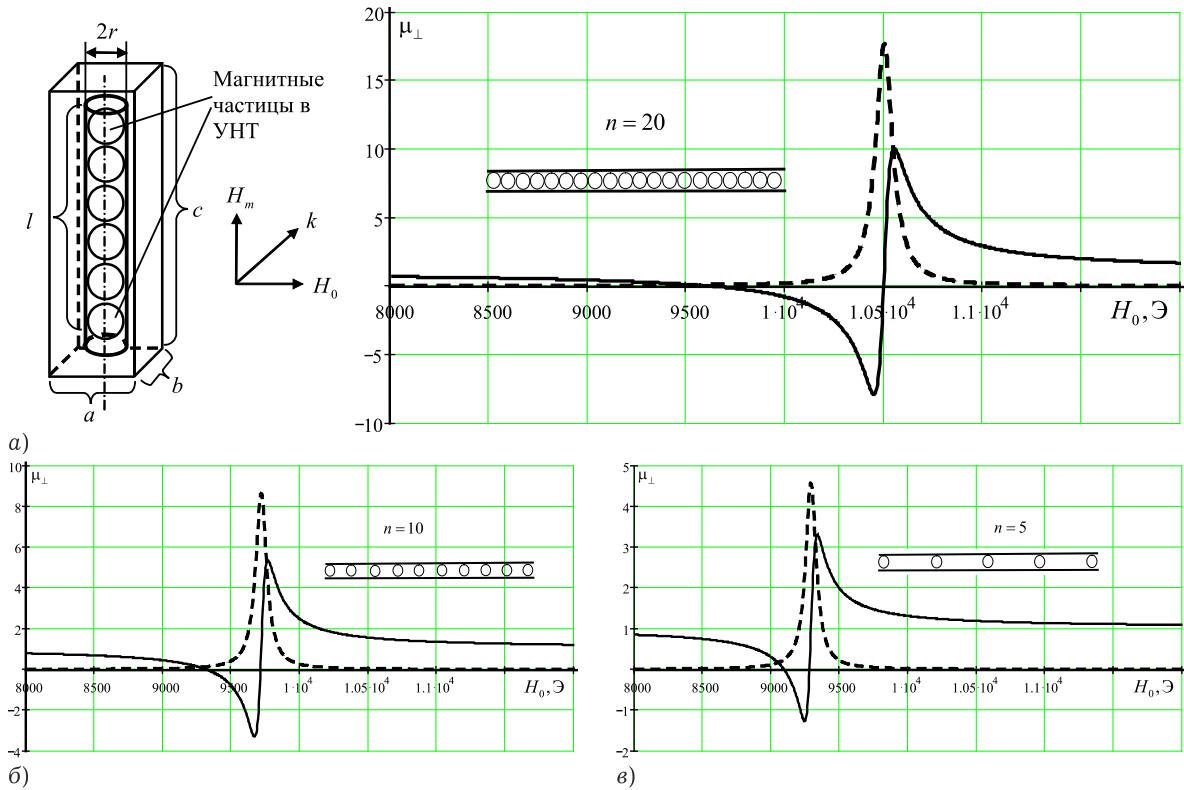


Рис. 7. Зависимости действительной и мнимой частей комплексной поперечной эффективной магнитной проницаемости μ_{\perp} нанокompозита (на основе 3D-решетки УНТ с различным числом n МНЧ с поперечным подмагничиванием) от постоянного магнитного поля H_0 ; материал наночастиц $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$; УНТ ($\sigma = 0,0125 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\epsilon = 12,5$, $2r = 25 \text{ нм}$, $l = 500 \text{ нм}$, $\Delta = 3 \text{ нм}$), $a = b = 150 \text{ нм}$, $c = 525 \text{ нм}$; $f = 26 \text{ ГГц}$; ориентация H_0 ортогонально оси УНТ; волновой вектор k перпендикулярен оси УНТ; а) $n = 20$; б) $n = 10$; в) $n = 5$; — — — $\text{Re} \mu_{\perp}$, - - - - $\text{Im} \mu_{\perp}$

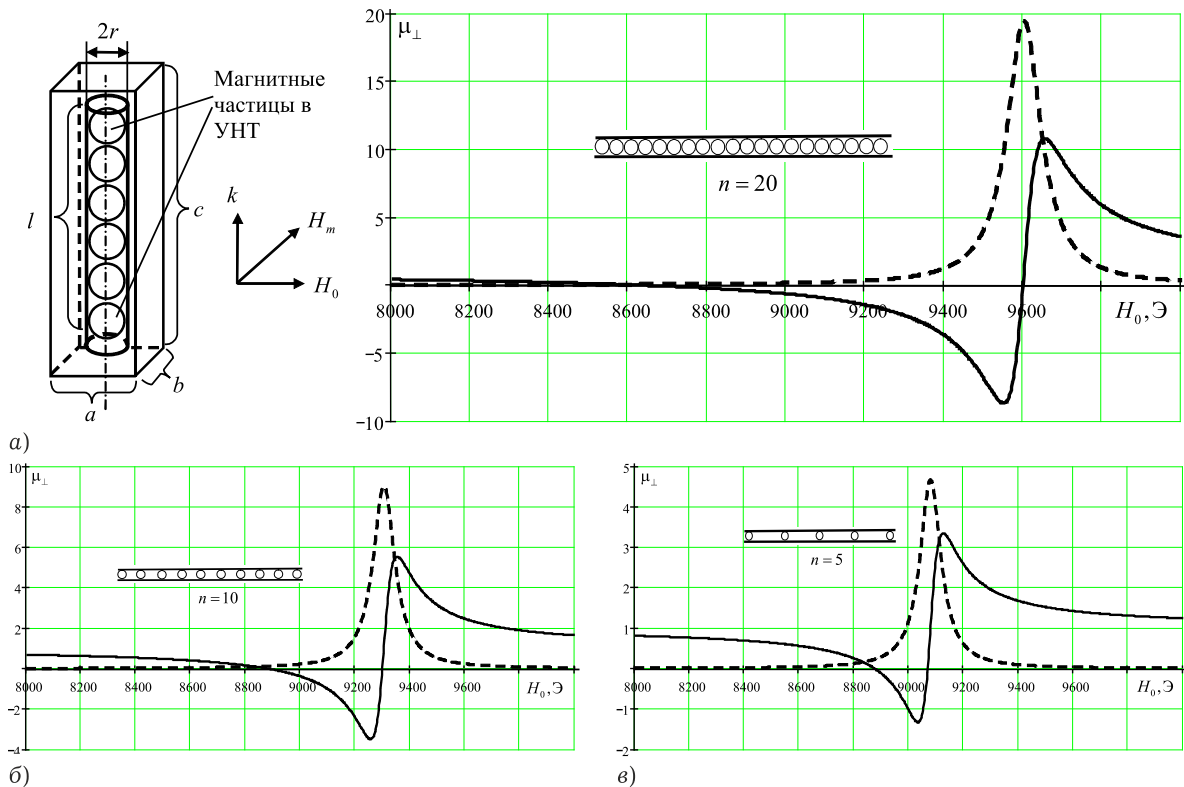


Рис. 8. Зависимости действительной и мнимой частей комплексной поперечной эффективной магнитной проницаемости μ_{\perp} 3D-нанокompозита (на основе 3D-решетки УНТ с различным числом n МНЧ с поперечным подмагничиванием) от постоянного магнитного поля H_0 ; материал наночастиц $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$; УНТ ($\sigma = 0,0125 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\epsilon = 12,5$, $2r = 25 \text{ нм}$, $l = 500 \text{ нм}$, $\Delta = 3 \text{ нм}$), $a = b = 150 \text{ нм}$, $c = 525 \text{ нм}$; $f = 26 \text{ ГГц}$; ориентация H_0 ортогонально оси УНТ; волновой вектор k параллелен оси УНТ; а) $n = 20$; б) $n = 10$; в) $n = 5$; — — — $\text{Re} \mu_{\perp}$, - - - - $\text{Im} \mu_{\perp}$

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

в случае магнитной нанорешетки с малой плотностью упаковки.

2.4. Результаты моделирования при введении поперечной эффективной магнитной проницаемости (ориентация H_0 ортогонально оси УНТ с магнитными наночастицами)

На рис. 7, 8 приведены результаты электродинамического расчета по методике [16] действительной и мнимой частей комплексной поперечной эффективной магнитной проницаемости μ_{\perp} нанокompозита на основе 3D-решеток УНТ с различным числом n МНЧ в УНТ ($n = 20, 5$) при поперечном подмагничивании и различной ориентации постоянного H_0 и высокочастотного H_m магнитных полей (см. вставки к рис. 7, 8) в зависимости от напряженности внешнего постоянного магнитного поля H_0 (вектор H_0 ортогонален оси УНТ) в условиях ФМР на частоте $f = 26$ ГГц.

Для сравнения на рис. 9 представлены результаты электродинамического расчета комплексной поперечной эффективной магнитной проницаемости μ_{\perp} нанокompозитов на основе решеток УНТ с МНЧ ($n = 20$) и магнитных нанопроволоков, намагниченных ортогонально оси, от напряженности внешнего постоянного магнитного поля H_0 .

Таким образом, показано, что положение минимума коэффициента прохождения (максимума коэффициента отражения) изменяется вследствие изменения собственной частоты ФМР однородного типа прецессии намагниченности периодической 3D-решетки ориентированных УНТ с МНЧ, которая зависит от геометрии и периода, плотности упаковки магнитной нанорешетки и управляется действием внешнего магнитного поля (при изменении направления и величины вектора поля подмагничивания, взаимной ориентации постоянного и высокочастотного магнитных полей и их ориентации к оси УНТ), а также при изменении числа n МНЧ в УНТ.

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 ди-

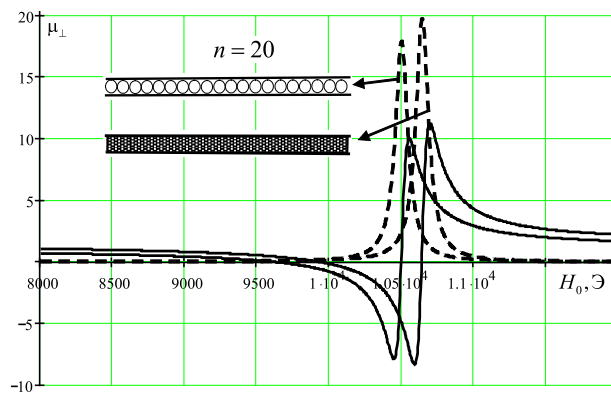


Рис. 9. Зависимости действительной и мнимой частей комплексной поперечной эффективной магнитной проницаемости μ_{\perp} нанокompозитов на основе решеток УНТ с МНЧ ($n = 20$) и магнитных нанопроволоков с поперечным подмагничиванием от постоянного магнитного поля H_0 : материал МНЧ и нанопроволок $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$; УНТ ($\sigma = 0,0125 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\epsilon = 12,5$, $2r = 25 \text{ нм}$, $l = 500 \text{ нм}$, $\Delta = 3 \text{ нм}$), $a = b = 150 \text{ нм}$, $c = 525 \text{ нм}$; $f = 26 \text{ ГГц}$; ориентация вектора H_0 ортогонально оси УНТ; — — $\text{Re} \mu_{\perp}$, - - - $\text{Im} \mu_{\perp}$

электрической проницаемостей нанокompозитов на основе периодических 3D-решеток ориентированных УНТ с МНЧ.

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

Список литературы

1. Microwave absorption in nanocomposite material of magnetically functionalized carbon nanotubes / V.A. Labunov [et al.] // J. Appl. Phys. 2012. № 112. P. 024302.
2. Резонансный характер взаимодействия многослойных углеродных нанотрубок с излучением миллиметрового диапазона волн / Л.Л. Вовченко [и др.] // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. 2011. Т. 9. № 4. С. 759.
3. Shi C.X., Cong H.T. Tuning the coercivity of Fe-filled carbon-nanotube arrays by changing the shape anisotropy of the encapsulated Fe nanoparticles // J. Appl. Phys. 2008. № 104. P. 034307.
4. Qin F., Brosseau C. A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles // J. Appl. Phys. 2012. № 111. P. 061301.
5. Multiband microwave absorption films based on defective multiwalled carbon nanotubes added carbonyliron/acrylicresin / Y. Lia [et al.] // Physica B. 2009. № 404. P. 1343.
6. Zhao D.-L., Li X., Shen Z.-M. Microwave absorbing property and complex permittivity and permeability of epoxy composites containing Ni-coated and Ag filled carbon nanotubes // Composites Science and Technology. 2008. № 68. P. 2902–2908.
7. Novel composite of Co/carbon nanotubes: synthesis, magnetism and microwave absorption properties / Z. Zheng [et al.] // Solid State Sciences. 2008. № 10. P. 316–320.

8. Microwave response of FeCo/carbon nanotubes composites / Z. Han [et al.] // J. Appl. Phys. 2011. № 109. P. 07A301.
9. Preparation and electromagnetic interference shielding characteristics of novel carbon-nanotube/siloxane/poly-(urea urethane) nanocomposites / C.-C.M. Ma [et al.] // Polym. Sci. Part B: Polym. Phys. 2005. V. 43. № 4. P. 345–358.
10. Microwave absorption enhancement and complex permittivity and permeability of Fe encapsulated within carbon nanotubes / R.C. Che [et al.] // Adv. Mater. 2004. V. 16. № 5. P. 401–405.
11. Голованов О.А., Макеева Г.С. Метод автономных блоков с магнитными нановключениями и каналами Флоке для математического моделирования магнитных наноструктур с учетом обмена и граничных условий // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 12. С. 1421–1428.
12. Никольский В.В., Никольская Т.И. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. М.: Наука, 1983. 304 с.
13. Никольский В.В. Проекционные методы в электродинамике // Сборник научно-методических статей по прикладной электродинамике. М.: Высшая школа, 1977. С. 4.
14. Никольский В.В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. М.: Наука, 1967. 460 с.
15. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. 464 с.
16. Макеева Г.С., Голованов О.А. Математическое моделирование распространения электромагнитных волн в наноструктурированных гиромангнитных средах методом автономных блоков с магнитными нановключениями и каналами Флоке // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 12. С. 1455–1459.

Electrodynamic analysis of transmission coefficient of H_{10} mode through slabs of nanocomposites, containing arrays of carbon nanotubes with magnetic nanoparticles, in waveguide at condition of ferromagnetic resonance

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

The mathematical model of diffraction of wave modes on the samples of nanocomposites, based on arrays of carbon nanotubes with magnetic nanoparticles, was developed taking into account the exchange interaction and boundary conditions. The computational algorithm for calculation of scattering parameters of S-matrix for 3D magnetic nanostructures in waveguides was created by using the multilevel re-composition of autonomous blocks with Floquet channels.

Using the numerical autonomous blocks with Floquet channels method the results of electrodynamic calculation of the transmission coefficients of H_{10} mode through slabs of nanomaterials based on the periodic 3D-arrays of oriented carbon nanotubes with magnetic $Co_{80}Ni_{20}$ nanoparticles, in the rectangular waveguide, depending on the direction and the value of DC bias magnetic field at different orientation with respect to CNT axis and rf magnetic field for several values of the filling factor of encapsulated magnetic nanoparticles were obtained at condition of ferromagnetic resonance at frequency of $f = 26$ GHz.

Keywords: diffraction, transmission coefficient, carbon nanotubes, magnetic nanoparticles, slabs of nanomaterials, autonomous blocks, ferromagnetic resonance.
