

ISSN 1028-821X. Radiofiz. Electron. 2019. Vol. 24, No. 4: 3–10

DOI: <https://10.15407/rej2019.04.003>

УДК: 537.8, 537.86, 537.6

PACS: 03.50.De, 75.75.Jn, 75.30.Cr, 75.78.-n

### С.В. Недух

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина  
4, пл. Свободы, Харьков, 61022, Украина  
E-mail: sv\_grey@ire.kharkov.ua

## Использование пакета микромагнитного моделирования *mtax3* для определения частотной дисперсии высокочастотной магнитной восприимчивости магнитных наноструктур – элементов метаматериалов СВЧ-диапазона

**Предмет и цель работы.** В данной работе предложена методика определения элементов тензора высокочастотной восприимчивости магнитной наноструктуры в условиях одновременного воздействия внешнего постоянного и высокочастотного магнитных полей.

**Методы и методология.** В ходе исследований применялось численное решение уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта с использованием пакета микромагнитного моделирования *mtax3*. Преимуществом данного пакета является использование ресурсов дискретной видеокарты компьютера для ускорения решения уравнения.

**Результаты работы.** На примере одиночных наноразмерных дисков из пермаллоя диаметром 500 и 3000 нм с помощью данного пакета микромагнитного моделирования получен вид частотной дисперсии компонентов тензора магнитной восприимчивости в условиях резонансного возбуждения прецессии намагниченности.

**Заключение.** Продемонстрированный подход позволяет использовать результаты микромагнитного моделирования для дальнейших задач моделирования электромагнитных свойств перспективных планарных сверхвысокочастотных метаматериалов, основанных на наноразмерных элементах из магнетика. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 13 назв.

**Ключевые слова:** высокочастотная магнитная восприимчивость, магнитные наноструктуры, сверхвысокочастотные метаматериалы.

Электромагнитные метаматериалы давно вышли из разряда экзотических объектов исследования и практически вплотную подошли к точке их практического применения в различных задачах гигагерцевого, терагерцевого, инфракрасного диапазонов [1–3]. Одним из общепринятых путей создания метаматериала является использование периодически расположенных включений определенных форм, обуславливающих частотную дисперсию диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериала, – так называемых эффективных материальных параметров [4].

Следует отметить, что в случае, когда в качестве таких включений выступают элементы из магнитного материала (особенно микро- и наноразмеров), их влияние на вид частотной дисперсии эффективной магнитной проницаемости метаматериала остается все еще недостаточно изученным. При этом можно предположить, что включение магнитных элементов позволит реализовать метаматериалы, управляемые путем воздействия внешнего магнитного поля. Кроме того, инъекция спинового или спин-поляризованного тока также сможет эффективно изменять вид частотной дисперсии

метаматериала, созданного на основе магнитных включений [5–9].

Основной трудностью в прогнозировании и теоретическом анализе электромагнитного отклика (коэффициентов отражения, прохождения, преломления электромагнитной волны, распределения структуры электромагнитного поля в метаматериале либо в его окрестностях) метаматериала с магнитными включениями является сложность аналитического описания частотной дисперсии как эффективной магнитной проницаемости всего метаматериала, так и магнитной проницаемости отдельных магнитных включений, его составляющих.

Отдельного рассмотрения требует вопрос исследования магнитного метаматериала – некой структурированной магнитной среды, в которой закон дисперсии спиновой волны (и, следовательно, магнона) определяется не столько параметрами самой магнитной среды, сколько видом ее структуризации. Самым известным примером такого метаматериала на сегодняшний день является магнитный кристалл [10]. Очевидно, что для электромагнитного моделирования взаимодействия электромагнитной волны с метаматериалом на основе структурированной магнитной среды (представленной набором магнитных элементов, размеры и период расположения которых много меньше длины волны) знание вида частотной дисперсии эффективной магнитной проницаемости является необходимым условием [11].

Одним из известных вариантов решения задачи определения вида частотной дисперсии эффективной магнитной проницаемости является использование методов численного решения уравнения Ландау–Лившица, реализованных, в том числе, в виде пакетов микромагнитного моделирования. Среди всего многообразия пакетов микромагнитного моделирования стоит выделить пакет *mutax3* [12], реализующий численное решение уравнения Ландау–Лившица–Гильберта с использованием ресурсов видеокарты компьютера, что многократно увеличивает скорость счета. Бесспорным преимуществом использования пакетов микромагнитного моделирования является возможность определения временной высокочастотной динамики намагниченности магнетика практически любой формы и любого вида структуриза-

ции. Это достаточно трудно, а чаще практически невозможно осуществить, если использовать только аналитический подход к решению этого уравнения.

Таким образом, получив в качестве результата численного решения уравнения Ландау–Лившица временную зависимость высокочастотной динамики намагниченности магнетика – элемента метаматериала, в ходе последующего анализа можно будет определить вид и характер высокочастотной магнитной восприимчивости магнитного элемента.

В данной работе с помощью программного пакета *mutax3* смоделирована временная высокочастотная динамика намагниченности магнитной наноструктуры в условии одновременного подмагничивания внешним постоянным магнитным полем и возбуждения слабым «высокочастотным» магнитным полем. В случае, когда направления внешнего подмагничивающего и «высокочастотного» магнитных полей ортогональны, возможно наблюдение резонансного поглощения энергии «высокочастотного» поля – ферромагнитного резонанса (ФМР).

В качестве образцов выбраны одиночные дисковые элементы из пермаллоя толщиной 20 нм и диаметрами 500 и 3000 нм.

С целью анализа степени влияния на вид спектра ФМР нарушения симметрии элемента также были рассмотрены случаи, когда в геометрию диска был внесен дефект в виде щели (рис. 1).

В таблице приведены параметры дисков, которые были использованы в расчете.

В качестве «высокочастотного» возбуждения в расчетах использовалось возбуждение импульсом  $\sin t / t$ , частотный спектр которого, как известно, представляет собой непрерывный набор частот с частотой отсечки, определяемой шириной импульса во временной области. Такой подход позволяет моделировать возбуждение в непрерывном диапазоне частот, в пределах которого все частотные составляю-

#### Геометрические размеры дисков из пермаллоя

Диаметр диска, $D$ , нм	Размеры щели, $1/2D \times t$ , нм		
	500	$0 \times 0$	$250 \times 10$
3000	$0 \times 0$	$1500 \times 300$	$1500 \times 1500$

щие имеют одинаковую амплитуду, т. е. создавать одинаковые «энергетические» условия для возбуждения колебаний намагниченности разной частоты.

В результате моделирования получены временные зависимости изменения амплитуд проекций вектора намагниченности для исследованных элементов (рис. 2). Применение быстрого преобразования Фурье к этим результатам позволяет выделить частоты, преобладающие в частотном спектре колебаний намагниченности.

На рис. 3 представлены примеры результата преобразования Фурье временных зависимостей  $m_y$ -компоненты намагниченности. Частоты, на которых происходит увеличение амплитуды, соответствуют собственным резонансным частотам системы и являются собственными частотами прецессии намагниченности диска.

Из представленных графиков видно, что во всех исследованных дисках в области частот 0...25 ГГц имеются собственные резонансные частоты. Хорошо известно, что в области магнитного резонанса действительная часть магнитной восприимчивости принимает отрицательное значение. Поэтому исследованные в работе магнитные элементы могут быть использованы для создания СВЧ-метаматериалов, демонстрирующих в диапазоне 0...25 ГГц эффекты отрицательного преломления, гиперболической среды и другие подобные эффекты, требующие наличия отрицательного значения эффективного материального параметра (при этом принимается, что отрицательная величина диэлектрической восприимчивости в этом частотном диапазоне уже достигнута).

Результаты моделирования показывают, что изменение величины внешнего подмагничивающего поля (в диапазоне 400...1600 Э) смещает резонансные частоты – это свидетельствует о возможности использования предложенной геометрии магнитного элемента для создания управляемого метаматериала.

Выявлено, что внесение дефекта в виде щели приводит к модификации спектра, проявляющейся в образовании дополнительных резонансных пиков. Можно предположить, что их появление связано с возникновением областей диска, где нарушается однородное рас-

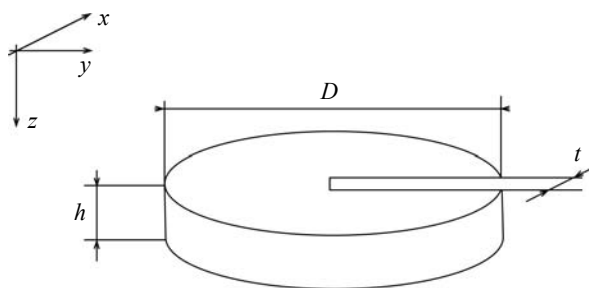


Рис. 1. Дисковый элемент из пермаллоя диаметром  $D$ , толщиной  $h$ , со щелью шириной  $t$

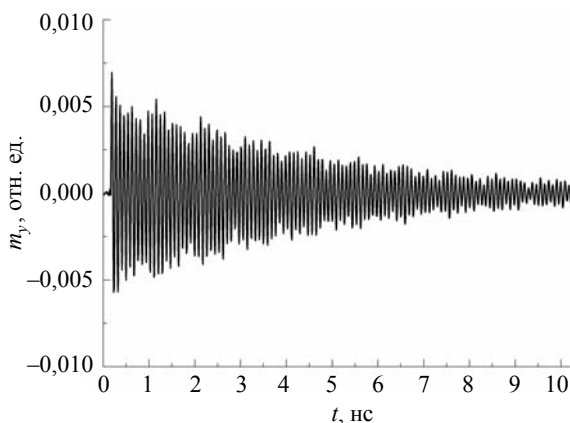
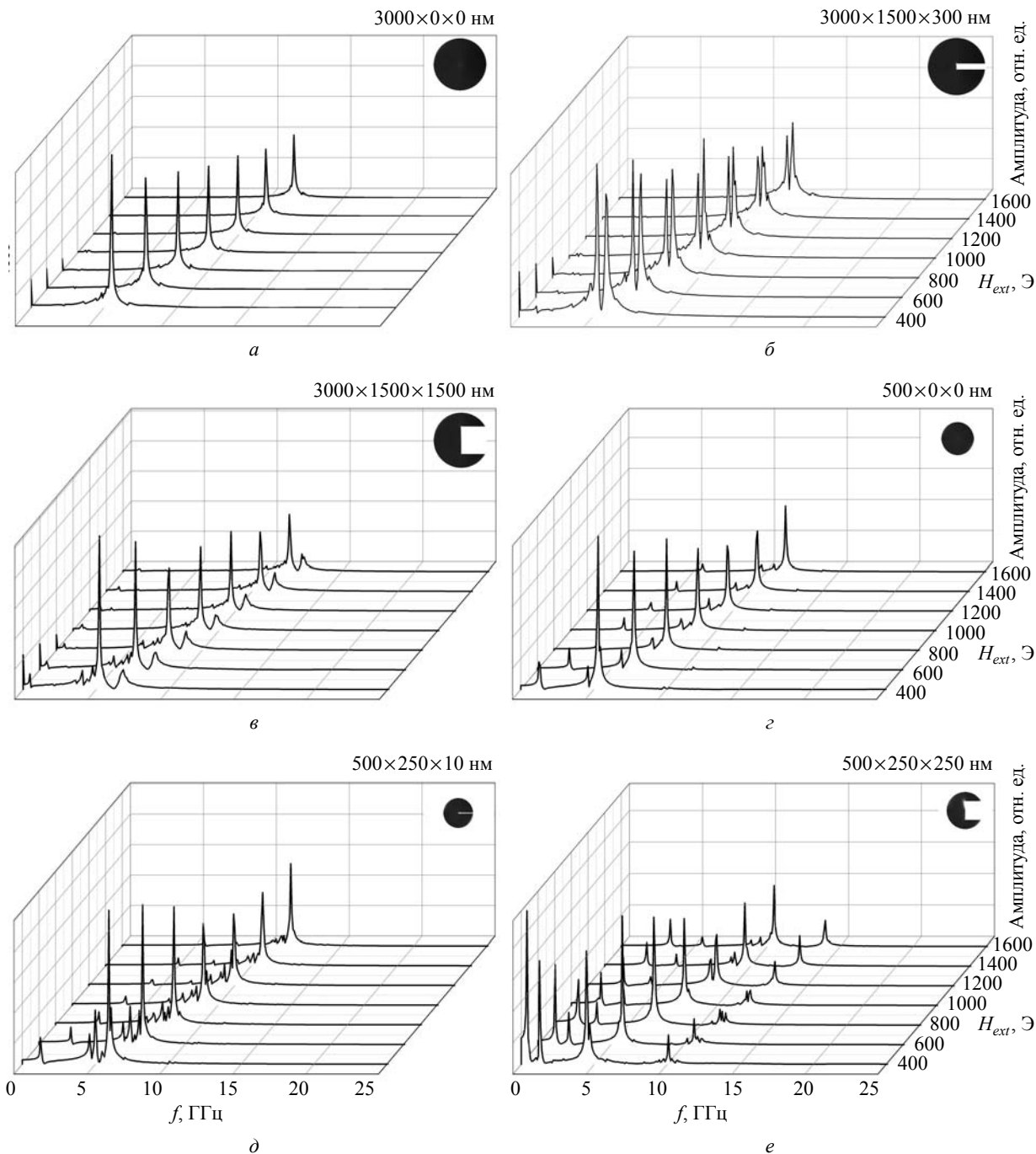


Рис. 2. Пример временной эволюции  $m_y$ -компоненты намагниченности сплошного диска диаметром 500 нм без щели

пределение намагниченности, индуцированное внешним подмагничивающим постоянным магнитным полем. Для полного понимания механизмов образования этих дополнительных пиков требуется проведение дополнительных исследований. Однако уже сейчас видно, что наличие дефекта создает ситуацию, когда при одной величине внешнего подмагничивающего поля в спектре существуют две и более частоты, в окрестности которых действительная часть восприимчивости становится отрицательной. Это дает основания ожидать, что в ходе моделирования электромагнитного отклика от метаматериала, содержащего магнитные элементы со щелью, в нем одновременно будут присутствовать несколько частотных диапазонов, в которых метаматериал будут проявлять эффекты отрицательного преломления, гиперболической среды и т. п.

Для подтверждения того факта, что в окрестности частоты резонансной прецессии намагниченности действительная часть высокочастотной восприимчивости будет принимать отрицательное значение, был проведен матема-



**Рис. 3.** Резонансные частоты прецессии  $m_y$ -компоненты намагниченности в дисках диаметром 500 и 3000 нм с различными размерами щелей для разных величин внешнего постоянного подмагничивающего поля

тический анализ полученных спектров прецессии компонент намагниченности дисков.

Имея информацию о частотной дисперсии амплитуды компонент намагниченности и частотный спектр возбуждающего сигнала в форме импульса  $\sin t/t$ , можно рассчитать частотную дисперсию компонент тензора высокочастотной магнитной восприимчивости магнитной

системы, воспользовавшись выражением [13]:

$$\hat{\chi}_{ij}(\omega) = \frac{m_i(\omega)}{h_j(\omega)},$$

где  $m_i(\omega)$  и  $h_j(\omega)$  – результат преобразования Фурье  $i$ -й и  $j$ -й компоненты намагниченности и внешнего возбуждающего магнитного поля соответственно, а  $i$  и  $j$  принимают значения  $x, y, z$ .

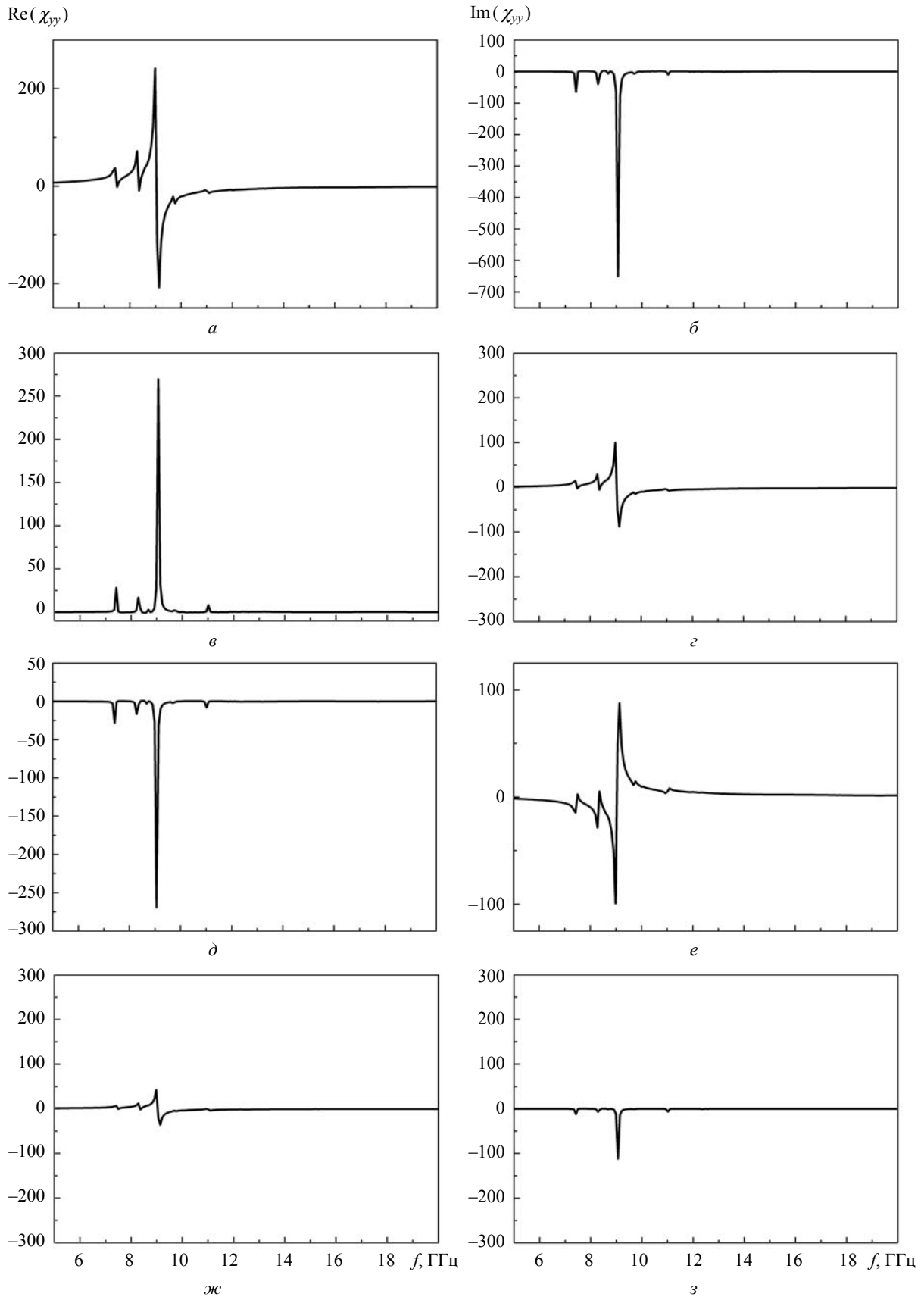


Рис. 4. Частотная дисперсия ненулевых компонент тензора  $\hat{\chi}_{ij}(\omega)$  для магнитной системы в виде диска диаметром 500 нм без щели

На рис. 4 представлены результаты, демонстрирующие частотную дисперсию компонент тензора высокочастотной магнитной восприимчивости наноразмерной магнитной системы в виде диска диаметром 500 нм без щели для случая, когда величина внешнего подмагничивающего магнитного поля равна 1600 Э.

На рис. 4 представлены графики только для ненулевых компонент тензора, т. е. полученный в качестве расчета тензор  $\hat{\chi}_{ij}(\omega)$  будет иметь следующий вид:

$$\hat{\chi}_{ij}(\omega) = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \chi_{yy}(\omega) & \chi_{yz}(\omega) \\ 0 & \chi_{zy}(\omega) & \chi_{zz}(\omega) \end{Bmatrix},$$

где соответствующие компоненты  $\hat{\chi}_{ij}(\omega)$  являются комплексными величинами, действительная и мнимая часть которых зависит от частоты. Такой вид тензора обусловлен взаимной ориентацией подмагничивающего и возбуждающего полей, используемой в расчете. Внешнее постоянное подмагничивающее магнитное и импульсное возбуждающее поля направлены вдоль осей  $X$  и  $Y$  соответственно.

Видно, что для действительной части диагональных элементов тензора существует диапазон частот, в котором действительная часть компонента меньше нуля.

Воспользовавшись хорошо известным выражением

$$\hat{\mu}_{ij}(\omega) = I + 4\pi\hat{\chi}_{ij}(\omega),$$

можно легко получить вид частотной диспер-

сии магнитной проницаемости исследованного магнитного диска. Эту информацию (вид частотной дисперсии магнитной проницаемости) можно использовать для моделирования электромагнитного отклика всего метаматериала, в состав которого входят наноразмерных магнитные структуры.

**Выводы.** В работе предложен новый методологический подход, основанный на применении пакета микромагнитного моделирования *mtax3*. Он позволяет получить частотную дисперсию высокочастотной магнитной восприимчивости/проницаемости (в тензорном виде) наноразмерных магнитных структур – элементов перспективных перестраиваемых планарных СВЧ-метаматериалов.

На примере наноразмерных магнитных структур в виде дисков из пермаллоя, для случая резонансного возбуждения прецессии намагниченности, показана применимость предложенного подхода.

Полученный вид тензора высокочастотной магнитной восприимчивости для случая целого диска хорошо коррелирует с теоретическими результатами, а характер дисперсии ненулевых компонент тензора хорошо согласуется с результатами других исследований [13].

Дальнейший шаг в развитии предложенного подхода автор видит в использовании полученных результатов для моделирования электромагнитного отклика планарного метаматериала (на основе наноразмерных магнитных структур) в пакетах электромагнитного моделирования (*COMSOL Multiphysics*, *meep* и т. п.).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Engheta N., Ziolkowski R.W. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. Wiley-IEEE Press, 2006. 440 p.
2. Caloz C. Ten applications of metamaterials. *Proc. 2016 IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation (APSURSI)*. (Fajardo, Puerto Rico 26 June – 1 July 2016). Fajardo: IEEE, 2016. P. 1299–1300.
3. Gangwar K., Paras D., Gangwar P. *Metamaterials: Characteristics, Process and Applications. Advance in Electronic and Electric Engineering (AEEE)*. 2014. Vol. 4, Iss. 1. P. 97–106.
4. Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. *Science*. 2001. Vol. 292, Iss. 5514. P. 77–79. DOI: 10.1126/science.1058847.
5. Ebels U., Duvail J.L., Wigen P.E., Piraux L., Buda L.D., Ounadjela K. Ferromagnetic resonance studies of Ni nanowire arrays. *Phys. Rev. B*. 2001. Vol. 64, Iss. 14. P. 144421(6 p.). DOI: 10.1103/PhysRevB.64.144421.
6. Makeeva G.S., Pardavi-Horvath M., Golovanov O.A. Tuning the Scattering Parameters of Magnetic Nanowire Arrays Near the Antiresonance at Photonic Frequencies. *IEEE Trans. Magn.* 2009. Vol. 45, Iss. 10. P. 4074–4076. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2023612.
7. Boucher V., Carignan L.-P., Kodera T., Caloz C., Yelon A., Menard D. Effective permeability tensor and double resonance of interacting bistable ferromagnetic nanowires. *Phys. Rev. B*. 2009. Vol. 80, Iss. 22. P. 224402 (11 p.). DOI: 10.1103/PhysRevB.80.224402.
8. Rajagopalan S., Furdyna J.K. Magnetic dimensional resonances in Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> spheres. *Phys. Rev. B*. 1989. Vol. 39, Iss. 4. P. 2532–2540. DOI: 10.1103/PhysRevB.39.2532.

9. Ramprecht J., Sjoberg D. Magnetic losses in composite materials. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. Vol. 41, Iss. 13. P. 135005(9 p.). DOI: 10.1088/0022-3727/41/13/135005.
10. Albuquerque E.L., Fulco P., Sarmento E.F., Tilley D.R. Spin waves in a magnetic superlattice. *Solid State Commun.* 1986. Vol. 58, Iss. 1. P. 41–44. DOI: 10.1016/0038-1098(86)90883-5.
11. Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W.J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1999. Vol. 47, Iss. 11. P. 2075–2084. DOI: 10.1109/22.798002.
12. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Van Waeyenberge B. The design and verification of mumax3. *AIP Advances*. 2014. Vol. 4. P. 107133(22 p.). DOI: 10.1063/1.4899186.
13. Dmytriiev O., Dvornik M., Mikhaylovskiy R.V., Franchin M., Fangohr H., Giovannini L., Montoncello F., Berkov D.V., Semenova E.K., Gorn N.L., Prabhakar A., Kruglyak V.V. Calculation of high-frequency permeability of magnonic metamaterials beyond the macrospin approximation. *Phys. Rev. B*. 2012. Vol. 86, Iss. 10. P. 104405(11 p.). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.104405.

Стаття надійшла 01.07.2019

## REFERENCES

1. Engheta, N. ed., Ziolkowski, R.W., 2006. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. Wiley-IEEE Press.
2. Caloz, C., 2016. Ten applications of metamaterials. In: *2016 IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation*. (APSURSI). Fajardo, Puerto Rico, 26 June – 1 July 2016. Fajardo: IEEE.
3. Gangwar, K., Paras, D., Gangwar, P., 2014. Metamaterials: Characteristics, Process and Applications. *Advance in Electronic and Electric Engineering (AEEE)*, **4**(1), pp. 97–106.
4. Shelby, R.A., Smith, D.R., Schultz, S., 2001. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. *Science*, **292**(5514), pp. 77–79. DOI: 10.1126/science.1058847.
5. Ebels, U., Duvail, J.L., Wigen, P.E., Piraux, L., Buda, L.D., Ounadjela, K., 2001. Ferromagnetic resonance studies of Ni nanowire arrays. *Phys. Rev. B*, **64**(14), pp. 144421(6 p.). DOI: 10.1103/PhysRevB.64.144421.
6. Makeeva, G.S., Pardavi-Horvath, M., Golovanov, O.A., 2009. Tuning the Scattering Parameters of Magnetic Nanowire Arrays Near the Antiresonance at Photonic Frequencies. *IEEE Trans. Magn.*, **45**(10), pp. 4074–4076. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2023612.
7. Boucher, V., Carignan, L.-P., Koderer, T., Caloz, C., Yelon, A., Menard, D., 2009. Effective permeability tensor and double resonance of interacting bistable ferromagnetic nanowires. *Phys. Rev. B*, **80**(22), pp. 224402(11 p.). DOI: 10.1103/PhysRevB.80.224402.
8. Rajagopalan, S., Furdyna, J. K., 1989. Magnetic dimensional resonances in Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> spheres. *Phys. Rev. B*, **39**(4), pp. 2532–2540. DOI: 10.1103/PhysRevB.39.2532.
9. Ramprecht, J., Sjoberg, D., 2008. Magnetic losses in composite materials. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**(13), pp. 135005(9 p.). DOI: 10.1088/0022-3727/41/13/135005.
10. Albuquerque, E.L., Fulco, P., Sarmento, E.F., Tilley, D.R., 1986. Spin waves in a magnetic superlattice. *Solid State Commun.*, **58**(1), pp. 41–44. DOI: 10.1016/0038-1098(86)90883-5.
11. Pendry, J.B., Holden, A. J., Robbins, D.J., Stewart, W.J., 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **47**(11), pp. 2075–2084. DOI: 10.1109/22.798002.
12. Vansteenkiste, A., Leliaert, J., Dvornik, M., Helsen, M., Garcia-Sanchez, F., Van Waeyenberge, B., 2014. The design and verification of mumax3. *AIP Advances*, **4**, pp. 107133(22 p.). DOI: 10.1063/1.4899186.
13. Dmytriiev, O., Dvornik, M., Mikhaylovskiy, R.V., Franchin, M., Fangohr, H., Giovannini, L., Montoncello, F., Berkov, D.V., Semenova, E.K., Gorn, N.L., Prabhakar, A., Kruglyak, V.V., 2012. Calculation of high-frequency permeability of magnonic metamaterials beyond the macrospin approximation. *Phys. Rev. B*, **86**(10), pp. 104405(11 p.). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.104405.

Received 01.07.2019

S.V. Nedukh

O.Ya. Usikov IRE of NASU  
12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine  
V.N. Karazin Kharkiv National University  
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

## THE MICROMAGNETIC SIMULATION PACKAGE *MUMAX3* FOR FINDING THE FREQUENCY DISPERSION OF HIGH-FREQUENCY MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF MAGNETIC NANOSTRUCTURES AS MICROWAVE METAMATERIAL COMPONENTS

**Subject and Purpose.** In this paper, a technique of finding the tensor elements of high-frequency susceptibility is proposed for a magnetic nanostructure under a simultaneous application of external constant and high-frequency magnetic fields.

**Methods and Methodology.** In the research, a numerical solution of the Landau–Lifshitz–Hilbert equation is obtained using the *mumax3* micromagnetic simulation package. This package benefits from the employment of the discrete computer video card resources, which speeds up the equation solution.

**Results.** As applied to single nano-sized permalloy disks measuring 500 and 3000 nm in diameter, the appearance of the frequency dispersion of the magnetic susceptibility tensor elements has been worked out in the case of the magnetization precession resonant excitation.

**Conclusions.** The demonstrated approach makes the obtained micromagnetic modeling results useful for the further electromagnetic modeling problems as applied to promising planar microwave metamaterials built upon nanoscale magnetic elements.

**Key words:** *high-frequency magnetic susceptibility, magnetic nanostructures, microwave metamaterials.*

С.В. Недух

ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України  
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
4, майдан Свободи, Харків, 61022, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ПАКЕТА МІКРОМАГНІТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ *mtax3*  
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТНОЇ ДИСПЕРСІЇ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ МАГНІТНОЇ СПРИЙНЯТЛИВОСТІ  
МАГНІТНИХ НАНОСТРУКТУР – ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАМАТЕРІАЛІВ НВЧ-ДІАПАЗОНУ

**Предмет і мета роботи.** У цій роботі запропоновано методику визначення елементів тензора високочастотної сприйнятливості для магнітної наноструктури в умовах одночасного впливу зовнішнього постійного і високочастотного магнітних полів.

**Методи і методологія роботи.** У процесі досліджень застосовувалося чисельне розв'язання рівняння Ландау–Ліфшиця–Гільберта з використанням пакета мікромагнітного симулювання *mtax3*. Перевагою цього пакета є використання ресурсів дискретної відеокарті комп'ютера для прискорення розв'язання рівняння.

**Результати роботи.** На прикладі нанорозмірних дисків з пермалою діаметром 500 і 3000 нм за допомогою пакета мікромагнітного симулювання отримано вигляд частотної дисперсії компонентів тензора магнітної сприйнятливості в умовах резонансного збудження прецесії намагніченості.

**Висновок.** Продемонстрований підхід дозволяє використовувати результати мікромагнітного моделювання для подальших завдань моделювання електромагнітних властивостей перспективних планарних надвисокочастотних метаматеріалів, заснованих на нанорозмірних елементах з магнетика.

**Ключові слова:** *високочастотна магнітна сприйнятливість, магнітні наноструктури, надвисокочастотні метаматеріали.*