

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 4–11
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 4–11
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-4-11>, EDN: BRQH YM

Научная статья
УДК 537.876.4

Управление распространением спиновых волн в микроволноводе с двумерным массивом магнитных микрочастиц различной геометрии

Ф. Е. Гаранин, А. Б. Хутиева, М. В. Ломова[✉], А. В. Садовников

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Гаранин Федор Евгеньевич, лаборант лаборатории «Магнитные метаматериалы», garaninfedor@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4999-2958>

Хутиева Анна Борисовна, младший научный сотрудник лаборатории «Магнитные метаматериалы», abkhutieva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4234-420X>, Author ID: 1100589

Ломова Мария Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, lomovamv85@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7464-1754>, Author ID: 612307

Садовников Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем, sadovnikovav@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8847-2621>, Author ID: 601222

Аннотация. Рассматриваются возможности применения спиновых волн в магнонике для создания элементной базы устройств обработки, передачи и хранения информации в микроволновом и терагерцевом диапазонах. В качестве основного материала используются пленки железо-иттриевого граната, обладающие низким затуханием спиновых волн даже при нанометровых толщинах. Перспективным подходом к управлению СВ является использование двумерных массивов магнитных наноструктур, таких как цилиндры и полуциилиндры из магнетита. Проведено численное микромагнитное моделирование микроволновода с массивом цилиндров и полуциилиндров из магнетита на основе решения уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта. Основное внимание уделено варьированию геометрических параметров и направления внешнего магнитного поля для изменения характеристик спиновых волн. Результаты моделирования открывают новые возможности для разработки магнонных устройств с высокой энергоэффективностью и компактными размерами.

Ключевые слова: магноника, спиновые волны, железо-иттриевый гранат, микромагнитное моделирование, магнетит, двумерные массивы, магнитные наноструктуры, численное моделирование, уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-13-00373).

Для цитирования: Гаранин Ф. Е., Хутиева А. Б., Ломова М. В., Садовников А. В. Управление распространением спиновых волн в микроволноводе с двумерным массивом магнитных микрочастиц различной геометрии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 4–11. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-4-11>, EDN: BRQH YM

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)



Article

Control of spin wave propagation in a microwaveguide with a two-dimensional array of magnetic cylinders of variable configuration

F. E. Garanin, A. B. Khutieva, M. V. Lomova[✉], A. V. Sadovnikov

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Fedor E. Garanin, garaninfedor@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4999-2958>

Anna B. Khutieva, abkhutieva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4234-420X>, Author ID: 1100589

Maria V. Lomova, lomovamv85@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7464-1754>, Author ID: 612307

Alexander V. Sadovnikov, sadovnikovav@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8847-2621>, Author ID: 601222

Abstract. *Background and Objectives:* The development of magnonics, focusing on the transfer of magnetic moment or electron spin instead of charge, has opened new opportunities for the application of spin waves (SW) in the design of devices for data processing, transmission, and storage in the microwave and terahertz ranges. Yttrium iron garnet (YIG) films are used as the magnetic material for forming spin-waveguiding structures due to their exceptionally low SW damping, even at nanometer thicknesses. One promising approach to controlling SW is the use of two-dimensional arrays of magnetic nanostructures, such as cylinders and half-cylinders made of magnetite. *Materials and Methods:* This study involves numerical micromagnetic modeling of a microwave waveguide with an array of magnetite cylinders and half-cylinders on its surface. The modeling focuses on varying the geometric parameters of the nanostructures and the direction of the external magnetic field to investigate their influence on SW propagation characteristics. Magnetite was chosen due to its unique magnetic properties and compatibility with modern micro- and nanofabrication technologies. The micromagnetic modeling was based on the numerical solution of the Landau–Lifshitz–Gilbert equation. *Results:* The results of the modeling provide insights into the ability to predict and control SW behavior depending on the geometry of the magnetic elements and the orientation of the external magnetic field. This opens new perspectives for the development of highly efficient magnonic devices. Identifying optimal configurations for the cylinders and half-cylinders could lead to the creation of more compact and energy-efficient components for magnonic logic circuits and other applications in the field of magnonics. *Conclusion:* The study has presented a significant step towards the development of new magnonic devices operating on the principles of spin electronics. The findings offer potential for further exploration and optimization of spin wave dynamics in nanostructured waveguides, contributing to the advancement of magnonic technology.

Keywords: magnonics, spin waves, yttrium iron garnet, micromagnetic modeling, magnetite, two-dimensional arrays, magnetic nanostructures, numerical modeling, Landau–Lifshitz–Gilbert equation

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-13-00373).

For citation: Garanin F. E., Khutieva A. B., Lomova M. V., Sadovnikov A. V. Control of spin wave propagation in a microwaveguide with a two-dimensional array of magnetic cylinders of variable configuration. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 4–11 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-4-11>, EDN: BRQHYM

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

В настоящее время развитие магноники [1, 2], направленное на исследование процессов переноса магнитного момента или спина электрона вместо переноса заряда, открывает новые возможности применения спиновых волн (СВ) для построения элементной базы приборов обработки, передачи и хранения информации в микроволновом и тера герцевом диапазонах [3, 4]. В таких устройствах информационный сигнал кодируется в фазе или амплитуде СВ, а логические операции реализованы на основе принципов спин-волновой интерференции [3]. В качестве магнитного материала, используемого для формирования магнитных волноведущих структур, используются пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ (YIG)), демонстрирующие рекордно низкие величины затухания СВ, в том числе при нанометровых толщинах ЖИГ [1]. Пленки ЖИГ могут быть получены методами жидкокристаллической эпитаксии [5], техникой лазерного

напыления [6] или вакуумным ионным распылением [7, 8].

Одним из возможных подходов к управлению спиновыми волнами является использование двумерных массивов магнитных nanoструктур [9]. Эти массивы могут изменять характеристики спиновых волн, включая их дисперсионные свойства и распространение [9]. В частности, массивы магнитных цилиндров/полуцилиндров представляют особый интерес, так как можно варьировать их геометрию и магнитные свойства, что открывает возможности для более разностороннего управления параметрами спиновых волн.

Численное микромагнитное моделирование [10] играет ключевую роль в изучении характеристик спиновых волн в сложных структурах. Микромагнитное моделирование позволяет не только глубже понять основные механизмы взаимодействия спиновых волн с магнитными nanoструктурами, но и исследовать влияние геометрии элементов на их



эффективность управления спиновыми волнами и затухание.

В рамках данной работы проведено численное микромагнитное моделирование микроволновода с массивом цилиндров и полуцилиндров из магнетита, расположенных на его поверхности. Особое внимание уделено варьированию геометрических параметров наноструктур, таких как диаметр цилиндров/полуцилиндров, а также направления внешнего магнитного поля, что позволяет выявить их влияние на характеристики распространения спиновых волн. Магнетит [11] был выбран в качестве материала для наноструктур благодаря его уникальным магнитным свойствам и совместимости с современными технологиями создания микро- и наноструктур [12].

Полученные результаты моделирования показывают возможность управления поведением спиновых волн в зависимости от геометрии магнитных элементов и направления внешнего магнитного поля, что открывает новые возможности для разработки высокоеффективных устройств магнонники.

1. Методы и материалы

Рассматриваемые структуры показаны на рис. 1. Они представляют собой микровол-

новод с массивом цилиндров/полуцилиндров (рис. 1, а, б) на поверхности. Микроволновод выполнен из пленки ЖИГ ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) длиной $L_2 = 4$ мм, шириной $L_1 = 300$ мкм и толщиной $w = 10$ мкм. Цилиндры/полуцилиндры были выполнены из магнетита (Fe_3O_4) толщиной 10 мкм, диаметром $d = 5$ и 10 мкм. Массив цилиндров/полуцилиндров располагался в области $L_3 = 1 \text{ мм} \times 300 \text{ мкм}$, расположенной от начала координат Ox на расстоянии 1.5 мм. Расстояние между цилиндрами/полуцилиндрами в каждом случае $u = 10$ мкм, а $k = u + d/2$ мкм. При $d = 5$ мкм в область L_3 помещался массив 66×20 (количество по $Ox \times Oy$) микроэлементов, а при $d = 10$ мкм вмещался 50×15 .

С помощью микромагнитного моделирования, основанного на решении уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта (ЛЛГ) [10], было проведено исследование режимов распространения СВ в структурах с различной геометрией магнетита (см. рис. 1). Уравнение ЛЛГ можно представить в виде:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = \gamma [\mathbf{H}_{eff} \times \mathbf{M}] + \frac{\alpha}{M_{s(x,y)}} \left[\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right],$$

где \mathbf{M} – вектор намагниченности, α – параметр затухания, $\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{demag} + \mathbf{H}_{ex}$ – эффективное магнитное поле, \mathbf{H}_0 – внешнее магнитное

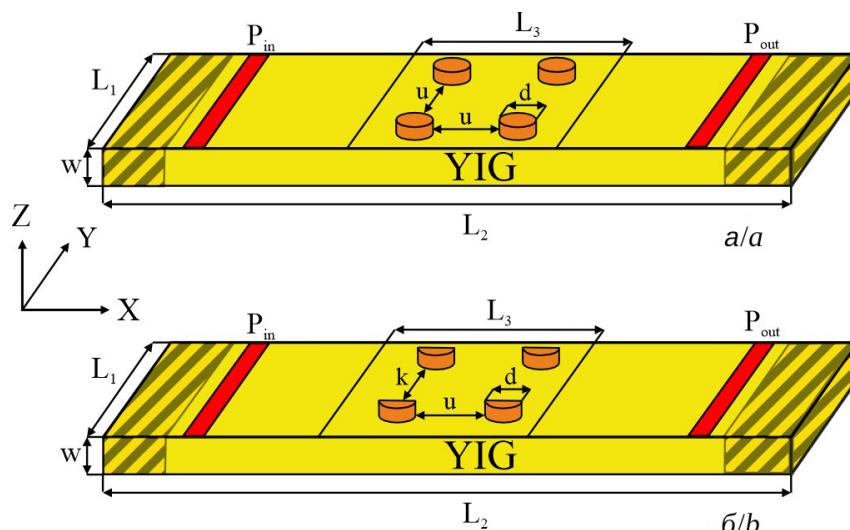


Рис. 1. Схематическое изображение структур с магнетитом в форме цилиндра (а) и полуцилиндра (б): L_1 – ширина ЖИГ микроволновода, L_2 – длина ЖИГ микроволновода, L_3 – область нанесения массива магнетита, w – толщина ЖИГ микроволновода, d – диаметр цилиндра, u , k – расстояния между цилиндрами/полуцилиндрами, P_{in} и P_{out} – антенны для возбуждения и приема СВ соответственно (цвет онлайн)

Fig. 1. Schematic representation of structures with magnetite in the form of a cylinder (a) and a half-cylinder (b): L_1 is the width of the YIG microwave guide, L_2 is the length of the YIG microwave guide, L_3 is the area where the magnetite array is deposited, w is the thickness of the YIG microwave guide, d is the diameter of the cylinder, u , k are distances between the cylinders/ half-cylinders, P_{in} and P_{out} are antennas for excitation and taking SW, respectively (color online)



поле, \mathbf{H}_{demag} – поле размагничивания, \mathbf{H}_{ex} – обменное поле, $\gamma = 2.8$ МГц/Э – гиромагнитное отношение. Параметры затухания пленки ЖИГ и магнетита равны $5 \cdot 10^{-4}$ и $2 \cdot 10^{-2}$ соответственно. Константа обмена в пленке ЖИГ составляет $A_{ex1} = 3.612$ пДж/м, а в магнетите $A_{ex2} = 1.210$ пДж/м. Намагниченности насыщения ЖИГ и магнетита составляют $4\pi M_{YIG} = 1750$ Гс и $4\pi M_{Mag} = 6000$ Гс соответственно. Структура была помещена в однородное статическое магнитное поле $H_0 = 1200$ Э, направленное по Oy для эффективного возбуждения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ). Рассматривались случаи, когда внешнее магнитное поле было направлено в положительном и отрицательном направлении по Oy . В случае положительного направления волна была «прижата» к границе ЖИГ-магнетит, в случае отрицательного – к нижней границе ЖИГ.

Для возбуждения СВ импульсом к пленке ЖИГ в области входной антенны P_{in} прикладывалось магнитное поле $h_z(t) = h_0 \text{sinc}(2\pi f_m t)$, где центральная частота $f_m = 6$ ГГц, $h_0 = 0.001$ Э. Для возбуждения СВ на определенной частоте к пленке ЖИГ в области входной антенны P_{in} прикладывалось магнитное поле $h_z(t) = h_1 \sin(2\pi f_p t)$, где f_p – конкретная частота, $h_1 = 8 \cdot 10^{-5}$ Э. Затем, в обоих случаях, значение динамической намагниченности $m_z(x, y, t)$ в области выходной секции P_{out} записывалось с шагом $\Delta t = 20$ пс в течение времени $T = 300$ нс, что достаточно для достижения устойчивого состояния. Возбуждение СВ импульсом требовалось, чтобы в дальнейшем

с помощью быстрого преобразования Фурье [13] из временной зависимости намагниченности получить амплитудно-частотную характеристику. Возбуждение на определенной частоте требовалось для построения пространственного распределения интенсивности СВ по формуле $I = \sqrt{m_x^2 + m_z^2}/I_{max}$, где I_{max} – это максимальное значение интенсивности СВ.

Значения $m_z(x, y, t)$ рассчитывались для всех ячеек по формуле $m_z(x, y, t) = m_z(x, y, t) m_z(x, y, 0)$, где $m_z(x, y, 0)$ соответствует основному состоянию. Для уменьшения отражений СВ от границ расчетной области были введены поглощающие слои с геометрически возрастающим коэффициентом α (заштрихованные области на рис. 1) [14, 15]. Размер ячейки сетки был $2 \times 2 \times 1$ мкм³.

2. Полученные результаты

Был произведен расчет внутренних полей размагничивания в каждой структуре. На рис. 2 показано распределение внутреннего поля в пленке ЖИГ с магнетитом различной геометрии в слое $zs = 10$ мкм. Можно заметить, что магнетит создает неоднородность во внутреннем поле пленки ЖИГ.

Для получения информации о том, что происходило с волной после взаимодействия с массивом магнетита различной геометрии, был проведен расчет спектральной плотности мощности спин-волнового сигнала. На рис. 3 изображены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для рассматриваемых структур при

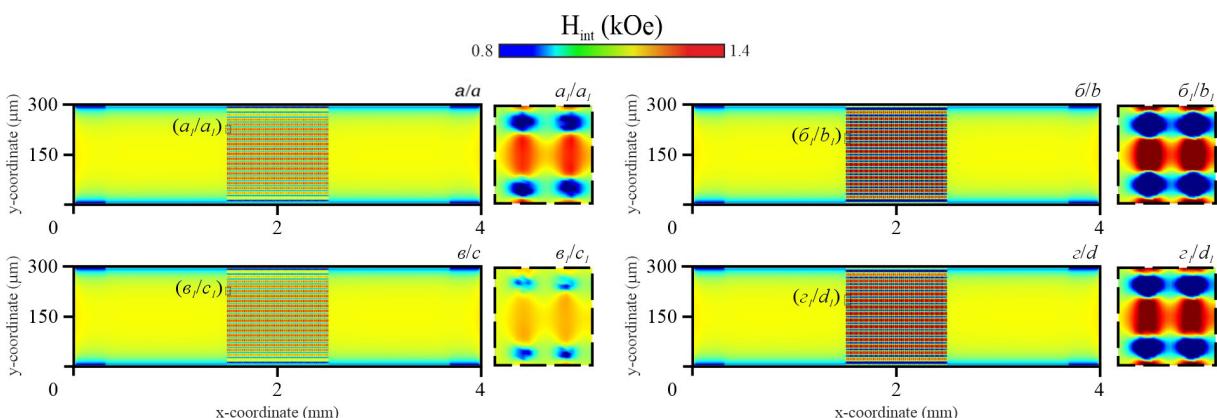


Рис. 2. Распределение внутреннего поля для пленки ЖИГ с цилиндрами/половинами цилиндров (а, б/в, г) при $d = 5$ мкм (а, в) и $d = 10$ мкм (б, г). Увеличенная область неоднородности (a_1, b_1, c_1, d_1) для микроэлементов $e_{15}, e_{16}, e_{25}, e_{26}$ (e_{nm} , где n/m – номер ряда/строки) (цвет онлайн)

Fig. 2. Distribution of the internal field for YIG film with cylinders/half-cylinders (a, b/c, d) at $d = 5$ μm (a) and $d = 10$ μm (b, d). Increased area of heterogeneity (a_1, b_1, c_1, d_1) for microelements $e_{15}, e_{16}, e_{25}, e_{26}$ (e_{nm} , where n/m is the row/line number) (color online)

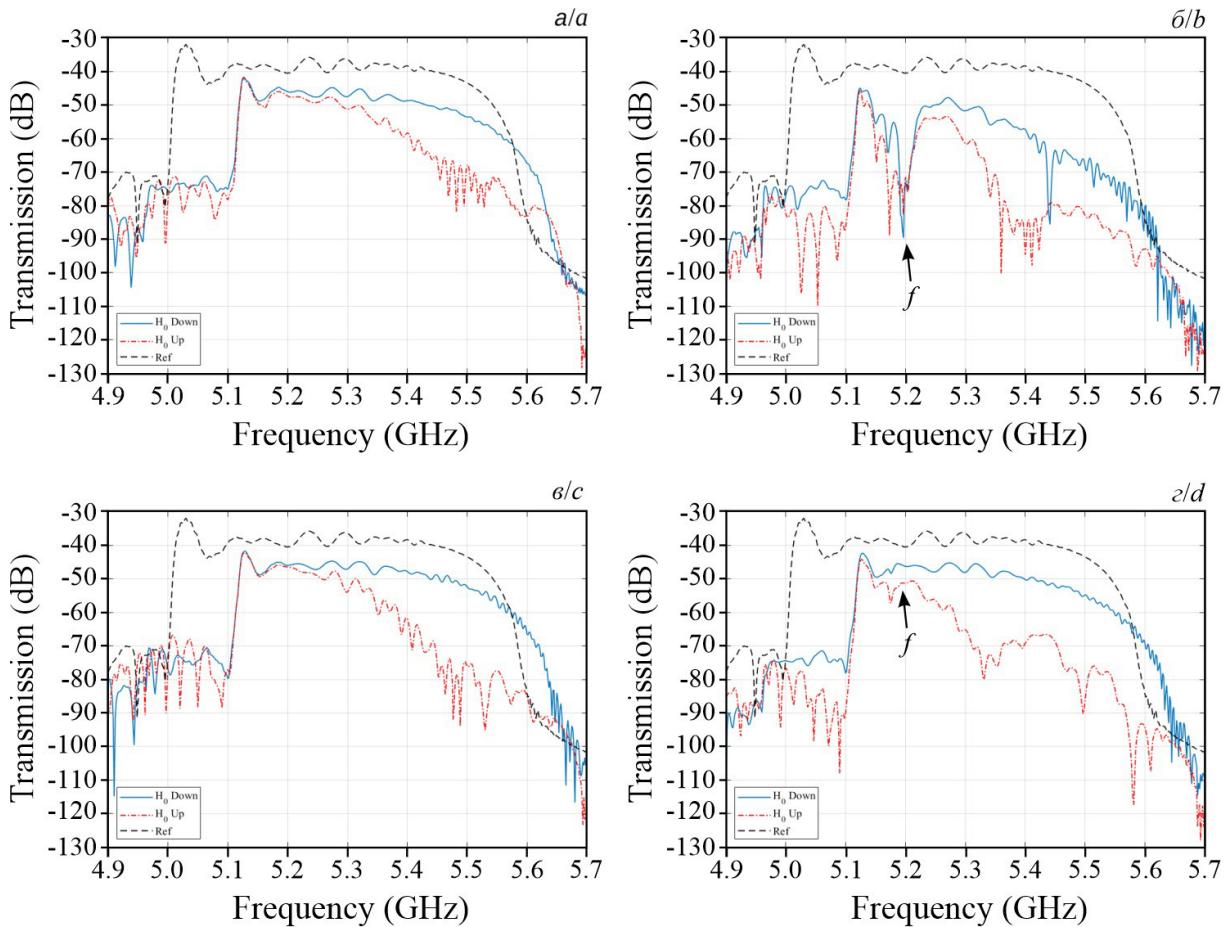


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики для пленки ЖИГ с цилиндрами/половинами цилиндров (а, б/в, г) при $d = 5 \mu\text{m}$ (а, в) и $d = 10 \mu\text{m}$ (б, г), когда магнитное поле было направлено в положительном (штрихпунктирная линия) и отрицательном (сплошная линия) направлениях по Oy (цвет онлайн)

Fig. 3. Amplitude-frequency characteristics for YIG film with cylinders/half-cylinders (a, b/c, d) at $d = 5 \mu\text{m}$ (a, c) and $d = 10 \mu\text{m}$ (b, d), when the magnetic field was directed in positive (dash-dotted line) and negative (solid line) directions along Oy (color online)

вариации направления магнитного поля. Сплошная/штрихпунктирная линия соответствует отрицательному/положительному направлению магнитного поля. Штриховая линия соответствует АЧХ для пленки ЖИГ без магнетита при \mathbf{H}_0 , ориентированном в отрицательном направлении Oy . При $d = 5 \mu\text{m}$ и изменении формы магнетита АЧХ качественно совпадают (см. рис. 3, а, в). При этом в случае положительного направления поля (что отвечает «прижатию» ПМСВ к границе ЖИГ-магнетит) ПМСВ испытывала дополнительное ослабление, которое было тем сильнее, чем выше частота. При увеличении диаметра до $10 \mu\text{m}$, в случае магнетита в форме цилиндра, можно наблюдать возникновение провалов как при положительном, так и при отрицательном направлении внешнего магнитного поля по Oy .

В случае магнетита в форме полуцилиндра возникновение провалов возможно лишь при положительном направлении \mathbf{H}_0 по Oy . В зависимости от геометрии магнетита наблюдается возможность управления спектром прохождения путем изменения направления внешнего магнитного поля.

При изменении формы магнетита на рис. 3, б, г можно выделить частоту $f = 5.195 \text{ ГГц}$, на которой в случае цилиндров возникает провал. Посмотрим, что происходит со спиновой волной на данной частоте. Для этого построим пространственные распределения интенсивности СВ для пленки ЖИГ с магнетитом различной формы при изменении ориентации \mathbf{H}_0 по Oy (рис. 4).

На рис. 4, а, б видно, что СВ на частоте f затухает сильнее после прохождения массива

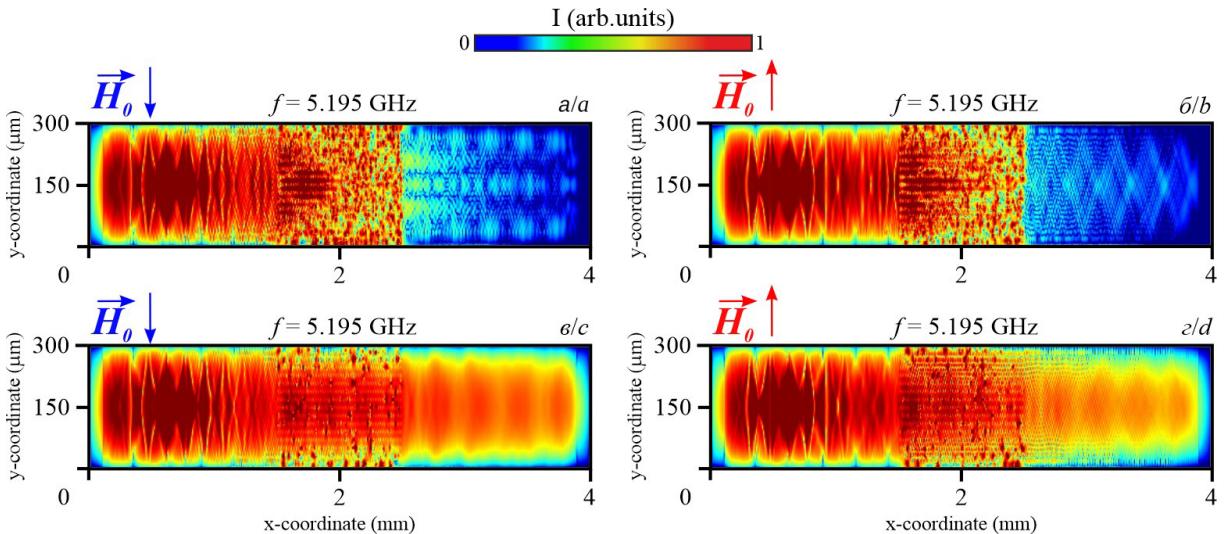


Рис. 4. Пространственные распределения интенсивности спиновой волны для пленки ЖИГ с цилиндрами/половинами цилиндров (а, б/в, г) для частоты входного сигнала $f = 5.195$ ГГц при $d = 10$ мкм, в случае магнитного поля, ориентированного в отрицательном (а, в) и положительном (б, г) направлениях по Oy (цвет онлайн)

Fig. 4. Spatial distributions of the spin wave intensity for YIG film with cylinders/half-cylinders (a, b/c, d) for an input signal frequency $f = 5.195$ GHz at $d = 10$ μm , in the case of a magnetic field oriented in negative (a, c) and positive (b, d) directions according to Oy (color online)

магнетита в форме цилиндров. Это происходит из-за большей плотности поглощающего покрытия. Причем стоит заметить, что в области после массива магнетита (см. рис. 4, а) наблюдается локализация мощности спиновой волны в виде полос, при этом такой эффект оказывается возможным только лишь при H_0 , ориентированном в отрицательном направлении Oy . На рис. 4, в, г спиновая волна проходит массив магнетита в форме полуцилиндров и при изменении ориентации внешнего магнитного поля по Oy пространственные распределения интенсивности СВ качественно совпадают.

Заключение

В статье исследованы процессы управления распространением спиновых волн в микроволноводе с двумерным массивом цилиндров и полуцилиндров из магнетита, расположенных на поверхности пленки ЖИГ. Проведенное численное микромагнитное моделирование продемонстрировало возможность изменения характеристик СВ за счет варьирования геометрии магнетита и ориентации внешнего магнитного поля. Установлено, что изменение диаметра цилиндров и полуцилиндров, а также направление внешнего магнитного поля влияют на амплитудно-частотные характеристики.

Результаты показывают, что изменение геометрии магнетита и внешних условий позволяют

управлять параметрами СВ, открывая новые возможности для создания высокоэффективных устройств магнонники. Важным аспектом исследования является техническая реализуемость таких структур, учитывая современные методы микро- и нанолитографии.

Кроме того, магнетит, используемый в качестве материала для метаповерхности, обладает уникальными магнитными свойствами и широким спектром применения в биомедицине [16–19] и сенсорных технологиях [20, 21]. Его биосовместимость [22] и возможность функционализации [17] делают магнетит перспективным материалом для разработки сенсоров и устройств, применяемых в диагностике и лечении биологических систем. Таким образом, представленные результаты могут найти применение не только в магноннике, но и в смежных областях, таких как биомедицинская инженерия и сенсорика, расширяя горизонты использования СВ и магнитных наноструктур.

Список литературы

- Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 591 с.
- Chumak A. V., Kabos P., Wu M., Abert C., Adelmann C., Adeyeye A. O., Åkerman J., Aliev F. G., Anane A., Awad A., Back C. H., Barman A., Bauer G. E. W., Becherer M., Beginin E. N., Bittencourt V. A. S. V., Blanter Y. M., Bortolotti P., Boventer I., Bozhko D. A. et al. Advances in Magnetics Roadmap on Spin-Wave

- Computing // IEEE Transactions on Magnetics. 2022. Vol. 58, № 6. Art. 0800172. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3149664>
3. Stancil D. D., Prabhakar A. Spin Waves: Theory and Applications. New York : Springer, 2009. 348 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77865>
4. Wang Q., Kewenig M., Schneider M., Verba R., Kohl F., Heinz B., Geilen M., Mohseni M., Lägel B., Ciubotaru F., Adelmann C., Dubs C., Cotofana S. D., Dobrovolskiy O. V., Brächer T., Pirro P., Chumak A. V. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders // Nature Electronics. 2020. Vol. 3. P. 765–774. <https://doi.org/10.1038/s41928-020-00485-6>
5. Shone M. The technology of YIG film growth // Circuits Systems and Signal Process. 1985. Vol. 4. P. 89–103. <https://doi.org/10.1007/BF01600074>
6. Sokolov N. S., Fedorov V. V., Korovin A. M., Suturin S. M., Baranov D. A., Gastev S. V., Krichevtskoy B. B., Maksimova K. Yu., Grunin A. I., Bursian V. E., Lutsev L. V., Tabuchi M. Thin yttrium iron garnet films grown by pulsed laser deposition: Crystal structure, static, and dynamic magnetic properties // Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 119, iss. 2. Art. 023903. <https://doi.org/10.1063/1.4939678>
7. Stognij A. I., Lutsev L. V., Bursian V. E., Novitskii N. N. Growth and spin-wave properties of thin $Y_3Fe_5O_{12}$ films on Si substrates // Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 118, № 2. Art. 023905. <https://doi.org/10.1063/1.4926475>
8. Stognij A., Lutsev L., Novitskii N., Bespalov A., Golikova O., Ketsko V., Gieniusz R., Maziewski A. Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin $Y_3Fe_5O_{12}$ films sputtered on GaN-based substrates // Journal of Physics D: Applied Physics. 2015. Vol. 48, № 48. Art. 485002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/48/485002>
9. Амельченко М. Д., Бир А. С., Огрин Ф. Ю., Одинцов С. А., Романенко Д. В., Садовников А. В., Никитов С. А., Гришин С. В. Магнитные метаповерхности с металлическими включениями // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 5. С. 563–591. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003007>
10. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Waeyenberge B. The design and verification of MuMax3 // AIP Advances. 2014. Vol. 4, iss. 8. Art. 107133. <https://doi.org/10.1063/1.4899186>
11. Niculescu A.-G., Chircov C., Grumezescu A. M. Magnetite nanoparticles: Synthesis methods – A comparative review // Methods. 2022. Vol. 199. P. 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2021.04.018>
12. Trifoi A. R., Matei E., Râpa M., Berbecaru A.-C., Panaitescu C., Banu I., Doukeh R. Coprecipitation nanoarchitectonics for the synthesis of magnetite: A review of mechanism and characterization // Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis. 2023. Vol. 136. P. 2835–2874. <https://doi.org/10.1007/s11144-023-02514-9>
13. Hu J., Jia F., Liu W. Application of Fast Fourier Transform // High Science and Technology. 2023. Vol. 38. P. 590–597. <https://doi.org/10.54097/hset.v38i5888>
14. Venkat G., Fangohr H., Prabhakar A. Absorbing boundary layers for spin wave micromagnetics // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. Vol. 450. P. 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.057>
15. Dvornik M., Kuchko A. N., Kruglyak V. V. Micromagnetic method of s-parameter characterization of magnonic devices // Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 109, iss. 7. Art. 07D350. <https://doi.org/10.1063/1.3562519>
16. Bustamante-Torres M., Romero-Fierro D., Estrella-Nuñez J., Arcenthaler-Vera B., Chichande-Proaño E., Bucio E. Polymeric Composite of Magnetite Iron Oxide Nanoparticles and Their Application in Biomedicine: A Review // Polymers. 2022. Vol. 14. Art. 752. <https://doi.org/10.3390/polym14040752>
17. Ganapathie L. S., Mohamed M. A., Mohamad Yunus R., Berhanuddin D. D. Magnetite (Fe_3O_4) Nanoparticles in Biomedical Application: From Synthesis to Surface Functionalisation // Magnetochemistry. 2020. Vol. 6, iss. 4. Art. 68. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6040068>
18. Włodarczyk A., Gorgoń S., Radoń A., Bajdak-Rusinek K. Magnetite Nanoparticles in Magnetic Hyperthermia and Cancer Therapies: Challenges and Perspectives // Nanomaterials. 2022. Vol. 12, iss. 11. Art. 1807. <https://doi.org/10.3390/nano12111807>
19. Petrov K. D., Chubarov A. S. Magnetite Nanoparticles for Biomedical Applications // Encyclopedia. 2022. Vol. 2, iss. 4. P. 1811–1828. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2040125>
20. Bilgic A., Cimen A. Two Novel BODIPY-Functional Magnetite Fluorescent Nano-Sensors for Detecting of Cr(VI) Ions in Aqueous Solutions // Journal of Fluorescence. 2020. Vol. 30, № 4. P. 867–881. <https://doi.org/10.1007/s10895-020-02559-2>
21. Bilgic A., Cimen A. A Highly Sensitive and Selective ON-OFF Fluorescent Sensor Based on Functionalized Magnetite Nanoparticles for Detection of Cr(VI) Metal Ions in the Aqueous Medium // Journal of Molecular Liquids. 2020. Vol. 312. Art. 113398. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113398>
22. Mbeh D. A., França R., Merhi Y., Zhang X. F., Veres T., Sacher E., Yahia L. In Vitro Biocompatibility Assessment of Functionalized Magnetite Nanoparticles: Biological and Cytotoxicological Effects // Journal of Biomedical Materials Research. Part A. 2012. Vol. 100A. P. 1637–1646. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.34096>

References

1. Gurevich A. G. Magnitny rezonans v ferritakh i antiferromagnitakh [Magnetic resonance in ferrites and antiferromagnets]. Moscow, Nauka, 1973. 591 p. (in Russian).
2. Chumak A. V., Kabos P., Wu M., Abert C., Adelmann C., Adeyeye A. O., Åkerman J., Aliev F. G., Anane A., Awad A., Back C. H., Barman A., Bauer G. E. W., Becherer M., Beginin E. N., Bittencourt V. A. S. V.,

- Blanter Y. M., Bortolotti P., Boventer I., Bozhko D. A., et al. Advances in Magnetics Roadmap on Spin-Wave Computing. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2022, vol. 58, no. 6, art. 0800172. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3149664>
3. Stancil D. D., Prabhakar A. *Spin Waves: Theory and Applications*. New York, Springer, 2009. 348 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77865>
4. Wang Q., Kewenig M., Schneider M., Verba R., Kohl F., Heinz B., Geilen M., Mohseni M., Lägel B., Ciubotaru F., Adelmann C., Dubs C., Cotofana S. D., Dobrovolskiy O. V., Brächer T., Pirro P., Chumak A. V. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders. *Nature Electronics*, 2020, vol. 3, pp. 765–774. <https://doi.org/10.1038/s41928-020-00485-6>
5. Shone M. The technology of YIG film growth. *Circuits Systems and Signal Process*, 1985, vol. 4, pp. 89–103. <https://doi.org/10.1007/BF01600074>
6. Sokolov N. S., Fedorov V. V., Korovin A. M., Suturin S. M., Baranov D. A., Gastev S. V., Krichevtsvob D. B., Maksimova K. Yu., Grunin A. I., Bursian V. E., Lutsev L. V., Tabuchi M. Thin yttrium iron garnet films grown by pulsed laser deposition: Crystal structure, static, and dynamic magnetic properties. *J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 119, no. 2, art. 023903. <https://doi.org/10.1063/1.4939678>
7. Stognij A. I., Lutsev L. V., Bursian V. E., Novitskii N. N. Growth and spin-wave properties of thin $Y_3Fe_5O_{12}$ films on Si substrates. *J. Appl. Phys.*, 2015, vol. 118, no. 2, art. 023905. <https://doi.org/10.1063/1.4926475>
8. Stognij A., Lutsev L., Novitskii N., Bespalov A., Golikova O., Ketsko V., Gieniusz R., Maziewski A. Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin $Y_3Fe_5O_{12}$ films sputtered on GaN-based substrates. *J. Appl. Phys. D: Applied Physics*, 2015, vol. 48, no. 48, art. 485002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/48/485002>
9. Amel'chenko M. D., Bir A. S., Ogrin F. Y., Odintsov S. A., Romanenko D. V., Sadovnikov A. V., Nikitov S. A., Grishin S. V. Magnetic metasurfaces with metallic inclusions. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 30, no. 5, pp. 563–591. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003007>
10. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Waeyenberge B. The design and verification of MuMax3. *AIP Advances*, 2014, vol. 4, art. 107133. <https://doi.org/10.1063/1.4899186>
11. Niculescu A.-G., Chircov C., Grumezescu A. M. Magnetite nanoparticles: Synthesis methods – A comparative review. *Methods*, 2022, vol. 199, pp. 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.jymeth.2021.04.018>
12. Trifoi A. R., Matei E., Râpă M., Berbecaru A.-C., Panaitescu C., Banu I., Doukeh R. Coprecipitation nanoarchitectonics for the synthesis of magnetite: A review of mechanism and characterization. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2023, vol. 136, pp. 2835–2874. <https://doi.org/10.1007/s11144-023-02514-9>
13. Hu J., Jia F., Liu W. Application of Fast Fourier Transform. *HSET*, 2023, vol. 38, pp. 590–597. <https://doi.org/10.54097/hset.v38i.5888>
14. Venkat G., Fangohr H., Prabhakar A. Absorbing boundary layers for spin wave micromagnetics. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 450, pp. 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.057>
15. Dvornik M., Kuchko A. N., Kruglyak V. V. Micromagnetic method of s-parameter characterization of magnonic devices. *J. Appl. Phys.*, 2011, vol. 109, iss. 7, art. 07D350. <https://doi.org/10.1063/1.3562519>
16. Bustamante-Torres M., Romero-Fierro D., Estrella-Nuñez J., Arcentales-Vera B., Chichande-Proaño E., Bucio E. Polymeric Composite of Magnetite Iron Oxide Nanoparticles and Their Application in Biomedicine: A Review. *Polymers*, 2022, vol. 14, art. 752. <https://doi.org/10.3390/polym14040752>
17. Ganapathe L. S., Mohamed M. A., Mohamad Yunus R., Berhanuddin D. D. Magnetite (Fe_3O_4) Nanoparticles in Biomedical Application: From Synthesis to Surface Functionalisation. *Magnetochemistry*, 2020, vol. 6, iss. 4, art. 68. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6040068>
18. Włodarczyk A., Gorgoń S., Radoń A., Bajdak-Rusinek K. Magnetite Nanoparticles in Magnetic Hyperthermia and Cancer Therapies: Challenges and Perspectives. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, iss. 11, art. 1807. <https://doi.org/10.3390/nano12111807>
19. Petrov K. D., Chubarov A. S. Magnetite Nanoparticles for Biomedical Applications. *Encyclopedia*, 2022, vol. 2, iss. 4, pp. 1811–1828. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2040125>
20. Bilgic A., Cimen A. Two Novel BODIPY-Functional Magnetite Fluorescent Nano-Sensors for Detecting of Cr(VI) Ions in Aqueous Solutions. *J. Fluoresc.*, 2020, vol. 30, no. 4, pp. 867–881. <https://doi.org/10.1007/s10895-020-02559-2>
21. Bilgic A., Cimen A. A highly sensitive and selective ON-OFF fluorescent sensor based on functionalized magnetite nanoparticles for detection of Cr(VI) metal ions in the aqueous medium. *J. Molecular Liquids*, 2020, vol. 312, art. 113398. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113398>
22. Mbeh D. A., França R., Merhi Y., Zhang X. F., Veres T., Sacher E., Yahia L. In vitro biocompatibility assessment of functionalized magnetite nanoparticles: Biological and cytotoxicological effects. *J. Biomed. Mater. Res. Part A*, 2012, vol. 100A, pp. 1637–1646. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.34096>

Поступила в редакцию 01.03.2024; одобрена после рецензирования 01.10.2024;
принята к публикации 03.10.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 01.03.2024; approved after reviewing 01.10.2024;
accepted for publication 03.10.2024; published 31.03.2025