

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2024. Т. 32, № 4
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2024;32(4)

Научная статья
УДК 537.611.2

DOI: 10.18500/0869-6632-003108
EDN: ВКПСQ

Нелинейные режимы распространения спиновых волн в волноводе с одномерным массивом отверстий

А. А. Мартышкин , А. В. Садовников

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского, Россия

E-mail: aamartyshkin@gmail.com, sadovnikovav@gmail.com

Поступила в редакцию 11.07.2023, принята к публикации 19.02.2024,
опубликована онлайн 3.07.2024

Аннотация. Цель. Исследование пространственно-частотной селекции сигнала в системе магнитных микроволноводов, разделенных между собой одномерным массивом отверстий в линейном и нелинейном режимах работы с помощью численных и экспериментальных методов. Методы. Микромагнитное моделирование спин-волнового транспорта в ферромагнитных пленках. Получение S-параметров спиновых волн, распространяющихся в тангенциально намагниченной структуре с помощью векторного анализатора цепей. Результаты. С помощью микромагнитного моделирования продемонстрированы пространственно-селективные свойства структуры в линейном и нелинейном режимах распространения спиновых волн. С помощью векторного анализатора выявлен механизм управления частотным диапазоном зон непропускания спин-волнового сигнала. Заключение. Волноведущая система латерально связанных волноводов, разделенная одномерным массивом отверстий, может быть использована в качестве функционального элемента в планарных топологиях магнанных сетей и устройств параллельной обработки сигналов на их основе.

Ключевые слова: спиновые волны, магнетика, спинтроника, нелинейность, латеральные волноводы, магнетный кристалл.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект #20-79-10191).

Для цитирования: Мартышкин А. А., Садовников А. В. Нелинейные режимы распространения спиновых волн в волноводе с одномерным массивом отверстий // Известия вузов. ПНД. 2024. Т. 32, № 4. С. xxx-xxx. DOI: 10.18500/0869-6632-003108. EDN: ВКПСQ

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Nonlinear regimes of spin wave propagation in a waveguide with a one-dimensional hole array

A. A. Martyshkin✉, A. V. Sadovnikov

Saratov State University, Russia

E-mail: ✉aamartyshkin@gmail.com, sadovnikovav@gmail.com

Received 11.07.2023, accepted 19.02.2024, available online 3.07.2024

Abstract. *Purpose.* Investigation of spin-wave signal passage in a system of magnetic microwaves separated from each other by a one-dimensional array of holes. Using numerical and experimental methods to show controlled spatial-frequency selection of the signal in linear and nonlinear modes of operation. *Methods.* Micromagnetic modeling of the spatial intensity distributions of spin waves. Obtaining S-parameters of spin waves propagating in a tangentially magnetized structure using a vector circuit analyzer. *Results.* The spatially selective properties of the structure in linear and nonlinear modes are demonstrated using micromagnetic modeling. A mechanism for controlling the frequency range of the Bragg zone is revealed using a vector analyzer. *Conclusion.* The proposed structure can be used as a functional element in planar topologies of magnon networks and parallel signal processing devices based on them.

Keywords: spin waves, magnonics, spintronics, nonlinearity, lateral waveguides, magnonic crystal.

Acknowledgements. This work was supported by Russian Science Foundation (Project #20-79-10191).

For citation: Martyshkin AA, Sadovnikov AV. Nonlinear regimes of spin wave propagation in a waveguide with a one-dimensional hole array. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2024;32(4):xxx–xxx. DOI: 10.18500/0869-6632-003108

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

Введение

Исследования волновых процессов в магнитных материалах в физике конденсированного состояния показали существование магнонов и их коллективных возбуждений — спиновых волн (СВ) [1, 2]. Развитие технологий структурирования магнитных пленок позволило широко использовать микро- и наноструктуры для создания магнитных логических устройств, передающих сигналы, закодированные в амплитуде и/или фазе спиновых волн [3–5]. По аналогии с интегральными схемами, основанными на комплементарной структуре металл–оксид–полупроводник (КМОП) [6, 7], устройства, основанные на магнонных принципах, могут быть соединены между собой магнитными волноводами, образуя магнонную вычислительную сеть [8, 9].

Магнонные сети функциональных логических элементов могут использоваться для маршрутизации и обработки информации, обеспечивая дополнительные преимущества энергонезависимости, низкой рабочей мощности и отсутствия джоулевого нагрева [10]. Затухание СВ представляет собой критическое препятствие для создания магнонных сетей, поскольку ограничивает пространственную протяженность масштабами, сравнимыми или меньшими длинами распространения СВ. Миниатюризация магнонных устройств является следствием ограничения масштабируемости магнонных схем. Использование пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ), в которых СВ могут распространяться на расстояния до нескольких миллиметров, является шагом к преодолению ограничений масштабируемости [11]. Однако однонаправленная передача сигналов в поперечно-ограниченных магнитных волноводах является препятствием для миниатюризации, что заставляет искать новые концепции устройств. Примером преодоления ограничений является создание устройств с управляемой передачей спин-волновых сигналов на основе структурированных магнитных пленок путём изменения геометрических параметров магнонных структур [12], изменения ориентации и величины внешнего магнитного поля [13], создания метаповерхностей [14] и т. д.

Периодическая перекачка мощности сигналов в латерально связанных магнитных волноводах, основанная на эффекте дипольной связи, может быть использована для реализации режимов пространственной селекции СВ [5, 15, 16]. Магнитные кристаллы (МК) представляют собой структуры с периодической модуляцией структурных или материальных параметров магнитных материалов, демонстрирующих спектры СВ с разрешенными частотными полосами пропускания и запрещенными зонами [17, 18]. Большинство исследуемых МК состоит из массивов магнитных полос [19], модулированных волноводах [20], магнитных наноточек [21] или структур с периодическим массивом отверстий [22]. Латерально связанные магнитные волноводы и магнитно-кристаллические структуры с одномерным массивом отверстий просты в изготовлении [22] и подробно исследованы в литературе [23].

Объединение концептуальных идей магнитного кристалла и латерально связанных магнитных волнопроводов в одном устройстве позволяет осуществлять пространственно-частотную селекцию СВ [24]. В латерально связанных волноводах, разделенных одномерным массивом отверстий, пространственно-частотная селекция спин-волновых сигналов осуществляется на основе эффектов брэгговского отражения СВ от периодической неоднородности и периодической перекачки мощности между полосками в одной структуре. В работе [24] мы показали, что управление спин-волновым транспортом можно осуществить путём изменения угла намагничивания структуры. Нелинейный режим распространения СВ можно использовать в качестве альтернативного метода управления пространственно-частотной селекцией сигналов [25, 26].

Целью данной работы является исследование режимов линейного и нелинейного распространения СВ в системе магнитных латеральных полосок, разделенных одномерным массивом отверстий. Методом микромагнитного моделирования показано статическое распределение внутреннего магнитного поля. Продемонстрированы линейные и нелинейные режимы пространственно-частотной селекции СВ. В работе радиофизическим методом с помощью векторного анализатора цепей получены S-параметры в линейном и нелинейном режимах передачи спин-волнового сигнала. Показана возможность управления частотной полосой непрохождения сигналов в случае нелинейного распространения СВ.

1. Микромагнитное моделирование

Для получения статического распределения внутреннего магнитного поля в латерально связанных волноводах, разделенных одномерным массивом отверстий, было проведено микромагнитное исследование в программном пакете *MuMax3* [27]. На рис. 1, а показано схематическое изображение исследуемой структуры. Магнитные полоски G_1 и G_2 (см. рис. 1, а) образуют латерально расположенные волноводы шириной $w_1 = w_2 = 200$ мкм. Массив отверстий, разделяющий волноводы G_1 и G_2 , представляет собой одномерную периодическую последовательность цилиндрических антиоточек диаметром $D = 75$ мкм с периодом $2 \times D$. Расстояние между волноводами G_1 и G_2 в областях без антиоточек совпадает с диаметром отверстий, так что спин-волновая дипольная связь возникает только в области периодической неоднородности. Было численно решено уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта [28]

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = \gamma [\mathbf{H}_{\text{eff}} \times \mathbf{M}] + \frac{\alpha}{M_s} \left[\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right], \quad (1)$$

которое описывает прецессию вектора намагниченности \mathbf{M} в эффективном магнитном поле $\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{\text{demag}} + \mathbf{H}_{\text{ex}} + \mathbf{H}_a$, где \mathbf{H}_0 – внешнее магнитное поле, $\mathbf{H}_{\text{demag}}$ – размагничивающее поле, \mathbf{H}_{ex} – обменное поле и \mathbf{H}_a – поле анизотропии. Компоненты, входящие в поле \mathbf{H}_{eff} , вычисляются по методике, представленной в [27]. Материальные параметры исследуемой структуры, такие как обменная константа $A_{\text{ex}} = 3 \times 10^7$ эрг/см и безразмерный параметр затухания $\alpha = 10^{-5}$, соответствуют железо-иттриевому гранату (ЖИГ [YIG], $\text{Y}_3\text{Fe}_2(\text{FeO}_4)_3$). Значение

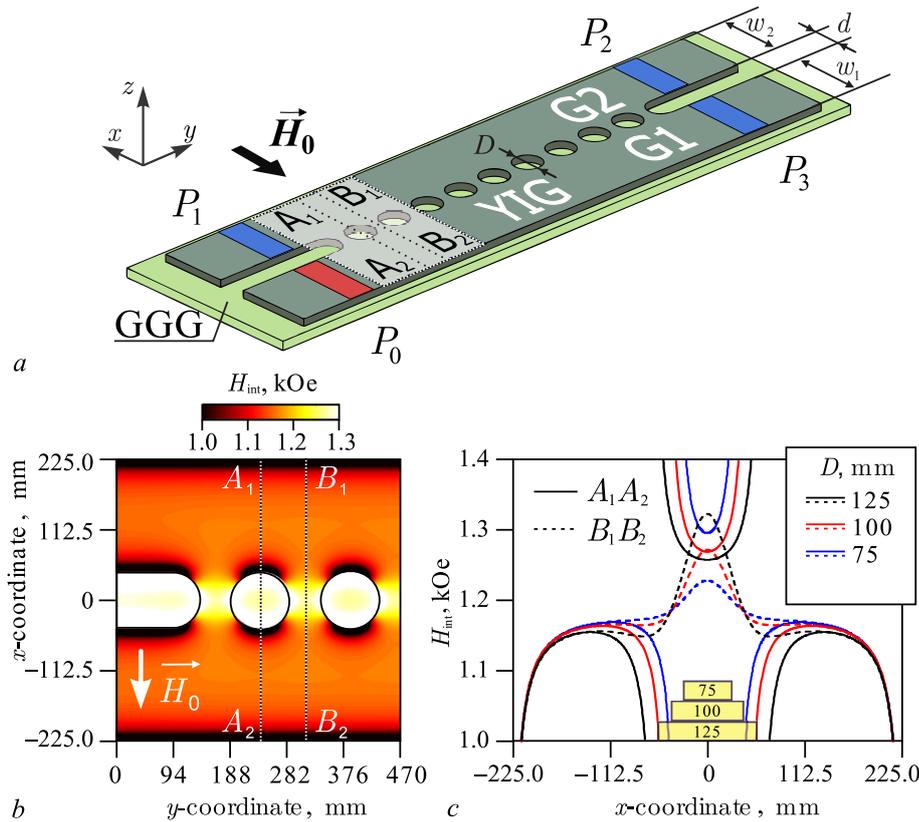


Рис. 1. *a* – Схематическое изображение латеральных микроволноводов, соединенных одномерным массивом отверстий. *b* – Распределение внутреннего магнитного поля в структуре. *c* – Распределение внутреннего магнитного поля в сечениях A_1A_2 и B_1B_2 (цвет онлайн)

Fig. 1. *a* – Schematic demonstration of lateral microwaveguides separated by a one-dimensional array of holes. *b* – Distribution of the internal magnetic field. *c* – Distribution of the internal magnetic field in cross sections A_1A_2 and B_1B_2 (color online)

параметра намагниченности насыщения задано равным $4\pi M_s = 1750$ Гс. Магнитокристаллическая анизотропия ЖИГ пренебрежимо мала по сравнению с анизотропией формы, поэтому поле анизотропии полагалось равным $\mathbf{H}_a = 0$. Однородное внешнее магнитное поле \mathbf{H}_0 было направлено параллельно оси x во всех измерениях и расчетах. Полученные карты распределения внутреннего магнитного поля в области входных секций латерально связанных волноводов G_1 и G_2 и двух периодов магнито-кристаллической структуры показаны на рис. 1, *b*. Видно, что размагничивание в области отверстий приводит к сильной неоднородности внутреннего магнитного поля $|\mathbf{H}_{int}(x, y)| = |\mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{demag} + \mathbf{H}_{ex}|$. На рис. 1, *c* показано распределение внутреннего магнитного поля в сечениях A_1A_2 и B_1B_2 . Можно отметить, что распределение внутреннего поля в сечении A_1A_2 имеет вид, соответствующий случаю двух латерально связанных ЖИГ, микроволноводов, расположенных на расстоянии, равном величине диаметра антиточки. Данные, полученные в сечении B_1B_2 , демонстрируют увеличение внутреннего магнитного поля в центре структуры, что связано с неоднородностью, вызванной близким расположением границ антиточек.

Микромагнитное моделирование позволяет численно решить задачу о возбуждении и распространении спиновых волн в магнитных структурах [12]. Прямоугольный источник возбуждения спин-волнового сигнала P_0 шириной 30 мкм был расположен в начале волновода G_1 . Входной спин-волновой сигнал возбуждался путём приложения динамического магнитного поля $b_z(t) = b_0 \sin(2\pi ft)$ с амплитудой $b_0 = 10$ мЭ и частотой f . Детектирующие области располагались на выходах структуры P_1, P_2, P_3 . Для уменьшения отражений СВ от границ расчетной

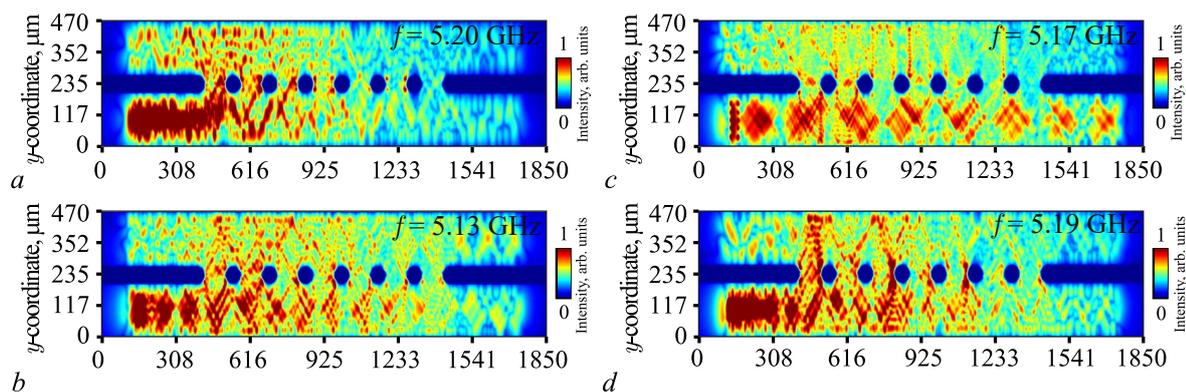


Рис. 2. Результаты численного моделирования в виде пространственного распределения интенсивности спиновой волны $I(x, z)$ при различных частотах возбуждения сигнала (указаны на рисунке) в линейном (a–c) и нелинейном (d) режимах (цвет онлайн)

Fig. 2. Spatial distribution of the spin wave intensity $I(x, z)$ at different signal excitation frequencies (indicated in the figure) in the linear (a–c) and nonlinear (d) regimes obtained by numerical simulation (color online)

области на концах структуры были введены поглощающие слои (см. рис. 1) с экспоненциально возрастающим в направлении границы коэффициентом затухания $\alpha = 10^{-5} \dots 1$ [29, 30]. Конфигурация внешнего магнитного поля H_0 и направление распространения СВ вдоль оси y соответствуют обратным объемным магнитостатическим спиновым волнам (ОМСВ) [31].

Массивы данных динамических компонент намагниченности $m_{x,y,z}$, полученные после решения численной задачи, были использованы для построения двумерных карт распределения интенсивности СВ $I(x, z) = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}$ (см. ис. 2). Линейный режим распространения СВ соответствовал уровню мощности подаваемого сигнала $P_0 = -20$ дБм, а нелинейный режим $P_0 = 26$ дБм. Характерные линейные режимы работы структуры, в которых осуществляется ответвление спин-волнового сигнала в области P_1, P_2, P_3 , показаны на рис. 2, a–c. При возбуждении СВ на частоте $f = 5.2$ ГГц спин-волновой сигнал ответвляется в канал P_1 (рис. 2, a). Режим приёма сигнала в канале P_2 осуществляется на частоте $f = 5.13$ ГГц (см. рис. 2, b). На частоте $f = 5.17$ ГГц спин-волновой сигнал распространяется вдоль волновода G_1 и большая часть мощности детектируется в канале P_3 (см. рис. 2, c). При возбуждении сигнала, соответствующего мощности на антенне $P_0 = 26$ дБм на частоте $f = 5.19$ ГГц, распределение интенсивности СВ позволяет говорить о режиме ответвления сигнала в два канала — P_1 и P_3 (рис. 2, d). В нелинейном режиме распространения спин-волнового сигнала в исследуемой структуре возможным оказывается осуществление режима «защищенный порт», когда мощность возбуждаемого сигнала ответвляется во все порты, кроме одного.

2. Экспериментальное исследование

Для проведения экспериментального исследования был создан макет исследуемой структуры из монокристаллической пленки ЖИГ [YIG, $Y_3Fe_2(FeO_4)_3$ (111)], выращенной на подложке галлий-гадолиниевого граната [GGG, $Gd_3Ga_5O_{12}$]. Толщина ЖИГ с намагниченностью насыщения $4\pi M_s = 1750$ Гс составляла 10 мкм. Ширина линии ферромагнитного резонанса для ЖИГ составляла 0.5 Э. Методом локальной лазерной абляции на основе волоконного Nd:YAG лазера с модулем 2D гальванометрического сканирования (Cambridge Technology 6240H), работающего в импульсном режиме с длительностью импульса 50 нс и энергией 50 мДж, была сформирована геометрия структуры. Отверстия на поверхности пленки ЖИГ выполнены до подложки, то есть глубиной 10 мкм.

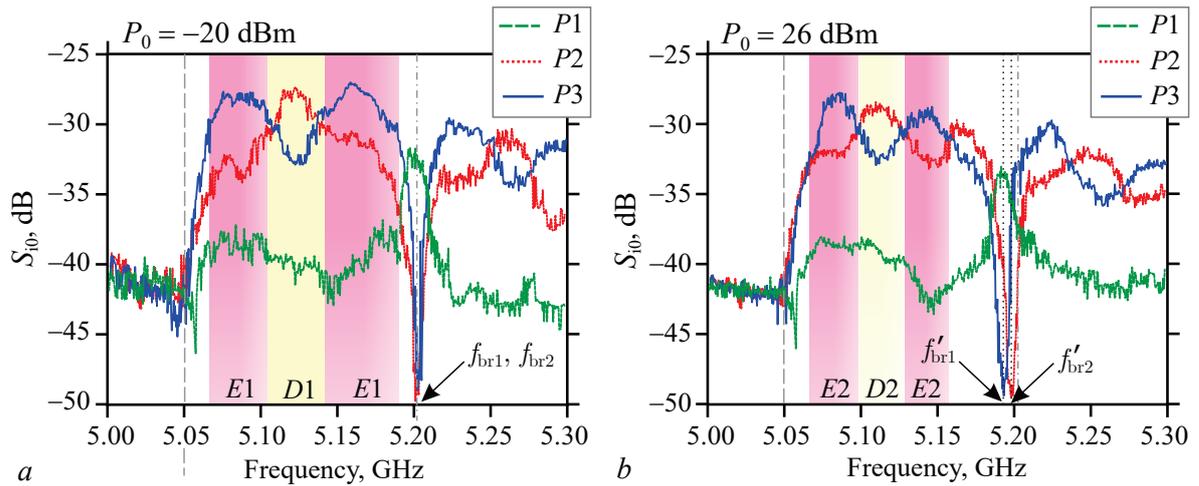


Рис. 3. Частотная зависимость модуля коэффициентов S_{j0} в линейном (a) и нелинейном (b) режимах (цвет онлайн)
 Fig. 3. Frequency dependence of the magnitude of the S_{j0} coefficients in the linear (a) and nonlinear (b) modes (color online)

Экспериментальное исследование распространения спин-волнового сигнала в изготовленной структуре было проведено методом микроволновой спектроскопии — путем использования микрополосковой линии передачи с антеннами шириной 30 мкм. При этом было проведено измерение S -параметров на векторном анализаторе цепей Agilent Technologies PNA Network Analyzer E8362C. Получена частотная зависимость параметров S_{j0} , соответствующих приему сигнала на микрополосковом преобразователе P_j ($j = 1, 2, 3$) при возбуждении сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала микрополоском P_0 в линейном (см. рис. 3, a) и нелинейном (см. рис. 3, b) режимах.

На рис. 3 цветом отмечены частотные диапазоны D_1, D_2 , которые демонстрируют режимы перекачки спин-волнового сигнала в волновод G_2 . При этом видно, что большая часть мощности спин-волнового сигнала ответвляется в порт P_2 . Области частот, отмеченные E_1, E_2 , соответствуют режиму распространения сигнала вдоль микрополосковода G_1 , при этом большая часть мощности ответвляется в канал P_3 . Из анализа положения провалов на амплитудно-частотных характеристиках видно, что в линейном режиме на частотах f_{br1}, f_{br2} , соответствующих условиям брэгговского резонанса, наблюдается ответвление сигнала в канал P_1 . При этом можно заметить формирование частотной области непропускания сигнала для выходов P_2 и P_3 , что косвенно подтверждает формирование волны в микрополосковом волноводе G_2 , бегущей в противоположном направлении относительно возбуждаемой в волноводе G_1 спиновой волны. В нелинейном режиме распространения СВ происходит смещение частотной полосы непрохождения сигнала с центральной частотой f'_{br1} вниз на величину ~ 10 МГц относительно f'_{br2} . В случае нелинейного режима распространения СВ оказывается возможным одновременное ответвление сигнала в каналы P_1, P_2 на частоте f'_{br1} . В то же время детектируемая зона непропускания f'_{br2} на порте P_2 смещается на ~ 2 МГц относительно f_{br1} , что можно считать незначительным при ширине полосы непропускания 15 МГц, определяемой по уровню -35 дБ (на 5 дБ ниже уровня основания пика непрохождения). При этом важно отметить, что для пика, соответствующего прохождению сигнала в порт P_1 , значение частоты совпадает с f'_{br1} .

Таким образом, в линейном режиме на частоте f_{br1} сигнал, возбуждаемый на антенне порта P_0 , ответвляется только в порт P_1 , в то время как для нелинейного случая на частоте f'_{br1} мощность входного сигнала делится между портами P_1 и P_2 в отношении $\Delta P = 1.78$. При возбуждении СВ на частоте f'_{br2} спин-волновой сигнал будет ответвляться в канал P_2 и P_3 .

Заключение

С помощью численных и экспериментальных методов показано, что магنونная волнодушащая структура, объединяющая в себе идеи магنونного кристалла и латеральных микроволноводов, обеспечивает возможность управления спин-волновым транспортом при линейных и нелинейных режимах распространения. С помощью микромагнитного моделирования показаны режимы пространственно-частотной селекции спин-волнового сигнала. Показан механизм управления спектральными характеристиками в нелинейном режиме распространения СВ за счёт изменения частотного диапазона зоны Брэгга. Предложенная структура с периодическим массивом отверстий может быть использована для создания управляемых спин-волновых демультимплексов, делителей мощности и ответвителей СВЧ-сигнала.

Список литературы

1. Bloch F. Zur Theorie des Ferromagnetismus // Zeitschrift für Physik. 1930. Vol. 61. P. 206–219. DOI: 10.1007/BF01339661
2. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.
3. Khitun A., Bao M., Wang K.L. Magnonic logic circuits // Journal of Physics D: Applied Physics. 2010. Vol. 43, no. 26. P. 264005. DOI: 10.1088/0022-3727/43/26/264005.
4. Au Y., Dvornik M., Dmytriiev O., Kruglyak V.V. Nanoscale spin wave valve and phase shifter // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 100, iss. 17. P. 172408. DOI: 10.1063/1.4705289.
5. Sadovnikov A. V., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Romanenko D. V., Sharaevskiy Y. P., Nikitov S. A. Directional multimode coupler for planar magnonics: Side-coupled magnetic stripes // Applied Physics Letters. 2015. Vol. 107, iss. 20. P. 202405. DOI: 10.1063/1.4936207.
6. Wang Q., Kewenig M., Schneider M., Verba R., Kohl F., Heinz B., Geilen M., Mohseni M., Lägél B., Ciubotaru F., Adelman 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, no. 12. P. 765–774. DOI: 10.1038/s41928-020-00485-6.
7. Csaba G., Papp Á., Porod W. Perspectives of using spin waves for computing and signal processing // Physics Letters A. 2017. Vol. 381, iss. 17. P. 1471–1476. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.02.042.
8. Barman A., Gubbiotti G., Ladak S., Adeyeye A. O., Krawczyk M., Gräfe J., Adelman C., Cotofana S., Naeemi A., Vasyuchka V.I., Hillebrands B., Nikitov S. A., Yu H., Grundler D., Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Sheshukova S. E., Duquesne J.-Y., Marangolo M., Csaba G., Porod W., Demidov V.E., Urazhdin S., Demokritov S. O., Albisetti E., Petti D., Bertacco R., Schultheiss H., Kruglyak V.V., Poimanov V.D., Sahoo S., Sinha J., Yang H., Müntenberg M., Moriyama T., Mizukami S., Landeros P., Gallardo R. A., Carlotti G., Kim J.-V., Stamps R. L., Camley R.E., Rana B., Otani Y., Yu W., Yu T., Bauer G.E.W., Back C., Uhrig G.S., Dobrovolskiy O. V., Budinska B., Qin H., van Dijken S., Chumak A. V., Khitun A., Nikonov D. E., Young I. A., Zingsem B. W. and Winklhofer M. The 2021 magnonics roadmap // Journal of Physics: Condensed Matter. 2021. Vol. 33. P. 413001. DOI: 10.1088/1361-648X/abec1a.
9. Wang Q., Csaba G., Verba R., Chumak A. V., Pirro P. Perspective on Nanoscaled Magnonic Networks // arXiv:2311.06129, 2023. 9 p. DOI: 10.48550/arXiv.2311.06129.
10. Demidov V.E., Urazhdin S., Anane A., Cros V., Demokritov S. O. Spin-orbit-torque magnonics // Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 127, iss. 17. P. 170901. DOI: 10.1063/5.0007095.
11. Chumak A. V., Vasyuchka V.I., Serga A. A., Hillebrands B. Magnon spintronics // Nature Physics. 2015. Vol. 11. P. 453–461. DOI: 10.1038/nphys3347.
12. Sadovnikov A. V., Davies C. S., Kruglyak V.V., Romanenko D. V., Grishin S. V., Beginin E. N., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic

- waveguide // *Physical Review B*. 2017. Vol. 96, iss. 6. P. 060401(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.060401.
13. *Kostylev M., Schrader P., Stamps R. L., Gubbiotti G., Carlotti G., Adeyeye A. O., Goolaup S., Singh N.* Partial frequency band gap in one-dimensional magnonic crystals // *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 92, iss. 13. P. 132504–132504-3. DOI: 10.1063/1.2904697.
 14. *Evelt M., Ochoa H., Dzyapko O., Demidov V. E., Yurgens A., Sun J., Tserkovnyak Y., Bessonov V., Rinkevich A. B., Demokritov S. O.* Chiral charge pumping in graphene deposited on a magnetic insulator // *Physical Review B*. 2017. Vol. 95, iss. 2. P. 024408. DOI: 10.1103/PhysRevB.95.024408.
 15. *Odintsov S. A., Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Beginin E. N., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Spatial-frequency selection of magnetostatic waves in a two-dimensional magnonic crystal lattice // *JETP Letters*. 2016. Vol. 104, iss. 8. P. 563–567. DOI: 10.1134/S0021364016200121.
 16. *Collet M., Gladii O., Evelt M., Bessonov V., Soumah L., Bortolotti P., Demokritov S. O., Henry Y., Cros V., Bailleul M., Demidov V. E., Anane A.* Spin-wave propagation in ultra-thin YIG based waveguides // *Applied Physics Letters*. 2017. Vol. 110, iss. 9. P. 092408. DOI: 10.1063/1.4976708.
 17. *Nikitov S. A., Tailhades Ph., Tsai C. S.* Spin waves in periodic magnetic structures—magnonic crystals // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001. Vol. 236, iss. 3. P. 320–330. DOI: 10.1016/S0304-8853(01)00470-X.
 18. *Kruglyak V. V., Hicken R. J., Kuchko A. N., Gorobets V. Y.* Spin waves in a periodically layered magnetic nanowire // *Journal of Applied Physics*. 2005. Vol. 98, iss. 1. P. 014304. DOI: 10.1063/1.1935764.
 19. *Gubbiotti G., Tacchi S., Carlotti G., Singh N., Goolaup S., Adeyeye A. O., Kostylev M.* Collective spin modes in monodimensional magnonic crystals consisting of dipolarly coupled nanowires // *Applied Physics Letters* 2007. Vol. 90, iss. 9. P. 092503. DOI: 10.1063/1.2709909.
 20. *Ciubotaru F., Chumak A. V., Obry B., Serga A. A., Hillebrands B.* Magnonic band gaps in waveguides with a periodic variation of the saturation magnetization // *Physical Review B*. 2013. Vol. 88, iss. 13. P. 134406. DOI: 10.1103/PhysRevB.88.134406.
 21. *Huber R., Grundler D.* Ferromagnetic nanodisks for magnonic crystals and waveguides // In: Drouhin H.-J. M., Wegrowe J.-E., Razeghi M. (eds.) *Spintronics IV*. Vol. 8100. SPIE, 2011. P. 81000D. DOI: 10.1117/12.892168.
 22. *Klos J. W., Kumar D., Krawczyk M., Barman A.* Magnonic band engineering by intrinsic and extrinsic mirror symmetry breaking in antidot spin-wave waveguides // *Scientific Reports*. 2013. Vol. 3, iss. 1. 2444. DOI: 10.1038/srep02444.
 23. *Groß F., Zelent M., Gangwar A., Mamica S., Gruszecki P., Werner M., Schütz G., Weigand M., Goering E. J., Back C. H., Krawczyk M., Gräfe J.* Phase resolved observation of spin wave modes in antidot lattices // *Applied Physics Letters*. 2021. Vol. 118, iss. 23. P. 232403. DOI: 10.1063/5.0045142.
 24. *Martyshkin A. A., Odintsov S. A., Gubanova Yu. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Nikitov S. A., Sadovnikov A. V.* Controlled spin-wave transport in a magnon-crystal structure with a one-dimensional array of holes // *JETP Letters*. 2019. Vol. 110, iss. 8. P. 533–539. DOI: 10.1134/S0021364019200062.
 25. *Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A.* Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes // *Physical Review B*. 2017. Vol. 96, iss. 14. P. 144428. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.144428.
 26. *Lenk B., Ulrichs H., Garbs F., Münzenberg M.* The building blocks of magnonics // *Physics Reports*. 2011. Vol. 507, no. 4–5. P. 107–136. DOI: 10.1016/j.physrep.2011.06.003.
 27. *Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., van Waeyenberge B.* The design verification of MuMax3 // *AIP Advances* 2014. Vol. 4. 107133. DOI: 10.1063/1.4899186.

28. Landau L. D., Lifschitz E. M. On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies // *Phys. Z. Sowjetunion*. 1935. Vol. 8. P. 153–164.
29. 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. 07D350. DOI: 10.1063/1.3562519.
30. Venkat G., Fangohr H., Prabhakar A. Absorbing boundary layers for spin wave micromagnetics // *Journal of Magnetism Magnetic Materials*. 2018. Vol. 450. P. 34–39. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.057.
31. Damon R. W., Eschbach J. R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1961. Vol. 19, iss. 3–4. P. 308–320. DOI: 10.1016/0022-3697(61)90041-5.

References

1. Bloch F. Zur Theorie des Ferromagnetismus. *Zeitschrift für Physik*. 1930;61:206–219. DOI: 10.1007/BF01339661.
2. Gurevich AG, Melkov GA. *Magnetic Vibrations and Waves*. Moscow: Fizmatlit; 1994. 464 p. (in Russian).
3. Khitun A, Bao M, Wang KL. Magnonic logic circuits. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2010;43(26):264005. DOI: 10.1088/0022-3727/43/26/264005.
4. Au Y, Dvornik M, Dmytriiev O, Kruglyak VV. Nanoscale spin wave valve and phase shifter. *Applied Physics Letters*. 2012;100(17):172408. DOI: 10.1063/1.4705289.
5. Sadovnikov AV, Beginin EN, Sheshukova SE, Romanenko DV, Sharaevsky YP, Nikitov SA. Directional multimode coupler for planar magnonics: Side-coupled magnetic stripes. *Applied Physics Letters*. 2015;107(20):202405. DOI: 10.1063/1.4936207.
6. Wang Q, Kewenig M, Schneider M, Verba R, Kohl F, Heinz B, Geilen M, Mohseni M, Lägél B, Ciubotaru F, Adelman C, Dubs C, Cotofana SD, Dobrovolskiy OV, Brächer T, Pirro P, Chumak AV. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders. *Nature Electronics*. 2020;3(12):765–774. DOI: 10.1038/s41928-020-00485-6.
7. Csaba G, Papp A, Porod W. Perspectives of using spin waves for computing and signal processing. *Physics Letters A*. 2017;381(17):1471–1476. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.02.042.
8. Barman A, Gubbiotti G, Ladak S, Adeyeye AO, Krawczyk M, Gräfe J, Adelman C, Cotofana S, Naeemi A, Vasyuchka VI, Hillebrands B, Nikitov SA, Yu H, Grundler D, Sadovnikov AV, Grachev AA, Sheshukova SE, Duquesne J-Y, Marangolo M, Csaba G, Porod W, Demidov VE, Urazhdin S, Demokritov SO, Albisetti E, Petti D, Bertacco R, Schultheiss H, Kruglyak VV, Poimanov VD, Sahoo S, Sinha J, Yang H, Münzenberg M, Moriyama T, Mizukami S, Landeros P, Gallardo RA, Carlotti G, Kim J-V, Stamps RL, Camley RE, Rana B, Otani Y, Yu W, Yu T, Bauer GEW, Back C, Uhrig GS, Dobrovolskiy OV, Budinska B, Qin H, van Dijken S, Chumak AV, Khitun A, Nikonov DE, Young IA, Zingsem BW, Winklhofer M. The 2021 magnonics roadmap. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2021;33:413001. DOI: 10.1088/1361-648X/abec1a.
9. Wang Q, Csaba G, Verba R, Chumak AV, Pirro P. Perspective on Nanoscaled Magnonic Networks. arXiv:2311.06129; 2023. 9 p. DOI: 10.48550/arXiv.2311.06129.
10. Demidov VE, Urazhdin S, Anane A, Cros V., Demokritov S. O. Spin–orbit–torque magnonics. *Journal of Applied Physics*. 2020;127(17):170901. DOI: 10.1063/5.0007095.
11. Chumak AV, Vasyuchka VI, Serga AA, Hillebrands B. Magnon spintronics. *Nature Physics*. 2015;96(6):453–461. DOI: 10.1038/nphys3347.
12. Sadovnikov AV, Davies CS, Kruglyak VV, Romanenko DV, Grishin SV, Beginin EN, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic waveguide. *Physical Review B*. 2017;96(6):060401(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.060401
13. Kostylev M, Schrader P, Stamps RL, Gubbiotti G, Carlotti G, Adeyeye AO, Goolaup S, Singh N.

- Partial frequency band gap in one-dimensional magnonic crystals. *Applied Physics Letters*. 2008;92(13):132504–132504-3. DOI: 10.1063/1.2904697.
14. Evelt M, Ochoa H, Dzyapko O, Demidov VE, Yurgens A, Sun J, Tserkovnyak Y, Bessonov V, Rinkevich AB, Demokritov SO. Chiral charge pumping in graphene deposited on a magnetic insulator. *Physical Review B*. 2017;95(2):024408. DOI: 10.1103/PhysRevB.95.024408
 15. Odintsov SA, Sadovnikov AV, Grachev AA, Beginin EN, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Spatial-frequency selection of magnetostatic waves in a two-dimensional magnonic crystal lattice. *JETP Letters*. 2016;104(8):563–567. DOI: 10.1134/S0021364016200121.
 16. Collet M, Gladii O, Evelt M, Bessonov V, Soumah L, Bortolotti P, Demokritov SO, Henry Y, Cros V, Bailleul M, Demidov VE, Anane A. Spin-wave propagation in ultra-thin YIG based waveguides. *Applied Physics Letters*. 2017;110(9):092408. DOI: 10.1063/1.4976708.
 17. Nikitov SA, Tailhades Ph, Tsai CS Spin waves in periodic magnetic structures—magnonic crystals. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001;236(3):320–330. DOI: 10.1016/S0304-8853(01)00470-X.
 18. Kruglyak VV, Hicken RJ, Kuchko AN, Gorobets VY. Spin waves in a periodically layered magnetic nanowire. *Journal of Applied Physics*. 2005;98(1):014304. DOI: 10.1063/1.1935764.
 19. Gubbiotti G, Tacchi S, Carlotti G, Singh N, Goolaup S, Adeyeye AO, Kostylev M. Collective spin modes in monodimensional magnonic crystals consisting of dipolarly coupled nanowires. *Applied Physics Letters*. 2007;90(9):092503. DOI: 10.1063/1.2709909.
 20. Ciubotaru F, Chumak AV, Obry B, Serga AA, Hillebrands B. Magnonic band gaps in waveguides with a periodic variation of the saturation magnetization. *Physical Review B*. 2013;88(13):134406. DOI: 10.1103/PhysRevB.88.134406.
 21. Huber R, Grundler D. Ferromagnetic nanodisks for magnonic crystals and waveguides. In: Drouhin H-JM, Wegrowe J-E, Razeghi M. (eds.) *Spintronics IV*. Vol. 8100. SPIE, 2011. P. 81000D. DOI: 10.1117/12.892168.
 22. Klos JW, Kumar D, Krawczyk M, Barman A. Magnonic band engineering by intrinsic and extrinsic mirror symmetry breaking in antidot spin-wave waveguides. *Scientific Reports*. 2013;3(1):2444. DOI: 10.1038/srep02444.
 23. Groß F, Zelent M, Gangwar A, Mamica S, Gruszecki P, Werner M, Schütz G, Weigand M, Goering EJ, Back CH, Krawczyk M, Gräfe J. Phase resolved observation of spin wave modes in antidot lattices. *Applied Physics Letters*. 2021;118(23):232403. DOI: 10.1063/5.0045142.
 24. Martyshkin AA, Odintsov SA, Gubanova YuA, Beginin EN, Sheshukova SE, Nikitov SA, Sadovnikov AV. Controlled spin-wave transport in a magnon-crystal structure with a one-dimensional array of holes. *JETP Letters*. 2019;110(8):533–539. DOI: 10.1134/S0021364019200062.
 25. Sadovnikov AV, Odintsov SA, Beginin EN, Sheshukova SE, Sharaevskii YuP, Nikitov SA. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes. *Physical Review B*. 2017;96(14):144428. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.144428.
 26. Lenk B, Ulrichs H, Garbs F, Münzenberg M. The building blocks of magnonics. *Physics Reports*. 2011;507(4–5):107–136. DOI: 10.1016/j.physrep.2011.06.003.
 27. Vansteenkiste A, Leliaert J, Dvornik M, Helsen M, Garcia-Sanchez F, van Waeyenberge B. The design verification of MuMax3. *AIP Advances*. 2014;4:107133. DOI: 10.1063/1.4899186.
 28. Landau LD, Lifschitz EM. On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies. *Phys. Z. Sowjetunion*. 1935;8:153–164.
 29. Dvornik M, Kuchko AN, Kruglyak VV. Micromagnetic method of s-parameter characterization of magnonic devices. *Journal of Applied Physics*. 2011;109(7):07D350. DOI: 10.1063/1.3562519.
 30. Venkat G, Fangohr H, Prabhakar A. Absorbing boundary layers for spin wave micromagnetics. *Journal of Magnetism Magnetic Materials*. 2018;450:34–39. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.057.
 31. Damon RW, Eschbach JR. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1961;19(3–4):308–320. DOI: 10.1016/0022-3697(61)90041-5.



Мартышкин Александр Александрович — родился в 1995 году. Окончил факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета по направлению «Радиофизика» (2017). С 2019 года работает в лаборатории магнитных материалов Саратовского государственного университета в должности младшего научного сотрудника. Научные интересы — спиновые волны, математическое моделирование, трехмерные ферромагнитные структуры. Опубликовал более 10 научных статей по указанным направлениям.

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: aamartyshevich@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7442-0663
AuthorID (eLibrary.Ru): 1030152



Садовников Александр Владимирович — родился в Саратове (1987). Окончил с красным дипломом факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского (2009). Кандидат физико-математических наук (2012, СГУ). С 2008 года работает в СГУ, в настоящее время в должности доцента кафедры физики открытых систем. Имеет более 60 статей в реферируемых научных журналах.

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского, лаборатория «Метаматериалы»
E-mail: sadovnikovav@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8847-2621
AuthorID (eLibrary.Ru): 601222