



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2024. Т. 32, № 1
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2024;32(1)

Научная статья
УДК 537.611.2

DOI: 10.18500/0869-6632-003084
EDN: TPROZK

Распространение спиновых волн в решетке латерально и вертикально связанных ЖИГ-микроволноводов при изменении угла намагничивания в линейном и нелинейном режимах

А. Б. Хутиева[✉], А. А. Грачев, Е. Н. Бегинин, А. В. Садовников

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

E-mail: ✉abkhtieva@gmail.com, andrew.a.grachev@gmail.com,
egbegin@gmail.com, sadovnikovav@gmail.com

Поступила в редакцию 17.07.2023, принята к публикации 20.11.2023,
опубликована онлайн 27.12.2023, опубликована 31.01.2024

Аннотация. Цель. Исследование совместного проявления эффектов анизотропного распространения сигнала, связи и нелинейной зависимости параметров среды от мощности в решетке латерально и вертикально связанных микроволноводов спиновых волн. Рассмотрение случая влияния вращения угла намагничивания и изменения латерального зазора между микроволноводами, расположенными на одной подложке, на поперечный профиль спин-волнового пучка и пространственную локализацию амплитуды спиновых волн. Методы. Методом микромагнитного моделирования на основе численного решения уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта показана возможность управления направлением распространения спиновых волн в ансамбле латерально и вертикально связанных микроволноводов железиттриевого граната путем изменения угла намагничивания. Методом численного интегрирования системы связанных дискретных нелинейных уравнений Шрёдингера показана возможность изменения поперечного профиля спин-волнового пучка при изменении уровня начальной амплитуды сигнала. Результаты. Полученные в микромагнитном моделировании пространственные распределения компонент динамической намагниченности спиновых волн, возбуждаемых в двух микроволноводах, расположенных на одной подложке, свидетельствуют об изменении характера локализации их мощности в выходных секциях микроволноводов. При вариации угла намагничивания решетки наблюдается сдвиг величины пороговой мощности, при которой появляется характерное обужение поперечной ширины спин-волнового пучка в нелинейном режиме. Заключение. При возбуждении поверхностной магнитостатической спиновой волны в решетке латерально и вертикально связанных микроволноводов наблюдается трансформация поперечного профиля волны при отклонении угла намагничивания структуры на 15° , что проявляется в изменении длины волны и ее локализации в каждом из микроволноводов. Совместное проявление эффектов дипольной связи, гиротропии и нелинейности среды позволяют управлять величиной пороговой мощности спиновых волн, при которой в отдельно взятом слое структуры реализуется режим бездифракционного распространения спин-волнового пучка.

Ключевые слова: спиновая волна, микромагнитное моделирование, система уравнений связанных волн, спин-волновой пучок, дискретная дифракция.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ) в соответствии с проектом № 23-79-30027.

Для цитирования: Хутиева А. Б., Грачев А. А., Бегинин Е. Н., Садовников А. В. Распространение спиновых волн в решетке латерально и вертикально связанных ЖИГ-микроволноводов при изменении угла намагничивания в линейном и нелинейном режимах // Известия вузов. ПНД. 2024. Т. 32, № 1. С. 57–71. DOI: 10.18500/0869-6632-003084. EDN: TPROZK

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

Propagation of spin waves in a lattice of laterally and vertically coupled YIG microwaveguides by changing the magnetization angle in linear and nonlinear modes

A. B. Khutieva[✉], A. A. Grachev, E. N. Beginin, A. V. Sadovnikov

Saratov State University, Russia

E-mail: ✉abkhutieva@gmail.com, andrew.a.grachev@gmail.com,
egbegin@gmail.com, sadovnikovav@gmail.com

Received 17.07.2023, accepted 20.11.2023, available online 27.12.2023, published 31.01.2024

Abstract. *Purpose.* Investigation of the joint manifestation of the effects of anisotropic signal propagation, coupling, and nonlinear power dependence of the medium parameters in a lattice of laterally and vertically coupled spin-wave (SW) microwaveguides. Consideration of the case of the influence of the rotation of the magnetization angle and the change of the lateral gap between microwaveguides located on the same substrate on the transverse profile of the spin-wave beam and the spatial localization of the SW amplitude. *Methods.* The method of micromagnetic modeling based on the numerical solution of the Landau–Lifshitz–Hilbert equation shows the possibility of controlling the direction of propagation of SW in an ensemble of laterally and vertically coupled iron yttrium garnet (YIG) microwaveguides by changing the magnetization angle. By the method of numerical integration of the system of coupled discrete nonlinear Schrödinger equations, the possibility of changing the transverse profile of the spin-wave beam by changing the level of the initial signal amplitude is shown. *Results.* The spatial distributions of the components of the dynamic magnetization of the SW excited in two microwaveguides located on the same substrate obtained in micromagnetic simulations indicate a change in the character of localization of the SW power in the output sections of the microwaveguides. At variation of the lattice magnetization angle, a shift of the threshold power value is observed, at which a characteristic curbing of the transverse width of the spin-wave beam in the nonlinear mode appears. *Conclusion.* When excitation of surface magnetostatic SW in a lattice of laterally and vertically coupled microwaveguides, a transformation of the transverse profile of the wave is observed at a deviation of the magnetization angle of the structure by 15° , which is manifested in the change of the SW length and its localization in each of the microwaveguides. The combined effects of dipole coupling, gyrotropy, and nonlinearity of the medium make it possible to control the value of the threshold power of the SW, at which the mode of diffractionless propagation of the spin-wave beam is realized in a single layer of the structure.

Keywords: spin wave, micromagnetic modeling, system of coupled wave equations, spin-wave beam, discrete diffraction.

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Science Foundation (RSF) under project number 23-79-30027.

For citation: Khutieva AB, Grachev AA, Beginin EN, Sadovnikov AV. Propagation of spin waves in a lattice of laterally and vertically coupled YIG microwaveguides by changing the magnetization angle in linear and nonlinear modes. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2024;32(1):57–71. DOI: 10.18500/0869-6632-003084

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

Введение

В настоящее время активно исследуются способы построения систем обработки информационного сигнала на основе эффектов переноса магнитных моментов или спинов электронов без переноса заряда [1]. В таких устройствах, основанных на магнотронных принципах, информационный сигнал кодируется в фазе или амплитуде спиновых волн (СВ), а логические операции реализованы на основе принципов спин-волновой интерференции [2]. Планарные ферритовые волноводы конечной ширины на основе пленок железоиттриевого граната (ЖИГ, Iron-Yttrium-Garnet — YIG) могут быть использованы как базовые элементы магнотронных сетей (МС), для создания различных устройств обработки сигналов: линий задержки, фильтров, интерферометров, переключателей и мультиплексоров [3–6].

Магнотронные сети, состоящие из микроволноводов СВ на основе пленок ЖИГ, могут использоваться для обработки информации и в то же время обеспечивать технологическую интеграцию с существующей архитектурой на основе технологий комплементарных структур металл–оксид–полупроводник [7]. В качестве простейшего элемента МС может выступать полоска ферромагнетика.

тика, ограниченная в двух направлениях и представляющая собой волноведущий канал для СВ. Использование ЖИГ при создании спин-волноведущих структур обусловлено рекордно низким затуханием СВ [2]. Экспериментально было продемонстрировано, что создание многослойных топологий трехмерных структур с нарушением трансляционной симметрии позволяет рассматривать создаваемые элементы как узлы межсоединений для вертикально интегрированных МС [9]. Функционирование таких магнанных элементов, как спин-волновой ответитель сигнала на основе латерально [3, 10] или вертикально [11, 12] связанных микроволноводов, может быть основано на нелинейных режимах распространения СВ [13, 14], реализуемых за счет изменения величины намагниченности насыщения ЖИГ при увеличении уровня входного сигнала, и последующем изменении величины длины связи СВ [3]. При этом были исследованы два типа связанных магнанных волноведущих структур: многослойные структуры [15, 16] и микро- и наноразмерные волноводы, расположенные в планарной геометрии [3, 7].

В настоящей работе рассмотрены методы двойного управления характеристиками спин-волнового сигнала на основе изменения величины амплитуды СВ и угла намагничивания двухслойной структуры, в каждом слое которой сформированы волноведущие каналы. С помощью микромагнитного моделирования были исследованы режимы распространения СВ в решетке ЖИГ-микроволноводов. Исследование нелинейных эффектов проводится на основе системы дискретных связанных нелинейных уравнений Шрёдингера (НУШ). Используя сравнение полученных в микромагнитном моделировании карт пространственного распределения намагниченности в двухслойной структуре и в решетке, состоящей из двух слоев, в каждом из которых имеется решетка латеральных микроволноводов, показана возможность управления поперечной структурой поля спиновой волны. При этом выявлены режимы управления передачей спин-волнового сигнала при изменении угла намагничивания структуры. Рассматриваемая структура на основе решетки ЖИГ-микроволноводов может быть использована для создания систем многоканального демультимплексирования информационного сигнала.

1. Структура

Микромагнитное моделирование [17] проводилось для решетки латерально и вертикально связанных ферритовых микроволноводов (рис. 1). В качестве материала был выбран ЖИГ. Микроволноводы выполнены в виде удлиненных полосок длиной $L = 4$ мм, шириной $c = 300$ мкм и толщиной $d = 10$ мкм. Структура представляет собой два слоя, каждый из которых содержит

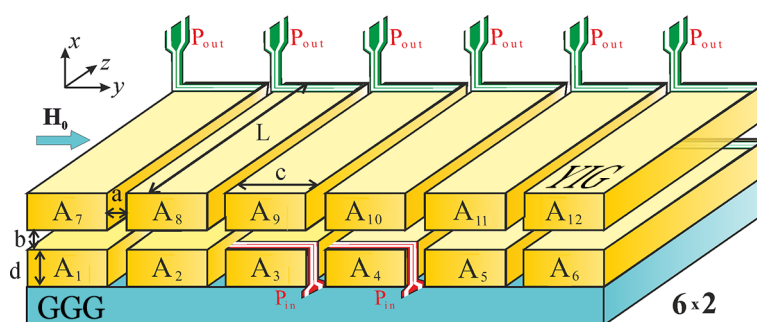


Рис. 1. Схематическое изображение решетки микроволноводов. На рисунке введены обозначения: a – горизонтальный зазор; b – вертикальный зазор; c – ширина; d – толщина; L – длина микроволноводов; P_{in} и P_{out} – микрополосковые антенны для возбуждения и приема СВ, соответственно (цвет онлайн)

Fig. 1. Schematic diagram of the microwaveguides array. The following notations are introduced in the figure: a – horizontal gap; b – vertical gap; c – width; d – thickness; L – length of microwaveguide; P_{in} and P_{out} – microstrip antennas for SW excitation and reception respectively (color online)

по шесть параллельно ориентированных микроволноводов, разделенных воздушным зазором. Намагниченность насыщения ЖИГ составляет $M = 139$ Гс, а величина внешнего магнитного поля, направленного вдоль оси y , составляет $H_0 = 1200$ Э. Численное исследование проводилось на частоте 5.21 ГГц для всех случаев, рассмотренных в настоящей работе. При этом данная конфигурация намагничивания обеспечивает эффективное возбуждение поверхностных спиновых волн. Как известно, связанные ферритовые структуры расширяют функциональные возможности СВЧ-устройств ввиду дополнительного управляющего параметра, которым является связь между СВ, распространяющимися в отдельно взятых ферромагнитных пленках [13–16, 18–20]. Можно отметить, что при экспериментальном исследовании таких структур ЖИГ-волноводы формируются на подложке из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ, Gadolinium-Gallium Garnet – GGG) [10].

2. Микромагнитное моделирование

Рассмотрим принцип работы исследуемой структуры: на входную антенну P_{in} подается микроволновой сигнал, частотный диапазон которого зависит от величины постоянного внешнего магнитного поля. По мере распространения СВ будет происходить перекачка спин-волнового сигнала во все микроволноводы в зависимости от угла отклонения внешнего магнитного поля, частоты и разности фаз подаваемого микроволнового сигнала на входные антенны. С помощью микромагнитного моделирования, основанного на решении уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта (ЛЛГ) [17], было проведено исследование режимов распространения СВ в решетке ЖИГ-микроволноводов. Для уменьшения отражений сигнала от границ расчетной области в численном моделировании были введены области с увеличивающимся в геометрической прогрессии параметром затухания, при этом начальное значение параметра затухания выбиралось $\alpha = 10^{-5}$, что соответствовало значению параметра затухания для эпитаксиально выращенных пленок ЖИГ/ГГГ [2]. Возбуждение структуры было реализовано путем создания локализованной области с переменным внешним магнитным полем на двух центральных микроволноводах в одном из слоев. Благодаря связи между СВ, распространяющимися в отдельных слоях и каналах двуслойной структуры, меняются динамические свойства волновых процессов, что явным образом учитывается в численном моделировании при расчете величины динамического поля размагничивания. Также отметим, что численная модель структуры, сформированная двумя латеральными массивами магнитных микроволноводов, расположенных друг над другом, приводит к неоднородному распределению внутреннего магнитного поля вдоль ширины пленок.

На рис. 2, *a, b* источник СВ показан черными прямоугольниками, расположенными в левой части микроволноводов A_3 и A_4 , при этом длина данных микроволноводов была выбрана равной 6 мм, что на 2 мм превышало длину остальных волноводов из решетки. Распространение в волноводах нижнего слоя A_1 – A_6 показано на рис. 2, *a, c*, а в волноводах верхнего слоя A_7 – A_{12} — на рис. 2, *b, d*. Данный метод возбуждения позволяет реализовать возбуждение как симметричной, так и антисимметричной моды связанной структуры, состоящей из двух связанных микроволноводов. В настоящей работе был рассмотрен случай возбуждения симметричной моды [10]. Была исследована динамика распространения в решетке латерально и вертикально связанных ЖИГ-микроволноводов при помощи построения карт пространственного распределения величины динамической намагниченности $m_z(x, y)$ и интенсивности СВ. Под интенсивностью СВ понимается величина $I(x, y) = \sqrt{m_x^2(x, y) + m_y^2(x, y)}$.

В случае, когда величина латерального и вертикального зазора составляет 10 мкм, интенсивность СВ имеет максимум в двух центральных каналах, при этом при $x = 4$ мм наблюдается перераспределение интенсивности, а именно, мощность СВ передается из двух центральных каналов $A_{3,4}$ в боковые $A_{1,2,5,6}$. Затем в первом слое структуры, в котором расположены возбуждаемые волноводы, наблюдается локализация мощности СВ в области выходных секций центральных

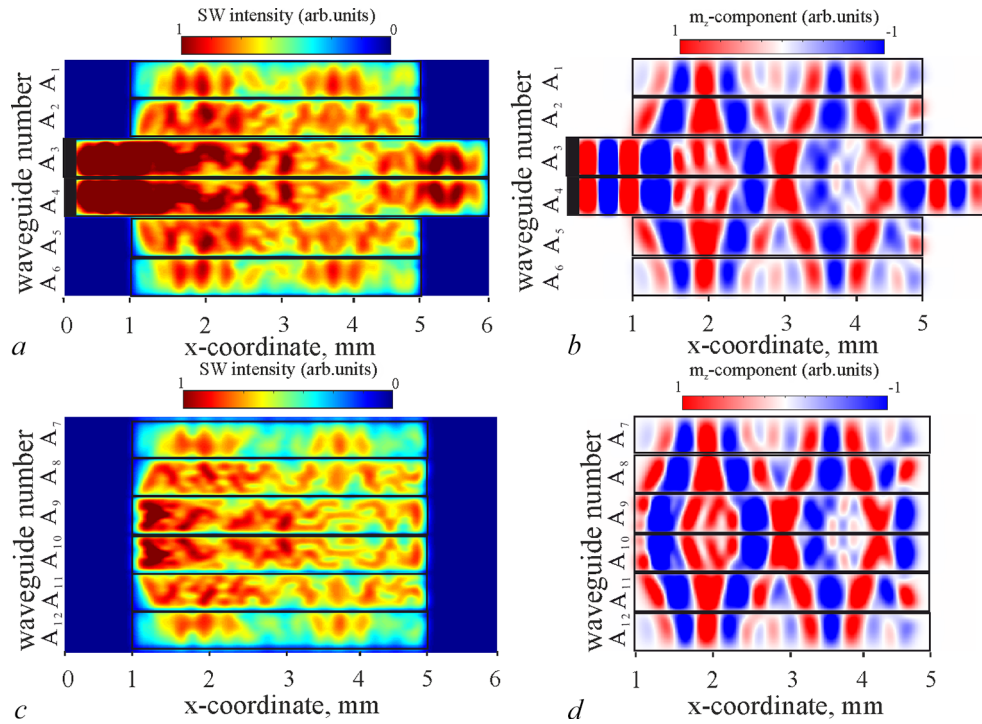


Рис. 2. *a, c* – Пространственное распределение интенсивности СВ, градациями цвета закодирована интенсивность СВ $I(x, y)$ на частоте 5.21 ГГц; *b, d* – карты пространственного распределения компоненты m_z динамической намагниченности для СВ, распространяющихся в решётке микроволноводов, где величина латерального и вертикального зазора составляет 10 мкм (цвет онлайн)

Fig. 2. *a, c* – Spatial distribution of SW intensity, where the color gradations encode the SW intensity $I(x, y)$ at the frequency 5.21 GHz; *b, d* – spatial maps distribution of the m_z component of the dynamic magnetisation for the SW propagating in the microwavguides lattice, where the lateral and vertical gaps are 10 μm (color online)

каналов $A_{3,4}$ (см. рис. 2). Видно, что во входной и выходной областях центральных каналов $A_{3,4}$ длина СВ составляет величину 800 мкм, что соответствует расчету дисперсии симметричной моды латеральной структуры с данными геометрическими размерами [10]. На рис. 2 изображена стационарная картина установления волнового процесса, при котором происходит распространение как в соседние микроволноводы внутри одного слоя, так и вертикальном направлении. Отметим, что в верхнем слое пространственное распределение компоненты m_z динамической намагниченности и интенсивность СВ отличаются от таковых в нижнем слое, а именно минимум локализации в каналах $A_{3,4}$ нижнего слоя наблюдается при $x = 4.05$ мм, в то время как в верхнем слое – при $x = 3.9$ мм.

При сравнении результатов численного моделирования для двух слоев ЖИГ, разделенных воздушным зазором (рис. 3), и для решетки микроволноводов размерностью 26 (см. рис. 2) видно, что влияние неоднородного распределения внутреннего магнитного поля в решетке микроволноводов приводит к уменьшению длины волны по сравнению с двуслойной структурой в 1.4 раза. Можно отметить, что при распространении СВ в центральной части двуслойной пленки структура поля волны обусловлена интерференцией поперечных спин-волновых мод. Так, в поперечном сечении при $1 < x < 5$ мм наблюдается профиль намагниченности, образованный целым числом длин полуволн $3\Lambda/2$, где $\Lambda = 2\pi/k_y$, что вызвано интерференцией первой и третьей ширинных мод с поперечными волновыми числами $k_y^I = \pi/(6c)$ и $k_y^{III} = \pi/(2c)$ и продольными волновыми числами $k_x^I = k_x^I(f)$ и $k_x^{III} = k_x^{III}(f)$ [22, 23]. Амплитуда поля при этом может быть описана соотношением $A(x, y) = a_I \Phi_I(y) \exp(-ik_x^I x) + a_{III} \Phi_{III}(y) \exp(-ik_x^{III} x)$, где функции $\Phi_{I,III}(y)$

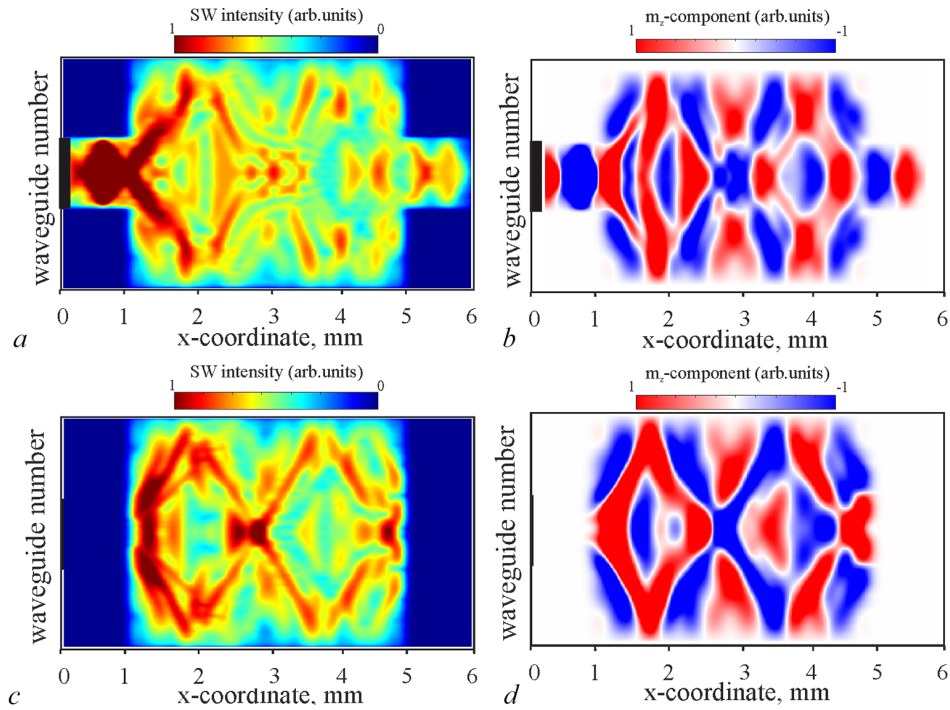


Рис. 3. *a, c* — Пространственное распределение интенсивности СВ; *b, d* — карты пространственного распределения компоненты m_z динамической намагниченности для СВ, распространяющихся в двуслойной структуре, где величина вертикального зазора составляет 10 мкм (цвет онлайн)

Fig. 3. *a, c* — Spatial distribution of the SW intensity; *b, d* — spatial maps distribution of the m_z component of the dynamic magnetisation for the SW propagating in a bilayer structure where the vertical gap is 10 μm (color online)

описывают поперечный профиль первой и третьей ширинных мод. В случае решетки связанных микроволноводов, разделенных латеральным зазором, можно наблюдать формирование периодической перекачки сигнала в каждом отдельном волноводе вдоль направления распространения волны. При этом максимум интенсивности в нижнем слое расположен на линии $x = 3.1$ мм, в то время как в верхнем слое максимум интенсивности СВ происходит при $x = 2.75$ мм.

Стоит отметить, что в случае решетки связанных микроволноводов с помощью микромагнитного моделирования можно исследовать режимы распространения сигнала при разных углах намагничивания. На рис. 4 приведено сравнение двух конфигураций: двух слоев ЖИГ, разделенных воздушным зазором, и решетки микроволноводов размерностью 26 при отклонении угла намагничивания структуры на 15° относительно направления оси y . Для сравнения в стационарном режиме распространения СВ при 0° происходит изменение длины СВ и ее локализация в каждом из микроволноводов. В связи с этим поперечная структура пучка трансформируется и наблюдается волновой процесс (перенос фазы СВ) внутри каждой из пленок в решетке. Такой метод изменения пространственного профиля пучка СВ в решетке связанных микроволноводов позволяет реализовать режим управления сигналом на выходе каналов $A_{3,4}$. Так, например, видно, что максимум амплитуды сигнала может разделяться между выходными секциями каналов A_3 или A_4 (рис. 4, *e*), при этом в верхнем слое амплитуды сигналов в секциях A_7 и A_{12} одинаковы при $x = 5$ мм. Для объяснения наблюдаемого поведения СВ при изменении угла намагничивания можно указать, что закон дисперсии $k_x^I = k_x^I(f)$, $k_x^{III} = k_x^{III}(f)$ меняется при изменении ориентации вектора магнитного поля [2, 23]. Это приводит к изменению результата интерференции поперечных мод спиновых волн в области $1 < x < 5$ мм, что проявляется в зигзагообразном виде профиля динамической намагниченности, изображенного на рис. 4, *a-d*. В случае решетки

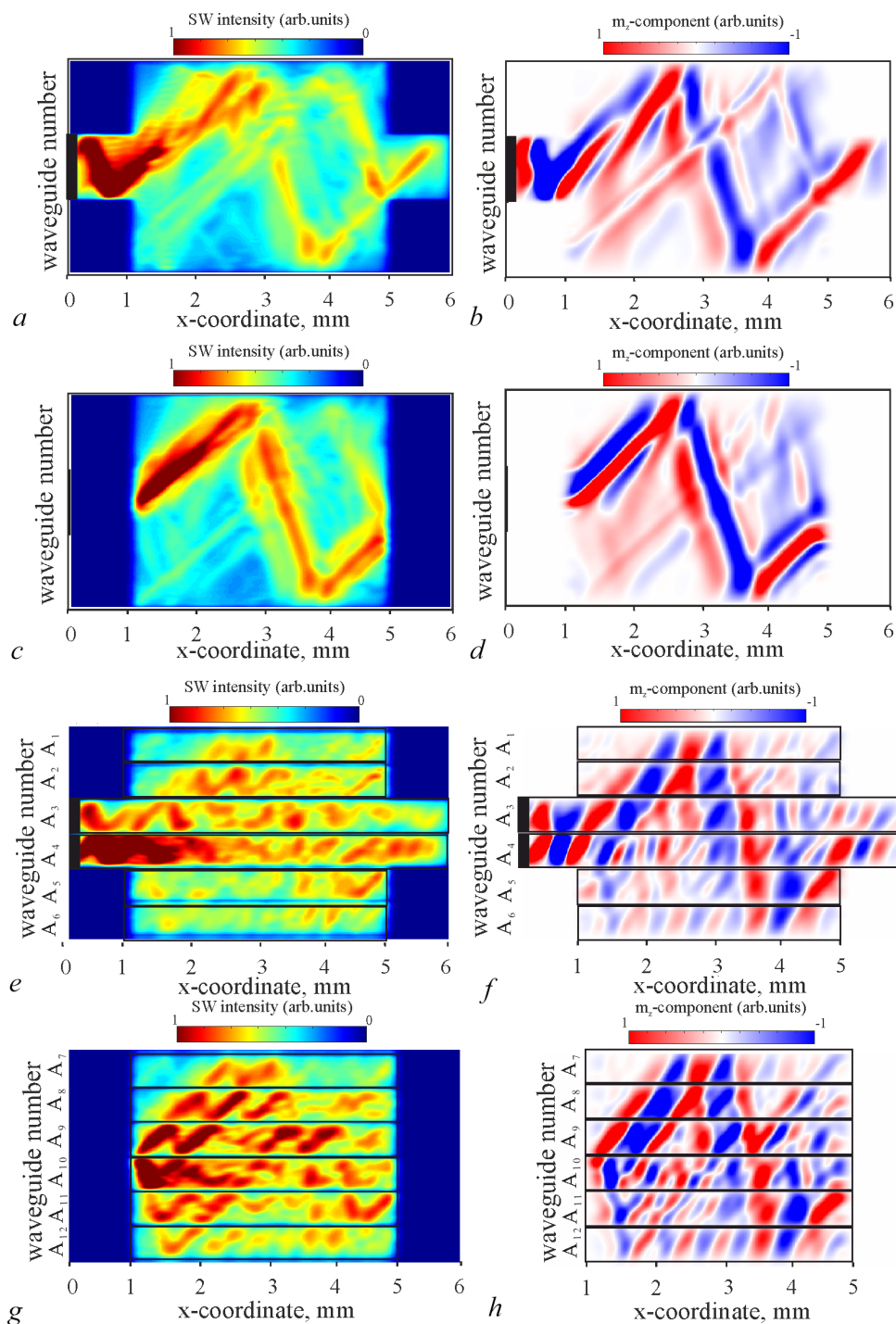


Рис. 4. *a, c, e, g* – пространственное распределение интенсивности СВ; *b, d, f, h* – карты пространственного распределения компоненты m_z динамической намагниченности для СВ (цвет онлайн)

Fig. 4. *a, c, e, g* – spatial distribution of the SW intensity; *b, d, f, h* – spatial maps distribution of the m_z component of the dynamic magnetisation for the SW (color online)

микроволноводов (рис. 4, *e–h*) меняется не только дисперсия СВ в отдельно взятом волноводе, но и величина связи спиновых волн, определяемая интегралом перекрытия собственных волн микроволноводов, расположенных рядом друг с другом.

3. Численная модель на основе связанных дискретных нелинейных уравнений Шрёдингера

Для описания процессов нелинейного распространения СВ в решётке микроволноводов построена численная модель на основе связанных дискретных НУШ [25, 26]:

$$i \frac{dA_{mn}}{dz} + \beta(\varphi)A_{mn} - C_L(\varphi) (A_{m(n+1)} + A_{m(n-1)}) + C_V(\varphi) (A_{(m+1)n} + A_{(m-1)n}) + \Gamma(\varphi)|A_{mn}|^2 A_{mn} = 0, \quad (1)$$

где A_{mn} — амплитуда сигнала в n -м микроволноводе m -го слоя, $\beta(\varphi)$ — коэффициент дисперсии одиночного микроволновода, $C_L(\varphi)$ — коэффициент связи между микроволноводами в латеральном (горизонтальном) направлении, $C_V(\varphi)$ — коэффициент связи между микроволноводами в вертикальном направлении, $\Gamma(\varphi)$ — коэффициент нелинейности. В данном случае для каждого волновода записывается одно уравнение, то есть в общей сложности 12 связанных уравнений.

Для получения коэффициента дисперсии $\beta(\varphi)$ был рассчитан спектр собственных мод одиночного микроволновода и построена дисперсия его первой собственной моды. Расчёт данной характеристики производился в статье [10] с помощью метода конечных элементов. При этом отметим, что $\beta(\varphi)$ имеет явную зависимость от угла намагничивания φ в диапазоне $0...15^\circ$ и приводит к увеличению внутреннего магнитного поля в ЖИГ микроволноводе [27].

Расчёт коэффициентов связи $C_L(\varphi)$ и $C_V(\varphi)$ также сводится к поиску собственных мод, но уже для системы из двух микроволноводов, имеющих дипольную связь в латеральном направлении ($C_L(\varphi)$) [10] и для системы, состоящей из двух вертикально связанных микроволноводов [11, 28]. Данные коэффициенты имеют следующий вид:

$$C_{L,V}(\varphi) = \frac{\pi}{2L_h(\varphi)}, \quad (2)$$

$$L_h(\varphi) = \frac{\pi}{\Delta k} = \frac{\pi}{|k_s - k_{as}|}, \quad (3)$$

где k_s и k_{as} — волновые числа для симметричной и антисимметричной моды в связанных микроволноводах. При этом поворот внешнего магнитного поля на φ в диапазоне $0...15^\circ$ так же, как в случае одиночного волновода, будет приводить к увеличению внутреннего магнитного поля в ЖИГ-микроволноводах и, следовательно, изменять значения k_s и k_{as} [22, 23]. Коэффициент нелинейности $\Gamma(\varphi)$ выражается в виде [29]

$$\Gamma(\varphi) = \frac{d\beta(\varphi)}{d|A_{m,n}|^2}. \quad (4)$$

Расчёт производной проводится аналитически, путем поиска корней дисперсионного уравнения для безграничной касательно намагниченной ферритовой плёнки [30]

$$f^2 - \left(f_H(\varphi) + \frac{f_M}{2} \right)^2 = - \left(\frac{f_M}{2} \right)^2 e^{-2|\beta|t}, \quad (5)$$

где t — толщина плёнки, где $f_M = \gamma 4\pi M$, $f_H = \gamma H_0$, $\gamma = 2.8$ МГц/Э — гиромангнитное отношение. При условии $f_M = f_{M_0} \{ |(A_{m,n})^2| \}$ получается следующий вид коэффициента нелинейности для ПМСВ:

$$\Gamma(\varphi) = \frac{2(2f^2 - 2f_H^2(\varphi) - f_H(\varphi)f_M(|A_{m,n}|^2))}{(4f^2 - 4f_H^2(\varphi) - 4f_H(\varphi)f_M|A_{m,n}|^2 - f_M^2|A_{m,n}|^2)t}. \quad (6)$$

На рис. 5, *a*, *b* показано распределение интенсивности СВ в рассматриваемой решётке ЖИГ-микроволноводов при различном значении амплитуды начального возбуждения. В случае линейного возбуждения СВ ($A_0 = 0.01$) (см. рис. 5, *a*), как и в случае микромагнитного моделирования, показанного выше, наблюдается перенос СВ между микроволноводами. На расстоянии от 2.5 до 3.5 мм в центральной области наблюдается фокусировка СВ. При увеличении амплитуды начального возбуждения $A_0 = 0.18$ (см. рис. 5, *b*) наблюдается увеличение интенсивности СВ в области центральных микроволноводов в результате увеличения длины связи СВ. Можно сказать, что в данном случае в решётке наблюдается режим самофокусировки СВ. Данный режим можно пронаблюдать на рис. 5, *c* при выводе амплитуды СВ вдоль ширины микроволноводов в сечении $z = 5$ мм (зелёная линия на рис. 5, *a*, *b*). В случае $A_0 = 0.18$ (синие квадраты) максимум интенсивности наблюдается в области центральных микроволноводов, в отличие от случая $A_0 = 0.01$ (красные круги).

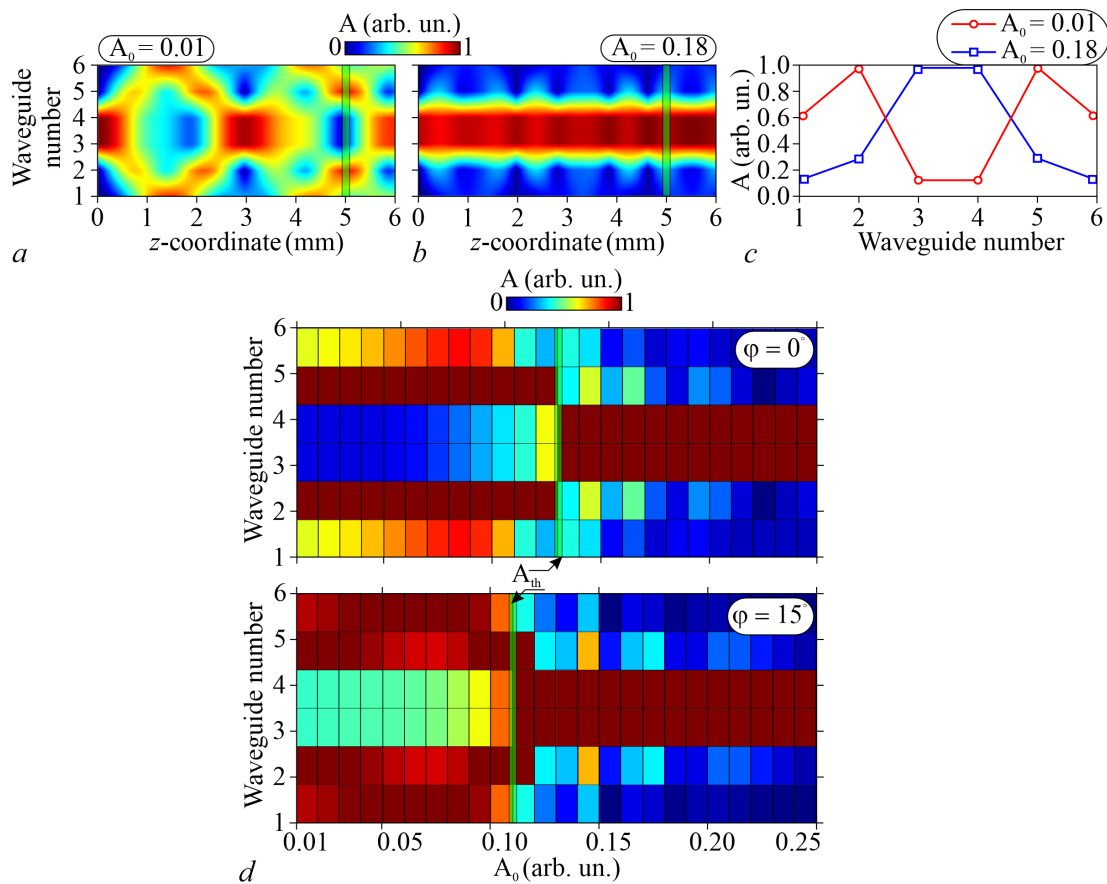


Рис. 5. *a* – Пространственное распределение амплитуды СВ, распространяющихся в решётке микроволноводов при начальной амплитуде возбуждения СВ: $A_0 = 0.01$ (*a*); 0.18 (*b*). *c* – Распределение амплитуды СВ вдоль направления оси y магнитных микроволноводов в сечении $z = 5$ мм для $A_0 = 0.01$ (красные круги) и $A_0 = 0.18$ (синие квадраты). *d* – Пространственные карты амплитуды СВ, распространяющихся в решётке микроволноводов в сечении $z = 5$ мм, как функция начальной амплитуды возбуждения СВ для разных значений угла намагничивания φ (значения φ указаны на рисунке) (цвет онлайн)

Fig. 5. *a* – Spatial distribution of the SW amplitude propagating in the microwaveguides grating at the initial amplitude of the SW excitation $A_0 = 0.01$ (*a*); 0.18 (*b*). *c* – Distribution of the SW amplitude along the y -axis of the magnetic microwaveguides grating in the section $z = 5$ mm for $A_0 = 0.01$ (red circles) and $A_0 = 0.18$ (blue squares). *d* – Spatial maps of the SW amplitude propagating in the microwaveguides grating in the $z = 5$ mm section as a function of the initial SW excitation amplitude for different values of the bias angle φ (the values of φ are given in the figure) (color online)

Модель на основе связанных НУШ позволяет исследовать влияние поворота угла намагничивания φ , поскольку коэффициенты β , $C_{L,V}$ и Γ имеют зависимость от величины внутреннего магнитного поля и от φ . На рис. 5, *d* показаны поперечные распределения интенсивности СВ в сечении $z = 5$ мм при увеличении амплитуды начального возбуждения A_0 (ось абсцисс) для двух значений угла намагничивания φ . В случае $\varphi = 0^\circ$ (верхняя карта на рис. 5, *d*) при $A_0 = 0.14$ в решётке микроволноводов наблюдается режим нелинейного переключения, данное значение можно назвать пороговым значением амплитуды A_{th} , при котором наблюдается обужение пучка. При повороте угла относительно направления оси y ($\varphi = 15^\circ$) порог нелинейного переключения снижается до значения $A_{th} = 0.11$ (нижняя карта на рис. 5, *d*). Таким образом, оказывается возможным управлять пространственным распределением интенсивности СВ в решётке магнитных микроволноводов путём одновременного изменения мощности входного сигнала и ориентации внешнего магнитного поля.

Заключение

В настоящей работе проведено исследование двойного управления характеристиками СВ в решетке ЖИГ-микроволноводов при реализации одновременно латерального и вертикального типа связи. Проведено исследование особенностей процессов формирования пучков спиновых волн для двуслойной структуры и решетки связанных магнитных волноводов. Выявлены особенности распространения и механизмы изменения пространственного распределения профиля спин-волнового пучка при совместном проявлении эффектов анизотропного распространения сигнала, дипольной связи и нелинейной зависимости параметров среды от мощности. На основе полученных пространственных распределений компонент динамической намагниченности СВ продемонстрировано изменение характера локализации мощности СВ в линейном и нелинейном режиме в выходных секциях микроволноводов. При этом показано, что отклонение угла намагничивания от направления, при котором в центральных каналах возбуждается поверхностная магнитостатическая волна, приводит к трансформации поперечной структуры спин-волнового пучка, позволяя менять положение пространственной локализации мощности СВ. Показана возможность изменения поперечного профиля спин-волнового пучка при изменении уровня начальной амплитуды сигнала, при этом при вариации угла намагничивания массива наблюдается сдвиг величины пороговой мощности, при которой появляется характерное обужение спин-волнового пучка. На основании результатов микромагнитного моделирования и расчетов по модельным системам дискретных связанных уравнений можно сделать вывод, что выбранные геометрические размеры структуры на основе магнитных микроволноводов соответствуют режимам фильтрации и возможности пространственно-частотного демультимплексирования сигнала, закодированного в виде амплитуды и фазы СВ. Помимо этого, решетка латерально и вертикально связанных микроволноводов представляет собой элемент межсоединений для трехмерных топологий магнитных сетей [31], демонстрируя при этом функциональные возможности обработки сигналов в различных приложениях, связанных с магнитной микроэлектроникой и спинтроникой.

Список литературы

1. Chumak A. V., Kabos P., Wu M., Abert C., Adelman 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., Bunyaev S. A., Carmiggelt J. J., Cheenikundil R. R., Ciubotaru F., Cotofana S., Csaba G., Dobrovolskiy O. V., Dubs C., Elyasi M., Fripp K. G., Fulara H., Golovchanskiy I. A., Gonzalez-Ballester C., Graczyk P., Grundler D., Gruszecki P., Gubbiotti G., Guslienko K., Haldar A., Hamdioui S., Hertel R., Hillebrands B., Hioki T., Houshang A., Hu C.-M., Huebl H., Huth M., Iacocca E., Jungfleisch M. B., Kakazei G. N., Khitun A., Khymyn R., Kikkawa T., Kläui M., Klein O., Klos J. W.,

- Knauer S., Koraltan S., Kostylev M., Krawczyk M., Krivorotov I. N., Kruglyak V. V., Lachance-Quirion D., Ladak S., Lebrun R., Li Y., Lindner M., Macêdo R., Mayr S., Melkov G. A., Mieszczak S., Nakamura Y., Nembach H. T., Nikitin A. A., Nikitov S. A., Novosad V., Otálora J. A., Otani Y., Papp A., Pigeau B., Pirro P., Porod W., Porrati F., Qin H., Rana B., Reimann T., Riente F., Romero-Isart O., Ross A., Sadovnikov A. V., Safin A. R., Saitoh E., Schmidt G., Schultheiss H., Schultheiss K., Serga A. A., Sharma S., Shaw J. M., Suess D., Surzhenko O., Szulc K., Taniguchi T., Urbánek M., Usami K., Ustinov A. B., van der Sar T., van Dijken S., Vasyuchka V. I., Verba R., Viola Kusminskiy S., Wang Q., Weides M., Weiler M., Wintz S., Wolski S. P., Zhang X.* Advances in magnetics roadmap on spin-wave computing // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2022. Vol. 58, no. 6. P. 0800172. DOI: 10.1109/TMAG.2022.3149664.
2. *Prabhakar A., Stancil D. D.* Spin Waves: Theory and Applications. New York: Springer, 2009. 348 p. DOI: 10.1007/978-0-387-77865-5.
 3. *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.
 4. *Vogt K., Schultheiss H., Jain S., Pearson J. E., Hoffmann A., Bader S. D., Hillebrands B.* Spin waves turning a corner // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101, no. 4. P. 042410. DOI: 10.1063/1.4738887.
 5. *Balynsky M., Gutierrez D., Chiang H., Kozhevnikov A., Dudko G., Filimonov Y., Balandin A. A., Khitun A.* A magnetometer based on a spin wave interferometer // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, no. 1. P. 11539. DOI: 10.1038/s41598-017-11881-y.
 6. *Raskhodchikov D., Bensmann J., Nikolaev K. O., Lomonte E., Jin L., Steeger P., Preuß J. A., Schmidt R., Schneider R., Kern J., de Vasconcellos S. M., Bratschitsch R., Demokritov S. O., Pernice W. H. P., Demidov V. E.* Propagation of spin waves in intersecting yttrium iron garnet nanowaveguides // *Phys. Rev. Applied*. 2022. Vol. 18, no. 5. P. 054081. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.18.054081.
 7. *Sadovnikov A. V., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Stognij A. I., Novitski N. N., Sakharov V. K., Khivintsev Y. V., Nikitov S. A.* Route toward semiconductor magnonics: Light-induced spin-wave nonreciprocity in a YIG/GaAs structure // *Phys. Rev. B*. 2019. Vol. 99, no. 5. P. 054424. DOI: 10.1103/PhysRevB.99.054424.
 8. *Sakharov V., Khivintsev Y., Vysotskii S., Stognij A., Filimonov Y., Sadovnikov A., Beginin E., Nikitov S.* Spin wave filtration by resonances in the sidewalls of corrugated yttrium-iron garnet films // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022. Vol. 545. P. 168786. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168786.
 9. *Martyshkin A. A., Davies C. S., Sadovnikov A. V.* Magnonic interconnections: Spin-wave propagation across two-dimensional and three-dimensional junctions between yttrium iron garnet magnonic stripes // *Phys. Rev. Applied*. 2022. Vol. 18, no. 6. P. 064093. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.18.064093.
 10. *Sadovnikov A. V., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Romanenko D. V., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Directional multimode coupler for planar magnonics: Side-coupled magnetic stripes // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107, no. 20. P. 202405. DOI: 10.1063/1.4936207.
 11. *Sasaki H., Mikoshiba N.* Directional coupling of magnetostatic surface waves in a layered structure of YIG films // *J. Appl. Phys.* 1981. Vol. 52, no. 5. P. 3546–3552. DOI: 10.1063/1.329134.
 12. *Morozova M. A., Sharaevskaya A. Y., Sadovnikov A. V., Grishin S. V., Romanenko D. V., Beginin E. N., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic structures // *J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 120, no. 22. P. 223901. DOI: 10.1063/1.4971410.
 13. *Дудко Г. М., Филимонов Ю. А.* Самофокусировка ограниченных пучков обратных объемных магнитостатических волн в ферромагнитных плёнках: численный эксперимент // *Известия вузов. ПНД*. 1997. Т. 5, № 6. С. 29–40.

14. *Ustinov A. B., Drozdovskii A. V., Kalinikos B. A.* Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96, no. 14. P. 142513. DOI: 10.1063/1.3386540.
15. *Ganguly A. K., Vittoria C.* Magnetostatic wave propagation in double layers of magnetically anisotropic slabs // *J. Appl. Phys.* 1974. Vol. 45, no. 10. P. 4665–4667. DOI: 10.1063/1.1663113.
16. *Puszkarski H.* Theory of interface magnons in magnetic multilayer films // *Surface Science Reports.* 1994. Vol. 20, no. 2. P. 45–110. DOI: 10.1016/0167-5729(94)90011-6.
17. *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, no. 10. P. 107133. DOI: 10.1063/1.4899186.
18. *Gubbiotti G., Sadovnikov A., Beginin E., Nikitov S., Wan D., Gupta A., Kundu S., Talmelli G., Carpenter R., Asselberghs I., Radu I. P., Adelmann C., Ciubotaru F.* Magnonic band structure in vertical meander-shaped Co₄₀Fe₄₀B₂₀ thin films // *Phys. Rev. Applied.* 2021. Vol. 15, no. 1. P. 014061. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.014061.
19. *Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes // *Phys. Rev. B.* 2017. Vol. 96, no. 14. P. 144428. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.144428.
20. *Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Nonlinear lateral spin-wave transport in planar magnonic networks // *IEEE Magnetics Letters.* 2018. Vol. 9. P. 3707105. DOI: 10.1109/LMAG.2018.2874349.
21. *Вашковский А. В., Стальмахов А. В.* Дисперсия магнитостатических волн в двухслойных структурах феррит–феррит // *Радиотехника и электроника.* 1984. Т. 29, № 5. С. 901–907.
22. *Grachev A. A., Sheshukova S. E., Kostylev M. P., Nikitov S. A., Sadovnikov A. V.* Reconfigurable dipolar spin-wave coupling in a bilateral yttrium iron garnet structure // *Phys. Rev. Applied.* 2023. Vol. 19, no. 5. P. 054089. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.19.054089.
23. *Odincov S. A., Grachev A. A., Nikitov S. A., Sadovnikov A. V.* Intensity and magnetization angle reconfigurable lateral spin-wave coupling and transport // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2020. Vol. 500. P. 166344. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166344.
24. *Gurevich A. G., Melkov G. A.* Magnetization Oscillations and Waves. London: CRC Press, 1996. 456 p.
25. *Lederer F., Stegeman G. I., Christodoulides D. N., Assanto G., Segev M., Silberberg Y.* Discrete solitons in optics // *Phys. Rep.* 2008. Vol. 463, no. 1–3. P. 1–126. DOI: 10.1016/j.physrep.2008.04.004.
26. *Кившарь Ю. С., Агравал Г. П.* Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 648 с.
27. *Садовников А. В., Грачев А. А., Бегинин Е. Н., Одинцов С. А., Шешукова С. Е., Шараевский Ю. П., Сердобинцев А. А., Митин Д. М., Никитов С. А.* Связанные спиновые волны в индуцированных упругими деформациями магнитных волноводах в структуре ЖИГ-пьезоэлектрик // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики.* 2017. Т. 106, № 7. С. 445–450. DOI: 10.7868/S0370274X17190092.
28. *Sasaki H., Mikoshiba N.* Directional coupling of magnetostatic surface waves in layered magnetic thin films // *Electronics Letters.* 1979. Vol. 15, no. 6. P. 172–174. DOI: 10.1049/el:19790121.
29. *Зависляк И. В., Тычинский А. В.* Физические основы функциональной микроэлектроники. Киев: УМК ВО, 1989. 105 с.
30. *Damon R. W., Eshbach J. R.* Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* 1961. Vol. 19, no. 3–4. P. 308–320. DOI: 10.1016/0022-3697(61)90041-5.
31. *Gubbiotti G.* Three-Dimensional Magnonics: Layered, Micro- and Nanostructures. New York: Jenny Stanford Publishing, 2019. 416 p. DOI: 10.1201/9780429299155.

References

1. Chumak AV, Kabos P, Wu M, Abert C, Adelman C, Adeyeye AO, Åkerman J, Aliev FG, Anane A, Awad A, Back CH, Barman A, Bauer GEW, Becherer M, Beginin EN, Bittencourt VASV, Blanter YM, Bortolotti P, Boventer I, Bozhko DA, Bunyayev SA, Carmiggelt JJ, Cheenikundil RR, Ciubotaru F, Cotofana S, Csaba G, Dobrovolskiy OV, Dubs C, Elyasi M, Fripp KG, Fulara H, Golovchanskiy IA, Gonzalez-Ballester C, Graczyk P, Grundler D, Gruszecki P, Gubbiotti G, Gusliencko K, Haldar A, Hamdioui S, Hertel R, Hillebrands B, Hioki T, Houshang A, Hu C-M, Huebl H, Huth M, Iacocca E, Jungfleisch MB, Kakazei GN, Khitun A, Khymyn R, Kikkawa T, Kläui M, Klein O, Klos JW, Knauer S, Koraltan S, Kostylev M, Krawczyk M, Krivorotov IN, Kruglyak VV, Lachance-Quirion D, Ladak S, Lebrun R, Li Y, Lindner M, Macêdo R, Mayr S, Melkov GA, Mieszczyk S, Nakamura Y, Nembach HT, Nikitin AA, Nikitov SA, Novosad V, Otálora JA, Otani Y, Papp A, Pigeau B, Pirro P, Porod W, Porrati F, Qin H, Rana B, Reimann T, Riente F, Romero-Isart O, Ross A, Sadovnikov AV, Safin AR, Saitoh E, Schmidt G, Schultheiss H, Schultheiss K, Serga AA, Sharma S, Shaw JM, Suess D, Surzhenko O, Szulc K, Taniguchi T, Urbánek M, Usami K, Ustinov AB, van der Sar T, van Dijken S, Vasyuchka VI, Verba R, Viola Kusminskiy S, Wang Q, Weides M, Weiler M, Wintz S, Wolski SP, Zhang X. Advances in magnetism roadmap on spin-wave computing. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2022;58(6): 0800172. DOI: 10.1109/TMAG.2022.3149664.
2. Prabhakar A, Stancil DD. *Spin Waves: Theory and Applications*. New York: Springer; 2009. 348 p. DOI: 10.1007/978-0-387-77865-5.
3. 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.
4. Vogt K, Schultheiss H, Jain S, Pearson JE, Hoffmann A, Bader SD, Hillebrands B. Spin waves turning a corner. *Appl. Phys. Lett.* 2012;101(4):042410. DOI: 10.1063/1.4738887.
5. Balynsky M, Gutierrez D, Chiang H, Kozhevnikov A, Dudko G, Filimonov Y, Balandin AA, Khitun A. A magnetometer based on a spin wave interferometer. *Scientific Reports*. 2017;7(1): 11539. DOI: 10.1038/s41598-017-11881-y.
6. Raskhodchikov D, Bensmann J, Nikolaev KO, Lomonte E, Jin L, Steeger P, Preuß JA, Schmidt R, Schneider R, Kern J, de Vasconcellos SM, Bratschitsch R, Demokritov SO, Pernice WHP, Demidov VE. Propagation of spin waves in intersecting yttrium iron garnet nanowaveguides. *Phys. Rev. Applied*. 2022;18(5):054081. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.18.054081.
7. Sadovnikov AV, Beginin EN, Sheshukova SE, Sharaevskii YP, Stognij AI, Novitski NN, Sakharov VK, Khivintsev YV, Nikitov SA. Route toward semiconductor magnonics: Light-induced spin-wave nonreciprocity in a YIG/GaAs structure. *Phys. Rev. B*. 2019;99(5):054424. DOI: 10.1103/PhysRevB.99.054424.
8. Sakharov V, Khivintsev Y, Vysotskii S, Stognij A, Filimonov Y, Sadovnikov A, Beginin E, Nikitov S. Spin wave filtration by resonances in the sidewalls of corrugated yttrium-iron garnet films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022;545:168786. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168786.
9. Martyshkin AA, Davies CS, Sadovnikov AV. Magnonic interconnections: Spin-wave propagation across two-dimensional and three-dimensional junctions between yttrium iron garnet magnonic stripes. *Phys. Rev. Applied*. 2022;18(6):064093. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.18.064093.
10. Sadovnikov AV, Beginin EN, Sheshukova SE, Romanenko DV, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Directional multimode coupler for planar magnonics: Side-coupled magnetic stripes. *Appl. Phys. Lett.* 2015;107(20):202405. DOI: 10.1063/1.4936207.
11. Sasaki H, Mikoshiha N. Directional coupling of magnetostatic surface waves in a layered structure of YIG films. *J. Appl. Phys.* 1981;52(5):3546–3552. DOI: 10.1063/1.329134.

12. Morozova MA, Sharaevskaya AY, Sadovnikov AV, Grishin SV, Romanenko DV, Beginin EN, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic structures. *J. Appl. Phys.* 2016;120(22):223901. DOI: 10.1063/1.4971410.
13. Dudko GM, Filimonov YA. Self-focusing of confined beams of backward volume magnetostatic waves in ferromagnetic films: a numerical experiment. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 1997;5(6):29–40 (in Russian).
14. Ustinov AB, Drozdovskii AV, Kalinikos BA. Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing. *Appl. Phys. Lett.* 2010;96(14):142513. DOI: 10.1063/1.3386540.
15. Ganguly AK, Vittoria C. Magnetostatic wave propagation in double layers of magnetically anisotropic slabs. *J. Appl. Phys.* 1974;45(10):4665–4667. DOI: 10.1063/1.1663113.
16. Puzskarski H. Theory of interface magnons in magnetic multilayer films. *Surface Science Reports.* 1994;20(2):45–110. DOI: 10.1016/0167-5729(94)90011-6.
17. Vansteenkiste A, Leliaert J, Dvornik M, Helsen M, Garcia-Sanchez F, Van Waeyenberge B. The design and verification of MuMax3. *AIP Advances.* 2014;4(10):107133. DOI: 10.1063/1.4899186.
18. Gubbiotti G, Sadovnikov A, Beginin E, Nikitov S, Wan D, Gupta A, Kundu S, Talmelli G, Carpenter R, Asselberghs I, Radu IP, Adelmann C, Ciubotaru F. Magnonic band structure in vertical meander-shaped Co₄₀Fe₄₀B₂₀ thin films. *Phys. Rev. Applied.* 2021;15(1):014061. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.014061.
19. Sadovnikov AV, Odintsov SA, Beginin EN, Sheshukova SE, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes. *Phys. Rev. B.* 2017;96(14):144428. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.144428.
20. Sadovnikov AV, Odintsov SA, Sheshukova SE, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Nonlinear lateral spin-wave transport in planar magnonic networks. *IEEE Magnetics Letters.* 2018;9:3707105. DOI: 10.1109/LMAG.2018.2874349.
21. Vashkovskii AV, Stalmakhov AV. Dispersion of magnetostatic waves in two-layer ferrite-ferrite structures. *Radio Engineering and Electronic Physics.* 1984;29(5):901–907 (in Russian).
22. Grachev AA, Sheshukova SE, Kostylev MP, Nikitov SA, Sadovnikov AV. Reconfigurable dipolar spin-wave coupling in a bilateral yttrium iron garnet structure. *Phys. Rev. Applied.* 2023;19(5):054089. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.19.054089.
23. Odincov SA, Grachev AA, Nikitov SA, Sadovnikov AV. Intensity and magnetization angle reconfigurable lateral spin-wave coupling and transport. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2020;500:166344. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166344.
24. Gurevich AG, Melkov GA. *Magnetization Oscillations and Waves.* London: CRC Press; 1996. 456 p.
25. Lederer F, Stegeman GI, Christodoulides DN, Assanto G, Segev M, Silberberg Y. Discrete solitons in optics. *Phys. Rep.* 2008;463(1–3):1–126. DOI: 10.1016/j.physrep.2008.04.004.
26. Kivshar YS, Agrawal GP. *Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals.* Waltham: Academic Press; 2003. 540 p.
27. Sadovnikov AV, Grachev AA, Beginin EN, Odintsov SA, Sheshukova SE, Sharaevskii YP, Serdobintsev AA, Mitin DM, Nikitov SA. Coupled spin waves in magnetic waveguides induced by elastic deformations in YIG–piezoelectric structures. *JETP Letters.* 2017;106(7):465–469. DOI: 10.1134/S0021364017190110.
28. Sasaki H, Mikoshiba N. Directional coupling of magnetostatic surface waves in layered magnetic thin films. *Electronics Letters.* 1979;15(6):172–174. DOI: 10.1049/el:19790121.
29. Zavislyak IV, Tychinskii AV. *Physical Principles of Functional Microelectronics.* Kyiv: UMK VO; 1989. 105 p. (in Russian).
30. Damon RW, Eshbach 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.
31. Gubbiotti G. *Three-Dimensional Magnonics: Layered, Micro- and Nanostructures.* New York: Jenny Stanford Publishing; 2019. 416 p. DOI: 10.1201/9780429299155.



Хутиева Анна Борисовна — родилась в городе Кокшетау (Казахстан). Магистрант факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета по специальности «Прикладные математика и физика». Научные интересы: планарные структуры, метаматериалы, системы обработки и передачи информации.

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, лаборатория «Метаматериалы»
E-mail: abkhutieva@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4234-420X
AuthorID (eLibrary.Ru): 1100589



Грачев Андрей Андреевич — родился в Саратове (1994). Окончил бакалавриат (2015, «Радиофизика») и магистратуру (2017, «Прикладные математика и физика») факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета. Кандидат физико-математических наук (2022, «Радиофизика»). Заведующий лабораторией «Метаматериалы» СГУ. Постоянный участник научных конференций. Научные интересы: планарные структуры, метаматериалы, системы обработки и передачи информации, бриллюэновская спектроскопия, управляемые микро- и наноструктуры. Имеет 28 научных статей в реферируемых научных журналах.

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, лаборатория «Метаматериалы»
E-mail: andrew.a.grachev@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2023-910X
AuthorID (eLibrary.Ru): 967348



Бегинин Евгений Николаевич — родился в 1962 году. Окончил с отличием Саратовский государственный университет (1984). Кандидат физико-математических наук (1997, «Радиофизика»). Заведующий кафедрой нелинейной физики (с 2018 года). Автор 2 коллективных монографий, автор более 80 статей в центральных реферируемых отечественных и зарубежных научных журналах, более 10 патентов на изобретения и полезные модели.

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, лаборатория «Метаматериалы»
E-mail: egbegin@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7138-8282
AuthorID (eLibrary.Ru): 162724



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