

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2021. Т. 29, № 2
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2021;29(2)

Научная статья

УДК 537.562.2; 537.862

DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-2-302-316

Микромагнитное моделирование эффекта самофокусировки обратных объемных магнитостатических волн в пленках железоиттриевого граната

Г. М. Дудко¹✉, Ю. В. Хивинцев^{1,2}, В. К. Сахаров¹, А. В. Кожевников¹,
С. Л. Высоцкий^{1,2}, М. Е. Селезнёв^{1,2}, Ю. А. Филимонов^{1,2}

¹Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия

²Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Россия

E-mail: ✉dugal_2010@hotmail.com, khivintsev@gmail.com, valentin@sakharov.info, kzhavl@gmail.com,
vysotsl@gmail.com, mixanich94@mail.ru, yuri.a.filimonov@gmail.com

Поступила в редакцию 14.12.2020, принята к публикации 29.01.2021, опубликована 31.03.2021

Аннотация. Тема. Проведено микромагнитное моделирование распространения волновых пучков обратных объемных магнитостатических волн, возбуждаемых антенной, помещенной в центре пленки железоиттриевого граната. Цель работы – численными методами исследовать фокусировку пучка обратных объемных магнитостатических волн с ростом амплитуды возбуждающего поля на антенне в условиях, когда для этих волн разрешены только четырехмагнотонные процессы. Методы. Задача решалась с помощью микромагнитного моделирования конечно-разностным методом решения уравнения Ландау–Лифшица с использованием пакета программ OOMMF. Результаты. Показано, что в зависимости от положения частоты сигнала в спектре обратных объемных магнитостатических волн рост амплитуды входного сигнала выше некоторого порога может приводить как к эффекту фокусировки волнового пучка за счет развития модуляционной неустойчивости, так и к пространственно-временной хаотизации распределения амплитуды в пучке из-за четырехмагнотонных распадных процессов. Смена характера неустойчивости пучка обратных объемных магнитостатических волн при изменении частоты связывается с изменением углового спектра пучка и характера взаимодействия обратных объемных магнитостатических волн с латеральными («ширинными») модами пленки. Полученные результаты могут быть использованы при анализе эффектов распространения нелинейных спиновых волн в пленочных волноводах на основе железоиттриевого граната.

Ключевые слова: микромагнитное моделирование, обратные объемные магнитостатические волны, модуляционная и параметрическая неустойчивости, самофокусировка.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01673).

Для цитирования: Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Селезнёв М. Е., Филимонов Ю. А. Микромагнитное моделирование эффекта самофокусировки обратных объемных магнитостатических волн в пленках железоиттриевого граната // Известия вузов. ПНД. 2021. Т. 29, № 2. С. 302–316.

DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-2-302-316

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

Micromagnetic modeling of self-focusing effect of backward volume magnetostatic waves in iron-yttrium garnet films

G. M. Dudko¹✉, Y. V. Khivintsev^{1,2}, V. K. Sakharov¹, A. V. Kozhevnikov¹,
S. L. Vysotskii^{1,2}, M. E. Seleznev^{1,2}, Y. A. Filimonov^{1,2}

¹Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russia

²Saratov State University, Russia

E-mail: ✉dugal_2010@hotmail.com, khivintsev@gmail.com, valentin@sakharov.info,
kzhavl@gmail.com vysotsl@gmail.com, mixanich94@mail.ru, yuri.a.filimonov@gmail.com

Received 14.12.2020, accepted 29.01.2021, published 31.03.2021

Abstract. *Topic.* Micromagnetic modeling of the propagation of backward volume magnetostatic waves (MSBVW) beams, excited by an antenna, placed in the center of yttrium iron garnet (YIG) film, has been carried out. *Aim.* To explore MSBVW-beam focusing with an increase in the amplitude of the exciting field at the antenna under conditions when only four-magnon (4M) processes are allowed for the MSBVW. *Methods.* The problem was solved using micromagnetic modeling by the finite-difference method solving the Landau–Lifshitz equation using the OOMMF software package. *Results.* It is shown that, depending on the position of the signal frequency in the MSBVW spectrum, an increase in the amplitude of the input signal above a certain threshold can lead to both the effect of wave beam focusing due to the development of modulation instability and the spatiotemporal chaotization of the amplitude distribution in the beam due to 4M decay processes. Changing of MSBVW-beam instability character at the frequency variation is associated with a change in the angular spectrum width of the beam and interaction between MSBVW and so-called «width» modes of the film. The obtained results can be used to analyze the effects of the propagation of nonlinear spin waves in YIG film waveguides.

Keywords: micromagnetic simulation, backward volume magnetostatic waves, modulation and parametric instabilities, self-focusing.

Acknowledgements. This research is supported by the Russian Science Foundation (grant no. 17-19-01673).

For citation: Dudko GM, Khivintsev YV, Sakharov VK, Kozhevnikov AV, Vysotskii SL, Seleznev ME, Filimonov YA. Micromagnetic modeling of self-focusing effect of backward volume magnetostatic waves in iron-yttrium garnet films. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2021;29(2):302–316. DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-2-302-316

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

Введение

Эффекты распространения направленных пучков дипольных магнитостатических спиновых волн (МСВ), фокусировки и дифракции на различного рода неоднородностях в магнитных пленках могут использоваться для построения квазиоптических аналогов СВЧ-элементов (линз, призм, зеркал, делителей) на МСВ, интегрированных непосредственно с пленочным волноводом МСВ [1–3]. В последние годы, в связи с бурным развитием магноники [4], особое внимание было уделено возможности управляемой фокусировки распространяющихся спиновых волн (СВ) с длинами волн λ микронных и субмикронных размеров [5–19]. Такая фокусировка позволяет сконцентрировать энергию спиновых волн в небольшой области пространства, что важно, например, для построения спиновой логики на основе интерференции СВ и эффективного считывания магнитных битов [20], частотного мультиплексирования [21] и спектрального анализа [22]. Кроме того, сильная локальная концентрация энергии спиновой волны может использоваться для стимулирования нелинейных явлений, например, генерации второй гармоники [23] и самовоздействия [24], приводящего к самофокусировке волновых пучков [25–28]. В данной работе методом микромагнитного моделирования в рамках подхода OOMMF [29] исследовано влияние амплитуды входного сигнала на распределение амплитуды волнового пучка обратных объемных магнитостатических волн (ОМСВ) при распространении в пленке железо-иттриевого граната (ЖИГ).

Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Кожеевников А. В.,
Высоцкий С. Л., Селезнёв М. Е., Филимонов Ю. А.

Известия вузов. ПНД, 2021, т. 29, № 2

Отметим, что для моделирования эффекта самофокусировки ООМСВ часто используется подход на основе численного решения нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) для огибающей МСВ [24–28, 30]. Особенностью подхода на основе НУШ является требование малости пространственных возмущений на длинах пробега, сопоставимых с длиной волны λ ООМСВ. Микромагнитное моделирование [29] это ограничение легко преодолевает, но накладывает менее жесткие ограничения на размер области фазового пространства (ω, k) (ω – частота, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число) для возмущений, определяемые временным шагом и параметрами численной сетки по пространству или размерами антенны и микроструктуры. Отметим, что микромагнитное моделирование ранее применялось для анализа спин-волновых неустойчивостей в пленках пермаллоя нанометровой толщины, вызванных спин-поляризованным током [31, 32], возбуждения СВ параметрической накачкой [33] и анализа неустойчивости дипольных латеральных МСВ в тонкопленочных крестовидных структурах [34].

1. Моделирование и обсуждение полученных результатов

Геометрия задачи показана на вставке к рис. 1. Рассматривалась пленка ЖИГ толщиной $d = 7.2$ мкм и плоскостными размерами $L_x = 4$ мм, $L_y = 3$ мм. Магнитные параметры

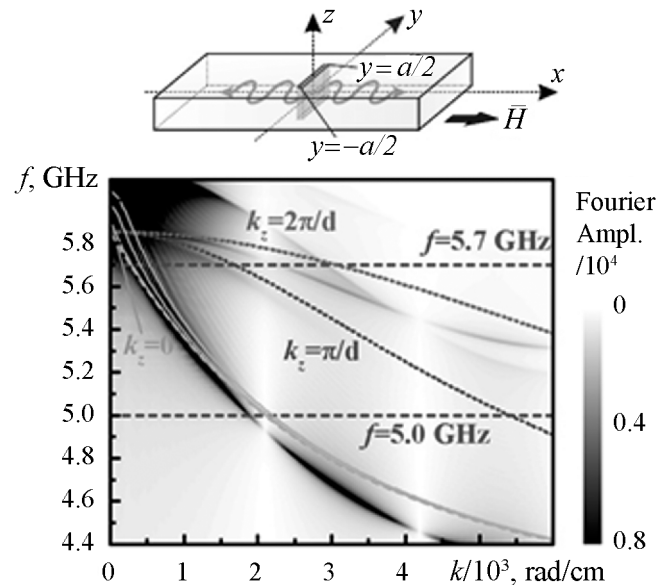


Рис. 1. Спектр ООМСВ в пленке с выбранными параметрами. Расчет с помощью выражения (1). Пунктирными линиями результат для первых трех объемных мод $N = 0, 1, 2$ с $k_z = \pi N/d$ в приближении безграничной пленки. Сплошные линии отвечают подстановке в (2) значений $\tilde{n} = (2n + 1) \cdot L_y/a$, $n = 0, 1, 2, \dots$, $a = 500$ мкм с учетом конечной ширины пленки $L_y = 3$ мм. Тоновыми линиями показан спектр, полученный в результате фурье-преобразования релаксационных колебаний намагниченности $m_z(x, y, z, t)$ в рассматриваемой структуре $L_x = 4$ мм, $L_y = 3$ мм после подачи на входную антенну импульса поля длительностью 100 пс. На вставке к рисунку показана геометрия задачи. Поле $H = 1391$ Ое направлено вдоль оси $0x$

Fig. 1. Spectrum of MSBVW in the film with the chosen parameters. Calculation is done using expression (1). Dotted lines show the result for the first three bulk modes $N = 0, 1, 2$ with $k_z = \pi N/d$ in the infinite film approximation. Solid lines correspond to the substitution in (2) of the values $\tilde{n} = (2n + 1) \cdot L_y/a$, $n = 0, 1, 2, \dots$, $a = 500$ μm taking into account the finite film width $L_y = 3$ mm. The tonal lines show the spectrum obtained as a result of the Fourier transform of relaxation oscillations of the magnetization $m_z(x, y, z, t)$ in the structure under consideration $L_x = 4$ mm, $L_y = 3$ mm after a field pulse with a duration of 100 ps is applied to the input antenna. The inset to the figure shows the geometry of the problem. The field $H = 1391$ Oe is directed along the $0x$ axis

Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Кожевников А. В.,
Высоцкий С. Л., Селезнёв М. Е., Филимонов Ю. А.
Известия вузов. ПНД, 2021, т. 29, № 2

пленки характеризуются гиромангнитным отношением $\gamma = 1.76 \cdot 10^7$ рад/(Э·с), намагниченностью насыщения $4\pi M = 1750$ Гс, обменной жесткостью $A = 3.5 \cdot 10^{-7}$ эрг/см, параметром релаксации спиновых волн $\alpha = 0.001$. Считалось, что внешнее поле $H = 1391$ Э направлено по оси Ox , вдоль длинной стороны пленки. Отметим, что выбранные параметры пленки и поля H соответствуют эксперименту по исследованию распространения нелинейных пучков ООМСВ [25] в условиях четырехмагнотных процессов, а также моделированию самофокусировки ООМСВ на основе НУШ [30]. Возбуждение МСВ осуществляется антенной с апертурой $a = 500$ мкм и шириной $w = 30$ мкм, расположенной параллельно оси Oy в центре пленки. Возбуждение МСВ моделировалось добавкой к постоянному полю H поля $h_z = A(y) \cos(\omega_p t)$, направленного перпендикулярно поверхности пленки. Здесь t – время, ω_p – частота сигнала накачки, $A(y)$ – апертурная функция, которая бралась в виде $A(y) = A_0 \cos(\pi y/a)$, A_0 – амплитуда поля в эрстедах. Поле h_z считалось однородным по ширине антенны и локализованным в области под входным преобразователем.

Распространение МСВ в пленке анализировалось с помощью пакета микромагнитного моделирования ООММФ [29]. Расчетную область $4 \text{ мм} \times 3 \text{ мм} \times 7.2 \text{ мкм}$ разбивали на $800 \times 600 \times 3$ ячеек, что эквивалентно размеру ячейки численной сетки $(5 \times 5 \times 2.4) \text{ мкм}^3$. Шаг по времени составлял 0.01 нс. Для расчета спектра сигнала и анализа распределения полей МСВ по структуре использовалась зависимость нормальной к поверхности структуры компоненты СВЧ намагниченности $m_z(x, y, z, t)$. Время моделирования T_c принимали равным 200 нс, что превышало максимальное время пробега МСВ по структуре. Необходимо отметить, что величина шага численной сетки определяет минимальные значения длины волны λ , которые будут учитываться в численном моделировании. Если предположить, что численная сетка «захватывает» волну, когда на ее длине укладывается не менее 5 точек, то для выбранного шага сетки по плоскости волновода в 5 мкм будут учитываться волны длиной $\lambda \geq 25$ мкм. Это значит, что влияние коротковолновой (существенно обменной) части спектра пленки на результаты микромагнитного моделирования отсутствует, и при моделировании учитываются лишь преимущественно дипольные МСВ, заключенные в объеме фазового пространства (ω, k_x, k_y) , ограниченном значениями волновых чисел $k \leq 2500 \text{ см}^{-1}$.

Отметим, что выбранная геометрия задачи отвечает возбуждению входной антенной ООМСВ с законом дисперсии [35]:

$$\omega = \sqrt{(\omega_H + \omega_{ex}) \cdot (\omega_H + \omega_{ex} + \omega_m F_{00})}, \quad (1)$$

где $\omega_m = \gamma 4\pi M$, $\omega_H = \gamma H$, $\omega_{ex} = (\omega_m A k^2)/(2\pi M^2)$,

$$F_{00} = 1 + P_{00} \left[(1 - P_{00}) \left(\frac{\omega_m}{\omega_H + \omega_{ex}} \right) \left(\frac{k_y}{k} \right)^2 - \left(\frac{k_x}{k} \right)^2 \right],$$

$$P_{00} = 1 - \frac{1 - e^{-kd}}{kd},$$

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}, \quad k_z = \pi N/d.$$

На рис. 1 пунктирными линиями приведены дисперсионные кривые объемных мод ООМСВ $N = 0, 1, 2, \dots$, рассчитанные с помощью (1) при выбранных параметрах для безграничной пленки ($L_{x,y} \rightarrow \infty$). Учет латерального квантования приведет к появлению «ширинных» мод в спектре [36]. Такие «ширинные» моды характеризуются суперпозицией парциальных волн с направлениями волнового вектора $\vec{k}$ под углом θ к оси волновода, определяемого как $\theta = \arctan(k_y/k_x)$.

При этом считается, что продольная компонента k_x принимает непрерывный ряд значений, а поперечная компонента k_y квантуется и в приближении однородности основного состояния волновода принимает значения [36]:

$$k_y = \frac{\pi n}{L_y}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

На рис. 1 тоновыми линиями приведен расчет спектра ООМСВ для пленки с выбранными $L_{x,y}$, выполненный с помощью пакета OOMMF [29] по аналогии с методикой, описанной в [37]. Градация серого цвета отражает амплитуду мод ООМСВ, возбуждаемых в пленке шириной $L_y = 3$ мм при подаче на антенну импульса поля с однородной по ширине антенны амплитудой 800 А/м и длительностью 100 пс. Здесь же сплошными линиями показаны «ширинные» моды основной моды ООМСВ ($N = 0$), рассчитанные с помощью (1) при значениях k_y , определяемых (2) при подстановке $\tilde{n} = (2n + 1)L_y/a$, $n = 0, 1, 2, \dots$, a – ширина антенны. Можно видеть, что они хорошо соответствуют расчетам ширинных мод с помощью микромагнитного моделирования. То обстоятельство, что в спектре релаксационных колебаний намагниченности наблюдается рост амплитуды «ширинных» мод с номерами $\tilde{n}$, отражает рост эффективности возбуждения таких мод импульсом поля, когда по ширине антенны укладывается нечетное число полувольт.

При расчетах будем считать, что на входной антенне возбуждаются ООМСВ с частотами $f_{p1} = 5.7$ ГГц ($\omega_{p1} = 3.58 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$) и $f_{p2} = 5.0$ ГГц ($\omega_{p2} = 3.14 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$), положение которых показано на рис. 1 горизонтальными пунктирными линиями. Частоте $f_{p1} = 5.7$ ГГц отвечает ООМСВ с волновым числом $k_1 \approx 276 \text{ см}^{-1}$ ($\lambda_1 \approx 228 \text{ мкм}$), для $f_{p2} = 5.0$ ГГц – значения $k_2 \approx 2082 \text{ см}^{-1}$ ($\lambda_2 \approx 30 \text{ мкм}$). В Таблице указаны основные параметры волн на выбранных частотах, включая групповую скорость V_g , коэффициенты дисперсионного β_x и дифракционного β_y расплывания, а также коэффициент нелинейности η , определяющие в нелинейной теории модуляционной неустойчивости волн характерные черты и этапы процессов самовоздействия. Можно видеть, что для исследуемых волн выполняется необходимый для развития процесса самофокусировки критерий Лайтхилла: $\beta_{x,y}\eta \leq 0$.

Таблица

f , ГГц	k , см^{-1}	λ , мкм	V_g , см/с	β_x , $\text{см}^2/\text{с}$	β_y , $\text{см}^2/\text{с}$	η , с^{-1}
5.7	276	228	$-3.32 \cdot 10^6$	624	21176	$-7.0 \cdot 10^9$
5.0	2082	30	$-1.75 \cdot 10^6$	295	1575	$-4.96 \cdot 10^9$

Для характеристики распределения амплитуды пучка в пленке будем рассматривать распределение амплитуды нормальной к поверхности пленки компоненты намагниченности $m_z(x, y) = \sum_{i=1}^3 m_{z_i}(x, y, z_i)$ в момент времени $t = 100$ нс в зависимости от значений амплитуды A_0 возбуждающего поля.

На рис. 2(А) показаны результаты микромагнитного моделирования распределения амплитуды ООМСВ $m_z(x, y)$ на частоте $f_{p1} = 5.7$ ГГц. При $A_0 = 40$ Э распространение происходит в линейном режиме, причем характер распределения $m_z(x, y)$ близок случаю возбуждения ООМСВ точечным источником [11]. Последнее обстоятельство объясняется тем, что при выбранном виде апертурной функции «эффективная ширина» $\tilde{a}$ антенны, где амплитуда возбуждающего поля принимает значение $A \geq A_0/2$, составляет $\tilde{a} = 2a/3 \approx 330 \text{ мкм}$, что сопоставимо с длиной волны ООМСВ $\lambda_1 \approx 228 \text{ мкм}$. При этом угловой спектр возбуждаемых ООМСВ включает волны с $k(x, y) \geq k_{p1} \approx 276 \text{ см}^{-1}$. При уровнях входного сигнала $A_0 \geq 47$ Э развивается четырехмагنونная параметрическая неустойчивость, составляющая конкуренцию модуляционной неустойчивости. В результате волновой пучок расплывается и при увеличении амплитуды обогащается мелкомасштабными возмущениями.

Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Кожевников А. В.,
Высоцкий С. Л., Селезнёв М. Е., Филимонов Ю. А.
Известия вузов. ПНД, 2021, т. 29, № 2

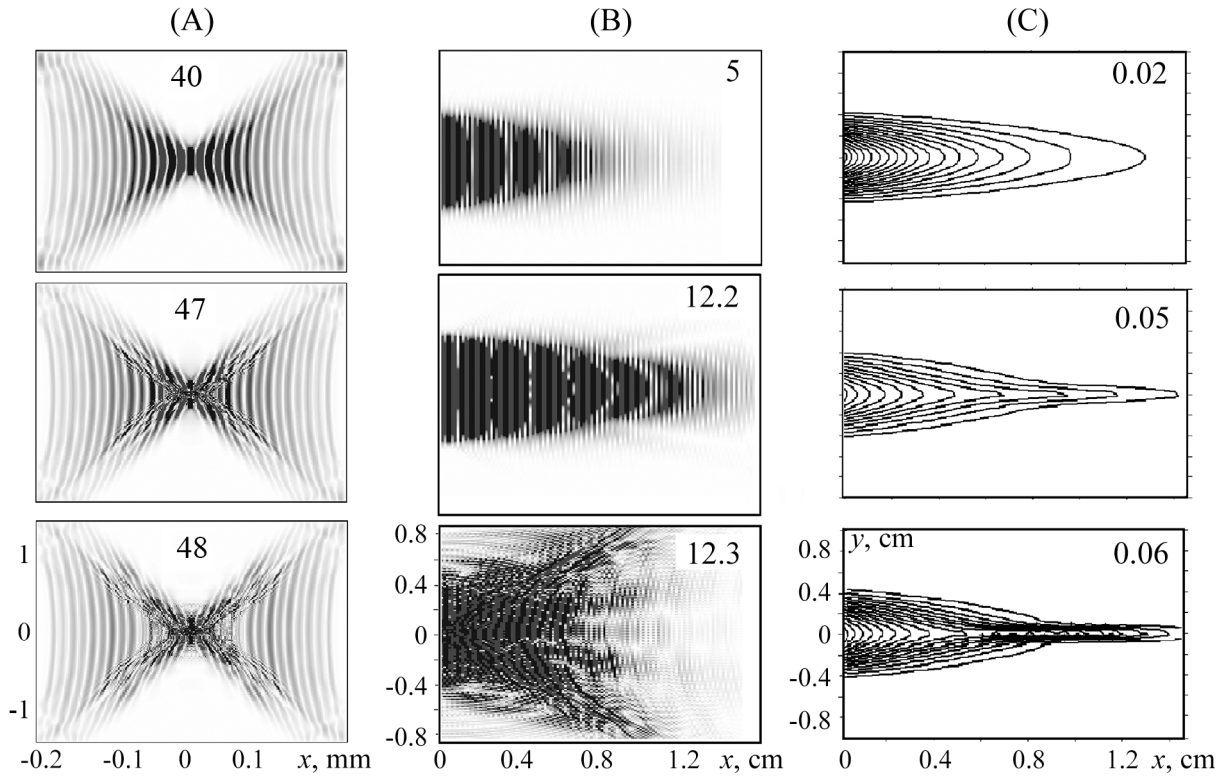


Рис. 2. Распределение амплитуды в пучке ООМСВ с частотой $f_{p1} = 5.7$ ГГц в зависимости от амплитуды A_0 на входе. (А): Антенна с апертурой $a = 500$ мкм, плоскостные размеры $L_x = 4$ мм, $L_y = 3$ мм, размер ячейки численной сетки $(5 \times 5 \times 2.4)$ мкм³. (В): Антенна с апертурой $a = 0.8$ см, плоскостные размеры $L_x = 4$ см, $L_y = 3$ см, размер ячейки численной сетки $(50 \times 50 \times 2.4)$ мкм³. (С): Результаты моделирования эффекта самофокусировки в рамках НУШ в работе [30], полученные для частоты $f_{p1} = 5.7$ ГГц, размеров $L_x = 4$ см, $L_y = 3$ см, апертуры $a = 0.8$ см

Fig. 2. Distribution of the amplitude in the MSBVW-beam with a frequency $f_{p1} = 5.7$ GHz depending on the amplitude A_0 at the input. (A): Antenna with aperture $a = 500$ μm, planar dimensions $L_x = 4$ mm, $L_y = 3$ mm, cell size of the numerical grid $(5 \times 5 \times 2.4)$ μm³. (B): Antenna with $a = 0.8$ cm aperture, planar dimensions $L_x = 4$ cm, $L_y = 3$ cm, cell size of the numerical grid $(50 \times 50 \times 2.4)$ μm³. (C): Results of modeling the self-focusing effect within the framework of nonlinear Shredinger equation in [30], obtained for the frequency $f_{p1} = 5.7$ GHz, dimensions $L_x = 4$ cm, $L_y = 3$ cm, and aperture $a = 0.8$ cm

На рис. 3 показаны результаты микромагнитного моделирования распределения амплитуды ООМСВ на частоте $f_{p2} = 5.0$ ГГц. В этом случае по эффективной ширине антенны $a \approx 330$ мкм укладывается более 10 длин волн $\lambda_2 \approx 30$ мкм и выполняется условие квазиоптического приближения ($ka \gg 1$), справедливое для пучков, близких к однонаправленной монохроматической плоской волне. Моделирование проводилось как для указанного выше шага (5×5) мкм² в плоскости пленки (колонка А), так и с шагом в два раза меньшим (2.5×2.5) мкм² (колонка В) для проверки устойчивости характера решения к шумам численной сетки. Из сравнения распределений $m_z(x, y)$, представленных в колонках (А) и (В), можно видеть, что при изменении шага численной сетки характер зависимости от амплитуды A_0 сохранился. При этом, однако, пороговые значения амплитуд входных сигналов для характерных нелинейных режимов для меньшего шага сетки оказались ниже. Есть еще одно принципиальное отличие в этих двух случаях, произошедшее в результате изменения шага моделирования. Моделируемая система стала «видеть» кроме основной моды ООМСВ и множества ширинных мод еще и следующую моду ООМСВ по толщине пленки. Взаимодействие с этой модой инициировало развитие распадных процессов. В результате интервал устойчивого существования процессов нелинейного самовоздействия значительно сократился.

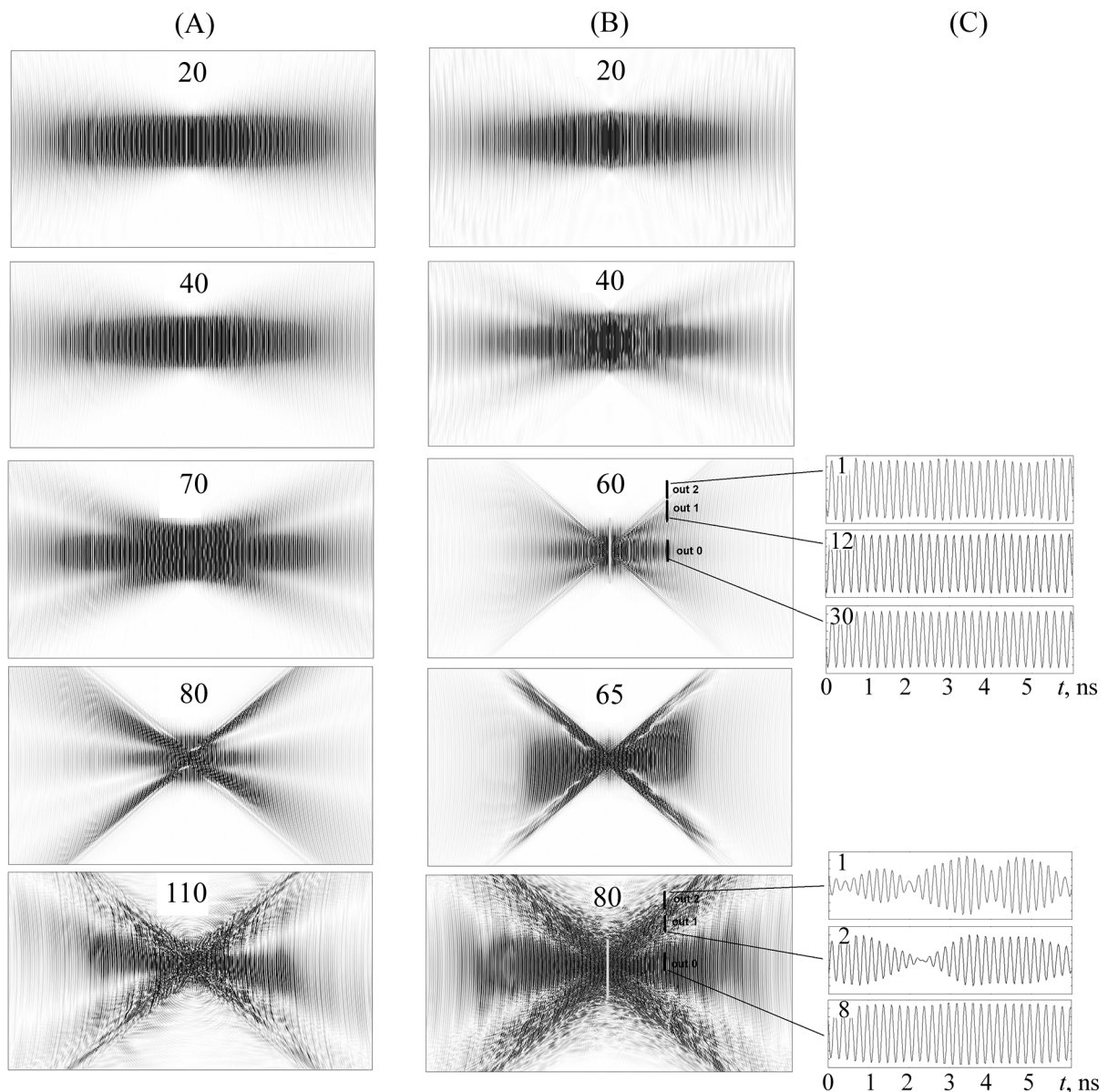


Рис. 3. Распределение амплитуды в пучке ООМСВ с частотой $f_{p2} = 5.0$ ГГц в зависимости от амплитуды на входе для выбранного шага численной сетки (А) и шага сетки $(2.5 \times 2.5 \times 2.4) \text{ мкм}^3$ (В). В колонке (С) приведены временные реализации выходных сигналов с трех антенн длиной 100 мкм, расположенных в разных точках сечения волнового пучка ($x_1 = 0.5 \text{ мм}$, $y_1 = 0 \text{ мм}$), ($x_2 = 0.5 \text{ мм}$, $y_2 = 0.3 \text{ мм}$), ($x_3 = 0.5 \text{ мм}$, $y_3 = 0.45 \text{ мм}$). Амплитуды на временных реализациях выравнены с помощью множителей, указанных на реализациях

Fig. 3. Distribution of the amplitude in the MSBVW-beam with a frequency of $f_{p2} = 5.0$ GHz depending on the amplitude at the input for the chosen step of the numerical grid (A) and the step of the grid $(2.5 \times 2.5 \times 2.4) \text{ }\mu\text{m}^3$ (B). Column (C) shows temporal realizations of the output signals from three antennas with a length of 100 μm , located at different points of the wave beam cross section ($x_1 = 0.5 \text{ mm}$, $y_1 = 0 \text{ mm}$), ($x_2 = 0.5 \text{ mm}$, $y_2 = 0.3 \text{ mm}$), ($x_3 = 0.5 \text{ mm}$, $y_3 = 0.45 \text{ mm}$). Amplitudes on temporal realizations were leveled using the multipliers indicated on the realizations

Из вида распределений $m_z(x, y)$, представленных на рис. 3 в колонках (А) и (В), видно, что при выбранных параметрах численной сетки и амплитуде входного сигнала выше некоторого порога $A^{\text{th}} \approx A_0 = 20$ Э наблюдается самофокусировка пучка. С дальнейшим ростом A_0 наблюдаются самоканалирование и далее распадная неустойчивость, которые сопровождаются волной модуляции огибающей. Четырехмагنونная распадная неустойчивость ООМСВ на частоте $f_{p2} = 5.0$ ГГц развивается при уровнях амплитуды A_0 , превышающих соответствующий уровень для случая частоты $f_{p1} = 5.7$ ГГц, для которой угловой пространственный спектр волнового пучка при заданной апертуре $a = 500$ мкм существенно шире (см. рис. 2(А)).

Для более детальной характеристики динамики пучка при режимах самофокусировки и распадной неустойчивости обратимся к колонке (С) на рис. 3, где приведены временные реализации с антенн длиной 100 мкм, центры которых находятся в точках $(x_1 = 0.5$ мм, $y_1 = 0$ мм), $(x_2 = 0.5$ мм, $y_2 = 0.3$ мм), $(x_3 = 0.5$ мм, $y_3 = 0.45$ мм). Видно, что при режимах самофокусировки и самоканалирования по пучку распространяется волна модуляции, имеющая в разных точках сечения пучка $x = \text{const}$ близкие фазы. При развитии четырехмаггонной распадной неустойчивости волны модуляции в разных точках сечения пучка теряют синхронизм, и возникает пространственно-временная хаотизация сигнала. Причем хаос может быть локализованным.

Представляет интерес сопоставить результаты микромагнитного моделирования и численного решения НУШ, выполненного при выбранных параметрах пленки для частоты $f_{p1} = 5.7$ ГГц в работе [30]. На рис. 2 в колонке (В) приведены результаты микромагнитного моделирования распределения амплитуды ООМСВ, распространяющейся в пленке с плоскостными размерами $L_x = 4$ см, $L_y = 3$ см при возбуждении антенной с апертурой $a = 0.8$ см на частоте 5.7 ГГц, которые использовались при моделировании самофокусировки в работе [30]. Размер ячейки численной сетки в этом случае брался равным $(50 \times 50 \times 2.4)$ мкм³. В колонке (С) приведены результаты решения НУШ при параметрах групповой скорости V_g , коэффициентах дисперсионного распыливания $\beta_{x,y}$ и нелинейности η , указанных в Таблице и отвечающих используемым в [30]. Можно видеть, что решение НУШ с диссипативным членом при росте амплитуды волны на входе демонстрирует фокусировку пучка, тогда как микромагнитное моделирование показывает разрушение процесса фокусировки из-за развития четырехмаггонной параметрической неустойчивости с образованием пространственно-временного хаоса.

Заключение

Методом микромагнитного моделирования исследовано распространение волновых пучков ООМСВ, возбуждаемых антенной с апертурой 500 мкм, помещенной в центре пленки железиттриевого граната с плоскостными размерами 4 мм $\times$ 3 мм и толщиной 7.2 мкм. Показано, что взаимодействие интенсивной ООМСВ с латеральными модами пленки и модами ООМСВ высшего порядка нарушает развитие процесса нелинейной самофокусировки волнового пучка ООМСВ. Для параметров волн, проанализированных в данной работе, эффекты нелинейной конкуренции приводили к невозможности наблюдать все этапы самофокусировки волновых пучков ООМСВ, предсказанные теорией и проиллюстрированные результатами численного решения НУШ в работе [30]. В зависимости от положения частоты сигнала в спектре ООМСВ, рост амплитуды входного сигнала выше некоторого порога приводил как к эффекту самофокусировки волнового пучка за счет развития модуляционной неустойчивости ООМСВ относительно поперечных возмущений, так и к пространственно-временному хаосу распределения амплитуды в пучке из-за четырехмаггонных распадных процессов. Полученные результаты могут быть использованы при анализе эффектов распространения нелинейных спиновых волн в пленочных ЖИГ-волноводах.

Список литературы

1. *Ваиковский А. В., Стальмахов А. В., Шахназарян Д. Г.* Формирование, отражение и преломление пучков магнитостатических волн // Известия вузов. Физика. 1988. № 11. С. 57–75. DOI: 10.1007/BF00893543.
2. *Ваиковский А. В., Стальмахов А. В., Тюлюкин В. А., Шахназарян Д. Г.* О возможности применения методов геометрической оптики к созданию приборов на магнитостатических волнах // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35, № 12. С. 2606–2610.
3. *Ваиковский А. В., Стальмахов В. С., Шараевский Ю. П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Издательство Саратовского университета, 1993. 312 с.
4. *Никитов С. А., Калябин Д. В., Лисенков И. В., Славин А. Н., Барабаненков Ю. Н., Осокин С. А., Садовников А. В., Бегинин Е. Н., Морозова М. А., Шараевский Ю. П., Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Сахаров В. К., Павлов Е. С.* Магноника – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники // УФН. 2015. Т. 185, № 10. С. 1099–1128. DOI: 10.3367/UFNe.0185.201510m.1099.
5. *Csaba G., Papp A., and Porod W.* Spin-wave based realization of optical computing primitives // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115, no. 17. P. 17C741. DOI: 10.1063/1.4868921.
6. *Toedt J.-N., Mundkowsky M., Heitmann D., Mendach S., Hansen W.* Design and construction of a spin-wave lens // Sci. Rep. 2016. Vol. 6, no. 1. P. 33169. DOI: 10.1038/srep33169.
7. *Dzyapko O., Borisenko I. V., Demidov V. E., Pernice W., Demokritov S. O.* Reconfigurable heat-induced spin wave lenses // Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 109, no. 23. P. 232407. DOI: 10.1063/1.4971829.
8. *Gräfe J., Decker M., Keskinbora K., Noske M., Gawronski P., Stoll H., Back C. H., Goering E. J., Schütz G.* X-Ray microscopy of spin wave focusing using a Fresnel zone plate // Phys. Rev. B. 2020. Vol. 102. P. 024420. DOI: 10.1103/PhysRevB.102.024420.
9. *Whitehead N. J., Horsley S. A. R., Philbin T. G., Kruglyak V. V.* A Luneburg lens for spin waves // Appl. Phys. Lett. 2018. Vol. 113, no. 21. P. 212404. DOI: 10.1063/1.5049470.
10. *Madami M., Khivintsev Y., Gubbiotti G., Dudko G., Kozhevnikov A., Sakharov V., Stal'makhov A., Khitun A., Filimonov Y.* Nonreciprocity of backward volume spin wave beams excited by the curved focusing transducer // Appl. Phys. Lett. 2018. Vol. 113, no. 5. P. 152403. DOI: 10.1063/1.5050347.
11. *Дудко Г. М., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Стальмахов А. В., Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В.* Расчет фокусирующих преобразователей спиновых волн методом микромагнитного моделирования // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2018. Т. 18, № 2. С. 92–102. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102.
12. *Albisetti E., Tacchi S., Silvani R., Scaramuzzi G., Finizio S., Wintz S., Rinaldi C., Cantoni M., Raabe J., Carlotti G., Bertacco R., Riedo E., Petti D.* Optically inspired nanomagnonics with nonreciprocal spin waves in synthetic antiferromagnets // Adv. Mater. 2020. Vol. 32, no. 9. P. 1906439. DOI: 10.1002/adma.201906439.
13. *Annenkov A. Y., Gerus S. V., Lock E. H.* Superdirectional beam of surface spin wave // Europhysics Letters. 2018. Vol. 123, no. 4. P. 44003. DOI: 10.1209/0295-5075/123/44003.
14. *Demidov V. E., Demokritov S. O., Birt D., O'Gorman B., Tsoi M., Li X.* Radiation of spin waves from the open end of a microscopic magnetic-film waveguide // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 80, no. 1. P. 014429. DOI: 10.1103/PhysRevB.80.014429.
15. *Schneider T., Serga A. A., Chumak A. V., Sandweg C. W., Trudel S., Wolff S., Kostylev M. P., Tiberkevich V. S., Slavin A. N., Hillebrands B.* Nondiffractive subwavelength wave beams in a

*Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Кожевников А. В.,
Высоцкий С. Л., Селезнёв М. Е., Филимонов Ю. А.*
Известия вузов. ПНД, 2021, т. 29, № 2

- medium with externally controlled anisotropy // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 104, no. 19. P. 197203. DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.197203.
16. *Davies C. S., Sadovnikov A. V., Grishin S. V., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A., Kruglyak V. V.* Generation of propagating spin waves from regions of increased dynamic demagnetising field near magnetic antidots // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107, no. 16. P. 162401. DOI: 10.1063/1.4933263.
 17. *Gieniusz R., Ulrichs H., Bessonov V. D., Guzowska U., Stognii A. I., Maziewski A.* Single antidot as a passive way to create caustic spin-wave beams in yttrium iron garnet films // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102, no. 10. P. 102409. DOI: 10.1063/1.4795293.
 18. *Divinskiy B., Thiery N., Vila L., Klein O., Beaulieu N., Ben Youssef J., Demokritov S. O., Demidov V. E.* Sub-micrometer near-field focusing of spin waves in ultrathin YIG films // *Appl. Phys. Lett.* 2020. Vol. 116, no. 6. P. 062401. DOI: 10.1063/1.5131689.
 19. *Gruszecki P., Kasprzak M., Serebryannikov A. E., Krawczyk M., Śmigaj W.* Microwave excitation of spin wave beams in thin ferromagnetic films // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6, no. 1. P. 22367. DOI: 10.1038/srep22367.
 20. *Madami M., Gubbiotti G., Khivintsev Y. V., Dudko G. M., Sakharov V. K., Kozhevnikov A. V., Filimonov Y. A., Khitun A. G.* Spin waves interference under excitation by focusing transducers: logic and signal processing // *Semiconductors.* 2020. Vol. 54, no. 12, P. 1716–1720. DOI: 10.1134/S1063782620120192.
 21. *Heussner F., Serga A. A., Brächer T., Hillebrands B., Pirro P.* A switchable spin-wave signal splitter for magnonic networks // *Appl. Phys. Lett.* 2017. Vol. 111, no. 12. P. 122401. DOI: 10.1063/1.4987007.
 22. *Papp Á., Porod W., Csurgay Á. I., Csaba G.* Nanoscale spectrum analyzer based on spin-wave interference // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7, no. 1. P. 9245. DOI: 10.1038/s41598-017-09485-7.
 23. *Demidov V. E., Kostylev M. P., Rott K., Krzysteczko P., Reiss G., and Demokritov S. O.* Generation of the second harmonic by spin waves propagating in microscopic stripes // *Phys. Rev. B.* 2011. Vol. 83, no. 5. P. 054408. DOI: 10.1103/PhysRevB.83.054408.
 24. *Звездин А. К., Попков А. Ф.* К нелинейной теории магнитостатических спиновых волн // *ЖЭТФ.* 1983. Т. 84, № 2. С. 606–615.
 25. *Boyle J. W., Nikitov S. A., Boardman A. D., Booth J. G., Booth K.* Nonlinear self-channeling and beam shaping of magnetostatic waves in ferromagnetic films // *Phys. Rev. B.* 1996. Vol. 53, no. 18. P. 12173–12181. DOI: 10.1103/PhysRevB.53.12173.
 26. *Bauer M., Mathieu C., Demokritov S. O., Hillebrands B., Kolodin P. A., Sure S., Dötsch H., Grimalsky V., Rapoport Yu., Slavin A. N.* Direct observation of two-dimensional self-focusing of spin waves in magnetic films // *Phys. Rev. B.* 1997. Vol. 56, no. 14. P. R8483. DOI: 10.1103/PhysRevB.56.R8483.
 27. *Bauer M., Büttner O., Demokritov S. O., Hillebrands B., Grimalsky V., Rapoport Yu., Slavin A. N.* Observation of spatiotemporal self-focusing of spin waves in magnetic films // *Phys. Rev. Lett.* 1998. Vol. 81, no. 17. P. 3769. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.3769.
 28. *Büttner O., Bauer M., Demokritov S. O., Hillebrands B., Kostylev M. P., Kalinikos B. A., Slavin A. N.* Collisions of spin wave envelope solitons and self-focused spin wave packets in yttrium iron garnet films // *Phys. Rev. Lett.* 1999. Vol. 82, no. 21. P. 4320–4323. DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.4320.
 29. *Donahue M., Porter D.* Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF). Interagency Report NISTIR 6376, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, Sept. 1999. 897 p. Access mode: www.math.nist.gov/oommf.

30. Дудко Г.М., Филимонов Ю.А. Численное исследование явлений самовоздействия ограниченных пучков обратных объемных магнитостатических волн в ферромагнитных пленках // Известия вузов. ПНД. 1999. Т. 7, № 2–3. С. 17–28.
31. Pramanik T., Roy U., Tsoi M., Register L. F., Banerjee S. K. Micromagnetic simulations of spin-wave normal modes and the spin-transfer-torque driven magnetization dynamics of a ferromagnetic cross // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115, no. 17. P. 17D123. DOI: 10.1063/1.4863384.
32. Schultheiss K., Verba R., Wehrmann F., Wagner K., Körber L., Hula T., Hache T., Kákay A., Awad A. A., Tiberkevich V., Slavin A. N., Fassbender J., and Schultheiss H. Excitation of whispering gallery magnons in a magnetic vortex // Phys. Rev. Lett. 2019. Vol. 122, no. 9. P. 097202. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.097202.
33. Mohseni M., Kewenig M., Verba R., Wang Q., Schneider M., Heinz B., Kohl F., Dubs C., Lägél B., Serga A. A., Hillebrands B., Chumak A. V., Pirro P. Parametric generation of propagating spin-waves in ultra thin yttrium iron garnet waveguides // Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters. 2020. Vol. 14, no. 4. P. 2000011. DOI: 10.1002/pssr.202000011.
34. Дудко Г.М., Хивинцев Ю.В., Сахаров В.К., Кожевников А.В., Высоцкий С.Л., Селезнев М.Е., Филимонов Ю.А., Хитун А.Г. Микромагнитное моделирование нелинейного взаимодействия латеральных магнитостатических мод в крестовидных структурах на основе волноводов из пленок железо-иттриевого граната // Известия вузов. ПНД. 2019. Т. 27, № 2. С. 39–60. DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-2-39-60.
35. Kalinikos B. A., Slavin A. N. Theory of dipole-exchange spin wave spectrum for ferromagnetic films with mixed exchange boundary conditions // J. Phys. C: Solid State Phys. 1986. Vol. 19, no. 35. P. 7013–7033. DOI: 10.1088/0022-3719/19/35/014.
36. O’Keeffe T. W., Patterson R. W. Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49, no. 9. P. 4886–4895. DOI: 10.1063/1.325522.
37. Dvornik M. Numerical investigations of spin waves at the nanoscale. PhD thesis. University of Exeter, 2011. P. 58–79. DOI: 10036/3304.

References

1. Vashkovskii AV, Stal'makhov AV, Shakhnazaryan DG. Formation, reflection, and refraction of magnetostatic wave beams. Soviet Physics Journal. 1988;31(11):908–915. DOI: 10.1007/BF00893543.
2. Vashkovskii AV, Stalmakhov AV, Tulukin VA, Shakhnazaryan DG. On the possibility of applying the methods of geometric optics to the creation of devices on magnetostatic waves. Soviet Journal of Communications Technology and Electronics. 1990;35(12):2606–2610 (in Russian).
3. Vashkovskii AV, Stalmakhov AV, Sharaevskii YP. Magnetostatic Waves in Microwave Electronics. Saratov State University; 1993. 312 p (in Russian).
4. Nikitov SA, Kalyabin DV, Lisenkov IV, Slavin AN, Barabanenkov YN, Osokin SA, Sadovnikov AV, Beginin EN, Morozova MA, Sharaevsky YP, Filimonov YA, Khivintsev YV, Vysotsky SL, Sakharov VK, Pavlov ES. Magnonics: a new research area in spintronics and spin wave electronics. Phys. Usp. 2015;58(10):1002–1028. DOI: 10.3367/UFNe.0185.201510m.1099.
5. Csaba G, Papp A, and Porod W. Spin-wave based realization of optical computing primitives. J. Appl. Phys. 2014;115(17):17C741. DOI: 10.1063/1.4868921.
6. Toedt JN, Mundkowsky M, Heitmann D, Mendach S, Hansen W. Design and construction of a spin-wave lens. Sci. Rep. 2016;6(1):33169. DOI: 10.1038/srep33169.
7. Dzyapko O, Borisenko IV, Demidov VE, Pernice W, Demokritov SO. Reconfigurable heat-induced spin wave lenses. Appl. Phys. Lett. 2016;109(23):232407. DOI: 10.1063/1.4971829.

Дудко Г.М., Хивинцев Ю.В., Сахаров В.К., Кожевников А.В.,
Высоцкий С.Л., Селезнёв М.Е., Филимонов Ю.А.
Известия вузов. ПНД, 2021, т. 29, № 2

8. Gräfe J, Decker M, Keskinbora K, Noske M, Gawronski P, Stoll H, Back CH, Goering EJ, Schütz G. X-Ray microscopy of spin wave focusing using a Fresnel zone plate. *Phys. Rev. B.* 2020;102:024420. DOI: 10.1103/PhysRevB.102.024420.
9. Whitehead NJ, Horsley SAR, Philbin TG, Kruglyak VV. A Luneburg lens for spin waves. *Appl. Phys. Lett.* 2018;113(21):212404. DOI: 10.1063/1.5049470.
10. Madami M, Khivintsev Y, Gubbiotti G, Dudko G, Kozhevnikov A, Sakharov V, Stal'makhov A, Khitun A, Filimonov Y. Nonreciprocity of backward volume spin wave beams excited by the curved focusing transducer. *Appl. Phys. Lett.* 2018;113(5):152403. DOI: 10.1063/1.5050347.
11. Dudko GM, Kozhevnikov AV, Saharov VK, Stalmahov AV, Filimonov YA, Khivintsev YV. Calculation of focusing spin wave transducers using the method of micromagnetic simulation. *Izvestiya of Saratov University. New series. Series: Physics.* 2018;18(2):92–102 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102.
12. Albisetti E, Tacchi S, Silvani R, Scaramuzzi G, Finizio S, Wintz S, Rinaldi C, Cantoni M, Raabe J, Carloti G, Bertacco R, Riedo E, Petti D. Optically inspired nanomagnonics with nonreciprocal spin waves in synthetic antiferromagnets. *Adv. Mater.* 2020;32(9):1906439. DOI: 10.1002/adma.201906439.
13. Annenkov AY, Gerus SV, Lock EH. Superdirectional beam of surface spin wave. *Europhysics Letters.* 2018;123(4):44003. DOI: 10.1209/0295-5075/123/44003.
14. Demidov VE, Demokritov SO, Birt D, O'Gorman B, Tsoi M, Li X. Radiation of spin waves from the open end of a microscopic magnetic-film waveguide. *Phys. Rev. B.* 2009;80(1):014429. DOI: 10.1103/PhysRevB.80.014429.
15. Schneider T, Serga AA, Chumak AV, Sandweg CW, Trudel S, Wolff S, Kostylev MP, Tiberkevich VS, Slavin AN, Hillebrands B. Nondiffractive subwavelength wave beams in a medium with externally controlled anisotropy. *Phys. Rev. Lett.* 2010;104(19):197203. DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.197203.
16. Davies CS, Sadovnikov AV, Grishin SV, Sharaevskii YP, Nikitov SA, Kruglyak VV. Generation of propagating spin waves from regions of increased dynamic demagnetising field near magnetic antidots. *Appl. Phys. Lett.* 2015;107(16):162401. DOI: 10.1063/1.4933263.
17. Gieniusz R, Ulrichs H, Bessonov VD, Guzowska U, Stognii AI, Maziewski A. Single antidot as a passive way to create caustic spin-wave beams in yttrium iron garnet films. *Appl. Phys. Lett.* 2013;102(10):102409. DOI: 10.1063/1.4795293.
18. Divinskiy B, Thierry N, Vila L, Klein O, Beaulieu N, Ben Youssef J, Demokritov SO, Demidov VE. Sub-micrometer near-field focusing of spin waves in ultrathin YIG films. *Appl. Phys. Lett.* 2020;116(6):062401. DOI: 10.1063/1.5131689.
19. Gruszecki P, Kasprzak M, Serebryannikov AE, Krawczyk M, Śmigaj W. Microwave excitation of spin wave beams in thin ferromagnetic films. *Sci. Rep.* 2016;6(1):22367. DOI: 10.1038/srep22367.
20. Madami M, Gubbiotti G, Khivintsev YV, Dudko GM, Sakharov VK, Kozhevnikov AV, Filimonov YA, Khitun AG. Spin waves interference under excitation by focusing transducers: logic and signal processing. *Semiconductors.* 2020;54(12):1716–1720. DOI: 10.1134/S1063782620120192.
21. Heussner F, Serga AA, Brächer T, Hillebrands B, Pirro P. A switchable spin-wave signal splitter for magnonic networks. *Appl. Phys. Lett.* 2017;111(12):122401. DOI: 10.1063/1.4987007.
22. Papp Á, Porod W, Csurgay ÁI, Csaba G. Nanoscale spectrum analyzer based on spin-wave interference. *Sci. Rep.* 2017;7(1):9245. DOI: 10.1038/s41598-017-09485-7.
23. Demidov VE, Kostylev MP, Rott K, Krzysteczko P, Reiss G, and Demokritov SO. Generation of the second harmonic by spin waves propagating in microscopic stripes. *Phys. Rev. B.* 2011;83(5):054408. DOI: 10.1103/PhysRevB.83.054408.

24. Zvezdin AK, Popkov AF. Contribution to the nonlinear theory of magnetostatic spin waves. Sov. Phys. JETP. 1983;57(2):350–355.
25. Boyle JW, Nikitov SA, Boardman AD, Booth JG, Booth K. Nonlinear self-channeling and beam shaping of magnetostatic waves in ferromagnetic films. Phys. Rev. B. 1996;53(18):12173–12181. DOI: 10.1103/PhysRevB.53.12173.
26. Bauer M, Mathieu C, Demokritov SO, Hillebrands B, Kolodin PA, Sure S, Dötsch H, Grimalsky V, Rapoport Yu, Slavin AN. Direct observation of two-dimensional self-focusing of spin waves in magnetic films. Phys. Rev. B. 1997;56(14):R8483. DOI: 10.1103/PhysRevB.56.R8483.
27. Bauer M, Büttner O, Demokritov SO, Hillebrands B, Grimalsky V, Rapoport Yu, Slavin AN. Observation of spatiotemporal self-focusing of spin waves in magnetic films. Phys. Rev. Lett. 1998;81(17):3769. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.3769.
28. Büttner O, Bauer M, Demokritov SO, Hillebrands B, Kostylev MP, Kalinikos BA, Slavin AN. Collisions of spin wave envelope solitons and self-focused spin wave packets in yttrium iron garnet films. Phys. Rev. Lett. 1999;82(21):4320–4323. DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.4320.
29. Donahue M, Porter D. Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF). Interagency Report NISTIR 6376, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD; Sept. 1999. 897 p. Access mode: www.math.nist.gov/oommf.
30. Dudko GM, Filimonov YA. Numerical investigation of the phenomena of self-action of limited beams of backward volume magnetostatic waves in ferromagnetic films. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 1999;7(2–3):17–28 (in Russian).
31. Pramanik T, Roy U, Tsoi M, Register LF, Banerjee SK. Micromagnetic simulations of spin-wave normal modes and the spin-transfer-torque driven magnetization dynamics of a ferromagnetic cross. J. Appl. Phys. 2014;115(17):17D123. DOI: 10.1063/1.4863384.
32. Schultheiss K, Verba R, Wehrmann F, Wagner K, Körber L, Hula T, Hache T, Kákay A, Awad AA, Tiberkevich V, Slavin AN, Fassbender J, and Schultheiss H. Excitation of whispering gallery magnons in a magnetic vortex. Phys. Rev. Lett. 2019;122(9):097202. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.097202.
33. Mohseni M, Kewenig M, Verba R, Wang Q, Schneider M, Heinz B, Kohl F, Dubs C, Lägél B, Serga AA, Hillebrands B, Chumak AV, Pirro P. Parametric generation of propagating spin-waves in ultra thin yttrium iron garnet waveguides. Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters. 2020;14(4):2000011. DOI: 10.1002/pssr.202000011.
34. Dudko GM, Khivintsev YV, Sakharov VK, Kozhevnikov AV, Vysotskii SL, Seleznev ME, Filimonov YA, Khitun AG. Micromagnetic modeling of nonlinear interaction of lateral magnetostatic modes in cross-shaped structures based on waveguides from iron yttrium garnet films. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2019;27(2):39–60 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-2-39-60.
35. Kalinikos BA, Slavin AN. Theory of dipole-exchange spin wave spectrum for ferromagnetic films with mixed exchange boundary conditions. J. Phys. C: Solid State Phys. 1986;19(35):7013–7033. DOI: 10.1088/0022-3719/19/35/014.
36. O’Keeffe TW, Patterson RW. Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples. J. Appl. Phys. 1978;49(9):4886–4895. DOI: 10.1063/1.325522.
37. Dvornik M. Numerical investigations of spin waves at the nanoscale. PhD thesis. University of Exeter; 2011. P. 58–79. DOI: 10036/3304.

*Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Кожевников А. В.,
Высоцкий С. Л., Селезнёв М. Е., Филимонов Ю. А.
Известия вузов. ПНД, 2021, т. 29, № 2*



Дудко Галина Михайловна – родилась в Свердловске (1961). Окончила физический факультет Саратовского университета им. Н.Г. Чернышевского (1983). Кандидат физико-математических наук (2002). Область научных интересов: нелинейная динамика магнито-статических волн, микромагнитное моделирование динамики намагниченности в ферромагнитных нано- и микроструктурах. Является автором более 30 статей.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: dugal_2010@hotmail.com



Хивинцев Юрий Владимирович – родился в 1975 г. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (1998). Кандидат физико-математических наук (2004). Ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН и доцент Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. Область научных интересов – магнитные колебания и волны, СВЧ электроника.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: khivintsev@gmail.com



Сахаров Валентин Константинович – родился в пос. Соколовый Саратовской области (1986). Окончил кафедру физики полупроводников физического факультета СГУ им. Н.Г. Чернышевского (2008) и аспирантуру Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (2011). В настоящее время работает научным сотрудником лаборатории «Магнитоэлектроники СВЧ» Саратовского филиала ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Область научных интересов: спин-волновые явления в магнитных микро- и наноструктурах; СВЧ электроника. Является автором более 17 статей.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: valentin@sakharov.info



Кожевников Александр Владимирович – родился в Саратове (1962). Окончил Саратовский государственный университет (1984). Работает в Саратовском филиале ИРЭ РАН старшим научным сотрудником. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в СГУ (2011) в области нелинейных спиновых волн. Опубликовал 23 научных статьи.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: kzhavl@gmail.com



Высоцкий Сергей Львович – родился в Саратове (1955). Окончил Саратовский политехнический институт (1977). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в СГУ (1994) в области радиофизики. Ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники Саратовского филиала ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Автор более 60 научных работ.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: vysotsl@gmail.com



Селезнев Михаил Евгеньевич – родился в г. Заречный (1994), окончил факультет нано- и биомедицинских технологий (2017). Инженер Саратовского филиала ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, аспирант СНИГУ ФНБМТ. Профессиональные интересы: магноника и спинтроника, магнитные материалы, физика полупроводников, физика твердого тела. Имеет 3 публикации.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: mixanich94@mail.ru



Филимонов Юрий Александрович – родился в городе Куйбышев (1955). Окончил факультет физической и квантовой электроники МФТИ (1979). Доктор физико-математических наук (2008), профессор по специальности «Физика магнитных явлений» (2012). Директор Саратовского филиала ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Профессиональные интересы: магноника и спинтроника, магнитные материалы и структуры, электронная компонентная база. Имеет более 120 публикаций.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: fil@soire.renet.ru