



## НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА СПИНОВЫХ ВОЛН В ЛАТЕРАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ МИКРОВОЛНОВОДАХ

*С. А. Одинцов, А. В. Садовников*

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83  
E-mail: odinoff@gmail.com, sadovnikovav@gmail.com  
*Поступила в редакцию 2.07.2017*

Развитие идей магноники – нового направления исследования спин-волновых процессов в регулярных и нерегулярных микро- и наноразмерных магнитных структурах – и совершенствование методов изготовления и структурирования магнитных материалов открывает новые перспективы для создания миниатюрных устройств генерации, передачи и обработки информационных сигналов в СВЧ и терагерцевом диапазонах длин волн. Большой интерес представляет исследование латеральных магнитных микроструктур, поддерживающих как линейный, так и нелинейный режим распространения спиновых волн. Следует отметить, что латеральное расположение магнитных волноводов приводит как к сложной нелинейной динамике спиновой волны, так и к многомодовой спин-волновой связи в планарной топологии. Более того, исследование нелинейных режимов распространения связанных спиновых волн в латеральных магнитных микроволноводах имеет важное значение для нелинейной физики диссипативных систем в целом.

Исследование системы двух латеральных микроволноводов, лежащих на одной подложке и помещённых в магнитное поле, производилось численно методом конечных элементов и экспериментально методом мандельштам–бриллюэновской спектроскопии магнитных материалов с микронным разрешением.

Показано, что неоднородное распределение величины внутреннего магнитного поля изменяет пространственный профиль собственных типов мод электромагнитных волн, распространяющихся в системе латеральных магнитных микроволноводов. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментального исследования. Эффекты нелинейного переключения мощности спин-волнового сигнала в системах латеральных магнитных микроволноводов позволяют создавать нелинейные ответвители и делители мощности спин-волнового сигнала в планарных топологиях магнитных сетей для селективной обработки информационных сигналов.

*Ключевые слова:* Латеральные волноводы, спиновая волна, устройства обработки сигналов, ответвитель.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-56-68

*Образец цитирования:* Одинцов С.А., Садовников А.В. Нелинейная динамика спиновых волн в латеральных магнитных микроволноводах // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 5. С. 56–68. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-56-68

# NONLINEAR DYNAMICS OF SPIN WAVES IN LATERAL MAGNETIC MICROWAVEGUIDES

*S. A. Odintsov, A. V. Sadovnikov*

Saratov State University  
83, Astrakhanskaya, 410012 Saratov, Russia  
E-mail: odinoff@gmail.com, sadovnikovav@gmail.com

*Received 2.07.2017*

In the present work, a numerical and experimental study of the nonlinear dynamics of spin waves in lateral magnetic microwave guides was made. The mechanism of nonlinear spin-wave coupling between different types of modes in lateral waveguides was revealed. The investigation of lateral magnetic microstructures supporting both linear and nonlinear propagation of spin waves is of great interest nowadays. Moreover, the study of nonlinear modes of propagation of coupled spin waves in lateral magnetic microwave guides is of great importance for the nonlinear physics of dissipative systems as a whole.

It is shown, that the inhomogeneous distribution of the value of the internal magnetic field leads to the variation of the spatial profile of the eigenmode of electromagnetic waves propagating in a system of lateral magnetic microwaveguides. The results of the numerical simulation are in good agreement with the results of the experimental study. The effects of nonlinear switching of the power of the spin-wave signal in systems of lateral magnetic microwave guides allow creating nonlinear couplers and power dividers of the spin-wave signal in the planar topologies of magnon networks for selective processing of information signals.

It is shown, that an increase in the amplitude of the spin wave leads to a change in the coupling length. The effects of nonlinear switching in lateral magnetic waveguides allow the creation of nonlinear couplers and power dividers of the spin-wave signal in planar topologies of magnonic networks for selective processing of information signals in the microwave and terahertz ranges.

*Keywords:* Lateral waveguides, spin wave, signal processing devices, coupler.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-56-68

*References:* Odintsov S.A., Sadovnikov A.V. Nonlinear dynamics of spin waves in lateral magnetic microwaveguides. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2017. Vol. 25. Issue 5. P. 56–68. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-56-68

## Введение

Развитие идей магноники – нового направления исследования спин-волновых процессов в нерегулярных и микро- и наноразмерных магнитных структурах [1] – и совершенствование методов изготовления и структурирования магнитных материалов [2] открывает новые перспективы для создания миниатюрных устройств генерации, передачи и обработки информационных сигналов в СВЧ и терагерцевом диапазонах длин волн. Важным является исследование нелинейных процессов в нерегулярных магнитных микро- и наноструктурах. Результаты исследования нелинейных спин-волновых процессов в ферромагнетиках внесли значительный вклад в теорию, описывающую нелинейную динамику диссипативных систем [3–5]. Такие нелинейные явления в тонких пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ), как образование и распространение солитонов, экспериментально исследовались в ферромагнитных

волноводах миллиметровой ширины с использованием радиофизических методов [6–9] и мандельштам–бриллоэновской спектроскопии магнитных материалов [10–19]. Было показано, что, используя нелинейные эффекты в ЖИГ [20], возможным оказывается создание перестраиваемых спин-волновых устройств [21–25], например, нелинейных фазовращателей, фильтров [26–28] и устройств переключения сигнала на основе магнетонных кристаллов [29]. В последние годы довольно активно ведется исследование нелинейных спин-волновых явлений в системах генерации когерентных спин-волновых мод спин-орбитальным моментом, создаваемым чистыми спиновыми токами (pure spin current [25]). В связи с этим особый интерес представляет исследование латеральных магнитных микроструктур, поддерживающих как линейный, так и нелинейный режим распространения спиновых волн. Следует отметить, что латеральное расположение магнитных волноводов приводит как к сложной нелинейной динамике спиновой волны, так и к многомодовой спин-волновой связи в планарной топологии. Более того, исследование нелинейных режимов распространения связанных спиновых волн в латеральных магнитных микроволноводах имеет важное значение для нелинейной физики диссипативных систем в целом.

В настоящей работе проведено исследование нелинейной динамики спиновых волн в латеральной системе магнитных микроволноводов. Показано, что неоднородное распределение внутреннего магнитного поля изменяет пространственный профиль собственных типов мод системы магнитных микроволноводов. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментального исследования.

### Модель структуры

Рассмотрим структуру, схема которой приведена на рис. 1 и которая представляет собой два латеральных микроволновода (обозначим их как  $S_1$  и  $S_2$ ) из плёнки ЖИГ (YIG) ( $Y_3Fe_5O_{12}$  (111)), лежащих на подложке из галлий–гадолиниевого граната (GGG) ( $Gd_3Ga_5O_{12}$  (111)). Волноводы, представленные на рис. 1, имеют ширину  $w = 200 \mu\text{m}$ , расстояние между волноводами  $d = 40 \mu\text{m}$ . Численное моделирование проводилось методом конечных элементов с помощью решения полной системы уравнений Максвелла [30]. Латеральные микроволноводы помещены во внешнее магнитное поле  $H_0$ , направленное вдоль оси  $y$ . В каждом из волноводов вдоль оси  $x$  распространяются электромагнитные волны. На рис. 1,  $a$  продемонстрирована расчётная область и разбиение исследуемой структуры на треугольные элементы [30]. Параметры создаваемой сетки были следующие: максимальный размер элемента сетки –  $10.5 \mu\text{m}$ , минимальный размер элемента сетки –  $0.0188 \mu\text{m}$ , коэффициент линейного увеличения размера элемента –  $1.25$ , коэффициент кривизны –  $0.25$ . Коэффициент кривизны необходим для определения размера граничных элементов по сравнению с кривизной геометрической границы (это отношение размера элемента к радиусу кривизны). Радиус кривизны, умноженный на коэффициент кривизны, дает максимальный допустимый размер элемента вдоль границы. Меньший коэффициент кривизны дает более тонкую сетку вдоль изогнутых границ. Граничные условия выбраны в виде: «магнитных стенок» (касательная составляющая вектора напряжённости магнитного поля равна нулю) на левой и правой границах расчётной об-

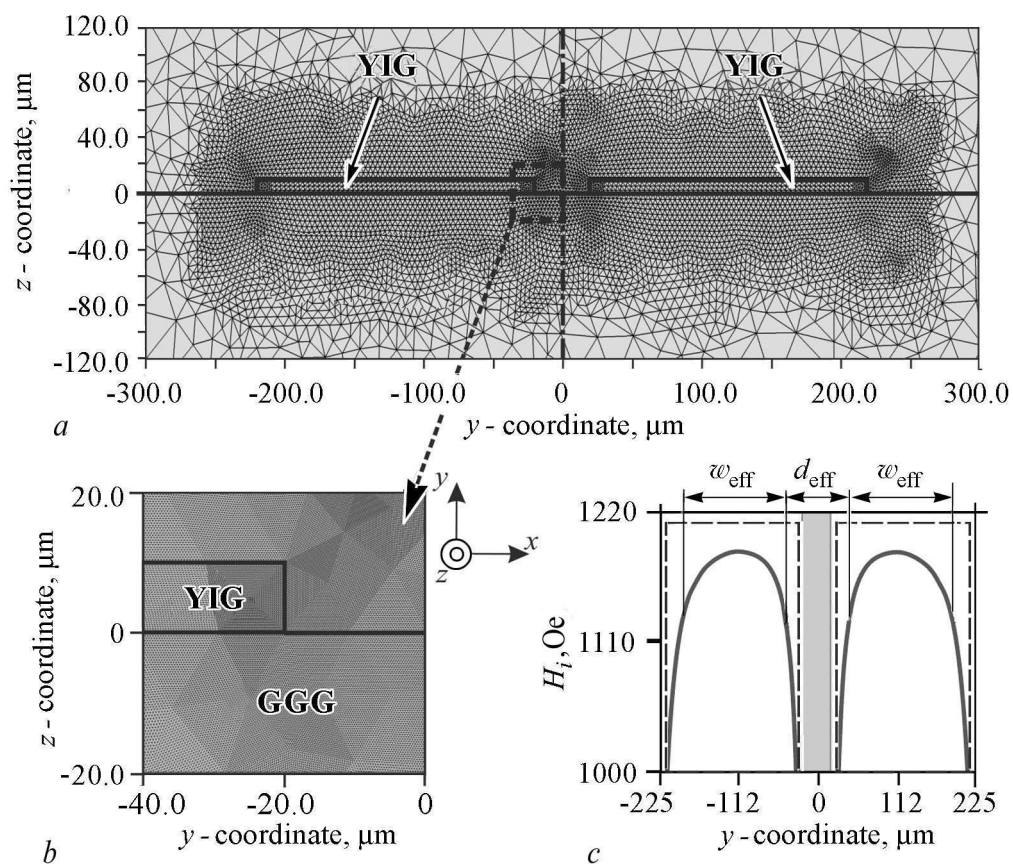


Рис. 1. *a* – схема расчётной области и исследуемой структуры; *b* – фрагмент расчетной области подробно показывающий разбиение сетки на углах ЖИГ плёнки; *c* – распределение однородного внутреннего поля (штриховая линия) и неоднородного внутреннего поля (сплошная линия) в латеральных микроволноводах

Fig. 1. *a* – scheme of the numerical domain and the structure under study; *b* – the domain on the calculated area detailing the partition of the grid at the corners of the YIG film; *c* – distribution of a homogeneous internal field (dashed line), inhomogeneous internal field (solid line) in side-coupled waveguides

ласти и «электрических стенок» (касательная составляющая вектора напряженности электрического поля равна нулю) на верхней и нижней границах. Тензор магнитной проницаемости ЖИГ в этом случае записывается в виде [3]

$$\hat{\mu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & -i\mu_a \\ 0 & i\mu_a & \mu \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\mu(f) = (f_H(f_H + f_M) - f^2)/(f_H^2 - f^2)$ ,  $\mu_a(f) = (f_M f)/(f_H^2 - f^2)$ ,  $f_H = \gamma H_0$ ,  $f_M = 4\pi\gamma M_0$ ,  $\gamma = 2.8$  МГц/Ое – гиромангнитное отношение для ЖИГ,  $M_0 = 170$  Ое. Относительная диэлектрическая проницаемость ЖИГ равна  $\epsilon = 14$ . Предполагается, что в направлении оси  $x$  структура бесконечна.

В областях ЖИГ микроволновода проводилось уменьшение шага разбиения сетки, для увеличения точности расчета. На рис. 1, *b* показан участок структуры с сеткой в области края ЖИГ микроволновода. Стоит отметить, что поскольку физической причиной связи спиновых волн в системе латеральных микроволновода

являются электромагнитные поля, провисающие за границу микроволновода, то учет формы края и адекватный размер сетки в области щели между волноводами обеспечивает высокую точность расчета.

На рис. 1, с показаны две конфигурации распределения внутреннего поля в системе из двух латеральных микроволноводов, которое было получено по уравнению из работы [31],

$$H_x(x, y) = -H_0 \frac{1}{\pi} \left( \operatorname{arctg} \frac{N+x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{N-x}{y} \right), \quad (2)$$

где  $N$  – половина расстояния между максимумами распределения поля,  $H_0$  – значение магнитного поля. Штриховыми линиями показано однородное распределение внутреннего магнитного поля, а сплошными линиями показано неоднородное распределение поля, полученное с помощью решения магнитоэлектростатической задачи методом конечных элементов. Уменьшение величины внутреннего поля в центре обоих микроволноводов до значения  $H_{i0} = 1159$  Ое приводит к смещению частоты ферромагнитного резонанса пленки ЖИГ. Следует отметить, что латеральное расположение волноводов приводит к асимметричному профилю распределения поля внутри волноводов по отношению к центру каждого из них, в отличие от одиночного ЖИГ микроволновода [31, 32]. Поэтому для расчета параметров собственных мод латеральных микроволноводов удобно ввести эффективную ширину волноводного канала  $w_{\text{eff}} \sim 150$  мкм, обеспечивающую распространение спиновых волн. Следует иметь в виду, что при этом увеличивается эффективный зазор между волноводами  $d_{\text{eff}}$ . Таким образом, из решения статической задачи становится понятным, что для вычисления спектров собственных мод волн, распространяющихся в системе латеральных магнитных микроволноводов, необходимым является учет неоднородного распределения статического магнитного поля внутри волноводов.

## 1. Результаты численного моделирования

Известно, что спектр собственных мод двух латеральных микроволноводов состоит из симметричных и антисимметричных мод [33]. Симметричные моды соответствуют случаю, когда амплитуды магнитных потенциалов в обоих магнитных волноводах имеют одну и ту же фазу, а в случае антисимметричных мод – сдвиг между фазами амплитуд составляет  $\pi$ . Из рис. 2 видно, что профили распределения трансформируются при учете неоднородности внутреннего магнитного поля, а именно, происходит «расталкивание» в распределении полей, поскольку, как было отмечено выше, увеличивается эффективное расстояние между волноводными каналами. Также стоит заметить, что при увеличении частоты и как следствие этого при увеличении величины продольного волнового числа распределение  $E_x$  компоненты поля трансформируется, а именно, поле становится более локализованным в центральной области магнитных микроволноводов. Результатом этого является уменьшение интеграла перекрытия полей мод и как следствие уменьшение величины связи между волнами, распространяющимися в волноводах, что, в свою очередь, влияет на величину длины связи

$$L_n = \pi / |k_n^s - k_n^{as}|, \quad (3)$$

где  $n$  – номер поперечной моды;  $k_n^s$  и  $k_n^{as}$  – волновые числа симметричных и антисимметричных мод, соответственно. Далее рассматриваем только первую поперечную моду. Наблюдаемое распределение интенсивности спиновой волны является результатом интерференции симметричной и антисимметричной мод. При этом мощность волны перекачивается из одного микроволновода в другой на расстоянии, равном длине связи.

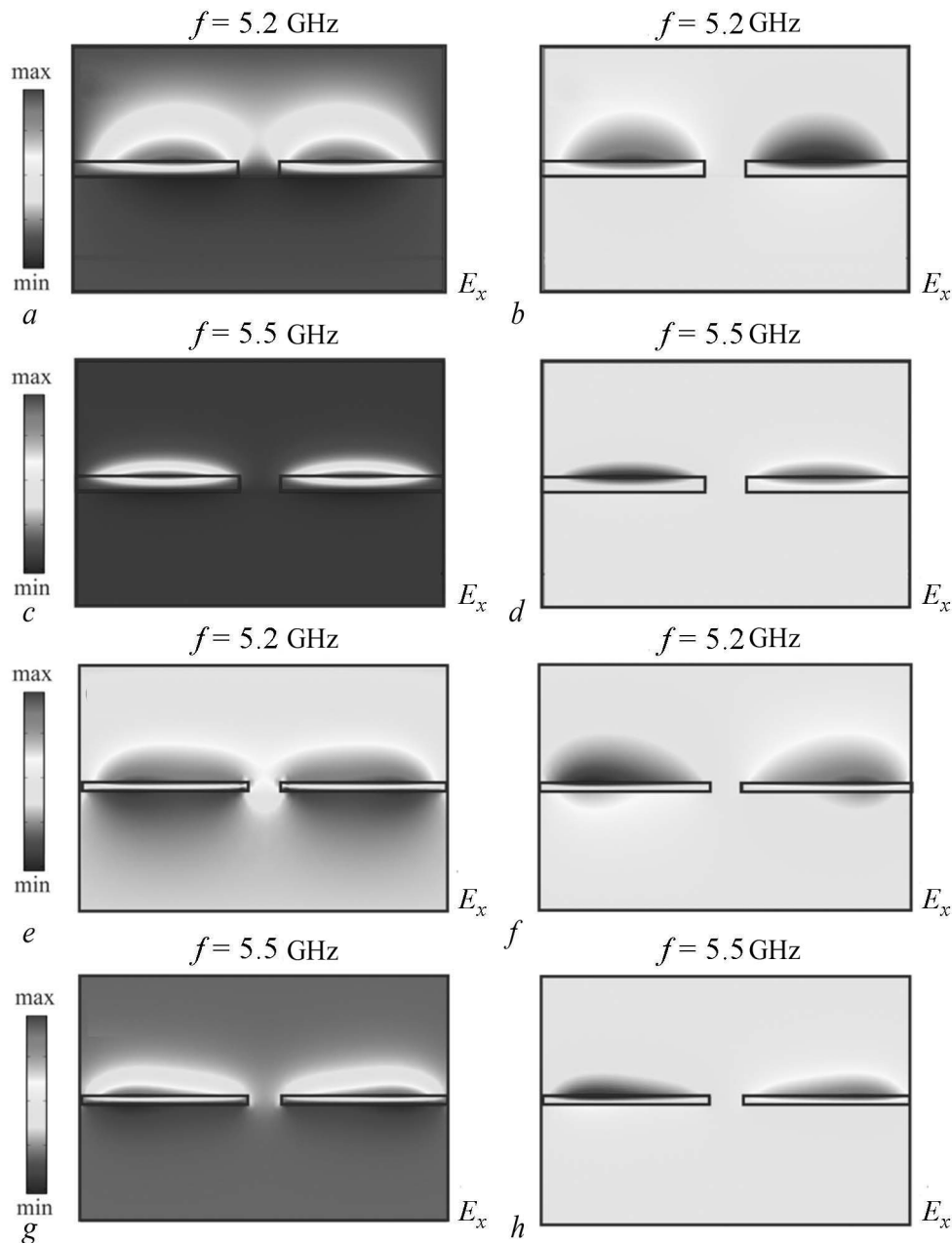


Рис. 2. Распределение компоненты  $E_x$  для симметричных (слева) и антисимметричных (справа) мод в случае однородного профиля статического магнитного поля (a–d) и неоднородного внутреннего профиля поля (e–h)

Fig. 2. Distribution of the  $E_x$  component for symmetric (left) and antisymmetric (right) modes in the case of a homogeneous profile of the static magnetic field (a–d) and the inhomogeneous internal field profile (e–h)

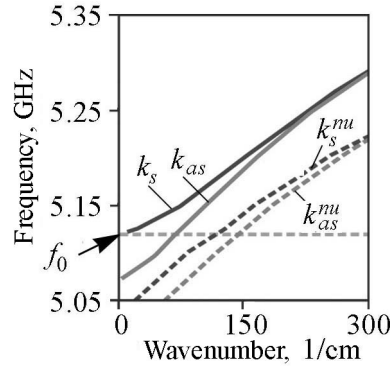


Рис. 3. Дисперсия первой симметричной и антисимметричной моды в случае однородного внутреннего профиля статического магнитного поля (сплошные линии) и в случае неоднородного (nonuniform) профиля поля (штриховые линии). Магнитное поле 1200 Ое

Fig. 3. Dispersion of the first symmetric and antisymmetric mode in the case of a homogeneous internal profile of the static magnetic field (solid lines) and in the case of an inhomogeneous field profile (dashed lines). The magnetic field is 1200 Oe

На рис. 3 показаны дисперсионные характеристики (зависимость продольного волнового числа от частоты) симметричных и антисимметричных мод для однородного (сплошные линии) и неоднородного (штриховые линии) распределения внутреннего магнитного поля в микроволноводе.

Видно, что дисперсионная характеристика, которая получена при неоднородном распределении профиля внутреннего магнитного поля, смещена по частоте вниз, относительно дисперсионной характеристики, полученной при однородном распределении поля. Это связано с особенностью распределения поля в неоднородной конфигурации. Границы полосы возбуждения ПМСВ рассчитывались по формулам [3]  $f_{\perp} = \sqrt{f_h(f_h + f_m)}$  и  $f_W = f_h + f_m/2$ .

Динамика спиновых волн в латеральных микроволноводах описывается

связанными нелинейными уравнениями Гинзбурга–Ландау [34] в виде

$$i \frac{d\Phi_{1,2}}{dx} = k\Phi_{1,2} + \kappa\Phi_{2,1} + (\zeta - i\nu_2) |\Phi_{1,2}|^2 \Phi_{1,2} - i\nu_1 \Phi_{1,2}. \quad (4)$$

Здесь  $\Phi_{1,2} = \Phi_{1,2}(x)|_{y=y_{1,2}}$  – амплитуда спиновой волны вдоль оси  $x$ ; координаты  $y_{1,2}$  определяют центральные точки в волноводах  $S_1$  и  $S_2$ , соответственно;  $k = k(f)$  – волновое число спиновой волны, распространяющейся в одиночном микроволноводе;  $\kappa = \kappa(f) = \beta C(f) \approx |k_s(f) - k_{as}(f)|$  – коэффициент связи спиновых волн между латеральными волноводами;  $\beta$  – коэффициент пропорциональности;  $\zeta = dk/d\varphi^2$  – нелинейный коэффициент, который определялся из условия уменьшения намагниченности насыщения при увеличении амплитуды спиновой волны с учетом дисперсионного соотношения [10]

$$\omega^2 - \left(\omega_H + \frac{\omega_M}{2}\right)^2 = - \left(\frac{\omega_M}{2}\right)^2 e^{-2|\beta|S}, \quad (5)$$

где  $S$  – толщина плёнки;  $\nu_1 = \frac{1}{v_g} \left| \frac{\partial \omega}{\partial H_1} \right| \frac{\Delta H}{2}$  и  $\nu_2 = \frac{1}{v_g^2} \zeta \frac{\Delta H}{2} \left| \frac{\partial \omega}{\partial H_1} \right| \left| \frac{\partial^2 \omega}{\partial k^2} \right|_{\varphi=0}$  – линейное и нелинейное затухание спиновой волны, соответственно;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота. Ширина линии ферромагнитного резонанса определялась экспериментально на частоте 9.7 GHz и составляла  $\Delta H = 0.54$  Ое [35]. Уравнение (3) решалось методом Рунге–Кутты при  $\omega_M = \omega_{M_0}(1 - \varphi)$  с начальными условиями  $A(x = 0, t = 0) = A_0$ .

Влияние нелинейности проявляется в изменении фазы симметричной и антисимметричной мод при увеличении амплитуды спиновой волны. Это, в свою

очередь, приводит к изменению длины связи. На рис. 4 показаны результаты численного решения уравнения (2). Сплошной линией показана зависимость нормированной амплитуды от продольной координаты  $z$  в случае малой амплитуды входного сигнала  $A_0 = 0.06$ . Пунктирной линией показана зависимость нормированной амплитуды от продольной координаты  $z$  в нелинейном случае, когда  $A_0 = 6.41$ .

Экспериментальное исследование нелинейных режимов распространения спиновых волн в системе латеральных микроволноводов проводилось методом мандельштам–бриллюэновской спектроскопии магнитных материалов в конфигурации обратного рассеяния. Экспериментальный макет для исследований представлял собой линию задержки с микрополосковыми антеннами шириной  $30 \mu\text{m}$ , которые использовались для возбуждения спиновых волн. Сначала строилась двумерная карта пространственного распределения вдоль системы латеральных микроволноводов квадрата намагниченности. Затем проводилось построение интегральной интенсивности сигнала вдоль оси  $x$ . Шаг сканирования вдоль оси  $x$  составлял  $200 \mu\text{m}$ . На рис. 4 символами (кружками и квадратами) показан результат экспериментально полученной зависимости интенсивности спиновой волны вдоль микроволновода  $S_2$  в линейном (мощность входного сигнала  $-25 \text{ dBm}$ ) и в нелинейном (мощность входного сигнала  $19 \text{ dBm}$ ) режимах для частоты сигнала  $5.15 \text{ GHz}$ , соответственно. Полученные результаты показывают увеличение длины связи в 1.3 раза в нелинейном случае по сравнению с линейным. Также видно хорошее взаимное соответствие результатов численного расчета и экспериментального исследования. Стоит отметить, что при дальнейшем увеличении мощности входного СВЧ сигнала рост величины длины связи не происходит из-за нелинейного затухания спиновой волны. Модель связанных нелинейных уравнений Гинзбурга–Ландау описывает эффекты нелинейного затухания, что и обуславливает справедливость ее использования для описания нелинейной динамики спиновых волн в латеральных микроволноводах.

## Выводы

В настоящей работе проведено численное и экспериментальное исследование нелинейной динамики спиновых волн в латеральных магнитных ЖИГ микроволноводах. Показано, что длина связи увеличивается при увеличении мощности входного СВЧ сигнала. Эффекты нелинейного переключения в системах латеральных магнитных микроволноводов позволяют создавать нелинейные ответвители и делители мощности спин-волнового сигнала в планарных топологиях магнетонных сетей для селективной обработки информационных сигналов.

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (№ 16-37-00217, № 16-02-00789) и РНФ (№ 16-19-10283).*

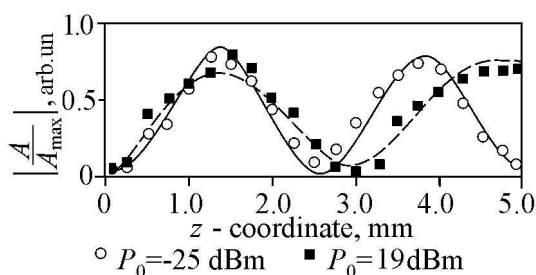


Рис. 4. Зависимость амплитуды спиновой волны от продольной координаты  $z$  в волноводе  $S_2$ , при разных уровнях мощности входного сигнала

Fig. 4. Dependence of the amplitude of the spin wave on the longitudinal coordinate  $z$  in the waveguide  $S_2$ , at different power levels of the input signal



## Библиографический список

1. 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. С.1099–1128.
2. Chumak A.V., Vasyuchka V.I., Serga A.A., Hillebrands B. Magnon spintronics // Nat. Phys. 2015. Vol. 11. P. 453.
3. Gurevich A.G., Melkov G.A. Magnetization Oscillations and Waves. London: CRC Press, 1996.
4. Stancil D.D., Prabhakar A. Spin Waves: Theory and Applications. Springer, 2009.
5. Розанов Н.Н. Диссипативные оптические солитоны // УФН. 2000. Т. 170, вып. 4. С. 462–465.
6. Zvezdin A.K., Popkov A.F. Contribution to the nonlinear theory of magnetostatic spin waves // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1983. Vol. 84. P. 606–615.
7. Zilberman P.E., Nikitov S.A., Temiryazev A.G. Four-magnon decay and the kinetic instability of a magnetostatic traveling wave in yttrium garnet ferrite films // JETP Lett. 1985. Vol. 42. Issue 3. P. 110.
8. Boardman A.D., Nikitov S.A., Waby N. Existence of spin-wave solitons in an anti-ferromagnetic film // Phys.Rev. B. 1993. Vol. 48. 13602.
9. Chen M., Tsankov M., Nash J., Patton C. Microwave magnetic-envelope dark solitons in yttrium iron garnet thin films // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 70. 1707.
10. Damon R.W., Eshbach J.R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // J. Phys. Chem. Solids. 1961. Vol. 19. P. 308.
11. O'Keeffe T.W., Patterson R.W. Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. Pp. 4886–4895.
12. Bajpai S.N. Excitation of magnetostatic surface waves: Effect of finite sample width // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58. P. 910.
13. Morozova M.A., Grishin S.V., Sadovnikov A.V., Romanenko D.V., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A. Band gap control in a line-defect magnonic crystal waveguide // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 107. 242402.
14. Demidov V.E., Demokritov S.O. Magnonic waveguides studied by microfocus Brillouin light scattering // IEEE Trans. Magn. 2015. Vol. 51. 0800215.
15. Beginin E.N., Sadovnikov A.V., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A. Multimode surface magnetostatic wave propagation in irregular planar YIG waveguide // Solid State Phenomena. 2014. Vol. 215. Pp. 389–393.
16. Beginin E., Sadovnikov A., Sharaevsky Y., Nikitov S. Spatiotemporal dynamics of magnetostatic and spin waves in a transversely confined ferrite waveguide // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2013. Vol. 77. Pp. 1429–1431.
17. Morozova M.A., Grishin S.V., Sadovnikov A.V., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A. Magnonic bandgap control in coupled magnonic crystals // IEEE Trans. Magn. 2014. Vol. 50. 4007204.

18. Demidov V.E., Demokritov S.O., Rott K., Krzysteczko P., Reiss G. Mode interference and periodic self-focusing of spin waves in permalloy microstrips // *Phys. Rev. B*. 2008. Vol. 77. 064406.
19. Kumar D., Adeyeye A.O. Broadband and total autocollimation of spin waves using planar magnonic crystals // *J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 117. 143901.
20. Suhl H. The theory of ferromagnetic resonance at high signal powers // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1957. Vol. 1. P. 209.
21. Slavin A.N., Buttner O., Bauer M., Demokritov S.O., Hillebrands B., Kostylev M.M., Kalinikos B.A., Grimalsky V.V., Rapoport Y. Collision properties of quasi-one-dimensional spin wave solitons and two-dimensional spin wave bullets // *Chaos*. 2003. Vol. 13.
22. Demidov V.E., Rekers P., Mahrov B., Demokritov S.O. Nonlinear transverse stabilization of spin-wave beams in magnetic stripes // *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 89. 212501.
23. Demidov V. E., Hansen U.-F., Dzyapko O., Koulev N., Demokritov S.O., Slavin A.N. Formation of longitudinal patterns and dimensionality crossover of nonlinear spin waves in ferromagnetic stripes // *Phys. Rev. B*. 2006. Vol. 74. 092407.
24. Demidov V.E., Jersch J., Rott K., Krzysteczko P., Reiss G., Demokritov S.O. Nonlinear propagation of spin waves in microscopic magnetic stripes // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102. 177207.
25. Demidov V.E., Evelt M., Bessonov V., Demokritov S.O., Prieto J.L., Munoz M., Ben Youssef J., Naletov V.V., de Loubens G., Klein O., Collet M., Bortolotti P., Cros V., Anane A. Direct observation of dynamic modes excited in a magnetic insulator by pure spin current // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. 32781.
26. Adam J.D., Davis L.E., Dionne G.F., Schloemann E.F., Stitzer S.N. Ferrite devices and materials // *IEEE Trans. MTT*. 2002. Vol. 50. Issue 3. P. 721.
27. Scott M.M., Patton C.E., Kostylev M.P., Kalinikos B.A. Nonlinear damping of high-power magnetostatic waves in yttrium-iron-garnet films // *Journal of Applied Physics*. 2004. Vol. 95. Pp. 6294–6301.
28. Hansen U.-H., Demidov V.E., Demokritov S.O. Dual-function phase shifter for spin-wave logic applications // *Applied Physics Letters*. 2009. Vol. 94. 252502.
29. Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Morozova M.A., Sharaevskii Yu.P., Grishin S.V., Sheshukova S.E., Nikitov S.A. Nonlinear spin wave coupling in adjacent magnonic crystals // *Appl. Phys. Lett.* 2016. Vol. 109. 042407.
30. Садовников А.В., Рожнев А.Г. Моделирование распространения магнитостатических волн в одномерных магнонных кристаллах // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. 2012. Т. 20, № 1. С. 143–159.
31. Karlqvist O. Calculation of the magnetic field in the ferromagnetic layer of a magnetic drum // *Trans. Roy. Inst. Techno.* 1954. Vol. 86, Issue 3.
32. Davies C.S., Sadovnikov A.V., Grishin S.V., Sharaevsky Y.P., Nikitov S.A., Kruglyak V.V. Field-controlled phase-rectified magnonic multiplexer // *IEEE Trans.* 2015. Vol. 51, Issue 1.

33. Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Odincov S.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Stognij A.I., Nikitov S.A. Frequency selective tunable spin wave channeling in the magnonic network // *Appl. Phys. Lett.* 2016. Vol. 108. 172411.
34. Lvov V.S. Wave Turbulence under Parametric Excitation. Berlin: Springer, 1994.
35. Ustinov A.B., Kalinikos B.A. A microwave nonlinear phase shifter // *Applied Physics Letters.* 2008. Vol. 93. 102504.

## References

1. Nikitov S.A., Kalyabin D.V., Lisenkov I.V., Slavin A.N., Barabanenkov Y.N., Osokin S.A., Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Morozova M.A., Sharaevsky Y.P., Filimonov Y.A., Khivintsev Y.V., Vysotsky S.L., Sakharov V.K., and Pavlov E.S. Magnonics: A new research area in spintronics and spin wave electronics. *Phys. Usp.* 2015. Vol. 58. Number 10.
2. Chumak A.V., Vasyuchka V.I., Serga A.A., Hillebrands B. Magnon spintronics. *Nat. Phys.* 2015. Vol. 11. P. 453.
3. Gurevich A.G., Melkov G.A. Magnetization Oscillations and Waves. London: CRC Press, 1996.
4. Stancil D. D., Prabhakar A. Spin Waves: Theory and Applications. Springer, 2009.
5. Rosanov N. Dissipative optical solitons. *Phys. Usp.* 2000. Vol. 43. Issue 4. Pp. 421–424.
6. Zvezdin A.K., Popkov A.F. Contribution to the nonlinear theory of magnetostatic spin waves. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1983. Vol. 84. P. 606–615.
7. Zilberman P.E., Nikitov S.A., Temiryazev A.G. Four-magnon decay and the kinetic instability of a magnetostatic traveling wave in yttrium garnet ferrite films. *JETP Lett.* 1985. Vol. 42. Issue 3. P. 110.
8. Boardman A.D., Nikitov S.A., Waby N. Existence of spin-wave solitons in an antiferromagnetic film. *Phys. Rev. B.* 1993. Vol. 48. 13602.
9. Chen M., Tsankov M., Nash J., Patton C. Microwave magnetic-envelope dark solitons in yttrium iron garnet thin films. *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 70. 1707.
10. Damon R.W., Eshbach J.R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. *J. Phys. Chem. Solids.* 1961. Vol. 19. P. 308.
11. O’Keeffe T.W., Patterson R.W. Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples. *J. Appl. Phys.* 1978. Vol. 49. Pp. 4886–4895.
12. Bajpai S.N. Excitation of magnetostatic surface waves: Effect of finite sample width. *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 58. P. 910.
13. Morozova M.A., Grishin S.V., Sadovnikov A.V., Romanenko D.V., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A. Band gap control in a line-defect magnonic crystal waveguide. *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107. 242402.
14. Demidov V.E., Demokritov S.O. Magnonic waveguides studied by microfocus Brillouin light scattering. *IEEE Trans. Magn.* 2015. Vol. 51. 0800215.
15. Beginin E.N., Sadovnikov A.V., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A. Multimode surface

- magnetostatic wave propagation in irregular planar YIG waveguide. *Solid State Phenomena*. 2014. Vol. 215. Pp. 389–393.
16. Beginin E., Sadovnikov A., Sharaevsky Y., Nikitov S. Spatiotemporal dynamics of magnetostatic and spin waves in a transversely confined ferrite waveguide. *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2013. Vol. 77. Pp. 1429–1431.
  17. Morozova M.A., Grishin S.V., Sadovnikov A.V., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A. Magnonic bandgap control in coupled magnonic crystals. *IEEE Trans. Magn.* 2014. Vol. 50. 4007204.
  18. Demidov V.E., Demokritov S.O., Rott K., Krzysteczko P., Reiss G. Mode interference and periodic self-focusing of spin waves in permalloy microstripes. *Phys. Rev. B*. 2008. Vol. 77. 064406.
  19. Kumar D., Adeyeye A.O. Broadband and total autocollimation of spin waves using planar magnonic crystals. *J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 117. 143901.
  20. Suhl H. The theory of ferromagnetic resonance at high signal powers. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1957. Vol. 1. P. 209.
  21. Slavin A.N., Buttner O., Bauer M., Demokritov S.O., Hillebrands B., Kostylev M.M., Kalinikos B.A., Grimalsky V.V., Rapoport Y. Collision properties of quasi-one-dimensional spin wave solitons and two-dimensional spin wave bullets. *Chaos*. 2003. Vol. 13.
  22. Demidov V.E., Rekers P., Mahrov B., Demokritov S.O. Nonlinear transverse stabilization of spin-wave beams in magnetic stripes. *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 89. 212501.
  23. Demidov V.E., Hansen U.-F., Dzyapko O., Koulev N., Demokritov S.O., Slavin A.N. Formation of longitudinal patterns and dimensionality crossover of nonlinear spin waves in ferromagnetic stripes. *Phys. Rev. B*. 2006. Vol. 74. 092407.
  24. Demidov V.E., Jersch J., Rott K., Krzysteczko P., Reiss G., Demokritov S.O. Nonlinear propagation of spin waves in microscopic magnetic stripes. *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102. 177207.
  25. Demidov V.E., Evelt M., Bessonov V., Demokritov S.O., Prieto J. L., Munoz M., Ben Youssef J., Naletov V. V., de Loubens G., Klein O., Collet M., Bortolotti P., Cros V., Anane A. Direct observation of dynamic modes excited in a magnetic insulator by pure spin current. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. 32781.
  26. Adam J.D., Davis L.E., Dionne G.F., Schloemann E.F., Stitzer S.N. Ferrite devices and materials. *IEEE Trans. MTT*. 2002. Vol. 50. Issue 3. P. 721.
  27. Scott M.M., Patton C.E., Kostylev M.P., Kalinikos B.A. Nonlinear damping of high-power magnetostatic waves in yttrium-iron-garnet films. *Journal of Applied Physics*. 2004. Vol. 95. Pp. 6294–6301.
  28. Hansen U.-H., Demidov V.E., Demokritov S.O. Dual-function phase shifter for spin-wave logic applications. *Applied Physics Letters*. 2009. Vol. 94. 252502.
  29. Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Morozova M.A., Sharaevskii Yu.P., Grishin S.V., Sheshukova S.E., Nikitov S.A. Nonlinear spin wave coupling in adjacent magnonic crystals. *Appl. Phys. Lett.* 2016. Vol. 109. 042407.

30. Sadovnikov A.V., Rozhnev A.G. Electrodynamical characteristics of periodic ferromagnetic structures. *Izvestiya VUZ. Appl. Nonlin. Dynamics*. 2012. Vol. 20, Issue 1. Pp. 143–159.
31. Karlqvist O. Calculation of the magnetic field in the ferromagnetic layer of a magnetic drum. *Trans. Roy. Inst. Techno.* 1954. Vol. 86, Issue 3.
32. Davies C.S., Sadovnikov A.V., Grishin S.V., Sharaevsky Y.P., Nikitov S.A., Kruglyak V.V. Field-controlled phase-rectified magnonic multiplexer. *IEEE Trans.* 2015. Vol. 51, Issue 1.
33. Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Odincov S.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Stognij A.I., Nikitov S.A. Frequency selective tunable spin wave channeling in the magnonic network. *Appl. Phys. Lett.* 2016. Vol. 108. 172411.
34. Lvov V.S. Wave Turbulence under Parametric Excitation. Berlin: Springer, 1994.
35. Ustinov A.B., Kalinikos B.A. A microwave nonlinear phase shifter. *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 93. 102504.



*Одинцов Сергей Александрович* родился в рабочем поселке Новоспасское, Ульяновской области (1995). Получил степень бакалавра (2015) по специальности «Радиофизика» и степень магистра (2017) по специальности «Прикладные математика и физика» на факультете нелинейных процессов Саратовского государственного университета. Работает в лаборатории «Метаматериалы» СГУ. Аспирант первого года обучения по направлению «Физика и астрономия», постоянный участник научных конференций. Опубликовал в соавторстве 6 статей в реферируемых журналах.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83  
 Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
 E-mail: odinoff@gmail.com



*Садовников Александр Владимирович* родился в Саратове (1987). Окончил с серебряной медалью МОУ СОШ № 73 (Саратов) и поступил на факультет нелинейных процессов СГУ (1987), который окончил с красным дипломом. В 2009 году поступил в аспирантуру по специальностям «Радиофизика», «Оптика» и в 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Работает старшим научным сотрудником в лаборатории «Метаматериалы» СГУ и доцентом на кафедре «Физика открытых систем». Научные интересы: планарные структуры, метаматериалы, системы обработки и передачи информации, бриллюэновская спектроскопия, управляемые микро- и наноструктуры. Имеет 50 научных статей в рецензируемых научных журналах.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83  
 Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
 E-mail: sadovnikovav@gmail.com