



УДК 537.613; 530.182; 622.4

<https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-6-59-67>

Нелинейные режимы спин-волновой связи в системе неидентичных магнонных структур

С. А. Одинцов, А. В. Садовников

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

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

Автор для переписки Одинцов Сергей Александрович, odinoff@gmail.com

Поступила в редакцию 20.08.2018, принята к публикации 4.09.2018

Тема. Исследование нелинейных режимов распространения спин-волнового сигнала в латеральных неидентичных структурах с учётом многомодовости спиновых волн. **Цель.** Рассмотрение влияния межмодовой связи на распределение интенсивности поверхностных магнитостатических волн, распространяющихся в латеральных волноводах различной ширины. Выявление возможности изменения коэффициента связи с помощью варьирования мощности входного сигнала. **Методы.** Исследование нелинейных режимов распространения спиновых волн осуществлялось путем численного интегрирования системы двух связанных уравнений Гинзбурга–Ландау. Расчет значений коэффициента связи спиновых волн между латеральными волноводами и коэффициента пропорциональности проводился методом конечных элементов. Методом микромагнитного моделирования для получения карт распределения динамической намагниченности спиновых волн решались уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта. **Результаты.** Показано, что режим работы нелинейного направленного ответвителя на основе латеральной системы неидентичных микроволноводов определяется геометрическими параметрами структуры, а именно, отношением ширин микроволноводов. Учет неоднородного распределения внутреннего магнитного поля и изменение ширины одного из микроволноводов приводит к изменению пороговой мощности СВЧ сигнала, при которой наблюдаются эффекты изменения длины связи спиновых волн и нелинейного переключения сигнала. **Обсуждение.** Зависимость длины связи спиновых волн от мощности входного сигнала обеспечивает возможность работы направленного ответвителя информационного сигнала в нелинейном режиме. Благодаря возможности перестройки полосы частот путем изменения величины магнитного поля оказывается возможным создание устройств обработки СВЧ сигнала на принципах магноники, таких как нелинейные демультиплексеры, делители мощности и направленные ответвители СВЧ сигнала.

Ключевые слова: латеральные неидентичные волноводы, спиновая волна, устройства обработки СВЧ сигналов, ответвитель.

Образец цитирования: Одинцов С.А., Садовников А.В. Нелинейные режимы спин-волновой связи в системе неидентичных магнонных структур // Изв. вузов. ПНД. 2018. Т. 26, № 6. С. 59–67.

<https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-6-59-67>

Финансовая поддержка. Разработка теоретических моделей, описывающих динамику распространения и дипольной связи спиновых волн в структурах с латеральной связью, выполнена при поддержке проекта РФФ № 18-79-00198, расчет спектра собственных мод при поддержке РФФИ № 16-02-00789, стипендии СП-2819.2018.5 и гранта Президента РФ МК-3650.2018.

Nonlinear spin-wave propagation in the nonidentical magnonic structures

S. A. Odintsov, A. V. Sadovnikov

Saratov State University

83, Astrakhanskaya str., 410012 Saratov, Russia

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

Correspondence should be addressed to Odintsov Sergey A., odinoff@gmail.com

Received 20.08.2018, accepted for publication 4.09.2018

Topic. Investigation of nonlinear propagation modes of a spin-wave signal in lateral non-identical structures, taking into account the multi-mode spin waves. **Aim.** Consideration of the effect of intermode coupling on the intensity distribution of surface magnetostatic waves propagating in lateral waveguides of various widths. Identify the possibility of changing the coupling coefficient by varying the power of the input signal. **Methods.** The study of nonlinear propagation modes of spin waves was carried out by numerical integration of a system of two coupled Ginzburg–Landau equations. The calculation of the values of the coupling coefficient of the spin waves between the lateral waveguides and the proportionality coefficient was carried out using the finite element method. Using micromagnetic simulation, the Landau–Lifshitz–Gilbert equation was solved using the finite difference method to obtain maps of the distribution of the dynamic magnetization of spin waves. **Results.** It is shown that the mode of operation of a nonlinear directional coupler based on the lateral system of non-identical microwave channels is determined by the geometrical parameters of the structure, namely, the ratio of the widths of the microwave channels. Inhomogeneous distribution of the internal magnetic field and a change in the width of one of the microwave lead to a change in the threshold power of the microwave signal, at which the effects of the variation of the coupling length of spin waves and a nonlinear switching signal are observed. **Discussion.** The dependence of the coupling length of the spin waves on the input signal power allows the directional coupler of the information signal to operate in a nonlinear mode. Due to the possibility of tuning the frequency band by changing the magnitude of the magnetic field, it is possible to fabricate magnonic based microwave signal processing devices, such as nonlinear demultiplexers, power splitters and directional microwave signal couplers.

Key words: lateral, irregular waveguides, spin wave, signal processing devices, coupler.

Reference: Odintsov S.A., Sadovnikov A.V. Nonlinear spin-wave propagation in the nonidentical magnonic structures. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 6, pp. 59–67. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-6-59-67>

Acknowledgements. The development of theoretical models describing the dynamics of the propagation and dipole coupling of spin waves was performed with the support of the project RNF (no. 18-79-00198); the calculation of eigenspectrum was supported by the Russian Foundation for Basic Research no. 16-02-00789 and in part by the grant of the President of the Russian Federation under Grant MK-3650.2018 and Fellowship (Stipendia) SP-2819.2018.5.

Введение

В настоящее время большой интерес представляет исследование микро- и наноразмерных спин-волновых (магнонных) ответвителей и делителей сигнала (magnonic coupler) [1, 2]. Исследования в области магноники направлены на создание микро- и наноразмерных устройств генерации, передачи и обработки информационных сигналов в СВЧ и ТГц диапазонах длин волн [3–6]. Одним из перспективных материалов для создания латеральных массивов магнонных структур является железо-иттриевый гранат (ЖИГ) ввиду рекордно низкого коэффициента затухания спиновых волн. Многомодовый режим распространения спиновых волн является характерным для поперечно ограниченных плёнок ЖИГ [7] и, как показано в работе [2], в случае латеральных топологий магнонных структур допускает использование для увеличения коэффициентов передачи сигнала между выходными портами ответвителя/делителя мощности. Стоит отметить, что в системах генерации когерентных спин-волновых мод [8] учет нелинейных режимов в латеральных топологиях [9] особенно важен. Использование нелинейных эффектов в ЖИГ [10], позволяет создавать перестраиваемые спин-волновые устройства, в том числе на плёнках ЖИГ нанометровой толщины [11]. Создание латеральных топологий магнитных волново-

дов позволяет использовать дипольную связь спиновых волн как дополнительный механизм для управления линейными и нелинейными режимами распространения сигнала. Однако нелинейные режимы в случае многомодового распространения спин-волнового сигнала в латеральных структурах не исследованы.

В настоящей работе проведено рассмотрение влияния межмодовой связи на режимы нелинейного распространения спиновых волн в латеральной системе неидентичных магнитных микроволноводов. Показано, что изменение ширины одного из микроволноводов приводит к изменению пороговой мощности СВЧ сигнала, при которой наблюдаются эффекты изменения длины связи спиновых волн и нелинейного переключения сигнала. Исследовано влияние неоднородного распределения внутреннего магнитного поля на эффективность спин-волновой связи.

1. Модель структуры

Структура, рассматриваемая в данной работе, показана на рис. 1, *a*. Она представляет собой два неидентичных латеральных микроволновода S_1 и S_2 из плёнки ЖИГ ($Y_3Fe_5O_{12}$ (111)), лежащих на подложке из галлий-гадоллиниевого граната ($Gd_3Ga_5O_{12}$ (111)). Микроволновод S_1 имеет ширину w_1 , ширина w_2 микроволновода S_2 варьировала от 250 до 500 мкм, расстояние между волноводами $d = 10$ мкм.

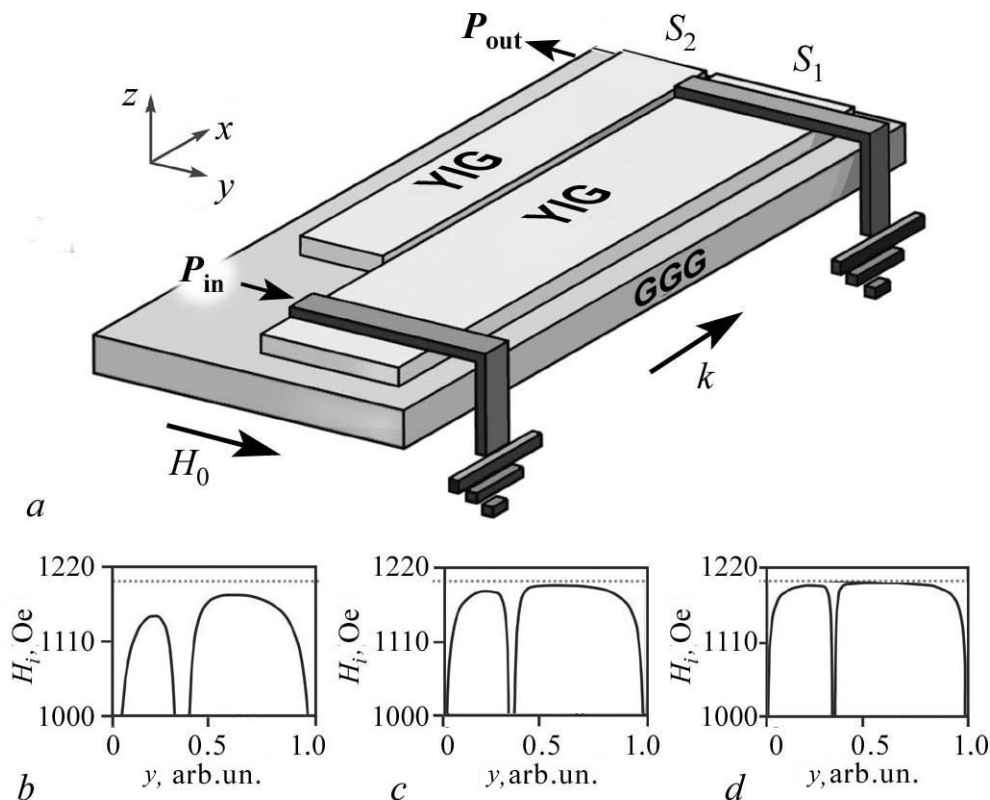


Рис. 1. *a* – схематическое изображение исследуемой структуры; форма внутреннего магнитного поля H_x , Oe в латеральных волноводах различной ширины w , мкм: *b* – $w_1 = 200$, $w_2 = 100$; *c* – $w_1 = 500$, $w_2 = 250$; *d* – $w_1 = 1000$, $w_2 = 500$

Fig. 1. *a* – scheme of the structure under study; form of internal field distribution in side-coupled waveguides of different width w , μm : *b* – $w_1 = 200$, $w_2 = 100$; *c* – $w_1 = 500$, $w_2 = 250$; *d* – $w_1 = 1000$, $w_2 = 500$

Для численного моделирования распространения поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) использовался метод конечных элементов (МКЭ) для решения полной системы уравнений Максвелла. Исследуемая структура помещена во внешнее магнитное поле H_0 , направленное вдоль оси y .

Граничные условия при моделировании МКЭ выбраны в виде «магнитных стенок» (касательная составляющая вектора напряжённости магнитного поля равна нулю) на левой и правой границах расчётной области 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 [12–14]

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

где $\mu(f) = (f_H(f_H + f_M) - f^2)/(f_H^2 - f^2)$, $\mu_a(f) = (f_M f)/(f_H^2 - f^2)$, $f_H = \gamma H_0$, $f_M = 4\pi\gamma M_0$ и $\gamma = 2.8$ МГц/Э – гиромангнитное отношение для ЖИГ. $M_0 = 139$ Гс – намагниченность насыщения пленки ЖИГ. Диэлектрическая проницаемость ЖИГ в численном моделировании полагалась равной $\varepsilon = 14$.

Распределение статического внутреннего магнитного поля H_i вдоль оси y сильно неоднородно ввиду анизотропии формы ЖИГ микроволноводов. Из рис. 1, $b-d$ видно, как распределения меняются в зависимости от изменения ширины волноводов. При этом чем больше различие в значении ширин микроволноводов, тем больше разница величин внутренних магнитных полей в центрах обеих структур и тем меньше эффективность связи ПМСВ, распространяющихся вдоль оси x . Также отметим, что распределение поля $H_i(y)$ ассиметрично относительно центра каждой из латеральных структур, что приводит к изменению интеграла перекрытия собственных мод отдельно взятых ЖИГ микроволноводов [1, 21] и, как следствие, к изменению связи между распространяющимися ПМСВ. Таким образом, из решения статической задачи становится понятным, что для моделирования МКЭ и вычисления спектров собственных мод волн, распространяющихся в системе латеральных магнитных микроволноводов, необходимым является учет неоднородного распределения статического магнитного поля внутри структур.

2. Результаты численного эксперимента

Спектр собственных мод двух латеральных микроволноводов состоит из набора симметричных и антисимметричных мод [1]. Симметричные моды соответствуют случаю, когда амплитуды магнитных потенциалов обоих магнитных волноводов имеют одну и ту же фазу. В антисимметричной моде сдвиг фазы между магнитными потенциалами составляет π . Но в случае неидентичных волноводов шириной $w_1 = 500$ мкм и $w_2 = 250$ мкм мода k_{++} соответствует первой собственной моде $n = 1$ идентичных волноводов, а моды k_{+-} и k_{-+} соответствуют расщепленной второй моде $n = 2$ идентичных волноводов. На рис. 2, a показана дисперсионная характеристика, описанных выше мод ПМСВ, распространяющихся в данной структуре. Здесь f_{\perp} – частота ферромагнитного резонанса. На рис. 3 показаны карты распределения намагниченности $|m_z|^2$, полученные путем решения уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта [15, 16] методом конечных разностей [17].

Видно, что при возбуждении ПМСВ в волноводе S_1 волна распространяется вдоль оси x . В латерально расположенных волноводах наблюдается эффект перераспределения мощности между волноводами вследствие интерференции распространяющихся симметричной и антисимметричной волн. Ввиду различия размеров микроволноводов не удается достичь равенства фа-

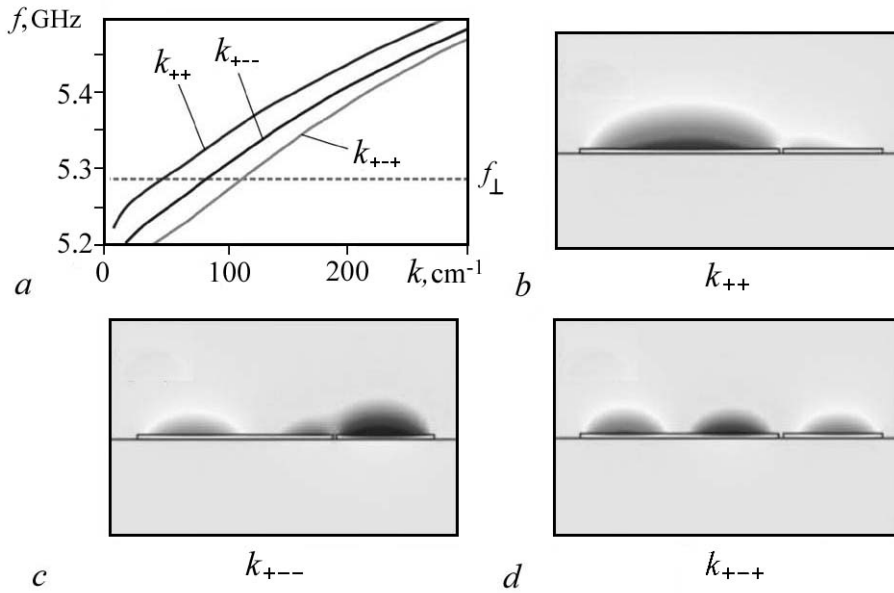


Рис. 2. Дисперсионная характеристика исследуемой структуры при ширине волноводов $w_1 = 500$ мкм и $w_2 = 250$ мкм (а); характерные распределения компоненты E_x (b-d) соответствующих мод волн, дисперсия которых изображена на фрагменте (а)

Fig. 2. The dispersion characteristic of the structure under study with the waveguide width $w_1 = 500$ μm and $w_2 = 250$ μm (a); distributions of the E_x (b-d) component of the modes that correspond to the lines on the dispersion characteristics (a)

зовых скоростей ширинных мод одинаковой четности. Однако в случае, когда, например, ширина волновода S_1 вдвое больше ширины волновода S_2 , оказывается возможным эффективная связь второй ширинной моды [18–20] микроволновода S_1 с первой модой волновода S_2 . Видно, что наиболее эффективная связь спиновых волн наблюдается при частоте входного сигнала $f = 5.15$ ГГц. Причина отсутствия полной перекачки энергии спиновой волны из S_1 в S_2 заключается в данном случае в неравенстве величин внутренних полей в центрах обоих микроволноводов (см. рис. 1, c).

В случае линейно распространяющихся магнитоэлектрических волн в неидентичных магнитных микроволноводах связь их невозможна из-за различных фазовых скоростей, которые зависят от геометрии волноводов. Но при учёте нелинейности существует возможность связи отдельных мод. Из-за влияния нелинейности, проявляющейся в данном случае в уменьшении проекции намагниченности на ось y с ростом амплитуды прецессии вектора намагниченности, можно добиться синхронизма ширинных мод различной четности, то есть равенства фазовых скоростей данных мод, что приведет к их эффективной связи.

В работе [21] представлены расчёты нелинейных эффектов в структуре из латеральных микроволноводов одинаковой ширины и показано, что динамика спиновых волн в латеральных микроволноводах описывается системой связанных нелинейных уравнений Гинзбурга–Ландау [16] в форме

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

Здесь $\Phi_{1,2} = \Phi_{1,2}(x)|_{y=y_{1,2}}$ – амплитуда спиновой волны вдоль оси x , $y_{1,2}$ координаты центральных точек в волноводах S_1 и S_2 , соответственно; $k_{1,2} = k_{1,2}(f)$ – волновое число спиновой волны, распространяющейся в одиночном микроволноводе; $\kappa = \kappa(f) = \beta C(f) \approx |k_s(f) - k_{as}(f)|$ –

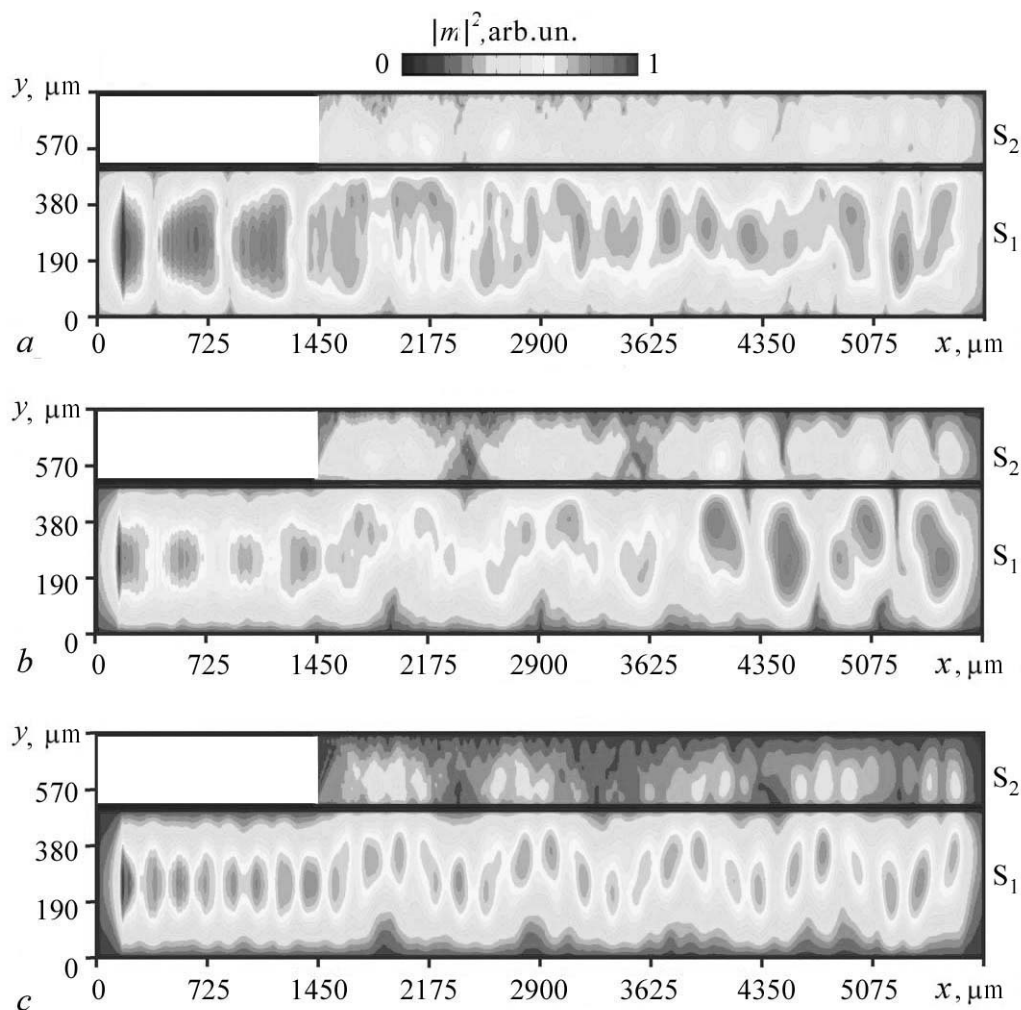


Рис. 3. Карты распределений динамической намагниченности $|m_z^2|$ в латеральных неидентичных волноводах на частотах входного сигнала f , ГГц: $a - 5.15$, $b - 5.25$, $c - 5.35$

Fig. 3. Map of distribution of dynamic magnetization $|m_z^2|$ component in lateral nonidentical waveguides for f , GHz: $a - 5.15$, $b - 5.25$, $c - 5.35$

коэффициент связи спиновых волн между латеральными волноводами; β – коэффициент пропорциональности; $\zeta = \frac{dk}{d\varphi^2}$ – нелинейный коэффициент, который определяется из условия уменьшения намагниченности насыщения при увеличении амплитуды спиновой волны с учетом дисперсионного соотношения [21]; $\nu_1 = \frac{1}{v_g} \left| \frac{\partial \omega}{\partial H_1} \right| \frac{\Delta H}{2}$ 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. Для расчёта нелинейных режимов распространения спиновых волн использовались следующие значения нелинейного параметра $\zeta = 1.77 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ и параметров линейного и нелинейного затухания $\nu_1 = 13.03 \text{ м}^{-1}$ и $\nu_2 = 50.09 \text{ м}^{-1}$, соответственно. В данной модели оказывается возможным учитывать различную ширину микроволноводов, используя дисперсионные зависимости $k_{1,2}(f)$, полученные из расчетов методом конечных элементов.

Результаты расчета порогов нелинейного переключения [22] для системы неидентичных структур представлены на рис. 4. На вставке рис. 4 представлена амплитудная зависимость

коэффициента $T = 20 \log(P_2/P_1)$ на выходе микроволновода S_2 . На графике отмечены точки P_1 и P_2 , соответствующие двум режимам спин-волнового сигнала. Точка P_1 соответствует режиму, при котором мощность сигнала на конце волноводов делится пополам между S_1 и S_2 , а точка P_2 соответствует режиму, при котором максимально возможное значение интенсивности ПМСВ сосредоточено в выходной секции микроволновода S_2 . Зависимость значений мощности P_1 и P_2 от $\Delta w = |w_2 - w_1|$ показана на рис. 4. При расчёте ширина волновода S_1 была фиксирована ($w_1 = 500$ мкм), а ширина w_2 менялась в диапазоне от 250 мкм до 500 мкм. При изменении ширины одного из волноводов оказывается возможным сближать на амплитудной зависимости значения величин P_1 и P_2 (см. рис. 4). В диапазоне $50 < \Delta w < 100$ мкм наблюдается наименьшее расхождение в критических мощностях P_1 и P_2 . Таким образом, режим работы нелинейного направленного ответвителя на основе латеральной системы неидентичных микроволноводов определяется геометрическими параметрами структуры, а именно, отношением ширин микроволноводов. При проектировании устройств обработки информационных сигналов важным оказывается создание функциональных межсоединений в планарных топологиях магنونных сетей. Предложенная система неидентичных магнитных структур может быть использована не только в качестве элемента для соединения функциональных блоков, но также в качестве системы нелинейного демультиплексирования сигнала, в которой реализуется режимы пространственно-частотного деления многочастотного сигнала в зависимости от амплитуды сигнала.

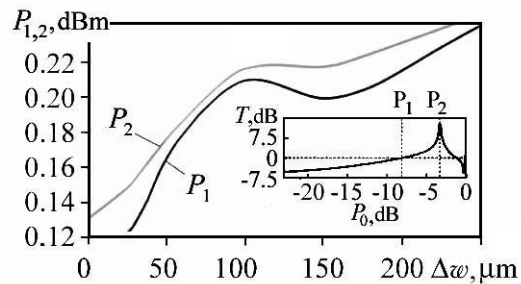


Рис. 4. Зависимость пороговых мощностей P_1 и P_2 от величины разницы ширин Δw латеральных микроволноводов

Fig. 4. Dependence the threshold power P_1 and P_2 versus the value of the parameter Δw

Выводы

Таким образом, в настоящей работе проведено исследование влияния межмодовой связи на режимы нелинейного распространения спиновых волн в латеральной системе неидентичных магнитных ЖИГ микроволноводов. Показана возможность управления пороговыми значениями мощности сигнала при изменении геометрии структуры. Выявлено влияние неоднородного распределения внутреннего магнитного поля в микроволноводах на эффективность дипольной спин-волновой связи в латеральных структурах. Использование нелинейных эффектов в системах неидентичных латеральных магнитных микроволноводов позволяют создавать устройства обработки СВЧ сигнала на принципах магноники с управлением свойствами спиновых волн.

References

1. Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Sheshukova S.E, Romanenko D.V., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A. Directional multimode coupler for planar magnonics: Side-coupled magnetic stripes. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 107, 202405.
2. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Gubanov V.A., Odintsov S.A., Martyshkin A.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A. Spin-wave intermodal coupling in the interconnection of magnonic units. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, vol. 112, 142402.
3. Sander D., Valenzuela S.O., Makarov D., Marrows C.H., Fullerton E.E., Fisher P., McCord J.,

- Vavassori P., Smangin S., Pirro P., Hillebrands B., Kent A.D., Jungwirth T., Gutfleisch O., Kim C.G., Berger A. The 2017 Magnetism Roadmap. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, vol. 50, 363001.
4. Stamps R., Breitzkreutz S., Akerman J., Chumak A.V., Otani Y., Bauer G., Thiele J.U., Bowen M., Majetich S.A., Klaui M., Prejbeanu I.L., Dieny B., Dempsey N., Hillebrands B. The 2014 Magnetism Roadmap. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2014, vol. 47, 333001.
 5. Demidov V.E., Urazhdin S., Zholud A., Sadovnikov A.V., Slavin A.N., Demokritov S.O. Spin-current nano-oscillator based on nonlocal spin injection. *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, 8578.
 6. ITRS, <http://www.itrs2.net/itrs-reports.html> for «International Technology Roadmap for Semiconductors. 2015 edition» (accessed 1 April 2017).
 7. Demokritov S. O., Hillebrands B., Slavin A. N. Brillouin light scattering studies of confined spin waves: Linear and nonlinear confinement. *Phys. Rep.*, 2001, vol. 348, 441.
 8. Demidov V.E., Urazhdin S., Zholud A., Sadovnikov A.V., Slavin A.N., Demokritov S.O. Spin-current nano-oscillator based on nonlocal spin injection. *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, 8578.
 9. Demidov V.E., Urazhdin S., Zholud A., Sadovnikov A.V., Demokritov S.O. Nanoconstriction-based spin-Hall nano-oscillator. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 105, 172410.
 10. Demidov V.E., Urazhdin S., de Loubens G., Klein O., Cros V., Anane A., Demokritov S.O. Magnetization oscillations and waves driven by pure spin currents. *Phys. Rep.*, 2017, vol. 673, pp. 1–31.
 11. Collet M., Gladii O., Evelt M., Bessonov V., Soumah L., Bortolotti P., Demokritov S.O., Henry Y., Cros V., Bailleul M., Demidov V.E., Anane A. Spin-wave propagation in ultra-thin YIG based waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, vol. 110, 092408.
 12. Gurevich A.G., Melkov G.A. Magnetization Oscillations and Waves. CRC Press, London, 1996.
 13. Stancil D.D., Prabhakar A. Spin Waves: Theory and Applications. Springer, 2009.
 14. Sodha M. S., Srivastava N.C. Microwave Propagation in Ferromagnetics. Springer US, New York, 1981.
 15. Landau L., Lifshitz E. On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies. *Phys. Z. Sowjetunion*, 1935, vol. 8, p. 153.
 16. Ginzburg V.L., Landau L.D. On the theory of superconductivity. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 1950, vol. 20, pp. 1064–1082.
 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, 107133.
 18. O’Keeffe T.W., Patterson R.W. Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples. *J. Appl. Phys.*, 1978, vol. 49, 4886.
 19. Bajpai S.N. Excitation of magnetostatic surface waves: Effect of finite sample width. *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 58, 910.
 20. 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.
 21. Sadovnikov A.V., Odintsov S.A., Beginin E.N., Grachev A.A., Gubanov V.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A. Nonlinear spin wave effects in the system of lateral magnonic structures. *JETP Letters*, 2018, vol. 107:1, pp. 25–29.
 22. Damon R.W., Eshbach J.R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. *J. Phys. Chem. Solids*, 1961, vol. 19, p. 308.



Одинцов Сергей Александрович родился в поселке Новоспасское Ульяновской обл. (1995). Получил степень магистра по специальности «Прикладные математика и физика» на факультете нелинейных процессов Саратовского государственного университета (2017). Аспирант СГУ. Лаборант-исследователь лаборатории «Магнитные явления» СГУ. Постоянный участник научных конференций. Имеет 11 научных статей в реферируемых научных журналах.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
E-mail: odinoff@gmail.com



Садовников Александр Владимирович родился в Саратове (1987). Окончил с серебряной медалью МОУ СОШ № 73 Саратова (2004) и поступил на факультет нелинейных процессов СГУ. Окончив с красным дипломом ФНП, в 2009 году поступил в аспирантуру по специальностям «Радиофизика», «Оптика». Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2012, СГУ). Имеет более 60 статей в реферируемых научных журналах.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
E-mail: sadovnikovav@gmail.com