

05,13

Латеральный спин-волновой транспорт в системе неидентичных магнотно-кристаллических микроволноводов

© В.А. Губанов, С.Е. Шешукова, А.В. Садовников

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
Саратов, Россия

E-mail: vladmeen@gmail.com

Поступила в Редакцию 9 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 9 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

Методом мандельштам-бриллюэновской спектроскопии и методом микромагнитного моделирования исследованы режимы управления дипольной связью в латеральной системе неидентичных магнотных кристаллов. Выявлены режимы пространственной и частотной селекции спин-волнового сигнала вблизи частоты зоны непротускания магнотного кристалла. Исследовано влияние изменения геометрических параметров на свойства волноводных мод вблизи частоты брэгговского резонанса. Полученные результаты могут быть использованы для создания устройств обработки СВЧ-сигнала, таких как демультимплексоров, делителей мощности, ответвителей.

Ключевые слова: спиновые волны, магнотника, латеральные структуры, магнотный кристалл.

DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51309.31H

1. Введение

В последнее время активно развивается новое направление спинтроники с использованием ферритов-гранатов — магнотника [1], в рамках которой транспортные свойства спин-поляризованных электронов не используются, а перенос информации происходит путем передачи сигнала с помощью спиновых волн (СВ) [2]. При таком подходе удастся реализовать целый ряд функциональных блоков обработки сигнала на принципах магнотники [3,4]. Малая константа затухания СВ в пленках железо-иттриевого граната (YIG) толщинами от единиц микрон и вплоть до 20 nm, выращенных методами жидко-фазной эпитаксии [5] либо техникой импульсного лазерного осаждения [6,7] позволяет существенно минимизировать потери при распространении сигнала, закодированного в виде амплитуды и фазы СВ. Диэлектрические свойства YIG позволяют существенно уменьшить омические потери по сравнению с металлическими ферромагнитными пленками.

Управление свойствами СВ возможно путем создания нерегулярных тонкопленочных структур с нарушением свойств трансляционной симметрии [8,9], локально индуцированных деформаций [10] или создания периодических в направлении распространения СВ-структур — магнотных кристаллов (МК). МК активно исследуются благодаря возможности формирования запрещенных зон [11]. При этом путем создания составных структур на основе тонких магнитных пленок удастся управлять свойствами СВ при использовании геометрических эффектов [12]. Последние используются для подходов градиентной магнотники [13,14] и концепции построения трехмерных магнотных сетей [15,16]. Использование латерального спин-волнового транспорта в магнотных

структурах находит применение для реализации режимов пространственно-частотной селекции информационных сигналов, реализующемся, например, в структуре, состоящей из неидентичных МК [17]. В последнем случае представляет интерес рассмотреть эффекты пространственно-частотного разделения спин-волнового сигнала при отдельном возбуждении каждого из МК, что и являлось целью настоящей работы.

В настоящей работе на основе численного микромагнитного моделирования и экспериментального исследования методом мандельштам-бриллюэновской спектроскопии показана возможность одновременного использования свойств дипольной спин-волновой связи и многомодового режима распространения СВ в связанной латеральной системе неидентичных магнотных кристаллов на частотах, близких к полосе непротускания МК.

2. Исследуемые структуры и методика численного моделирования

На рис. 1 показано схематическое изображение исследуемой структуры, состоящая из двух МК ($MC1$ и $MC2$), ориентированных вдоль направления оси y . Латеральный зазор между боковыми стенками магнотных кристаллов $MC1$ и $MC2$ $d = 20 \mu\text{m}$. Каждый МК представляет собой структуру с канавками глубиной $1 \mu\text{m}$, повторяющимися с периодом $D = 200 \mu\text{m}$. Длина участков с периодической системой канавок составляет величину $L_c = 5 \text{mm}$. Ширины $MC1$ и $MC2$ вдоль оси z составляли $w_1 = 200 \mu\text{m}$ и $w_2 = 500 \mu\text{m}$, соответственно. В качестве материала для изготовления магнотных кристаллов была использована пленка железо-иттриевого граната (YIG) $Y_3Fe_5O_{12}$ [18] толщиной $t = 10 \mu\text{m}$ с намагни-

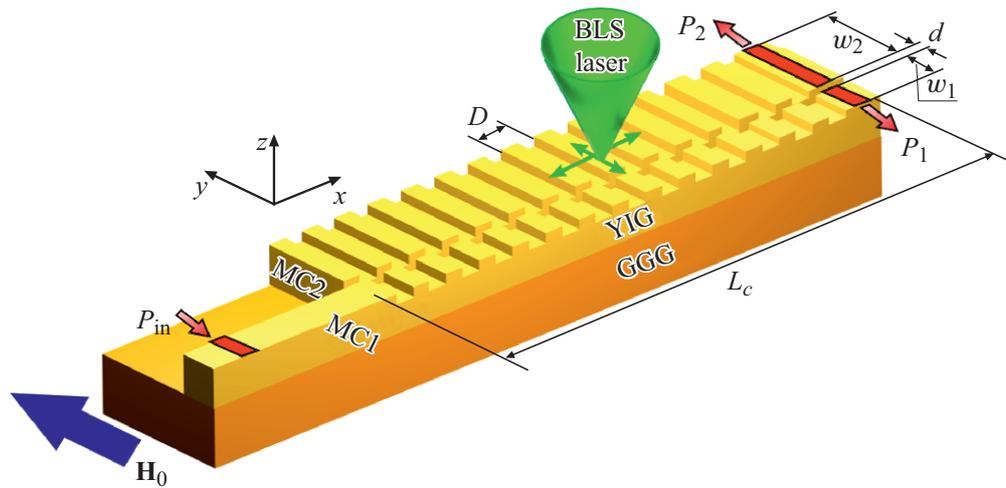


Рис. 1. Изображение исследуемой структуры

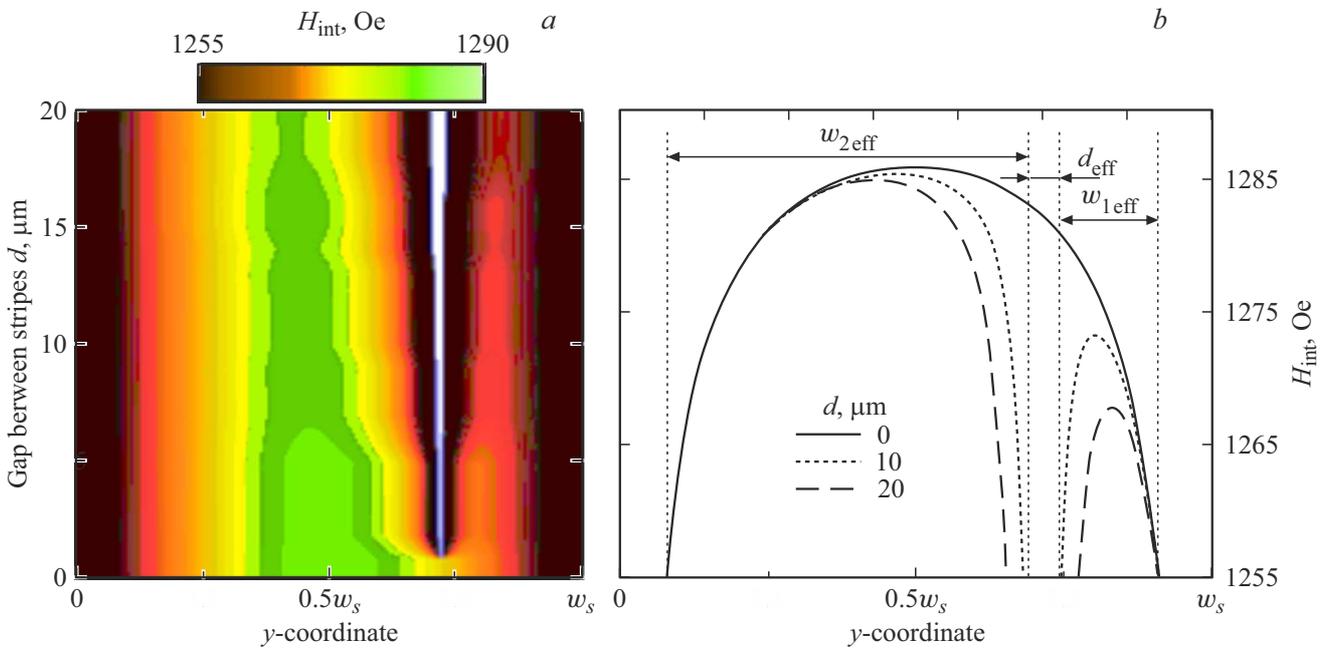


Рис. 2. Карта распределения величины внутреннего магнитного поля вдоль оси y в зависимости от расстояния между магнитными кристаллами $MC1$ и $MC2$ (a). Профили внутреннего магнитного поля в зависимости от расстояния между магнитными кристаллами $MC1$ и $MC2$ (b).

ченностью насыщения $M_0 = 139$ G и шириной линии ферромагнитного резонанса $\Delta H = 0.54$ Oe, измеренной на частоте 9.7 GHz. YIG выращен методом высокотемпературной жидкофазной эпитаксии на подложке галлий-гадолиниевого граната (GGG) $Gd_3Ga_5O_{12}$. Пленка была структурирована с помощью установки локальной лазерной абляции на основе волоконного YAG:Nd лазера с 2D гальванометрическим сканирующим модулем (Cambridge Technology 6240H), работающем в импульсном режиме с длительностью импульса 50 ns и мощностью 50 mJ. Метод был адаптирован для использования на пленках YIG с толщинами 0.1–10 μm .

Структура помещалась между полюсами электромагнита GMW 3472-70, при этом ориентация магнитного поля совпадала с направлением оси y (см. рис. 1). В такой конфигурации на входную антенну P_{in} , расположенной на $MC1$, подавался СВЧ-сигнал с генератора Anritsu MG3692C. В данной геометрии вдоль МК возможным оказывалось возбуждение поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) [19,20]. Прием сигнала осуществлялся выходными антеннами P_1 и P_2 на $MC1$ и $MC2$, соответственно. Ширины микрополосковых антенн P_{in} , P_1 и P_2 составляли 30 μm . Величина прикладываемого внешнего магнитного поля $H_0 = 1300$ Oe.

Исследование стационарного пространственного распределения динамической намагниченности было проведено методом Манделъштам–Бриллюэновской спектроскопии (Brillouin light scattering (BLS)), в основе которого лежит эффект неупругого рассеяния света на когерентно возбуждаемых магнонах [21,22]. Эксперимент проводился в конфигурации квазиобратного рассеяния, интенсивность оптического сигнала при этом оказывается пропорциональной квадрату динамической намагниченности в пространственной области, где сфокусирован лазерный луч на поверхности пленки YIG: $I_{\text{BLS}} = \sqrt{m_z^2 + m_x^2}$.

Экспериментальные результаты сопоставлялись с результатами микромагнитного моделирования (ММ), проведенные в программе MuMax3 [23] на основе численного решения уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта [24,25]. Метод ММ позволяет численно решить задачу о возбуждении и распространении СВ в системе латерально связанных неидентичных магнитных кристаллов. Определяя область возбуждения и параметры входного сигнала в МК можно наблюдать стационарный режим установления волнового процесса в структуре. При расчете размер ячейки численной сетки был положен $0.2 \times 0.7 \times 10 \mu\text{m}$.

Был проведен расчет пространственных зависимостей величины внутреннего магнитного поля $H_{\text{int}}(y)$ для значений величины зазора между магнитными кристаллами $0 < d < 20 \mu\text{m}$ (рис. 2, *a, b*). На оси абсцисс отложено значение координаты y в диапазоне $0 < y < w_s$, где $w_s = w_1 + w_2 + d$. Из анализа профилей $H_{\text{int}}(y)$, показанных на рис. 2, *b*, следует что при увеличении зазора d наблюдается уменьшение величины $H_{\text{int}}(y = y_{c1})$, где координата y_{c1} соответствует центру *MC1*. Изменение величины внутреннего поля сопровождается изменением спектра ПМСВ в *MC1,2* и изменением коэффициента связи СВ, распространяющихся вдоль латеральной структуры. Последнее является следствием изменения величины эффективного зазора d_{eff} и эффективной ширины спин-волноводных каналов $w_{1,2\text{eff}}$, образующихся при касательном намагничивании *MC1,2* [26]. Эффективная ширина $w_{1,2\text{eff}}$ меньше чем геометрическая ширина волновода за счет существования полей размагничивания [22]. При этом ширина эффективного зазора d_{eff} увеличивается. Ввиду этого при экспериментальном изготовлении латеральных структур можно пользоваться эмпирическим правилом для выбора величины зазора: $d \sim 2t$, которое обеспечивает наиболее эффективную передачу энергии СВ между магнитными кристаллами [4].

Возбуждение СВ в *MC1* происходило на частоте $f_B = 5.6 \text{ GHz}$. При этом мощность входного сигнала составляла величину $P_0 = -15 \text{ dBmW}$, что обеспечивало линейный режим возбуждения и распространения СВ вдоль структуры. Эксперимент осуществлялся в импульсном режиме: сигнал имел форму прямоугольных импульсов длительностью 200 ns с периодом повторения $2 \mu\text{s}$. Пространственное сканирование осуществлялось в области $2.5 \times 0.73 \text{ mm}^2$.

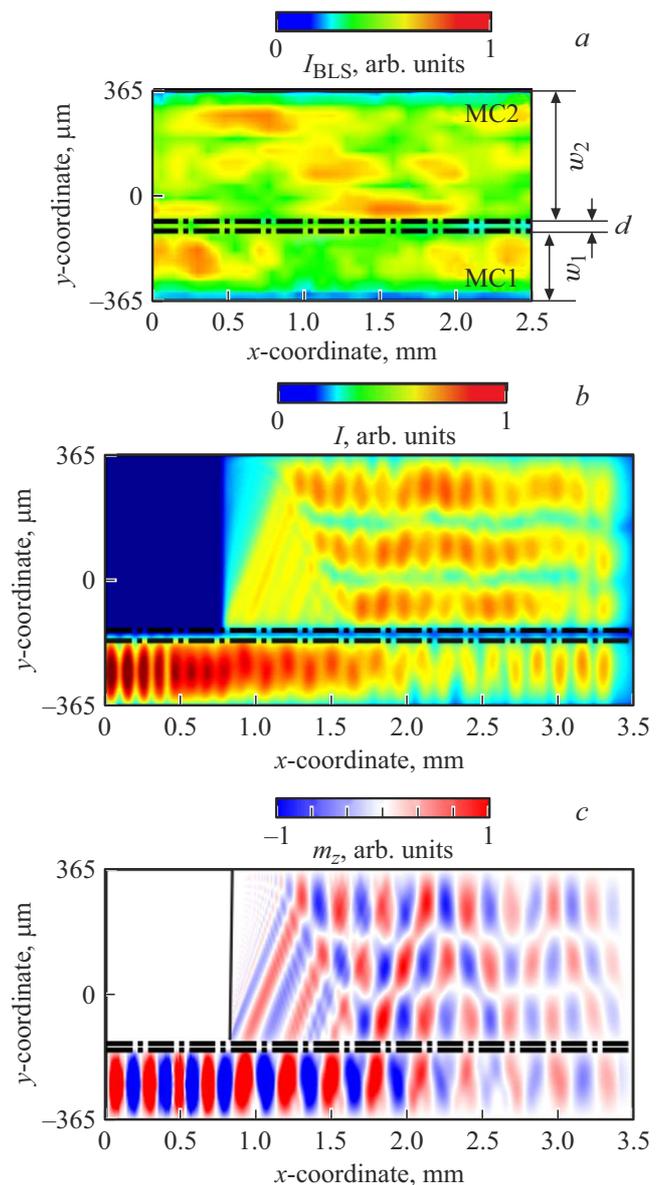


Рис. 3. Результаты BLS-эксперимента: пространственное распределение интенсивности спиновой волны $I(x, y)$ в случае возбуждения волны в магнитном кристалле *MC1* (*a*). Результаты микромагнитного моделирования: пространственное распределение интенсивности $I(x, y)$ и компоненты динамической намагниченности $m_z(x, y)$ в случае возбуждения СВ в магнитном кристалле *MC1* (*b, c*).

На рис. 3, *a* показаны пространственные карты распределения интенсивности $I_{\text{BLS}}(x, y)$ для случая возбуждения СВ в узком (*MC1*) МК на частоте входного сигнала f_B . Видно, что сигнал, распространяющийся на некоторое расстояние от антенны, перекачивается в смежный МК, и распространяется вдоль него.

Полученные методом ММ карты распределения величины интенсивности спиновой волны $I(x, y) = I_{\text{BLS}}$ (рис. 3, *b*) и ортогональной поверхности пленки компоненты намагниченности m_z (рис. 3, *c*) находятся в хоро-

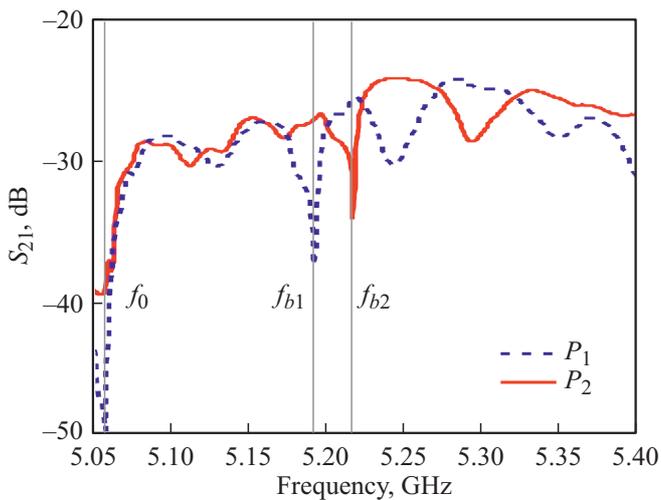


Рис. 4. Полученные методом микромагнитного моделирования АЧХ, снятые с портов P_1 и P_2 $MC1$ и $MC2$ соответственно.

шем соответствии с данными, полученными в эксперименте. Так, проводя модовую декомпозицию карты пространственного распределения интенсивности [19] СВ на рис. 3 можно отметить, что в возбуждаемом волноводе наблюдается преимущественно распространение сигнала с поперечным профилем, близким к первой шириной моде, в то время как в диапазоне $0.75 < x < 2$ mm, когда в $MC1$ сигнал отсутствует, в $MC2$ можно выделить режим распространения третьей шириной моды.

Для определения режимов работы латеральных МК в качестве пространственно-частотного разделителя спин-волновой мощности и направленного ответвителя спин-волнового сигнала был проведен расчет передаточных характеристик в областях, соответствующих каждой из выходных антенн (P_1 и P_2). На рис. 4 представлены частотные зависимости спектральной плотности мощности спин-волнового сигнала $S_{21}(f)$ в исследуемой структуре связанных неидентичных МК. Расчет выполнен методом ММ при возбуждении $MC1$ импульсным сигналом и проведением преобразования Фурье. На рис. 4 синей пунктирной и красной сплошной кривыми отмечены частотные зависимости $S_{21}(f)$ для областей выходных антенн P_1 и P_2 структур $MC1$ и $MC2$ соответственно. Видно, что частота начала спектра СВ для обоих МК совпадает и составляет $f_0 = \gamma(H_{\text{int}}(H_{\text{int}} + 4\pi M_0))^{1/2} \approx 5.051$ GHz. Важно отметить, что частоты провалов f_{b1} и f_{b2} в спектрах прохождения, характерных для запрещенных периодических структур $MC1$ и $MC2$, смещены относительно друг друга на величину 30 MHz, что может быть использовано для пространственно-частотной селекции сигнала, подаваемого на вход P_{in} структуры.

3. Заключение

Таким образом, с помощью метода мандельштамбриллоэновской спектроскопии и численного моделирова-

вания исследованы режимы распространения связанных СВ в системе латерально связанных неидентичных магнетонных кристаллов. Продемонстрирована возможность управления межмодовой связью волн, распространяющихся в магнетонных кристаллах вблизи границы частоты зоны непропускания. На основе результатов микромагнитного моделирования определен механизм, сопровождающий наблюдаемый режим межмодовой связи в латеральной системе неидентичных МК, и проведено исследование режимов пространственно-частотного разделения сигнала. Полученные результаты демонстрируют возможность создания демультимплектора и направленного ответвителя на основе латеральной системы неидентичных магнетонных кристаллов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRR-2020-0005).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.А. Никитов, Д.В. Калябин, И.В. Лисенков, А.Н. Славин, Ю.Н. Барабаненков, С.А. Осокин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.А. Морозова, Ю.П. Шараевский, Ю.А. Филимонов, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, В.К. Сахаров, Е.С. Павлов. УФН 185, 1099 (2015). [S.A. Nikitov, D.V. Kalyabin, I.V. Lisenkov, A.N. Slavin, Y.N. Barabanenkov, S.A. Osokin, A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, M.A. Morozova, Y.P. Sharaevsky, Y.A. Filimonov, Y.V. Khivintsev, S.L. Vysotsky, V.K. Sakharov, E.S. Pavlov. Phys. Usp. 58, 1002 (2015)].
- [2] V. Demidov, S. Urazhdin, G. de Loubens, O. Klein, V. Cros, A. Anane, S. Demokritov. Phys. Rep. 673, 1 (2017).
- [3] C.S. Davies, A.V. Sadovnikov, S.V. Grishin, Y.P. Sharaevsky, S.A. Nikitov, V.V. Kruglyak. IEEE Trans. Magn. 51, 1 (2015).
- [4] А.В. Садовников, А.А. Грачев, С.А. Одинцов, А.А. Мартышкин, В.А. Губанов, С.Е. Шешукова, С.А. Никитов. Письма в ЖЭТФ 108, 5, 332 (2018). [A.V. Sadovnikov, A.A. Grachev, S.A. Odintsov, A.A. Martyshkin, V.A. Gubanov, S.E. Sheshukova, S.A. Nikitov. JETP Lett. 108, 312 (2018)].
- [5] C. Dubs, O. Surzhenko, R. Thomas, J. Osten, T. Schneider, K. Lenz, J. Grenzer, R. Hübner, E. Wendler. Phys. Rev. Mater. 4, 024416 (2020).
- [6] Y. Sun, Y.-Y. Song, H. Chang, M. Kabatek, M. Jantz, W. Schneider, M. Wu, H. Schultheiss, A. Hoffmann. Appl. Phys. Lett. 101, 152405 (2012).
- [7] L.V. Lutsev, A.M. Korovin, S.M. Suturin, L.S. Vlasenko, M.P. Volkov, N.S. Sokolov. J. Phys. D 53, 265003 (2020).
- [8] В.А. Губанов, А.А. Мартышкин, С.Е. Шешукова, А.В. Садовников. ЖТФ 89, 11, 1726 (2019). [V. A. Gubanov, A.A. Martyshkin, S.E. Sheshukova, A.V. Sadovnikov. Tech. Phys. 64, 1636 (2019)].

- [9] A.V. Sadovnikov, C.S. Davies, V.V. Kruglyak, D.V. Romanenko, S.V. Grishin, E.N. Beginin, Y.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. *Phys. Rev. B* **96**, 060401(R) (2017).
- [10] V. Sadovnikov, A.A. Grachev, S.E. Sheshukova, Y.P. Sharaevskii, A.A. Serdobintsev, D.M. Mitin, S.A. Nikitov. *Phys. Rev. Lett.* **120**, 257203 (2018).
- [11] S. Nikitov, P. Tailhades, C. Tsai. *J. Magn. Magn. Mater.* **236**, 320 (2001).
- [12] I.A. Golovchanskiy, N.N. Abramov, V.S. Stolyarov, V.V. Ryazanov, A.A. Golubov, A.V. Ustinov. *J. Appl. Phys.* **124**, 233903 (2018).
- [13] A.V. Sadovnikov, C.S. Davies, V.V. Kruglyak, D.V. Romanenko, S.V. Grishin, E.N. Beginin, Y.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. *Phys. Rev. B* **96**, 060401 (2017).
- [14] S.L. Vysotskii, A.V. Sadovnikov, G.M. Dudko, A.V. Kozhevnikov, Y.V. Khivintsev, V.K. Sakharov, N.N. Novitskii, A.I. Stognij, Y.A. Filimonov. *Appl. Phys. Lett.* **117**, 102403 (2020).
- [15] E. Beginin, D. Kalyabin, P. Popov, A. Sadovnikov, A. Sharaevskaya, A. Stognij, S. Nikitov. In: *Three-Dimensional Magnonics* / Ed. G. Gubbiotti. Jenny Stanford Publishing, Singapore (2019). P. 67.
- [16] V.K. Sakharov, E.N. Beginin, Y.V. Khivintsev, A.V. Sadovnikov, A.I. Stognij, Y.A. Filimonov, S.A. Nikitov. *Appl. Phys. Lett.* **117**, 022403 (2020).
- [17] A.V. Sadovnikov, V.A. Gubanov, S.E. Sheshukova, Y.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. *Phys. Rev. Appl.* **9**, 051002 (2018).
- [18] V. Cherepanov, I. Kolokolov, V. Lvov. *Phys. Rep.* **229**, 81 (1993).
- [19] R. Damon, J. Eshbach. *J. Phys. Chem. Solids* **19**, 308 (1961).
- [20] S.N. Bajpai. *J. Appl. Phys.* **58**, 910 (1985).
- [21] V.E. Demidov, O. Dzyapko, S.O. Demokritov, G.A. Melkov, A.N. Slavin. *Phys. Rev. Lett.* **100**, 047205 (2008).
- [22] S. Demokritov. *Phys. Rep.* **348**, 441 (2001).
- [23] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B.V. Waeyenberge. *AIP Advances* **4**, 107133 (2014).
- [24] L. Landau, E. Lifshitz. *Phys. Z. Sow.* **8**, 153 (1935).
- [25] T.L. Gilbert, J.M. Kelly. In: *Conf. Magnetism and Magnetic Materials*. Pittsburgh, PA. American Institute of Electrical Engineers. N.Y. (1955). P. 253–263.
- [26] K.Y. Guslienko, S.O. Demokritov, B. Hillebrands, A.N. Slavin. *Phys. Rev. B* **66**, 132402 (2002).

Редактор Ю.Э. Кутаев