

05,12,13

Управляемая электрическим полем спин-волновая связь в латеральных ансамблях магнитных микроструктур

© А.А. Грачев, Е.Н. Бегинин, С.Е. Шешукова, А.В. Садовников

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

E-mail: stig133@gmail.com

Поступила в Редакцию 9 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 9 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

С помощью численных и экспериментальных исследований продемонстрирована возможность управления дипольной спин-волновой связью в латеральном массиве ферритовых полосок с помощью локальных деформаций. В качестве экспериментальной демонстрации исследованных физических процессов предложена конфигурация магнонной структуры с пьезоэлектрическим слоем и структурированными электродами на его поверхности и использована методика лазерной абляции с пространственным разрешением для структурирования пьезоэлектрического слоя. Показано, что с помощью локальных упругих деформаций оказывается возможным индуцировать волноведущий канал для распространяющихся спин-волновых краевых мод. С прикладной точки зрения, полученные результаты могут быть использованы для создания класса устройств обработки информации, таких как системы демультимплексирования с частотно-пространственной селективностью, управляемых одновременно электрическим и магнитным полем.

Ключевые слова: спиновые волны, магنونика, стрейнтроника, латеральные структуры.

DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51253.14H

1. Введение

В настоящее время использование заряда носителей тока (электронов или дырок) является основным эффектом в полупроводниковой микроэлектронике. Использование элементарных квантов магнитных возбуждений (магнонов) и спиновых волн (СВ) в диэлектрических магнитных пленках, поддерживают передачу сигнала без движения зарядов и, следовательно, без омических потерь, обеспечивают сверхнизкое энергопотребление и являются многообещающей альтернативой полупроводниковым приборам [1–3]. Одним из новых научных направлений в физике конденсированного состояния является магنونика [4–6], ставящая перед собой задачи по исследованию методов и характеристик управления спиновыми волнами в волноведущих системах в микро- и наномасштабах [7,8].

Недавние теоретические и экспериментальные исследования показывают, что деформация может быть использована для создания энергоэффективных сложных двумерных и трехмерных пьезоэлектрических материалов и гетероструктур на основе полупроводников [9], сегнетоэлектриков [10], графеновых слоев [11] и массивов нанопроволок [13]. Было также показано, что можно индуцировать сдвиг частоты ферромагнитного резонанса из-за влияния преобразования электрического поля в магнитное поле [13]. Влияние электрического поля на магнитную конфигурацию обусловлено модификацией эффективного внутреннего магнитного поля. Последнее изменяется из-за обратной магнитострикции (эффект Виллари) в результате локальной деформации магнит-

ной пленки. Экспериментально показано, что спин-волновая связь может эффективно использоваться для управления переносом магнонов [14], что привело к созданию класса спин-волновых устройств, таких как, двухканальные направленные ответвители [15], спин-волновые сплиттеры [16,17].

В настоящей работе с помощью численных и экспериментальных исследований продемонстрированы эффекты управления спин-волновой связью в системе из трех латеральных магнитных полосок с пьезоэлектрическим слоем. Выявлены механизмы управления дипольной связью спиновых волн путем создания упругих деформаций, локализованных в области максимумов напряженности электрического поля. Показана эффективная перестройка спин-волновых характеристик с помощью электрического поля, обусловленная локальной деформацией пьезослоя и обратным эффектом магнитострикции в ферритовых микрополосках и выявлены механизмы управления электрическим полем режимами пространственно-частотной селекции СВ.

2. Структура и численное исследование

Для экспериментального исследования механизмов управления спин-волновой связью была изготовлена латеральная структура, представляющая собой три параллельно ориентированных магнитных полоски Z_1 , Z_2 и Z_3 , образующих три спин-волновых канала (рис. 1). С помощью метода лазерного скрайбирования из пленки

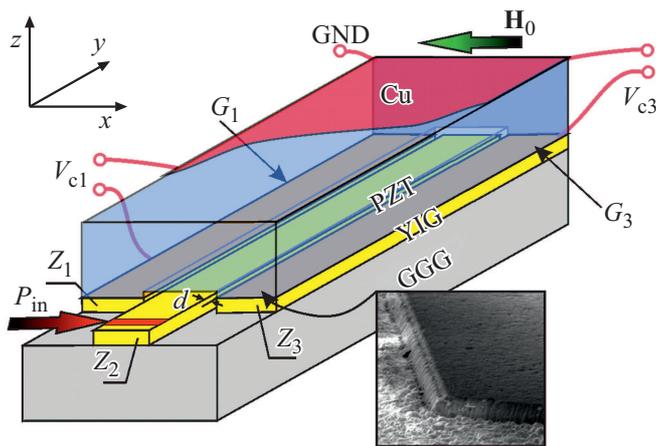


Рис. 1. Схема рассматриваемой структуры. На вставке приведено SEM-изображение края пьезоэлектрического слоя.

железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной $t = 10 \mu\text{m}$ [(YIG) $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (111)] на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) [(GGG) $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (111)] толщиной $500 \mu\text{m}$ сформирована система латеральных микроволноводов шириной $w = 500 \mu\text{m}$ с расстоянием $d = 40 \mu\text{m}$ между ними. Длина вдоль длинной стороны волноводов составляла 6mm для $Z_{1,3}$ и 8mm для Z_2 . Возбуждение СВ осуществлялось с помощью микрополосковой антенны толщиной $1 \mu\text{m}$ и шириной $30 \mu\text{m}$. Структура помещена во внешнее статическое магнитное поле, $H_0 = 1100 \text{ Oe}$, ориентированное вдоль оси x для эффективного возбуждения поверхностной магнитоэлектрической волны (ПМСВ) в Z_2 . На верхней поверхности пьезоэлектрического керамического слоя из цирконата-титаната свинца (ЦТС) ($(\text{Pb}(\text{Zr}_{0.3}\text{Ti}_{0.7})\text{O}_3)$ PZT) с размерами $1580 \times 4000 \times 200 \mu\text{m}^3$ размещен электрод (обозначение „GND“ на рис. 1, *a*) из меди толщиной $1 \mu\text{m}$, который не оказывает значительного влияния на распространение СВ в магнитных полосках. На другой стороне ЦТС были напылены электроды G_1 и G_3 из титана, толщиной 100 nm , расположенные над Z_1 и Z_3 соответственно. Отдельно к каждому из электродов в эксперименте прикладывалось напряжение величиной $V_{c1,3}$. Для более эффективного управления спин-волновым транспортом с помощью локальных деформаций, впервые использована методика лазерной абляции с пространственным разрешением для вытравливания пьезоэлектрического слоя толщиной $25 \mu\text{m}$ и формирования трапециевидных электродов для улучшения пьезомагнитной связи, в виду локального уменьшения толщины слоя ЦТС. На вставке на рис. 1, *a* показано изображение с электронного микроскопа, демонстрирующее края пьезоэлектрического слоя, находящегося в непосредственном контакте с ЖИГ полоской. В эксперименте эффективная механическая связь между полосками ЖИГ и ЦТС слоем была достигнута с помощью использования двухкомпонентного эпоксидного тензометрического клея.

Для описания физических процессов, определяющих физические характеристики при управлении спин-волновыми сигналами путем создания локальных упругих деформаций, была разработана численная модель на основе метода конечных элементов (МКЭ). На первом этапе выполнялся расчет упругих деформаций, вызываемых внешним электрическим полем в слое пьезоэлектрика. Далее, рассчитывались профили внутреннего магнитного поля в латеральных магнитных полосках. Затем, полученные профили внутреннего магнитного поля использовались в микромагнитном моделировании [18] и расчете спектров собственных мод поперечно-ограниченных магнитных полосок с помощью МКЭ [19]. Относительное изменение размеров слоя ЦТС показано на рис. 2, *a*, где градациями цвета изображено распределение значений компоненты тензора механических напряжений S_{xx} в случае $V_{c1,3} = \pm 250 \text{ V}$. Можно отметить, что деформация пьезоэлектрического слоя возникает в локальной области слоя ЦТС под электродами $G_{1,3}$, что приводит к изменению величины внутреннего магнитного поля H_{int} в полосках $Z_{1,3}$ вследствие обратного магнитоэлектрического эффекта. Была проведена оценка влияния деформаций структурированного (левая панель на рис. 2, *a*) и не структурированного пьезослоя (правая панель на рис. 2, *a*). Видно, что в случае структурированного слоя пьезоэлектрика наблюдается усиление локальных деформаций в области контакта пьезоэлектрического слоя с ЖИГ полоской.

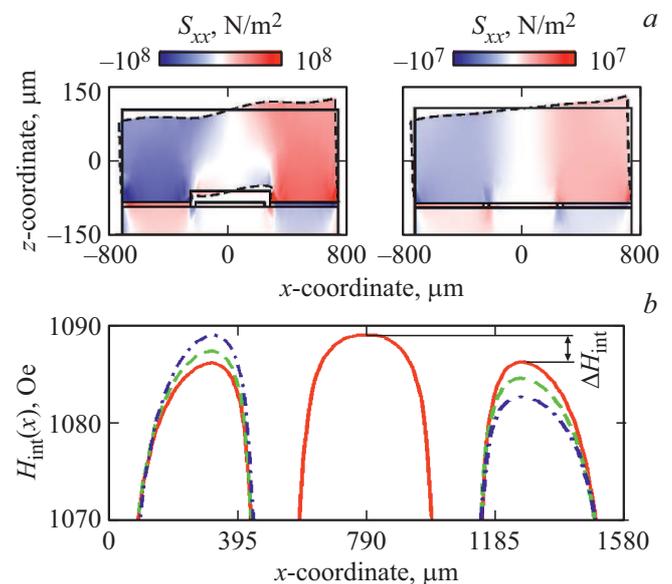


Рис. 2. *a* — распределения компоненты тензора механических напряжений S_{xx} при приложении к электродам $G_{1,3}$ напряжения $V_{c1,3} = \pm 250 \text{ V}$ в случае структурированного (левая панель) и не структурированного (правая панель) пьезоэлектрического слоя. *b* — профили внутреннего магнитного поля H_{int} в случаях $E_{1,3} = 0 \text{ kV/cm}$ (сплошные кривые); для не структурированного пьезослоя при $E_1 = -10 \text{ kV/cm}$, $E_3 = 10 \text{ kV/cm}$; для структурированного пьезослоя при $E_1 = -10 \text{ kV/cm}$, $E_3 = 10 \text{ kV/cm}$. Величина внешнего магнитного поля $H_0 = 1100 \text{ Oe}$.

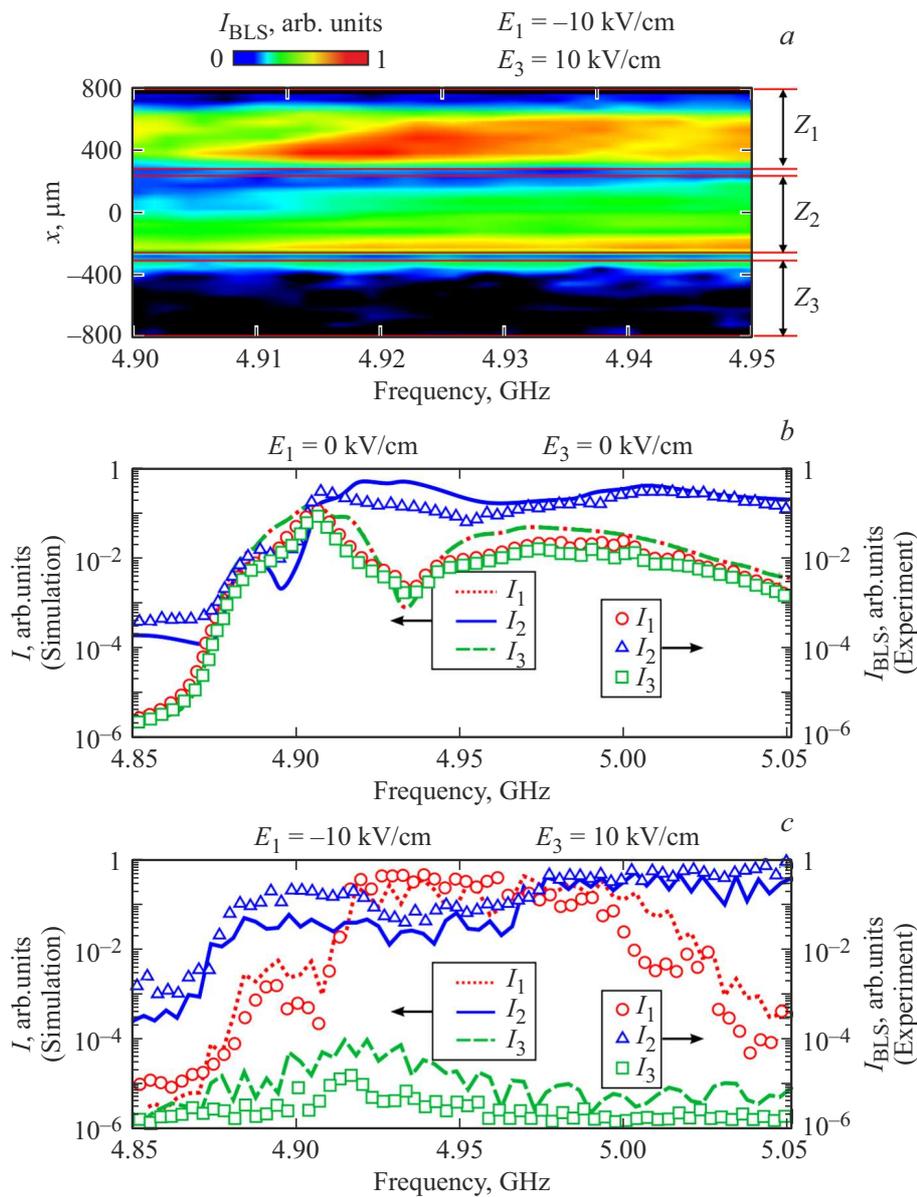


Рис. 3. Частотная зависимость МБС-сигнала (а) в сечении $y = 3 \text{ mm}$ при $E_1 = -10 \text{ kV/cm}$ и $E_3 = 10 \text{ kV/cm}$. Частотный спектр спин-волнового сигнала в выходной секции магнитных полосок $Z_{1,2,3}$ при $E_1 = E_3 = 0$ (b), $E_1 = -10 \text{ kV/cm}$ и $E_3 = 10 \text{ kV/cm}$ (c) — результат МБС (символы, правая вертикальная ось) и микромагнитных вычислений (кривые, левая вертикальная ось).

Стоит отметить, что эффективное управление свойствами СВ, распространяющихся в латеральной структуре, с помощью локальных упругих деформаций оказывается возможным благодаря неоднородному распределению величины H_{int} . Когда магнитное поле H_0 направлено вдоль оси x , распределение $H_{\text{int}}(x)$ в латеральных магнитных полосках становится неоднородным из-за анизотропии формы, что приводит к формированию трех спин-волновых каналов, вдоль которых распространяются СВ (см. рис. 2, b). Приложение положительного электрического поля к электроду G_3 и отрицательного поля к G_1 приводит к уменьшению внутреннего магнитного поля в Z_1 и увеличению H_{int} в полоске Z_3 , как показано на рис. 2, b. Статическое распределение

магнитного поля в структуре определяется величиной намагниченности ЖИГ и геометрическими размерами магнитных полосок, при этом малое изменение величины расстояния между латеральными полосками d не приводит к значительному изменению величины ΔH_{int} , однако приводит к изменению величины связи между СВ, распространяющимися в $Z_{1,2,3}$. Следует отметить, что в случае структурированного слоя пьезоэлектрика (см. штрих-пунктирные кривые на рис. 2, b) наблюдается более эффективное изменение внутреннего магнитного поля. Действительно влияния эффекта Виллари проявляется в изменении внутреннего поля в одном из микроволноводов, но это приводит к тому, что меняется профиль собственной моды в этом волноводе, будь

он изолированным от других рядом расположенных. Это означает, что изменится профиль „провисающих“ за границы микроволновода электромагнитных полей. Последнее в свою очередь приведет к тому, что поднесенный к такому волноводу соседний микроволновод будет испытывать влияния этого „провисающего поля“ несколько иначе, чем если бы он был расположен рядом с полностью идентичным ему микроволноводом. В этом смысле, можно указать на изменение величины дипольной связи, влияющей на результирующую картину, возникающую при связи спиновых волн и их перераспределении мощности, при распространении вдоль микроволноводов. Другими словами, эффект Виллари приводит к изменению профилей собственных мод и дисперсионных характеристик, соответствующих этим модам, что можно трактовать как изменение связи между микроволноводами. На языке теории связанных волн это можно записать, как зависимость коэффициента связи между волнами в двух (трех и т.д.) микроволноводах от величины внутреннего поля в одном из них.

3. Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование влияния локальных упругих деформаций на стационарное распределение интенсивности ПМСВ проводилось методом манделштамбриллюэновской спектроскопии (МБС, BLS) магнитных материалов [20]. Зондирующий лазерный луч с длиной волны 532 nm был сфокусирован на прозрачной стороне ГГГ композитной структуры. Чтобы показать трансформацию поперечного распределения интенсивности СВ при приложении электрического поля, была получена частотная зависимость величины $I_{BLS} \sim \sqrt{\beta_1 m_y^2 + \beta_2 m_z^2}$ (константы β_1 и β_2 определяются геометрией рассеяния) в сечении вдоль оси x при $y = 3.0$ mm, в случае $E_1 = -10$ kV/cm и $E_3 = 10$ kV/cm (см. рис. 3, *a*). Видно, что в данном случае наблюдается перераспределение мощности СВ в полосках $Z_{2,3}$. При этом в полоске Z_2 распространяется краевая мода и наблюдается связь между краевыми модами, распространяющимися вдоль Z_2 и Z_3 . Следует отметить, что краевая мода возбуждается в полоске Z_3 в диапазоне частот 4.9–4.95 GHz, как показано на рис. 3, *a*. Поэтому распространение центральной моды вдоль Z_3 подавляется локально созданной деформацией. Таким образом с помощью локальных упругих деформаций оказывается возможным индуцировать волноведущий канал для распространяющихся спин-волновых краевых мод.

На рис. 3 построены частотные зависимости интенсивности динамической намагниченности I_j при $y = 3.0$ mm на выходе каждого из волноводов Z_j ($j = 1, 2, 3$), полученные методом микромагнитного моделирования (линии) и в эксперименте (точки) для случая $E_1 = E_3 = 0$ (см. рис. 3, *b*), а также зависимости для $E_1 = -10$ kV/cm и $E_3 = 10$ kV/cm (см. рис. 3, *c*) для качественного и количественного сравнения. Видно качественное соответствие данных, полученный в эксперименте и при численном моделировании, при этом в случае $E_1 = -10$ kV/cm

и $E_3 = 10$ kV/cm мощность СВ локализована в полосках Z_1 и Z_2 . Разница в данных МБС эксперимента и численного моделирования может быть объяснена учетом конечного числа поперечных (ширинных) мод в численном счете. При этом, МБС сигнал является результатом интерференции как четных, так и нечетных ширинных мод отдельно взятой магнитной полоски, поскольку рассматриваемая структура не является трансляционно инвариантной вдоль оси y . Видно, что в случае отсутствия внешнего электрического поля в системе наблюдается симметричный перенос спин-волновой энергии из полоски Z_2 в $Z_{1,3}$. При приложении электрического поля к слою пьезоэлектрика происходит трансформация передаточных характеристик происходит нарушение симметрии характеристик для $Z_{1,3}$. Следует отметить, что в данном случае наблюдается потеря мощности СВ в полоске Z_3 и мощность спиновой волны перераспределяется между полосками $Z_{1,2}$.

4. Заключение

Таким образом, управляемый электрическим напряжением спин-волновой транспорт может быть реализован в структурированных многослойных пленках феррит-пьезоэлектрик. При этом формирование электродов на поверхности пьезослоя позволяет создавать упругие деформации в области неоднородности внутреннего магнитного поля в пленке феррита. Последняя при этом создается путем структурирования поверхности магнитной пленки и создания на ней нерегулярных спин-волноведущих каналов. В качестве демонстрации данного физического эффекта, используя численные и экспериментальные методы, показан управляемый напряжением спин-волновой транспорт вдоль трехканальной латеральной структуры. Показана эффективная перестройка спин-волновых характеристик с помощью электрического поля, обусловленным деформацией пьезослоя и эффектом магнитострикции в ЖИГ-полосках. Показано, что с помощью локальных упругих деформаций оказывается возможным индуцировать волноведущий канал для распространяющихся спин-волновых краевых мод. Рассмотренный в работе эффект может быть положен в основу конструктивного решения для создания, управляемого демультимплексера, когда для различных частот входного сигнала выходной сигнал будет в разных портах многоканальной структуры при возможности перестройки величин мощностей между выходными портами (путем приложения электрического поля).

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] S. Neusser, D. Grundler. *Adv. Mater.* **21**, 2927 (2009).
- [2] S.A. Nikitov, A.R. Safin, D.V. Kalyabin, A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, M.V. Logunov, M.A. Morozova, S.A. Odintsov, S.A. Osokin, A.Yu. Sharaevskaya, Yu.P. Sharaevsky, A.I. Kirilyuk. *Phys. Usp.* **63**, 945 (2020).
- [3] D. Sander, S.O. Valenzuela, D. Makarov, C.H. Marrows, E.E. Fullerton, P. Fischer, J. McCord, P. Vavassori, S. Mangin, P. Pirro, B. Hillebrands, A.D. Kent, T. Jungwirth, O. Gutfleisch, C.G. Kim, A. Berger. *J. Phys. D* **50**, 363001 (2017).
- [4] K. Roy, S. Bandyopadhyay, J. Atulasimha. *Appl. Phys. Lett.* **99**, 063108 (2011).
- [5] Yi-Pu. Wang, J.W. Rao, Y. Yang, Peng-Chao Xu, Y.S. Gui, B.M. Yao, J.Q. You, C.-M. Hu. *Phys. Rev. Lett.* **123**, 127202 (2019).
- [6] A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharaevskii, A.I. Stognij, N.N. Novitski, V.K. Sakharov, Yu.V. Khivintsev, S.A. Nikitov. *Phys. Rev. B* **99**, 054424 (2019).
- [7] P. Che, K. Baumgaertl, A. Kúkol'ová, C. Dubs, D. Grundler. *Nature Commun.* **11**, 1445 (2020).
- [8] P. Frey, A.A. Nikitin, D.A. Bozhko, S.A. Bunyaev, G.N. Kaka-zei, A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos, F. Ciubotaru, A.V. Chumak, Q. Wang, V.S. Tiberkevich, B. Hillebrands, A.A. Serga. *Commun. Phys.* **3**, 17 (2020).
- [9] A.A. Shevyrin, A.G. Pogosov, A.K. Bakarov, A.A. Shklyae. *Phys. Rev. Lett.* **117**, 017702 (2016).
- [10] S. Liu, R.E. Cohen. *Phys. Rev. Lett.* **119**, 207601 (2017).
- [11] N. Levy, S.A. Burke, K.L. Meaker, M. Panlasigui, A. Zettl, F. Guinea, A.H.C. Neto, M.F. Crommie. *Science* **329**, 544 (2010).
- [12] Z.L. Wang, J. Song. *Science* **312**, 242 (2006).
- [13] Y.K. Fetisov, G. Srinivasan. *Appl. Phys. Lett.* **93**, 033508 (2008).
- [14] A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, D.V. Romanenko, Y.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. *Appl. Phys. Lett.* **107**, 202405 (2015).
- [15] Q. Wang, P. Pirro, R. Verba, A. Slavin, B. Hillebrands, A.V. Chumak. *Sci. Adv.* **4**, e1701517 (2018).
- [16] A.V. Sadovnikov, A.A. Grachev, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, Y.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. *Phys. Rev. Appl.* **7**, 014013 (2017).
- [17] A.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).
- [18] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B. Van Waeyenberge. *AIP Advances* **4**, 107133 (2014).
- [19] P.P. Silvester, R.L. Ferrari. *Finite Elements for Electrical Engineers*, Cambridge University Press (1996), 541 p.
- [20] S.O. Demokritov, B. Hillebrands, A.N. Slavin. *Phys. Rep.* **348**, 441 (2001).

Редактор Т.Н. Василевская