

05

Управляемые режимы распространения спин-волнового сигнала в латеральных ЖИГ-микроволноводах с ортогональным элементом

© Р.В. Маслий, А.Б. Хутиева, А.В. Садовников

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

E-mail: romamaslij5@gmail.com

Поступила в Редакцию 18 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2024 г.

Принята к публикации 8 мая 2024 г.

Проанализировано распространение спиновых волн (СВ) в структуре, состоящей из двух волноводов, расположенных с зазорами в горизонтальной плоскости, и одного волновода, расположенного перпендикулярно над ними. С использованием метода микромагнитного моделирования выявлен механизм контроля пространственной структуры спин-волнового пучка и его разделения между каналами массива микроволноводов на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ). В частности, показано, что направление распространения СВ в массиве можно изменять путем изменения частоты, подаваемой на центральные каналы одного из слоев. Проведены детальные исследования режимов концентрации мощности сигнала, кодируемого в виде амплитуды и фазы СВ на концах центральных каналов с возможностью их отдельного включения, а также управления сигналом на концах микроволноводов верхнего слоя массива. Это позволяет рассматривать такой массив микроволноводов как управляемое логическое устройство или многоканальный делитель мощности.

Ключевые слова: спиновая волна, микромагнитное моделирование, невзаимность, спин-волновой пучок.

DOI: 10.61011/FTT.2024.08.58588.54НН

1. Введение

Перенос магнитного момента или спина электрона, вместо переноса заряда, открывает новые возможности использования квантовых спин-волновых возбуждений, таких как магноны, для разработки методов и подходов обработки, передачи и хранения сигналов, закодированных в виде амплитуды и фазы спиновых волн (СВ) в микроволновом и терагерцевом диапазонах [1–9]. При этом длины возбуждаемых СВ составляют величины от сотен микрон до десятков нанометров и могут меняться под влиянием различных факторов, таких как величина и направление поля намагничивания, тип и величина анизотропии магнитного материала, а также облучение поверхности магнитных пленок сфокусированным лазерным излучением.

Рекордно низкое затухание СВ в пленках из ферромагнетиков на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ, YIG) является основой для исследования процессов переноса спина, происходящих в структурированных пленках. Эти процессы исследуются в рамках научного направления физики магнитных явлений и физики конденсированного состояния, известного как диэлектрическая магноника [9]. ЖИГ используется в качестве материалов и сред изучения процессов, которые влияют на характеристики СВ, такие как величина и направление групповой скорости, пространственное распределение амплитуды и фазы СВ, частот-

ные диапазоны возбуждения и распространения СВ, а также различные методы управления связью СВ в многослойных структурах и других системах. Некоторые исследования показывают возможность использования структур на основе ЖИГ для демонстрации принципов работы логических устройств в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне [10–13]. Планарные ферритовые волноведущие микроструктуры на основе ЖИГ могут быть использованы в качестве базовых элементов „магнонных сетей“ для создания различных устройств обработки сигналов, таких как линии задержки, фильтры, интерферометры, переключатели, мультиплексоры и другие [13–16]. В этих устройствах информация передается с использованием спиновых волн, а логические операции основаны на принципах спин-волновой интерференции. Использование латеральных магнитных микроструктур является важным для разработки элементов соединения в планарных топологиях магнонных сетей [10]. Управление перестройкой частоты и параметрами выходного сигнала в таких микроструктурах осуществляется путем изменения эффективной диэлектрической и магнитной проницаемости слоистой структуры при воздействии внешних электрического и магнитного полей соответственно. Однако для построения таких структур требуется точное согласование расположения пьезоэлектрических слоев на поверхности волноводов или в процессе ионно-лучевого осаждения на поверхность пьезоэлектрических или полупроводни-

ковых подложек. Исследование многослойных структур, состоящих из системы микроволноводов, позволяет рассмотреть способ управления спектрами спиновых волн и режимами распространения сигнала путем изменения расстояния между отдельными волноводами и между слоями системы. Такой способ управления разделением сигнала между каналами расширяет функциональность магнанных структур, используемых в задачах параллельной обработки информационных сигналов [17–21].

Настоящая работа, таким образом, посвящена проблеме поиска методов управления амплитудой и фазой СВ в многослойных структурах, каждый слой которых образован магнанными микроволноводами. Рассмотрена базовая ситуация, когда в одном слое находятся магнанные микроволноводы, расположенные на одной подложке, расстояние между которыми составляет величину, сравнимую с толщиной магнитного материала. Это обеспечивает режим дипольной связи спиновых волн в планарных латерально ориентированных структурах. Во втором слое располагался магнанный микроволновод такой же ширины, но ориентированный ортогонально системе латеральных микроволноводов. Это позволяло реализовать режим управляемого ориентацией магнитного поля спин-волнового транспорта. Для выявления особенностей распространения СВ был проведен детальный анализ режимов распространения СВ в композитной структуре. С использованием метода микромагнитного моделирования был исследован эффект дипольной связи СВ, распространяющихся в параллельных полосках феррита, и связи с ортогонально расположенным над ними микроволноводом. Проведен учет анизотропного распространения сигнала, диполь-дипольной связи и нелинейной зависимости параметров среды от частоты в системе связанных микроволноводов, формирующих режимы распространения СВ. В ходе исследования были предложены и изучены методы контроля пространственной структуры спин-волнового пучка и его разделения между каналами массива микроволноводов. Было установлено, что направление распространения спиновых волн в массиве можно изменять путем изменения частоты, подаваемой на центральные каналы одного из слоев. Также были проведены подробные исследования режимов концентрации мощности сигнала, кодированного в виде амплитуды и фазы спиновых волн, на концах центральных каналов с возможностью их отдельного включения, а также управления сигналом на концах микроволноводов верхнего слоя массива. Благодаря большому количеству портов и двум слоям, позволяющим обрабатывать полученную информацию, открываются перспективы использования данного массива микроволноводов как управляемого логического устройства или многоканального делителя мощности.

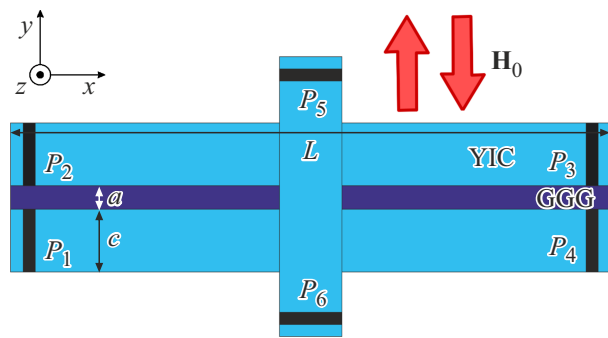


Рис. 1. Схематическое изображение решетки микроволноводов. На рисунке введены обозначения: a — горизонтальный зазор; c — ширина; L — длина микроволноводов; $P_{1,2}$ и P_{3-6} — микрополосковые антенны для возбуждения и приема СВ соответственно.

2. Исследуемая структура и численная модель

Для исследования было проведено микромагнитное моделирование системы, состоящей из латерально ($A_{1,2}$) и вертикально (A_3) связанных ферритовых микроволноводов, изготовленных из пленки железо-иттриевого граната и расположенных на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ, GGG). Микроволноводы имели форму удлиненных полосок со следующими размерами: длина $L = 6 \text{ mm}$, ширина $c = 300 \mu\text{m}$, толщина $b = 10 \mu\text{m}$. Структура состояла из двух волноводов, расположенных горизонтально с небольшим зазором между ними [22], и одного волновода, расположенного перпендикулярно над ними [3] (см. рис. 1).

ЖИГ находится в однодоменном состоянии. Намагниченность насыщения материала ЖИГ составляла $M = 139 \text{ G}$, а внешнее магнитное поле было направлено вдоль оси y и имело величину $H = 1200 \text{ Oe}$. Численное исследование проводилось в диапазоне частот от 5.15 до 5.35 GHz. В данной конфигурации и при данных частотах было обеспечено эффективное возбуждение поверхностных спиновых волн, что позволяет расширить функциональные возможности СВЧ-устройств. Особенностью связанных ферритовых структур является возможность управления связью между ширинными модами спиновых волн [22–25], распространяющихся в отдельных ферромагнитных микроволноводах, что добавляет дополнительный управляющий параметр. Для численного моделирования использовался программная среда mumax^3 [26], которая позволяла численно решать уравнение Ландау–Лифшица с затуханием в виде феноменологического слагаемого, записанного в форме, предложенной Гильбертом. Такой подход стандартно используется в задачах о возбуждении и распространении СВ в магнанных структурах [3–9].

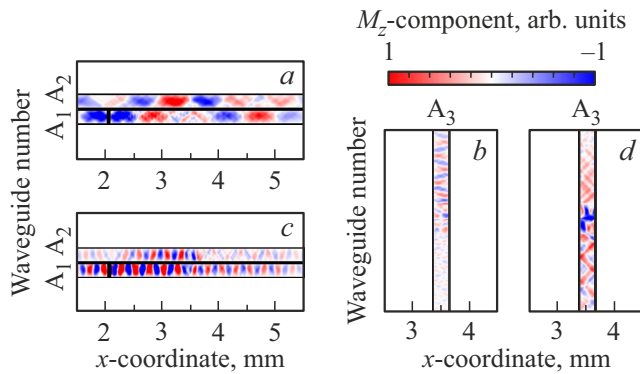


Рис. 2. Карты пространственного распределения компоненты M_z динамической намагниченности для СВ, распространяющихся в решётке микроволноводов. (a, b) — возбуждение волны на частоте 5.15 GHz. (c, d) — возбуждение волны на частоте 5.35 GHz.

3. Результаты микромагнитного моделирования режимов распространения спиновых волн в массиве ЖИГ-полосок

На рис. 2 представлен источник СВ в виде черного прямоугольника, размещенного на микроволноводе A_1 . Распространение в волноводах нижнего слоя A_1 – A_2 показано на рис. 2, a и c, а в волноводе верхнего слоя A_3 — на рис. 2, b и d при возбуждении СВ волны на частотах 5.15 и 5.35 GHz. Была исследована динамика распространения СВ в латерально и вертикально связанных волноводах, используя построение карт пространственного распределения динамической намагниченности.

На рис. 2 изображена стационарная картина установления волнового процесса, при котором наблюдается распространение как в соседний микроволновод внутри одного слоя, так и в вертикальном направлении. Длина волны для первого случая (рис. 2, a) составляет $500 \mu\text{m}$, а при неизменной конфигурации, но с частотой 5.35 GHz (рис. 2, c), длина составляет $250 \mu\text{m}$. Следует отметить, что верхний волновод практически не влияет на длину волны и ее распространение. Наблюдая за эволюцией волны в волноводе A_3 , можно выявить режим распространения обратной объемной СВ [3], длина волны которой при распространении в положительном направлении оси y больше, чем длина волны, распространяющейся в отрицательном направлении оси y . При этом стоит отметить многомодовый характер СВ в секции A_3 , проявляющийся в одновременном распространении первой и второй шириных мод обратной объемной магнитостатической волны [23–25]. При разных частотах, в нашем случае 5.15 и 5.35 GHz, пространственные профили амплитуды СВ определяются разным вкладом первой или второй шириных мод. В случае, приведенном на рис. 2, a и c, волна движется по направлению вектора

внешнего поля \mathbf{H} , но на рис. 2, b и d распространение происходит в направлении, противоположном направлению внешнего поля.

Рассмотрим процессы формирования пучков спиноволнового сигнала, построив пространственное распределение интенсивности СВ. На рис. 3, a и c представлено распространение волн в волноводах нижнего слоя A_1 – A_2 , а на рис. 3, b и d — в волноводе верхнего слоя A_3 в момент времени $t = 200 \text{ ns}$ после установления стационарного режима распространения СВ. Длина перекачки мощности, обусловленная связью СВ, для рис. 3, a составит 1 mm, тогда как для рис. 3, c не наблюдается явной перекачки.

Для выявления режимов невзаимного распространения СВ в рассматриваемой структуре были построены частотные зависимости спектральной плотности мощности при вариации ориентации поля подмагничивания. А именно, на входной антенне задавался импульсный сигнал, и на выходных антеннах, соответствующих каждому из выходных портов структуры P_{3-6} проводилось преобразование Фурье для построения спектров. По полученным спектрам (рис. 4) видно, что изменение ориентации поля подмагничивания на противоположное сильно меняет уровень прохождения спиноволнового сигнала в выходные порты структуры. Так, для сигнала с порта P_4 можно отметить изменение числа и глубины провалов, вызванных перекачкой спиноволновой мощности между микроволноводами A_1 и A_2 . Это вызвано невзаимным характером поверхностной магнитостатической волны, обусловленным изменением профиля амплитуды СВ в направлении оси ортогональной поверхности пленки (ось z на рис. 1). В то же время для ортогонально расположенного микроволновода A_3 наблюдается сильное изменение спектра выходного сигнала, несмотря на то, что в A_3 распространяется обратная объемная волна, для которой как известно, свойства невзаимности не проявляются. Таким образом, предложенная структура вкупе с методом управления путем изменения ориентации поля подмагничивания на

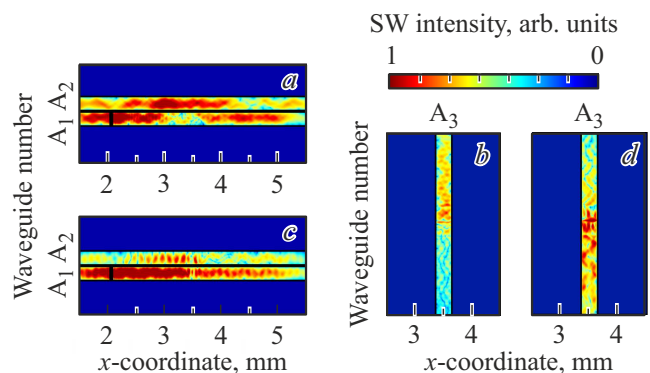


Рис. 3. Пространственное распределение интенсивности СВ (SW), где градиациями цвета закодирована интенсивность СВ $I(x, y)$. (a, b) — возбуждение волны на частоте 5.15 GHz. (c, d) — возбуждение волны на частоте 5.35 GHz.

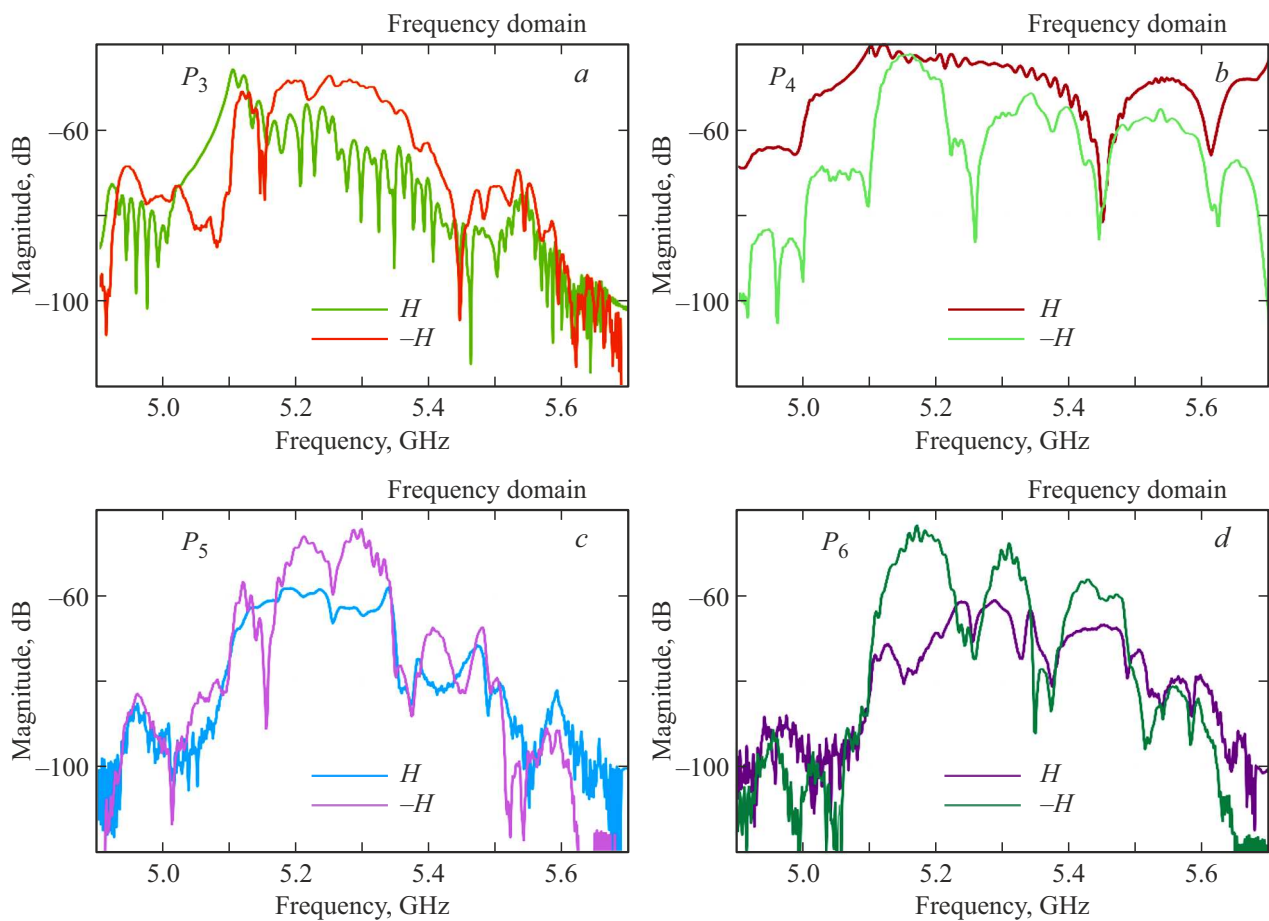


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики на выходных портах структуры, построенные методом микромагнитного моделирования при изменении ориентации магнитного поля на противоположное. Названия выходных портов показаны на каждой панели. Величина внешнего магнитного поля для всех полученных результатов составляла 120 Ое.

противоположное может быть использована в качестве фильтра СВЧ-сигнала, управляемого демультиплексора или магннного элемента для логических устройств.

4. Заключение

Исследовано двойное управление характеристиками СВ в решетке ЖИГ-микроволноводов при реализации одновременно латерального и вертикального типа связи. Проведено исследование особенностей процессов формирования пучков спиновых волн для структуры связанных магнитных волноводов. Выявлены особенности распространения и механизмы изменения пространственного распределения профиля спин-волнового пучка. На основе полученных пространственных распределений компонент динамической намагниченности СВ продемонстрировано изменение характера локализации мощности СВ в линейном режиме в выходных секциях микроволноводов. Предложенный способ управления свойствами СВ может быть использован в многослойных топологиях магннных сетей и устройствах магннной логики на их основе.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научно-го фонда в рамках выполнения проекта № 20-79-10191.

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**, 10, 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**, 10, 1002 (2015)].
- [2] V.E. Demidov, S. Urazhdin, A. Zholud, A.V. Sadovnikov, A.N. Slavin, S.O. Demokritov. Sci. Rep. **5**, 1, 8578 (2015).

- [3] C.S. Davies, A. Francis, A.V. Sadovnikov, S.V. Chertopalov, M.T. Bryan, S.V. Grishin, D.A. Allwood, Y.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov, V.V. Kruglyak. *Phys. Rev. B* **92**, 2, 020408(R) (2015).
- [4] 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**, 5, 054424 (2019).
- [5] A.V. Sadovnikov, A.A. Zyablovsky, A.V. Dorofeenko, S.A. Nikitov. *Phys. Rev. Appl.* **18**, 2, 024073 (2022).
- [6] M. Balynsky, D. Gutierrez, H. Chiang, A. Kozhevnikov, G. Dudko, Y. Filimonov, A.A. Balandin, A. Khitun. *Sci. Rep.* **7**, 1, 11539 (2017).
- [7] A.B. Ustinov, A.V. Drozdovskii, B.A. Kalinikos. *Appl. Phys. Lett.* **96**, 14, 142513 (2010).
- [8] L.A. Shelukhin, V.V. Pavlov, P.A. Usachev, P.Yu. Shamray, R.V. Pisarev, A.M. Kalashnikova. *Phys. Rev. B* **97**, 1, 014422 (2018).
- [9] С.А. Никитов, А.Р. Сафин, Д.В. Калябин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.В. Логунов, М.А. Морозова, С.А. Одинцов, С.А. Осокин, А.Ю. Шараевская, Ю.П. Шараевский, А.И. Кирилюк. *УФН* **190**, 10, 1009 (2020). [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**, 10, 945 (2020)].
- [10] А.Ю. Анненков, С.В. Герус, С.И. Ковалев. *ЖТФ* **68**, 2, 82 (1998).
- [11] Y.K. Fetisov, G. Srinivasan. *Appl. Phys. Lett.* **88**, 14, 143503 (2006).
- [12] С.Л. Высокfий, Ю.В. Хивинцев, В.К. Сахаров, Ю.А. Филимонов. *ЖТФ* **64**, 7, 1044 (2019). [S.L. Vysotskiy, Yu.V. Khivintsev, V. Sakharov, Yu. Filimonov. *Tech. Phys.* **64**, 7, 984 (2019)].
- [13] A.A. Grachev, A.V. Sadovnikov, S.A. Nikitov. *Nanomater.* **12**, 9, 1520 (2022).
- [14] A. Stognij, L. Lutsev, N. Novitskii, A. Bespalov, O. Golikova, V. Ketsko, R. Gieniusz, A. Maziewski. *J. Phys. D* **48**, 485002 (2015).
- [15] A.I. Stognij, L.V. Lutsev, V.E. Bursian, N.N. Novitskii. *J. Appl. Phys.* **118**, 2, 023905 (2015).
- [16] G. Gubbiotti, A. Sadovnikov, E. Beginin, S. Nikitov, D. Wan, A. Gupta, S. Kundu, G. Talmelli, R. Carpenter, I. Asselberghs, I.P. Radu, C. Adelman, F. Ciubotaru. *Phys. Rev. Appl.* **15**, 1, 014061 (2021).
- [17] A.K. Ganguly, C. Vittoria. *J. Appl. Phys.* **45**, 10, 4665 (1974).
- [18] H. Puzzkarski. *Surf. Sci. Rep.* **20**, 2, 45 (1994).
- [19] M.R. Daniel, P.R. Emtage. *J. Appl. Phys.* **53**, 5, 3723 (1982).
- [20] A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, D.V. Romanenko, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. *Appl. Phys. Lett.* **107**, 20, 202405 (2015).
- [21] A.Y. Annenkov, S.V. Gerus, E.H. Lock. *Europhys. Lett.* **123**, 4, 44003 (2018).
- [22] А.Б. Хутиева, А.В. Садовников, А.Ю. Анненков, С.В. Герус, Э.Г. Локк. *Изв. РАН. Сер. физ.* **85**, 11, 1542 (2021). [A.B. Khutieva, A.V. Sadovnikov, A.Yu. Annenkov, S.V. Gerus, E.H. Lock. *Bull. Russ. Acadmy. Sci.: Phys.* **85**, 11, 1205 (2021)].
- [23] S.N. Vajrai. *J. Appl. Phys.* **58**, 2, 910 (1985).
- [24] T.W. O’Keeffe, R.W. Patterson. *J. Appl. Phys.* **49**, 9, 4886 (1978).
- [25] O. Buttner, M. Bauer, C. Mathieu, S.O. Demokritov, B. Hillebrands, P.A. Kolodin, M.P. Kostylev, S. Sure, H. Dotsch, V. Grimalsky, Y. Rapoport, A.N. Slavin. *IEEE Trans. Magn.* **34**, 4, 1381 (1998).
- [26] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B. Van Waeyenberge. *AIP Adv.* **4**, 10, 107133 (2014).

Редактор Е.В. Толстякова