

11

Особенности формирования полос непропускания в двухкомпонентных магнитных метаповерхностях

© А.С. Бир¹, Д.В. Романенко¹, С.В. Гришин¹, С.А. Никитов^{1,2}¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия
E-mail: sergrsh@yandex.ru

Поступило в Редакцию 22 мая 2025 г.

В окончательной редакции 11 августа 2025 г.

Принято к публикации 30 августа 2025 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования и микромагнитного моделирования особенностей формирования полос непропускания в двухкомпонентных магнитных метаповерхностях. Метаповерхности состоят из двух магнитных материалов: диэлектрической пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) микронной толщины и пленки ферромагнитного металла (железа) нанометровой толщины. Из пленки железа формируется одномерная периодическая структура в виде полосок субмиллиметрового размера на свободной поверхности пленки ЖИГ. Установлено, что в спектре поверхностной магнитостатической спиновой волны (ПМСВ), распространяющейся в пленке ЖИГ, присутствуют полосы непропускания трех типов. Первый из них обусловлен отражением ПМСВ от периодической структуры (брэгговский резонанс), второй — резонансными явлениями спиновых волн внутри самих полосок, а третий — резонансами ПМСВ в области свободной пленки ЖИГ, находящейся между входной микрополосковой антенной и ближайшей к ней (первой) полоской железа.

Ключевые слова: метаповерхность, ферромагнетик, спиновая волна.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.01.61917.20381

В последнее время в магнетике большой интерес вызывают исследования, связанные с управлением спин-волновым транспортом в двухкомпонентных (ДК) двумерных (2D) периодических магнитных структурах, у которых период T гораздо меньше длины волны λ ($T \ll \lambda$) [1–3]. Такие искусственно созданные магнитные структуры получили название магнитных метаповерхностей [2]. Это планарные реализации трехмерных метаматериалов, которые более просты в изготовлении, чем их объемные аналоги [4,5]. К магнитным метаповерхностям сейчас относят и магнитные кристаллы (одномерные (1D) и 2D периодические планарные магнитные структуры), период которых сравним с длиной волны ($T \sim \lambda$) [6]. Их частотно-избирательные свойства представляют интерес для создания различных фильтрующих устройств, управляемых магнитным [7] или электрическим [8] полями, постоянным током [9–11], лазерным излучением [12] и даже механическими деформациями [13], а их реконфигурируемые свойства находят применение в логических схемах [14].

ДК магнитные метаповерхности состоят из двух магнетиков. Это либо два металлических ферромагнетика [15–20], либо металлический ферромагнетик и диэлектрический ферриманетик [1–3]. Один из магнетиков используется в качестве магнитной матрицы, на поверхности которой формируется 1D или 2D периодическая структура из другого магнитного материала в виде полосок [3,15] или дисков [1,2,16–20]. В случае одновременного использования металлического ферромагнетика и

диэлектрического ферриманетика последний представляет собой пленку железо-иттриевого граната (ЖИГ), из которой создается магнитная матрица. На поверхности ЖИГ-матрицы формируется периодическая структура из пленки ферромагнитного металла (Ni [15], Co [16–19], Fe [20] или их соединений [1–3]).

Эксперименты с ДК магнитными метаповерхностями проводились с использованием ЖИГ-матриц как микронной ($\sim 10^{-5}$ м) [3], так и нанометровой ($\sim (2-20) \cdot 10^{-8}$ м) [1,2] толщины. В [3] на поверхности касательно намагниченной ЖИГ-матрицы были сформированы 1D и 2D периодические структуры, состоящие из субволновых элементов прямоугольной/квадратной формы микронных размеров, выполненных на основе пленки пермаллоя (Pμ). Было продемонстрировано управление полосой непропускания, находящейся в спектре бегущей поверхностной магнитостатической спиновой волны (ПМСВ), путем изменения ориентации внешнего постоянного магнитного поля относительно направления распространения ПМСВ. Указанная полоса непропускания не подчинялась условию Брэгга ($k_B = n\pi/T$ — брэгговское волновое число, которому соответствует частота f_B , $n = 1, 2, 3, \dots$ — номер брэгговского резонанса), при выполнении которого в спектре ПМСВ формируются полосы непропускания за счет отражения ПМСВ от периодической структуры. В [2] на поверхности касательно намагниченной ЖИГ-матрицы были сформированы 2D периодические структуры, состоящие из субволновых элементов в виде

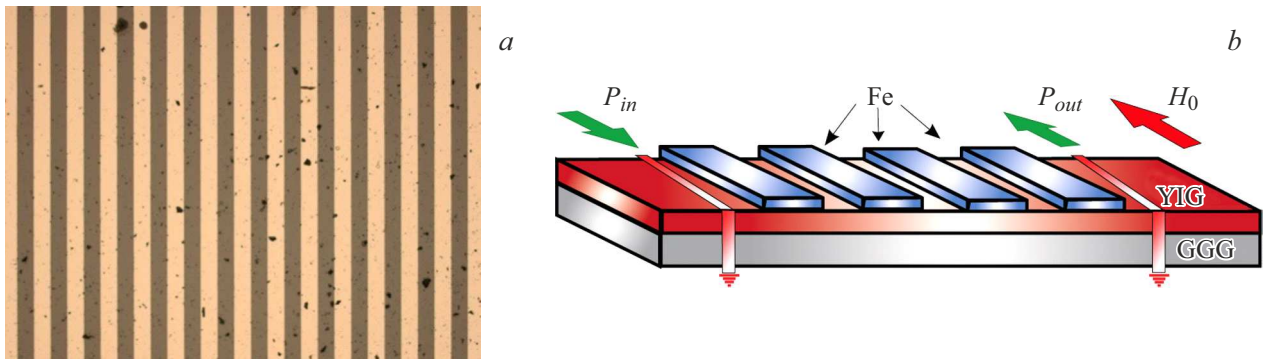


Рис. 1. *a* — фотография фрагмента ДК магнитной метаповерхности ЖИГ/Fe с периодом $T = 16 \cdot 10^{-5}$ м, полученная с помощью оптического микроскопа. *b* — схематическое изображение спин-волновой линии передачи на основе ДК магнитной метаповерхности ЖИГ/Fe с 1D-структурой в виде ферромагнитных полосок. P_{in} — мощность на входном микрополосковом проводнике, P_{out} — мощность на выходном микрополосковом проводнике.

дисков субмикронных размеров, выполненных на основе ферромагнитных металлических пленок $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$, Co и Ru ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$). Появление в спектре бегущей ПМСВ полосы непропускания здесь было обусловлено динамической связью между резонансом вихревого состояния в ферромагнитных нанодисках и ПМСВ, бегущей в ферритовой матрице.

В [21] продемонстрировано формирование полосы непропускания, не подчиняющейся условию Брэгга, в случае использования одиночной 1D ферромагнитной полоски. Полоса непропускания находилась в высокочастотной области спектра ПМСВ, бегущей в ЖИГ-матрице субмикронной толщины, на поверхности которой располагалась полоска CoFeV или Ru шириной от $27 \cdot 10^{-8}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ м. Полоса непропускания здесь являлась результатом деструктивной интерференции ПМСВ, падающей на бислой ЖИГ/CoFeV (или ЖИГ/Ru), со спиновой волной, циркулирующей внутри самого бислоя, работающего как резонатор Фабри-Перро.

В настоящей работе на примере ДК-метаповерхностей, выполненных на основе ЖИГ-матрицы микронной толщины с нанесенной на ее поверхность 1D периодической структурой из полосок Fe субмиллиметровых размеров, демонстрируется возможность одновременного формирования полос непропускания, одни из которых подчиняются, а другие не подчиняются условию Брэгга.

В эксперименте исследовались ДК магнитные метаповерхности, выполненные на основе пленки ЖИГ толщиной $d_1 = 12 \cdot 10^{-6}$ м с намагниченностью насыщения $M_1 = 0.0139$ Т, выращенной методом жидкофазной эпитаксии на подложке гадолиний-галлиевого граната толщиной $5 \cdot 10^{-4}$ м. Из пленки ЖИГ был сформирован волновод длиной $15 \cdot 10^{-3}$ м и шириной $4 \cdot 10^{-3}$ м. На поверхности ЖИГ-волновода были нанесены 1D периодические структуры, состоящие из полосок Fe толщиной $d_2 = 10^{-7}$ м, шириной $T/2$, периодом $T = (16-96) \cdot 10^{-5}$ м. 1D периодические структуры, занимающие площадь 6.5×4 мм, были изготовлены с ис-

пользованием методов магнетронного напыления, жидкостного травления, оптической литографии и взрывной (lift-off) фотолитографии. В процессе изготовления использовались многофункциональный сверхвысоковакуумный комплекс магнетронного осаждения и установка магнетронного напыления на основе вакуумного поста ВУП-5М. Фрагмент одной из изготовленных ДК магнитных метаповерхностей приведен на рис. 1, *a*.

Для возбуждения и приема ПМСВ, распространяющейся в ДК магнитной метаповерхности, используется макет микрополосковой линии передачи в конфигурации „линия задержки“ (рис. 1, *b*). Микрополосковые проводники имеют ширину $3 \cdot 10^{-5}$ м и расположены на расстоянии $8 \cdot 10^{-3}$ м друг от друга. Между микрополосковыми проводниками располагается ЖИГ-волновод с нанесенной на его поверхность 1D периодической структурой. Внешнее постоянное магнитное поле H_0 приложено параллельно микрополосковым проводникам и ортогонально направлению распространения ПМСВ.

На рис. 2 приведены измеренные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) спин-волновой линии передачи на основе ДК магнитной метаповерхности ЖИГ/Fe, имеющей разные периоды и размеры полосок 1D-структуры, а также АЧХ спин-волновой линии передачи, выполненной на основе ЖИГ-волновода, на поверхности которого отсутствует 1D-структура. Из представленных на рис. 2, *a* результатов следует, что в случае ДК-метаповерхности, у которой полоски имеют наибольший период ($T = 96 \cdot 10^{-5}$ м) и ширину ($T/2 = 48 \cdot 10^{-5}$ м), на АЧХ спин-волновой линии передачи отчетливо наблюдаются полосы непропускания. Одна из них (более высокочастотная) удовлетворяет условию Брэгга и соответствует первому брэгговскому резонансу, а другая (более низкочастотная) не удовлетворяет условию Брэгга и не наблюдается на АЧХ ЖИГ-волновода, на поверхности которого отсутствует периодическая 1D-структура. Глубина полос непропускания (разница между уровнем ослабления на частоте полосы непропускания и уровнем ослабления на той же

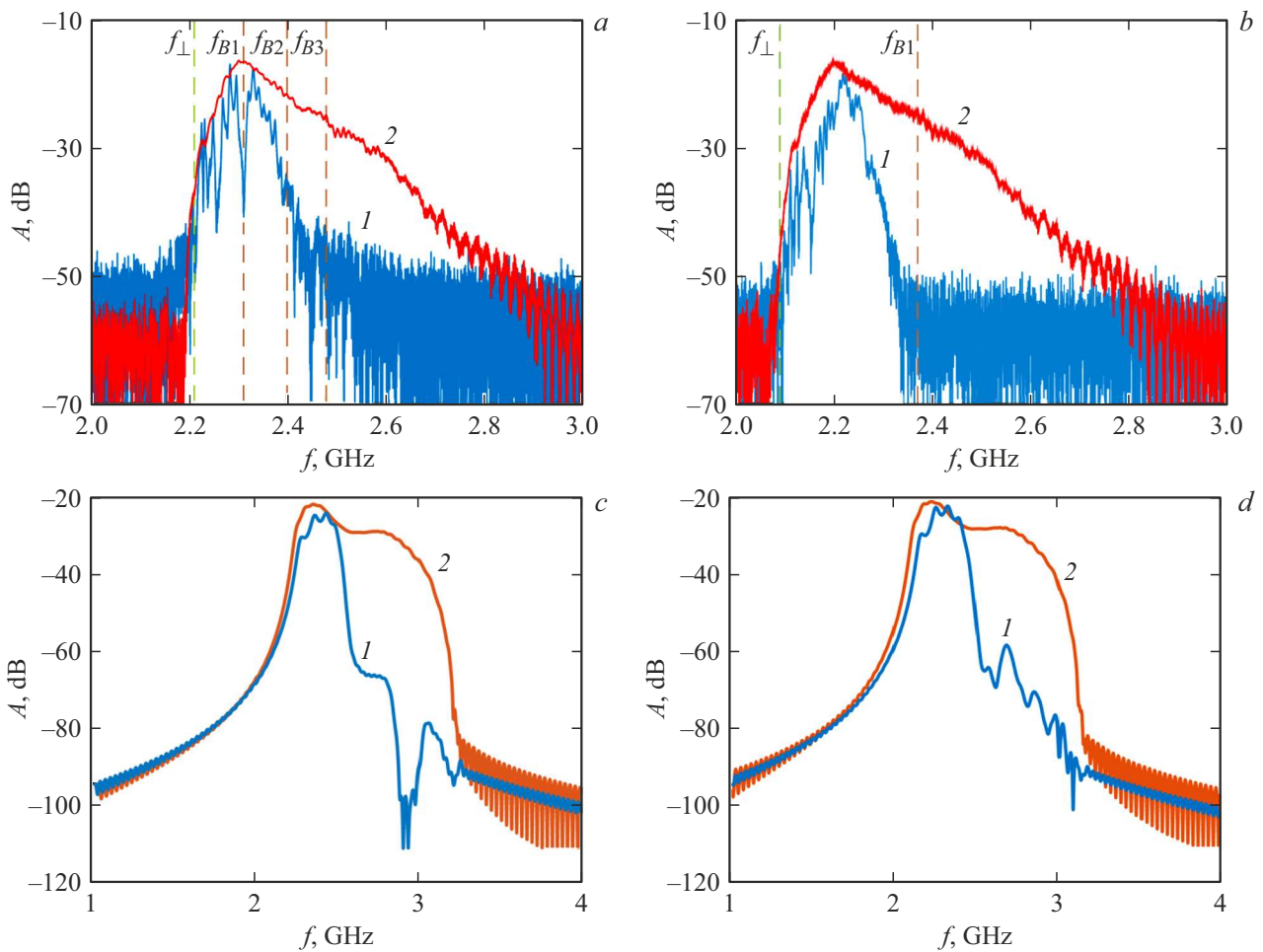


Рис. 2. АЧХ спин-волновой линии передачи с ДК магнитной метаповерхностью ЖИГ/Fe, полученные в радиофизическом эксперименте (*a, b*) и рассчитанные в пакете программ MuMax³ (*c, d*). *a, b* — результаты получены для периодической структуры, имеющей разный период T и ширину W полосок Fe (кривые *1*): $T = 96 \cdot 10^{-5}$ м, $W = 48 \cdot 10^{-5}$ м (*a*) и $T = 32 \cdot 10^{-5}$ м, $W = 16 \cdot 10^{-5}$ м (*b*). *c, d* — результаты получены для пленки ЖИГ, нагруженной на одиночную полоску Fe (кривые *1*) разной ширины W : $48 \cdot 10^{-5}$ (*c*) и $16 \cdot 10^{-5}$ м (*d*). Кривые *2* на всех фрагментах соответствуют результатам, полученным для однородной пленки ЖИГ. $H_0 = 24.11$ (*a, c*) и 21.88 кА/м (*b, d*).

частоте в отсутствие периодической структуры) 20 дБ (для низкочастотной полосы) и 24 дБ (для брэгговской полосы), а их добротности, измеренные по уровню 3 дБ относительно уровня ослабления на частоте полосы не пропускаения, имеют значения 657 и 836 соответственно. Кроме того, в высокочастотной области АЧХ линии передачи на основе 1D-метаповерхности наблюдается значительное увеличение уровня потерь, что приводит к сужению АЧХ по сравнению с АЧХ линии передачи на основе однородной пленки ЖИГ.

На рис. 2, *b* представлена АЧХ спин-волновой линии передачи с ДК-метаповерхностью, у которой период структуры и ширина полосок в 3 раза меньше аналогичных размеров структуры, рассмотренной ранее. В данном случае на АЧХ линии передачи наблюдается только одна (более низкочастотная) полоса не пропускаения, центральная частота которой не соответствует условию Брэгга, а ее местоположение в спектре ПМСВ практи-

чески не зависит от изменения размеров периодической структуры. Глубина низкочастотной полосы не пропускаения возрастает до 27.4 дБ, а ее добротность становится равной 4306. Последний результат является весьма привлекательным для создания высокодобротных полосно-заграждающих фильтров на основе магнитостатических спиновых волн. В то же время частота, соответствующая первому брэгговскому резонансу, находится теперь вне полосы возбуждения ПМСВ. Кроме того, использование периодической структуры с меньшими размерами также приводит к значительному увеличению уровня потерь в высокочастотной области спектра ПМСВ. За счет этого здесь также наблюдается сужение полосы возбуждения ПМСВ по сравнению со случаем, когда 1D-структура отсутствует на поверхности пленки ЖИГ. Аналогичный эффект наблюдался ранее при использовании 1D периодической структуры из полосок Ru микронной ширины на поверхности пленки ЖИГ [3]. Однако в нашем случае

в отличие от [3] ярко выраженная полоса непропускания располагается и в низкочастотной области спектра ПМСВ в отсутствие поворота периодической структуры относительно направления поля H_0 .

Мы полагаем, что возникновение низкочастотной полосы непропускания связано с образованием стоячей ПМСВ в той области свободной пленки ЖИГ, которая находится между входной микрополосковой антенной и ближайшей к ней (первой) полоской железа. Данная область имеет длину $\sim (0.5-1) \cdot 10^{-3}$ м, которая не остается постоянной при использовании ЖИГ-волноводов с различными периодическими структурами, и в ней резонирует ПМСВ с аналогичной длиной волны, отражаясь попеременно от первой полоски железа и входной микрополосковой антенны. Так, при $H_0 = 24.11$ кА/м и $W = 48 \cdot 10^{-5}$ м (рис. 2, *a*) волновое число ПМСВ имеет значение $\sim 14 \cdot 10^2$ м⁻¹ на резонансной частоте 2253 МГц низкочастотной полосы непропускания, а при $H_0 = 21.88$ кА/м и $W = 16 \cdot 10^{-5}$ м (рис. 2, *b*) волновое число ПМСВ $\sim 19 \cdot 10^2$ м⁻¹ соответствует резонансной частоте 2152 МГц. Таким образом, в пользу сделанного выше предположения свидетельствует слабая зависимость волнового числа ПМСВ, соответствующего центральной частоте полосы непропускания, от изменения периода и ширины полосок железа, а также исчезновение данной полосы непропускания при использовании пленки ЖИГ без структуры.

В подтверждение того факта, что увеличение уровня потерь в высокочастотной области спектра ПМСВ в обоих случаях обусловлено резонансными свойствами магнитных полосок, было проведено численное моделирование передаточной характеристики пленки ЖИГ толщиной $12 \cdot 10^{-6}$ м, на поверхности которой располагается одиночная полоска Fe толщиной $2 \cdot 10^{-7}$ м разной ширины с намагниченностью насыщения $M_2 = 0.1751$ Т. Результаты численного моделирования такой структуры, полученные в пакете программ микромагнитного моделирования MuMax³, приведены на рис. 2, *c, d*. Из представленных результатов расчета следует, что, как и в эксперименте, АЧХ слоистых структур в обоих случаях являются более узкополосными, чем для свободной пленки ЖИГ. Это связано с появлением в высокочастотной области спектра ПМСВ относительно широкой полосы непропускания, глубина которой уменьшается с уменьшением ширины полоски Fe. Однако низкочастотная полоса непропускания, которая фиксировалась в эксперименте, не наблюдается в численном моделировании, что связано с отсутствием возможности моделирования микрополосковой линии передачи в MuMax³.

Полученные результаты представляют интерес для разработки фильтрующих устройств магноники и магنونной спинтроники [22,23].

Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научно-го фонда (проект № 19-79-20121).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Watanabe, V.S. Bhat, A. Mucchietto, E.N. Dayi, S. Shan, D. Grundler, *Adv. Funct. Mater.*, **35** (31), 2301087 (2023). DOI: 10.1002/adma.202301087
- [2] H. Yu, J. Chen, V. Cros, P. Bortolotti, H. Wang, C. Guo, F. Brandl, F. Heimbach, X. Han, A. Anane, D. Grundler, *Adv. Funct. Mater.*, **32** (34), 2203466 (2022). DOI: 10.1002/adfm.202203466
- [3] С.Л. Высоцкий, Ю.В. Хивинцев, В.К. Сахаров, Н.Н. Новицкий, Г.М. Дудко, А.И. Стогний, Ю.А. Филимонов, *ФТТ*, **62** (9), 1494 (2020). DOI: 10.21883/ФТТ.2020.09.49775.12H [S.L. Vysotskii, Yu.V. Khivintsev, V.K. Sakharov, N.N. Novitskii, G.M. Dudko, A.I. Stognii, Yu.A. Filimonov, *Phys. Solid State*, **62** (9), 1659 (2020). DOI: 10.1134/S1063783420090334].
- [4] S.B. Glybovski, S.A. Tretyakov, P.A. Belov, Yu.S. Kivshar, C.R. Simovski, *Phys. Rep.*, **634**, 1 (2016). DOI: 10.1016/j.physrep.2016.04.004
- [5] H.-T. Chen, A.J. Taylor, N. Yu, *Rep. Prog. Phys.*, **79**, 076401 (2016). DOI: 10.1088/0034-4885/79/7/076401
- [6] K. Zakeri, *J. Phys.: Condens. Matter.*, **32** (36), 363001 (2020). DOI: 10.1088/1361-648X/ab88f2
- [7] A.S. Bir, S.V. Grishin, D.V. Romanenko, S.A. Nikitov, *IEEE Trans. Magn.*, **60** (9), 2800205 (2024). DOI: 10.1109/TMAG.2024.3425901
- [8] M.A. Morozova, D.V. Romanenko, A.A. Serdobintsev, O.V. Matveev, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov, *J. Magn. Magn. Mater.*, **514** (15), 167202 (2020). DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167202
- [9] A.V. Chumak, T. Neumann, A.A. Serga, B. Hillebrands, M.P. Kostylev, *J. Phys. D*, **42** (20), 205005 (2009). DOI: 10.1088/0022-3727/42/20/205005
- [10] A.A. Nikitin, A.B. Ustinov, A.A. Semenov, A.V. Chumak, A.A. Serga, V.I. Vasyuchka, E. Lähderanta, B.A. Kalinikov, *Appl. Phys. Lett.*, **106** (10), 102405 (2015). DOI: 10.1063/1.4914506
- [11] A.S. Bir, S.V. Grishin, A.A. Grachev, O.I. Moskalenko, A.N. Pavlov, D.V. Romanenko, V.N. Skorokhodov, S.A. Nikitov, *Phys. Rev. Appl.*, **21** (4), 044008 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.21.044008
- [12] А.С. Бир, М.А. Морозова, Д.В. Романенко, С.А. Никитов, С.В. Гришин, *Письма в ЖТФ*, **49** (22), 27 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.22.56596.19701 [A.S. Bir, M.A. Morozova, D.V. Romanenko, S.A. Nikitov, S.V. Grishin, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (11), 63 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.11.57203.19701].
- [13] A.V. Sadovnikov, A.A. Grachev, A.A. Serdobintsev, S.E. Sheshukova, S.S. Yankin, S.A. Nikitov, *IEEE Magn. Lett.*, **10**, 5506405 (2019). DOI: 10.1109/LMAG.2019.2943117
- [14] A. Khitun, M. Bao, K.L. Wang, *J. Phys. D*, **43**, 264005 (2010). DOI: 10.1088/0022-3727/43/26/264005
- [15] M. Mruczkiewicz, P. Graczyk, P. Lupo, A. Adeyeye, G. Gubbiotti, M. Krawczyk, *Phys. Rev. B*, **96** (10), 104411 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.104411
- [16] P. Malagò, L. Giovannini, R. Zivieri, P. Gruszecki, M. Krawczyk, *Phys. Rev. B*, **92** (6), 064416 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevB.92.064416

- [17] M. Krawczyk, S. Mamica, M. Mruczkiewicz, J.W. Klos, S. Tacchi, M. Madami, G. Gubbiotti, G. Duerr, D. Grundler, *J. Phys. D*, **46** (49), 495003 (2013). DOI: 10.1088/0022-3727/46/49/495003
- [18] S. Tacchi, G. Duerr, J.W. Klos, M. Madami, S. Neusser, G. Gubbiotti, G. Carlotti, M. Krawczyk, D. Grundler, *Phys. Rev. Lett.*, **109** (13), 137202 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.137202
- [19] G. Duerr, M. Madami, S. Neusser, S. Tacchi, G. Gubbiotti, G. Carlotti, D. Grundler, *Appl. Phys. Lett.*, **99** (20), 202502 (2011). DOI: 10.1063/1.3662841
- [20] F.S. Ma, H.S. Lim, Z.K. Wang, S.N. Piramanayagam, S.C. Ng, M.H. Kuok, *Appl. Phys. Lett.*, **98** (15), 153107 (2011). DOI: 10.1063/1.3579531
- [21] H. Qin, R.B. Holländer, L. Flajšman, F. Hermann, R. Dreyer, G. Woltersdorf, S. van Dijken, *Nat. Commun.*, **12**, 2293 (2021). DOI: 10.1038/s41467-021-22520-6
- [22] 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. Кирилук, *УФН*, **190** (10), 1009 (2020). DOI: 10.3367/UFNr.2019.07.038609 [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). DOI: 10.3367/UFNe.2019.07.038609].
- [23] A.V. Chumak, V.I. Vasyuchka, A.A. Serga, B. Hillebrands, *Nat. Phys.*, **11**, 453 (2015). DOI: 10.1038/nphys3347