

13

Генерация многочастотного сигнала в магнном кольцевом автогенераторе на основе супертонкой пленки железо-иттриевого граната

© 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 11 сентября 2024 г.

В окончательной редакции 14 ноября 2024 г.

Принято к публикации 14 ноября 2024 г.

Представлены результаты экспериментального исследования режимов генерации многочастотного СВЧ-сигнала в кольцевом автогенераторе с магнным кристаллом, выполненным на основе пленки железо-иттриевого граната субмикронной толщины. Установлено, что многочастотный СВЧ-сигнал генерируется, когда магнный кристалл работает в нелинейном режиме. Сигнал формируется по обе стороны от частоты первой запрещенной зоны кристалла, находящейся в полосе поверхностной магнитостатической спиновой волны. Продемонстрировано управление спектром многочастотного СВЧ-сигнала за счет изменения напряженности внешнего постоянного магнитного поля.

Ключевые слова: спиновые волны, магнный кристалл, ЖИГ-генераторы.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.06.59926.20114

В магннике одним из актуальных направлений является изучение распространения и взаимодействия спиновых волн (СВ) в супертонких пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) [1–3]. В первую очередь это связано со стремлением к миниатюризации спин-волновых устройств и их переходом в нанометровый масштаб. Кроме того, в супертонких пленках ЖИГ с толщиной $d \leq 2 \cdot 10^{-7}$ м, граничащих с супертонкими слоями нормального металла (например, платины), возникают эффекты, связанные либо с влиянием спин-поляризованного тока на потери СВ [4,5], либо с наведением ЭДС под действием СВ [6–8]. В первом случае ослабление/усиление СВ спин-поляризованным током происходит за счет прямого спинового эффекта Холла в нормальном металле, а во втором случае наведение ЭДС в нормальном металле обусловлено обратным спиновым эффектом Холла.

В настоящее время известны три технологии создания супертонких пленок ЖИГ с толщинами от единиц до сотен нанометров. Первая из них основана на применении метода жидкофазной эпитаксии [3,4,6], который широко применялся ранее для роста пленок ЖИГ микронной толщины на подложках гадолиний-галлиевого граната (ГГГ). Вторая технология использует метод импульсного лазерного осаждения [7,9,10], а третья — метод магнетронного напыления супертонких пленок ЖИГ на подложки ГГГ [11,12]. В зависимости от выбранного метода постоянная затухания Гильберта меняется от 10^{-4} до 10^{-3} и не уступает аналогичным значениям, полученным для пленок ЖИГ микронной толщины. Особенностью супертонких пленок ЖИГ является то, что в них при использовании возбуждающих антенн субмикронной и

нанометровой ширины ($w \sim d$, где w — ширина возбуждающей антенны) можно возбуждать СВ с гораздо большими значениями продольного волнового числа k , чем в пленках ЖИГ микронной толщины, в которых для возбуждения СВ используются антенны шириной порядка десятков микрометров. Как следствие этого, СВ, возбуждаемые в супертонких пленках ЖИГ антеннами меньшей ширины, имеют меньшие значения групповой скорости V_g , чем в пленках ЖИГ микронной толщины. Это приводит к уменьшению длины распространения СВ до $l \sim (10–100) \cdot 10^{-6}$ м по сравнению с пленками ЖИГ микронной толщины, где $l \sim 10^{-2}$ м.

В теоретической работе [13] продемонстрирована возможность использования линии задержки, выполненной на основе супертонкой пленки ЖИГ, в цепи обратной связи активного кольцевого резонатора. В настоящей работе рассчитан спектр собственных мод активного кольцевого резонатора, находящегося в предгенерационном режиме, и показана перестройка многочастотного спектра (частотный интервал между соседними модами определяется как $\Delta f = V_g(f)/l$ и является практически постоянным) при изменении толщины пленки ЖИГ и длины распространения СВ. Установлено, что для супертонкой пленки ЖИГ с $d = 10^{-7}$ м и $l = 56 \cdot 10^{-6}$ м частотный интервал Δf равен 6.9 МГц на частотах порядка 5 GHz.

Для управления спектром собственных мод активного кольцевого резонатора используется также магнный кристалл (МК), который представляет собой, например, периодически модулированную по толщине пленку ЖИГ [14–17]. Он участвует в управлении резонансными частотами кольцевых мод [14] и в формировании как

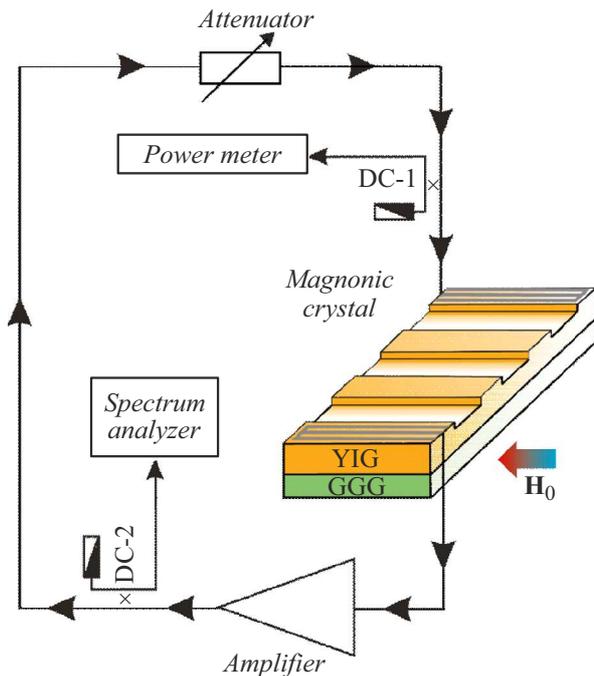


Рис. 1. Схематическое изображение магнного кольцевого автогенератора на основе линии задержки с МК.

монохроматического сигнала с низким уровнем фазовых шумов [15], так и хаотического СВЧ-сигнала в виде последовательностей диссипативных солитонов огибающей различной формы (светлых или темных) [16,17].

В настоящей работе экспериментально демонстрируется возможность генерации многочастотного СВЧ-сигнала в кольцевом автогенераторе с МК, выполненным на основе супертонкой пленки ЖИГ.

Схематическое изображение магнного кольцевого автогенератора приведено на рис. 1. Такой кольцевой генератор состоит из твердотельного СВЧ-усилителя, выполненного на основе GaN-транзисторов. Усилитель обладает коэффициентом усиления 55 дБ в полосе частот 2–8 ГГц. Он работает в режиме линейного усиления СВЧ-сигнала и служит только для компенсации потерь СВЧ-сигнала в кольце. С выхода СВЧ-усилителя сигнал поступает на вход переменного аттенюатора, а далее на вход линии задержки на основе МК и затем вновь попадает на вход СВЧ-усилителя. Переменный аттенюатор регулирует уровень мощности сигнала на входе линии задержки, которая в общем случае является нелинейным элементом. Большая часть мощности СВЧ-сигнала с выхода СВЧ-усилителя возвращается обратно в кольцо, а ее меньшая часть поступает на вход анализатора спектра E4408B.

Линия задержки состоит из двух (входной и выходной) копланарных СВЧ-антенн, которые сформированы на поверхности ЖИГ-волновода методом оптической литографии с применением металлических масок. Нанесение металлических масок выполнялось на установке магнетронно-ионного напыления. Каждая копланарная

СВЧ-антенна состоит из двух боковых (заземленные полоски) и одного центрального (сигнальный полосок) полосков шириной $w_s = 2.4 \mu\text{m}$. Один конец каждого полоска подключен к нагрузке (генератору или приемнику), а другой соединен с двумя другими полосками. Расстояние между боковыми и центральным полоском $w_g = 2 \mu\text{m}$, а длина всех трех полосков каждой антенны $L_{\text{CPL}} = 70 \mu\text{m}$. Входная СВЧ-антенна преобразует подаваемый на нее СВЧ-сигнал в СВ, а выходная СВЧ-антенна осуществляет обратное преобразование СВ в СВЧ-сигнал. Расстояние между центральными полосками двух копланарных линий передачи $L_d = 50 \mu\text{m}$.

Пленка ЖИГ, выращенная методом жидкофазной эпитаксии на подложке ГГГ, имеет толщину $d = 10^{-7}$ м, эффективную намагниченность вблизи поверхности пленки ЖИГ $4\pi M_{\text{eff}} \cong 0.175$ Т и ширину линии ферромагнитного резонанса $2\Delta H \cong 87.535$ А/м на частотах ~ 3 ГГц. ЖИГ-волновод характеризуется шириной $W = 50 \mu\text{m}$ и длиной $L = 500 \mu\text{m}$. Для создания ЖИГ-волновода с периодически модулированной толщиной (магнного кристалла) использовалось ионное травление пленки ЖИГ, которое осуществлялось на стенде ионно-пучкового травления с применением вакуумного универсального поста ВУП-5. Глубина травления составляет 10 нм (10% от толщины ЖИГ-волновода), ширина протравленного участка (канавки) — $2 \mu\text{m}$, а период структуры T равен $4 \mu\text{m}$. На расстоянии L_d между антеннами укладывается девять периодов МК. Внешнее постоянное магнитное поле H_0 прикладывается касательно к поверхности ЖИГ-волновода и направлено вдоль копланарных СВЧ-антенн. Такая ориентация поля позволяет возбуждать в ЖИГ-волноводе поверхностную магнитостатическую СВ (ПМСВ).

На рис. 2, а приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) линии задержки, выполненной на основе супертонкой пленки ЖИГ с одномерной периодической структурой. Измерения АЧХ линии задержки проводились вне генераторной схемы с помощью векторного анализатора цепей для магнитного поля $H_{01} = 34.22$ кА/м. Видно, что минимальный уровень потерь здесь 52–55 дБ, что значительно больше аналогичного уровня потерь, который наблюдался ранее у линии задержки с пленкой ЖИГ микронной толщины из-за большей величины $2\Delta H$. Кроме того, в спектре ПМСВ имеется ярко выраженный провал с максимальным уровнем ослабления СВЧ-сигнала порядка 95 дБ на частоте $f_{01} = 2785$ МГц. По обе стороны от этого провала образуются две (левая и правая) полосы пропускания, в каждой из которых впоследствии будет формироваться многочастотный СВЧ-сигнал.

На рис. 2, б приведена дисперсионная характеристика ПМСВ, построенная по измеренной фазочастотной характеристике линии задержки с МК. При построении данной зависимости волновые числа ПМСВ k определялись как $k = \Delta\varphi/L_d$, где $\Delta\varphi$ — набег „развернутой“ фазы в линии задержки с МК. Из полученной дисперсионной характеристики ПМСВ следует, что на

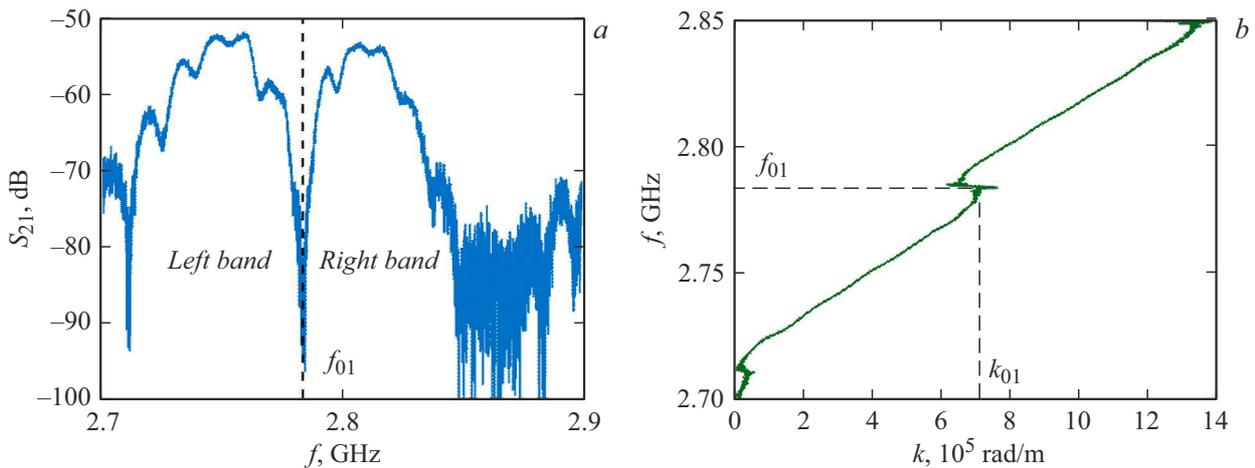


Рис. 2. АЧХ линии задержки на основе МК (а) и зависимость частоты от волнового числа ПМСВ (b). Измерения на обоих фрагментах выполнены для $H_{01} = 34.22$ кА/м и мощности монохроматического СВЧ-сигнала на входе линии задержки -30 dBm.

частоте f_{01} наблюдается разрыв дисперсионной характеристики, которому соответствует волновое число ПМСВ $k_{01} = 7.1 \cdot 10^5$ rad/m. Полученное значение волнового числа ПМСВ практически совпадает с волновым числом первой запрещенной зоны МК, которое определяется из условия Брэгга как $k_{b1} = \pi/T = 7.85 \cdot 10^5$ rad/m. Таким образом, данный провал на АЧХ линии задержки с МК есть первая запрещенная зона МК.

На рис. 3, а показан спектр мощности многочастотного СВЧ-сигнала, генерируемого в кольцевом генераторе с линией задержки на основе МК при $H_{01} = 34.22$ кА/м. Видно, что многочастотный СВЧ-сигнал генерируется по обе стороны от частоты первой запрещенной зоны МК и имеет практически эквидистантный спектр. Та часть спектра многочастотного сигнала, которая расположена по левую сторону от частоты f_{01} , характеризуется усредненной частотной отстройкой между спектральными компонентами сигнала $\Delta f_{lb1} = 7.9$ МГц. Другая часть спектра сигнала, которая расположена по правую сторону от частоты f_{01} , характеризуется усредненной частотной отстройкой $\Delta f_{rb1} = 7.4$ МГц. Обе частотные отстройки прямо пропорциональны групповой скорости ПМСВ, которая исходя из полученных результатов меняется в полосе частот линии задержки на величину менее 10%.

Необходимо отметить, что генерация СВЧ-сигнала в нашем случае сразу является многочастотной и наблюдается при превышении нелинейного порога на величину порядка 10 dB. Нелинейному порогу при выбранной напряженности магнитного поля соответствует уровень мощности сигнала на входе линии задержки порядка $50 \mu\text{W}$. Такие относительно низкие уровни мощности сигнала характерны для нелинейных параметрических трехволновых процессов распада ПМСВ, которые исходя из результатов работы [18] не могут наблюдаться в супертонких пленках ЖИГ толщиной менее 200 nm. Однако в соответствии с работой [19] в пленках ЖИГ

всегда существует так называемый переходный слой между пленкой ЖИГ и подложкой ГГГ, намагниченность которого является отличной от намагниченности самой пленки и спадает до нуля вблизи поверхности подложки ГГГ. Переходный слой имеет толщину порядка 200 nm, и его влияние становится существенным при переходе от пленок ЖИГ микронной толщины к супертонким пленкам ЖИГ субмикронной и нанометровой толщины. Таким образом, ПМСВ, возбуждаемая копланарной антенной вблизи поверхности пленки ЖИГ с эффективной намагниченностью порядка 0.175 T, может в свою очередь параметрически возбудить дипольно-обменные СВ только в непосредственной близости от поверхности подложки ГГГ, где намагниченность имеет такое значение, при котором частоты возбуждаемых СВ соответствуют половинному значению частоты ПМСВ. Именно наличие переходного слоя или градиент намагниченности по толщине пленки ЖИГ являются основными причинами существования в супертонкой пленке ЖИГ толщиной 100 nm нелинейного трехволнового параметрического распада ПМСВ.

На рис. 3, b демонстрируется возможность управления спектром генерируемого многочастотного СВЧ-сигнала за счет изменения напряженности магнитного поля. Видно, что увеличение напряженности поля до $H_{02} = 37.96$ кА/м приводит к увеличению частоты первой запрещенной зоны МК ($f_{02} = 2919$ МГц) и перестройке спектра сигнала вверх по частоте. При этом наблюдается уменьшение частотных отстроек как слева ($\Delta f_{lb2} = 7.3$ МГц), так и справа ($\Delta f_{rb2} = 6.9$ МГц) от частоты f_{02} . Данный факт свидетельствует об уменьшении групповой скорости ПМСВ с ростом напряженности магнитного поля, что согласуется с известными результатами для пленок ЖИГ микронной толщины.

В заключение отметим, что полученные в работе экспериментальные результаты указывают на необходимость учета нелинейных трехволновых параметрических

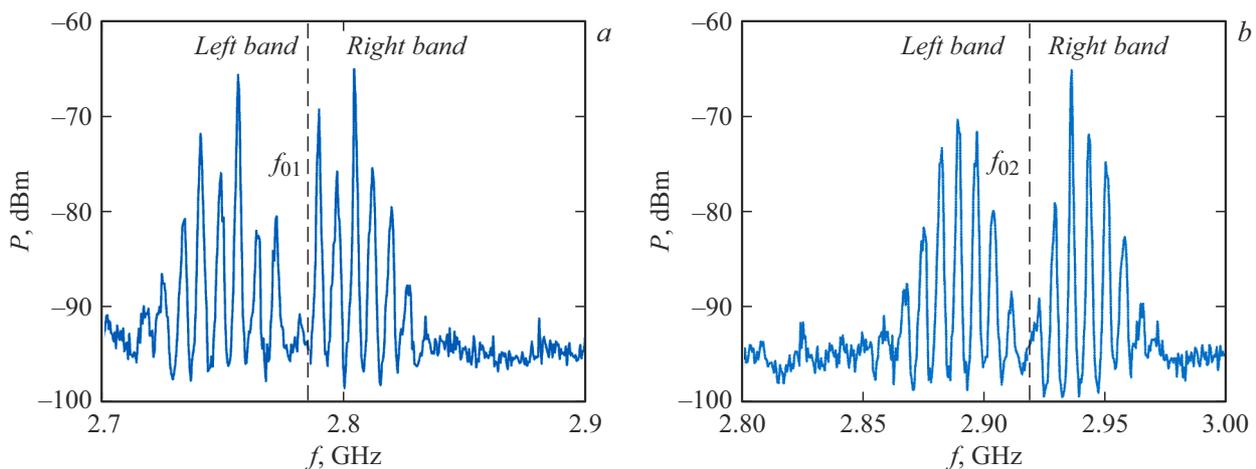


Рис. 3. Спектры мощности многочастотного СВЧ-сигнала, генерируемого в магнитном кольцевом автогенераторе с МК при $H_{01} = 34.22$ kA/m (a) и $H_{02} = 37.96$ kA/m (b). Мощность многочастотного СВЧ-сигнала на входе линии задержки с МК равна -15 (a) и -14.5 dBm (b).

процессов распада магнитоэлектронных СВ в супертонких пленках ЖИГ при создании моделей микроминиатюрных СВЧ-генераторов [13] и других устройств на основе таких пленок [20–22], работающих на частотах ниже 4.9 GHz.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-30027).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Q. Wang, G. Csaba, R. Verba, A.V. Chumak, P. Pirro, *Phys. Rev. Appl.*, **21** (4), 040503 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.21.040503
- [2] J. Xu, C. Zhong, S. Zhuang, C. Qian, Y. Jiang, A. Pishchvar, X. Han, D. Jin, J.M. Jornet, B. Zhen, J. Hu, L. Jiang, X. Zhang, *Phys. Rev. Lett.*, **132** (11), 116701 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevLett.132.116701
- [3] C. Dubs, O. Surzhenko, R. Thomas, J. Osten, T. Schneider, K. Lenz, J. Grenzer, R. Hübner, E. Wendler, *Phys. Rev. Mater.*, **4** (2), 024416 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.4.024416
- [4] M. Evelt, V.E. Demidov, V. Bessonov, S.O. Demokritov, J.L. Prieto, M. Muñoz, J. Ben Youssef, V.V. Naletov, G. de Loubens, O. Klein, M. Collet, K. Garcia-Hernandez, P. Bortolotti, V. Cros, A. Anane, *Appl. Phys. Lett.*, **108** (17), 172406 (2016). DOI: 10.1063/1.4948252
- [5] M. Collet, X. de Milly, O. d'Allivy Kelly, V.V. Naletov, R. Bernard, P. Bortolotti, J. Ben Youssef, V.E. Demidov, S.O. Demokritov, J.L. Prieto, M. Muñoz, V. Cros, A. Anane, G. de Loubens, O. Klein, *Nat. Commun.*, **7**, 10377 (2016). DOI: 10.1038/ncomms10377
- [6] V. Castel, N. Vlietstra, J. Ben Youssef, B.J. van Wees, *Appl. Phys. Lett.*, **101** (13), 132414 (2012). DOI: 10.1063/1.4754837
- [7] O. d'Allivy Kelly, A. Anane, R. Bernard, J. Ben Youssef, C. Hahn, A.H. Molpeceres, C. Carrétéro, E. Jacquet, C. Deranlot, P. Bortolotti, R. Lebourgeois, J.-C. Mage, G. de Loubens, O. Klein, V. Cros, A. Fert, *Appl. Phys. Lett.*, **103** (8), 082408 (2013). DOI: 10.1063/1.4819157
- [8] М.Е. Селезнёв, Ю.В. Никулин, В.К. Сахаров, Ю.В. Хивинцев, А.В. Кожевников, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов, *ЖТФ*, **91** (10), 1504 (2021). DOI: 10.61011/PJTF.2025.06.59926.20114 [М.Е. Seleznev, Yu.V. Nikulin, V.K. Sakharov, Yu.V. Khivintsev, A.V. Kozhevnikov, S.L. Vysotskiy, Yu.A. Filimonov, *Tech. Phys.*, **67** (13), 2074 (2022). DOI: 10.61011/PJTF.2025.06.59926.20114].
- [9] А.К. Кавеев, В.Э. Бурсиан, С.В. Гастев, Б.Б. Кричевцов, С.М. Сутурин, М.П. Волков, Н.С. Соколов, *Письма в ЖТФ*, **42** (23), 72 (2016). DOI: 10.21883/pjtf.2016.23.43985.16370 [A.K. Kaveev, V.E. Bursian, S.V. Gastev, B.B. Krichevstov, S.M. Suturin, M.P. Volkov, N.S. Sokolov, *Tech. Phys. Lett.*, **42** (12), 1156 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016120075].
- [10] B.B. Krichevstov, A.M. Korovin, S.M. Suturin, A.V. Telegin, I.D. Lobov, N.S. Sokolov, *Thin Solid Films*, **756**, 139346 (2022). DOI: 10.1016/j.tsf.2022.139346
- [11] T. Liu, H. Chang, V. Vlaminc, Y. Sun, M. Kabatek, A. Hoffmann, L. Deng, M. Wu, *J. Appl. Phys.*, **115** (17), 17A501 (2014). DOI: 10.1063/1.4852135
- [12] H. Chang, P. Li, W. Zhang, T. Liu, A. Hoffmann, L. Deng, M. Wu, *IEEE Magn. Lett.*, **5**, 6700104 (2014). DOI: 10.1109/LMAG.2014.2350958
- [13] A.A. Nikitin, I.Yu. Tatsenko, M.P. Kostylev, A.B. Ustinov, *J. Appl. Phys.*, **135** (12), 123906 (2024). DOI: 10.1063/5.0200249
- [14] А.В. Багаутдинов, А.Б. Устинов, *Письма в ЖТФ*, **49** (13), 16 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.13.55730.19527 [A.V. Bagautdinov, A.B. Ustinov, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (7), 12 (2023). DOI: 10.61011/PJTF.2025.06.59926.20114].

- [15] E. Bankowski, T. Meitzler, R.S. Khymyn, V.S. Tiberkevich, A.N. Slavin, H.X. Tang, *Appl. Phys. Lett.*, **107** (12), 122409 (2015). DOI: 10.1063/1.4931758
- [16] S.V. Grishin, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, *IEEE Trans. Magn.*, **47** (10), 3716 (2011). DOI: 10.1109/TMAG.2011.2158293
- [17] 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
- [18] V. Castel, N. Vlietstra, B.J. van Wees, *Phys. Rev. B*, **90** (21), 214434 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevB.90.214434
- [19] V.V. Tikhonov, V.A. Gubanov, S.A. Nikitov, A.V. Sadovnikov, *J. Magn. Magn. Mater.*, **562**, 169763 (2022). DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169763
- [20] S. Watt, M. Kostylev, *Phys. Rev. Appl.*, **13** (3), 034057 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.034057
- [21] A.B. Ustinov, R.V. Haponchuk, M. Kostylev, *Appl. Phys. Lett.*, **124** (4), 042405 (2024). DOI: 10.1063/5.0189542
- [22] А.А. Никитин, Р.В. Гапончик, И.Ю. Таценко, М.П. Костылев, А.Б. Устинов, *ЖТФ*, **94** (11), 1873 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.11.59105.190-24 [A.A. Nikitin, R.V. Haponchuk, I.Yu. Tatsenko, M.P. Kostylev, A.B. Ustinov, *Tech. Phys.*, **69** (11), 1736 (2024)].