

11

Нелинейная система резонаторной магнонники на основе супертонкой пленки железо-иттриевого граната

© С.В. Гришин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия
E-mail: sergrsh@yandex.ru

Поступило в Редакцию 28 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 16 сентября 2025 г.

Принято к публикации 17 сентября 2025 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования системы микрополосковый полуволновый резонатор (МПР)-супертонкая пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ) при повышенных уровнях мощности. Показано, что в линейном режиме супертонкая пленка ЖИГ, находясь в пучности переменного тока основного вида колебаний МПР, работает как гиromагнитный резонатор на частоте ферромагнитного резонанса. Последняя определяется поперечной ориентацией внешнего постоянного магнитного поля относительно распределения переменного тока стоячей волны в МПР. Установлено, что при замене МПР на микрополосковую линию передачи, работающую в режиме бегущей волны, супертонкая пленка ЖИГ не является гиromагнитным резонатором при той же ориентации постоянного магнитного поля относительно микрополоскового проводника. В нелинейном режиме система МПР-супертонкая пленка ЖИГ представляет собой многофункциональное нелинейное устройство с более низкими мощностными порогами, чем в случае пленок ЖИГ микронной толщины.

Ключевые слова: резонаторная магнонника, супертонкие пленки железо-иттриевого граната, нелинейный ферромагнитный резонанс.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.02.62070.20362

В настоящее время резонаторная магнонника является одним из бурно развивающихся направлений в области физики магнитных явлений, в котором изучается взаимодействие спиновых волн или их квантов — магнов — с ограниченными в пространстве электромагнитными полями, создаваемыми резонаторами различного вида [1–5]. Такое взаимодействие может приводить к эффектам, которые не наблюдаются у каждой из подсистем (магнонной и фотонной) в отдельности, а также при использовании фотонной подсистемы нерезонаторного типа [6]. В резонаторной магноннике большинство исследований проводилось с диэлектрическими ферритами в виде сфер [1,2] и тонких пленок [3–9] железо-иттриевого граната (ЖИГ), обладающих рекордно низкими значениями параметра затухания Гильберта $\alpha = 10^{-5}–10^{-3}$ и высокой плотностью спинов $4.0 \cdot 10^{27} \text{ m}^{-3}$.

Хорошо известно, что в тонких пленках ЖИГ микронной толщины могут распространяться магнитостатические спиновые волны (МСВ), для возбуждения которых используется, как правило, несимметричная микрополосковая линия (НМПЛ) передачи [10]. Возбуждение МСВ в широком интервале значений волнового числа k зависит от соотношения между толщиной пленки ЖИГ d и шириной проводника НМПЛ w . Если $w \sim d$, то возбуждение МСВ является наиболее широкополосным [11]. Если $w \gg d$, то интервал возбуждаемых волновых чисел МСВ заметно сужается и находится вблизи частоты $f_{\perp} = \sqrt{f_H(f_H + f_M)}$ (где $f_H = \gamma H_0$, γ — гиromагнитное отношение, $f_M = 4\pi\gamma M_0$, $4\pi M_0$ — намагниченность насыщения), являющейся частотой фер-

ромагнитного резонанса (ФМР) в случае поперечной накачки [12]. Вблизи этой частоты волновые числа обратных объемных МСВ (ООМСВ) и поверхностной МСВ обладают наименьшими значениями.

В [6] было показано, что если из НМПЛ создать микрополосковый полуволновый резонатор (МПР) с $w = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$, работающий в режиме стоячей электромагнитной волны, нагрузить его на пленку ЖИГ с $d = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ ($w \gg d$) и приложить внешнее постоянное магнитное поле H_0 так, чтобы его направление было ортогонально распределению переменного тока вдоль МПР (случай поперечной электромагнитной накачки), то эффективность возбуждения ООМСВ в такой резонаторной системе повысится на величину $\sim 30 \text{ dB}$ по сравнению со случаем использования микрополоскового проводника аналогичной ширины в НМПЛ, работающей в режиме бегущей волны. Кроме того, в [6,13] было показано, что система МПР—пленка ЖИГ при повышенных уровнях мощности СВЧ-сигнала представляет собой нелинейное многофункциональное устройство, которым не является обычная НМПЛ, нагруженная на пленку ЖИГ. Данная резонаторная система одновременно работает как усилитель отношения сигнал/шум в полосе возбуждения ООМСВ, как ограничитель мощности на частотах резонансных максимумов системы и как нелинейный фазовращатель на частотах, находящихся между указанными частотными областями.

В настоящей работе показано, что для планарных систем резонаторной магнонники с $w \gg d$, работающих при поперечной ориентации постоянного магнитного

поля H_0 относительно микрополоскового проводника, уменьшение толщины пленки ЖИГ до субмикронных размеров (случай супертонкой пленки ЖИГ) приводит к возбуждению только однородной прецессии вектора намагниченности на частоте ФМР и только при использовании в качестве возбудителя МПР. В режиме нелинейного ФМР система МПР–супертонкая пленка ЖИГ также будет обладать нелинейными многофункциональными свойствами, как и в случае более „толстых“ пленок ЖИГ (микронной толщины), но при значительно более низких пороговых уровнях мощности. Последнее обстоятельство важно для создания нелинейных ферритовых устройств для систем связи 5G [14].

На вставке к рис. 1, *a* приведено схематическое изображение МПР, в центральной части которого располагается пленка ЖИГ толщиной $d = 10^{-7}$ м, шириной $3 \cdot 10^{-3}$ м (определяет степень перекрытия пленкой МПР) и длиной 10^{-2} м. Толщина пленки ЖИГ изменилась с помощью оптического профилометра Talysurf CCI 2000 и соответствовала паспортным значениям пленки ЖИГ. Пленка ЖИГ, выращенная методом жидкокристаллической эпитаксии на подложке гадолиний-галиевого граната, характеризуется эффективной намагниченностью вблизи поверхности $4\pi M_{eff} \cong 0.175$ Т и паспортным значением ширины линии ФМР $2\Delta H \cong 87.535$ А/м на частотах ~ 3 ГГц. МПР является планарным резонатором проходного типа. Он выполнен на основе НМПЛ, которая состоит из металлизированной с одной стороны диэлектрической подложки толщиной $5 \cdot 10^{-4}$ м, на другой стороне которой находится разомкнутый с обеих сторон микрополосковый проводник (резонатор) шириной $w = 5 \cdot 10^{-4}$ м и длиной $18.1 \cdot 10^{-3}$ м. Для связи с генератором и нагрузкой используются два открытых с одного конца микрополосковых проводника шириной $5 \cdot 10^{-4}$ м, которые располагаются на расстоянии $6 \cdot 10^{-4}$ м от резонатора. Степень перекрытия их с МПР составляет величину $5 \cdot 10^{-3}$ м. Основной вид колебания МПР характеризуется резонансной частотой $f_0 = 3072$ МГц, нагруженной добротностью $Q_H = 106$ и ослаблением на резонансной частоте $A_0 = -7.8$ дБ. Внешнее постоянное магнитное поле H_0 приложено в плоскости исследуемой планарной системы и направлено перпендикулярно распределению переменного тока стоячей волны в МПР (случай поперечной электромагнитной накачки). Фактически пленка ЖИГ располагается в пучности переменного тока основной моды МПР, что, как показано далее, приводит к эффективному возбуждению однородной прецессии вектора намагниченности на частоте ФМР f_{\perp} . Необходимо отметить, что для эффективного возбуждения спин-волновых резонансов в МСВ-резонаторах последние также располагаются в пучности переменного тока, которая создается не МПР, а закороченным одним концом на землю отрезком НМПЛ [15].

На рис. 1, *a* приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) системы МПР–супертонкая пленка ЖИГ, измеренная в режиме совпадения собственной

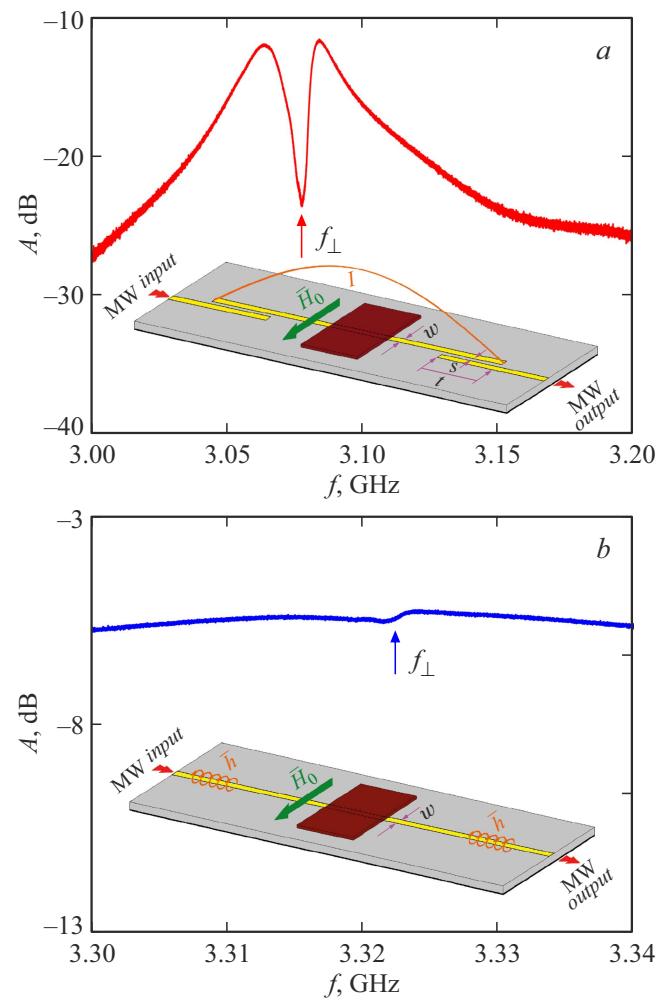


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики двух систем (*a* — МПР–супертонкая пленка ЖИГ, *b* — НМПЛ–супертонкая пленка ЖИГ), измеренные при поперечной ориентации поля H_0 относительно микрополоскового проводника. Измерения проводились в линейном режиме при уровне входной мощности $P_{in} = -30$ dBm. Напряженность внутреннего магнитного поля $H_{int} = H_0 + H_A = 42.176$ (*a*) и 47.667 кА/м (*b*). На вставках показаны схематические изображения исследуемых систем.

частоты МПР f_0 с частотой ФМР $f_{\perp} = 3078$ МГц ($f_{\perp} \cong f_0$) гиromагнитного резонатора, выполненного на основе супертонкой пленки ЖИГ. Видно, что на резонансной кривой системы наблюдается ярко выраженный провал, частота которого соответствует частоте f_{\perp} при $H_0 = 38.038$ кА/м и магнитном поле анизотропии $H_A = 4.138$ кА/м. Уровень ослабления на частоте провала -23.6 дБ. По обе стороны от провала образуются два максимума с частотами $f_{01} = 3064$ МГц и $f_{02} = 3084$ МГц, на которых уровни ослабления являются приблизительно одинаковыми ($A_{01} = -11.9$ дБ и $A_{02} = -11.6$ дБ). Ширина полосы частот провала Δf , измеренная по уровню 3 дБ относительно максимального уровня ослабления на частоте f_{\perp} , равна 4.2 МГц,

и этому значению соответствует ширина линии ФМР $2\Delta H \cong 119.366$ А/м. Необходимо отметить, что аналогичная ситуация, связанная с образованием двух максимумов на АЧХ планарной резонаторной системы, наблюдалась ранее в [6] при использовании более толстой пленки ЖИГ с $d = 4 \cdot 10^{-5}$ м. Однако в [6] провал между двумя максимумами был гораздо шире вследствие возбуждения в пленке ЖИГ ООМСВ.

На вставке к рис. 1, б приведено схематическое изображение НМПЛ, нагруженной на пленку ЖИГ с аналогичными значениями параметров. В данной схеме направление постоянного магнитного поля H_0 также ортогонально микрополосковому проводнику, но теперь совпадает с направлением витков переменного магнитного поля, создаваемого бегущей электромагнитной волной вокруг микрополоскового проводника (случай продольной электромагнитной накачки). В данном эксперименте магнитное поле H_0 имеет большую напряженность ($H_0 = 43.529$ кА/м), чем в предыдущем случае, при том же значении поля анизотропии ($H_A = 4.138$ кА/м). Из представленной на рис. 1, б АЧХ следует, что возбуждение однородной прецессии вектора намагниченности на частоте ФМР $f_{\perp} = 3322$ МГц не наблюдается, как в случае с МПР, где эффективность возбуждения ФМР ~ 15 дБ. Таким образом, при ориентации поля H_0 ортогонально микрополосковому проводнику явление ФМР детектируется на частоте f_{\perp} только при использовании МПР и не наблюдается на данной частоте при использовании НМПЛ в качестве возбудителя нерезонаторного типа.

На рис. 2 для сравнения приведена амплитудно-полевая характеристика НМПЛ, нагруженной на аналогичную супертонкую пленку ЖИГ. В данном случае поле

H_0 направлено вдоль микрополоскового проводника и ортогонально виткам переменного магнитного поля вокруг проводника (случай поперечной электромагнитной накачки, см. вставку на рис. 2). Из представленных на рис. 2 результатов следует, что при поперечной накачке с частотой $f = 2900$ МГц на амплитудно-полевой характеристике наблюдается ярко выраженный провал при напряженности магнитного поля $H_0 = 35.396$ кА/м. В этом случае частота, на которой проводились измерения амплитудно-полевой характеристики, в точности совпадает с частотой ФМР f_{\perp} , если $H_A = 2.944$ кА/м. Измеренная зависимость модуля коэффициента передачи от напряженности внешнего постоянного магнитного поля дает возможность непосредственно определить ширину линии ФМР, которая имеет значение $2\Delta H \cong 87.535$ А/м. Данное значение ширины линии ФМР, измеренное с использованием НМПЛ, совпадает с ее паспортным значением. В то же время, хотя значение ширины линии ФМР, полученное с использованием МПР, является менее точным, оно подтверждает, что присутствие провала на АЧХ резонаторной системы обусловлено возбуждением именно ФМР.

На рис. 3, а приведены частотные зависимости отношения большой сигнал/малый сигнал $LSSR = A_{lg} - A_{sm}$ (где A_{lg} — коэффициент ослабления в режиме большого сигнала (в децибелах), A_{sm} — коэффициент ослабления в режиме малого сигнала) и нелинейного набега фазы $NPS = \varphi_{lg} - \varphi_{sm}$ (где φ_{lg} — набег фазы в режиме большого сигнала, φ_{sm} — набег фазы в режиме малого сигнала). Полученные зависимости наглядно демонстрируют максимальное увеличение $LSSR$ на 8.1 дБ на частоте $f_1 = 3077.5$ МГц ($f_1 \cong f_{\perp}$), максимальное уменьшение $LSSR$ на -3.5 дБ на частоте $f_2 = 3083.9$ МГц ($f_2 \cong f_{02}$), а также максимальный нелинейный фазовый сдвиг 64 deg на частоте $f_3 = 3079.9$ МГц. Необходимо отметить, что, хотя максимальные значения $LSSR$ и NPS , полученные на МПР, нагруженном на супертонкую пленку ЖИГ, работающую в режиме ФМР, уступают аналогичным значениям, полученным на МПР, нагруженном на более толстую пленку ЖИГ, работающую в режиме возбуждения ООМСВ (разница составляет ~ 7 дБ и ~ 30 deg соответственно) [6,13], эти значения $LSSR$ и NPS являются недостижимыми в системе НМПЛ-супертонкая пленка ЖИГ при аналогичной ориентации поля H_0 . Указанные значения могут быть увеличены за счет использования более высокодобротных возбудителей резонаторного типа.

На рис. 3, б приведены мощностные характеристики исследуемой резонаторной системы, измеренные на трех характерных частотах: f_1 , f_2 и f_3 . Из представленных результатов следует, что нелинейные режимы работы резонаторной системы (нелинейное подавление малых сигналов, нелинейное ограничение больших сигналов и нелинейное изменение набега фазы) начинаются с пороговых уровней входной мощности, лежащих в интервале значений от -20 дБм до -15 дБм. Необходимо отметить, что в экспериментах, проводимых ранее с

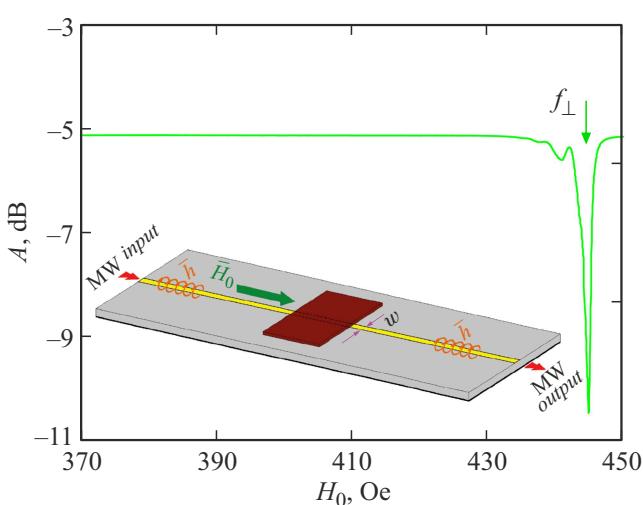


Рис. 2. Амплитудно-полевая характеристика системы НМПЛ-супертонкая пленка ЖИГ, измеренная при продольной ориентации поля H_0 относительно микрополоскового проводника. Измерения проводились на частоте $f = 2900$ МГц и при уровне входной мощности $P_{in} = -30$ дБм. На вставке показано схематическое изображение исследуемой системы.

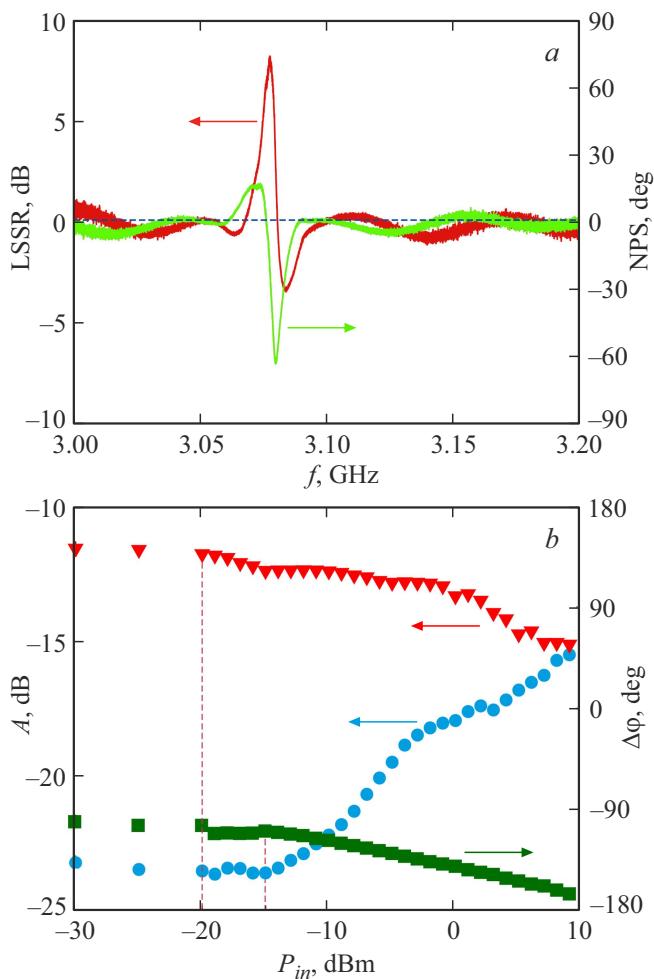


Рис. 3. Нелинейные характеристики системы МПР—супертонкая пленка ЖИГ, измеренные при поперечной ориентации поля H_0 относительно микрополоскового проводника. *a* — частотные зависимости отношения большой сигнал/малый сигнал LSSR и нелинейного фазового сдвига NPS, полученные при мощности большого сигнала +9 dBm и мощности малого сигнала -30 dBm; *b* — зависимости коэффициента ослабления A (кружки и треугольники) и набега фазы $\Delta\varphi$ (квадраты) от входной мощности P_{in} , измеренные на частотах $f_1 = 3077.5$ MHz (кружки), $f_2 = 3079.9$ MHz (квадраты) и $f_3 = 3083.93$ MHz (треугольники). На обеих частях рисунка результаты получены для $H_{int} = 42.176$ kA/m.

аналогичным МПР, но нагруженным на пленку ЖИГ толщиной $4 \cdot 10^{-5}$ m [16], перечисленные выше нелинейные режимы работы резонаторной системы на данных частотах не наблюдались. Это обусловлено тем, что в пленке ЖИГ толщиной несколько десятков микрометров эффективно возбуждались только длинноволновые ООМСВ, находящиеся вблизи частоты ФМР f_{\perp} , для которых нелинейные трехволновые параметрические процессы распада были запрещены. Нелинейные четырехволновые процессы распада ООМСВ в пленке ЖИГ указанной выше толщины не развивались, так как используемые в эксперименте максимальные уровни мощ-

ности на входе резонаторной системы ($P_{in} \sim +20$ dBm) были, по всей видимости, ниже нелинейного порога четырехволновых взаимодействий. Уменьшение порога нелинейных четырехволновых взаимодействий в пленках ЖИГ нанометровой толщины по сравнению с пленками ЖИГ микронной толщины было отмечено в [14], где супертонкие пленки ЖИГ с НМПЛ в конфигурации „линия задержки“ при $w \sim d$ использовались для создания планарной конструкции ограничителя мощности. В [14] было показано, что для МСВ, возбуждаемых в супертонкой пленке ЖИГ толщиной $d = 0.97 \cdot 10^{-7}$ m, пороговые уровни мощности на частотах ~ 4 GHz принадлежат интервалу значений от -20 dBm до -10 dBm. Таким образом, пороговые уровни мощности на частоте ФМР f_{\perp} согласуются с аналогичными значениями в [14].

Полученные результаты представляют интерес для разработки планарных нелинейных устройств, основанных на принципах резонаторной магноники.

Благодарности

Автор выражает благодарность В.К. Сахарову и А.С. Бир за помощь в получении амплитудно-полевой зависимости при поперечной накачке.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Barman, G. Gubbiotti, S. Ladak, A.O. Adeyeye, M. Krawczyk, J. Gräfe, C. Adelmann, S. Cotofana, A. Naeemi, V.I. Vasyuchka, B. Hillebrands, S.A. Nikitov, H. Yu, D. Grundler, A.V. Sadovnikov, A.A. Grachev, S.E. Sheshukova, J.-Y. Duquesne, M. Marangolo, G. Csaba, W. Porod, V.E. Demidov, S. Urazhdin, S.O. Demokritov, E. Albisetti, D. Petti, R. Bertacco, H. Schultheiss, V.V. Kruglyak, V.D. Poimanov, S. Sahoo, J. Sinha, H. Yang, M. Münzenberg, T. Moriyama, S. Mizukami, P. Landeros, R.A. Gallardo, G. Carlotti, J.-V. Kim, R.L. Stamps, R.E. Camley, B. Rana, Y. Otani, W. Yu, T. Yu, G.E.W. Bauer, C. Back, G.S. Uhrig, O.V. Dobrovolskiy, B. Budinska, H. Qin, S. van Dijken, A.V. Chumak, A. Khitun, D.E. Nikonov, I.A. Young, B.W. Zingsem, M. Winklhofer, *J. Phys.: Condens. Matter.*, **33**, 413001 (2021). DOI: 10.1088/1361-648X/abec1a
- [2] M. Harder, B.M. Yao, Y.S. Gui, C.-M. Hu, *J. Appl. Phys.*, **129** (20), 201101 (2021). DOI: 10.1063/5.0046202
- [3] С.В. Гришин, В.С. Гришин, В.В. Гурзо, Ю.П. Шараевский, *Радиотехника и электроника*, **48** (6), 724 (2003). [S.V. Grishin, V.S. Grishin, V.V. Gurzo, Yu.P. Sharaevskii, *J. Comm. Technol. Electron.*, **48** (6), 660 (2003).].

- [4] A.B. Ustinov, V.S. Tiberkevich, G. Srinivasan, A.N. Slavin, A.A. Semenov, S.F. Karmanenko, B.A. Kalinikos, J.V. Mantese, R. Ramer, *J. Appl. Phys.*, **100** (9), 093905 (2006). DOI: 10.1063/1.2372575
- [5] A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos, V.S. Tiberkevich, A.N. Slavin, G. Srinivasan, *J. Appl. Phys.*, **103** (6), 063908 (2008). DOI: 10.1063/1.2895006
- [6] С.В. Гришин, Ю.П. Шараевский, Письма в ЖТФ, **31** (2), 77 (2005). [S.V. Grishin, Yu.P. Sharaevskii, *Tech. Phys. Lett.*, **31** (1), 81 (2005). DOI: 10.1134/1.1859509].
- [7] X. Zhang, Z. Changling, J. Liang, H.X. Tang, *J. Appl. Phys.*, **119** (2), 023905 (2016). DOI: 10.1063/1.4939134
- [8] B. Bhoi, B. Kim, J. Kim, Y.-J. Cho, S.-K. Kim, *Sci. Rep.*, **7** (1), 11930 (2017). DOI: 10.1038/s41598-017-12215-8
- [9] J. Kim, B. Kim, B. Kim, H. Jeon, S.-K. Kim, *Nat. Commun.*, **15** (1), 9014 (2024). DOI: 10.1038/s41467-024-53328-9
- [10] А.В. Вашковский, В.С. Стальмахов, Ю.П. Шараевский, *Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот* (Изд-во Саратов. ун-та, 1993).
- [11] J.D. Adam, *IEEE Trans. Magn.*, **16** (5), 1168 (1980). DOI: 10.1109/TMAG.1980.1060801
- [12] В.И. Зубков, В.Н. Кильдишев, Радиотехника и электроника, **33** (5), 1839 (1988).
- [13] С.В. Гришин, Ю.П. Шараевский, *ЖТФ*, **76** (8), 107 (2006). [S.V. Grishin, Yu.P. Sharaevskii, *Tech. Phys.*, **51** (8), 1069 (2006). DOI: 10.1134/S1063784206080172].
- [14] K. Davídková, K. Levchenko, F. Bruckner, R. Verba, F. Majcen, Q. Wang, M. Lindner, C. Dubs, V. Vlaminck, J. Klíma, M. Urbánek, D. Suess, A. Chumak, *Phys. Rev. Appl.*, **23** (3), 034026 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.23.034026
- [15] В. Геворкян, В. Кочемасов, А. Устинов, Компоненты и технологии, № 3 (188), 16 (2017).
- [16] С.В. Гришин, В.С. Гришин, Ю.П. Шараевский, Радиотехника и электроника, **50** (8), 978 (2005). [S.V. Grishin, V.S. Grishin, Yu.P. Sharaevskii, *J. Comm. Technol. Electron.*, **50** (8), 902 (2005)].