

11.2

Наведенный нелинейный сдвиг частоты активного кольцевого резонатора на магннном кристалле

© А.В. Багаутдинов, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: freester12@mail.ru

Поступило в Редакцию 9 февраля 2023 г.

В окончательной редакции 7 апреля 2023 г.

Принято к публикации 4 мая 2023 г.

Впервые исследован нелинейный сдвиг резонансных частот сверхвысокочастотного активного кольцевого резонатора, наведенный волной накачки. Резонатор сконструирован по схеме в виде замкнутого кольца, содержащего спин-волновую линию задержки, изготовленную на основе магннного кристалла, а также сверхвысокочастотный усилитель в цепи обратной связи. Показано, что с увеличением мощности волны накачки сдвиг резонансных частот активного кольцевого резонатора возрастает по-разному в зависимости от положения частоты накачки. Максимальный наведенный нелинейный сдвиг частоты наблюдается, если частота накачки находится в минимуме коэффициента передачи активного кольцевого резонатора. Построена модель, описывающая исследуемый эффект.

Ключевые слова: магноника, магннный кристалл, спиновые волны, магнитные пленки.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.13.55730.19527

Спин-волновые активные кольцевые резонаторы (АКР) находят различные области применения. Так, например, на их основе возможно создание бистабильных устройств [1], узкополосных сверхвысокочастотных (СВЧ) фильтров [2,3], согласованных фильтров [4], СВЧ-генераторов [5–11]. В последние годы одним из актуальных направлений стали разработки в области искусственного интеллекта, в частности резервуарных вычислительных устройств, основанных на принципах магноники [12–14].

Как известно, для реализации электронной перестройки характеристик устройств магноники могут быть использованы различные механизмы. Одним из главных механизмов на данный момент является магнитная перестройка [15]. Также возможна реализация электрической перестройки за счет использования структур феррит–сегнетоэлектрик [3,16], феррит–пьезоэлектрик [17] и феррит–полупроводник [18].

Целью настоящей работы является исследование наведенного нелинейного сдвига резонансных частот магннного активного кольцевого резонатора за счет возбуждения в нем волны накачки.

Схематическое изображение активного кольцевого резонатора представлено на рис. 1, а. Схема включает в себя линию задержки на основе магннного кристалла 1, СВЧ-усилитель 2, перестраиваемый аттенюатор 3, сумматор 4, а также входной 5 и выходной 6 направленные ответвители. Магннный кристалл, использовавшийся в линии задержки, был изготовлен из пленки железиттриевого граната (ЖИГ) толщиной $L = 5.5 \mu\text{m}$ с намагниченностью насыщения $M_0 = 153 \text{ kA/m}$ и полушириной кривой ферромагнитного резонанса $\Delta H = 48 \text{ A/m}$. На поверхности пленки были вытравлены 20 канавок глубиной $0.5 \mu\text{m}$. Сформированная структура имела

период $\Lambda = 150 \mu\text{m}$, причем протяженность травленной части пленки (ширина канавки) $a = 50 \mu\text{m}$ и протяженность нетравленной части $b = 100 \mu\text{m}$. Намагничивание пленки ЖИГ осуществлялось постоянным магнитом с напряженностью поля $H = 97.6 \text{ kA/m}$. Однородное поле подмагничивания было направлено в плоскости пленки вдоль канавок. Для возбуждения и приема поверхностных спиновых волн в пленке ЖИГ использовались две короткозамкнутые микрополосковые антенны шириной $50 \mu\text{m}$ и длиной 2 mm . Расстояние между антеннами d было равным 7 mm . Сверхвысокочастотный сигнал к антеннам подводился по микрополосковым линиям передачи с волновым сопротивлением 50Ω . Микрополосковая схема была изготовлена методом фотолитографии на подложке из поликора толщиной $500 \mu\text{m}$. Усилитель 2 компенсировал потери СВЧ-сигнала в линии задержки и остальных компонентах кольца. Переменный аттенюатор 3 регулировал усиление сигнала в кольце.

Принцип работы активного кольцевого резонатора заключается в следующем. Сверхвысокочастотный сигнал подается на входной направленный ответвитель 5 и начинает циркулировать в кольце. После прохождения одного оборота сигнал ослабляется и складывается с входным сигналом. Далее два сигнала распространяются в кольце. После прохождения второго оборота эти сигналы опять складываются с входным сигналом, и затем три сигнала распространяются в кольце и т.д. Таким образом, в установившемся режиме СВЧ-сигнал, циркулирующий в кольце, представляет собой бесконечную сумму затухающих циркулирующих в кольце волн. Резонанс в кольце возникает на некоторых частотах, удовлетворяющих условию синфазного сложения циркулирующих волн. На таких частотах полный набег фазы сигнала $\Delta\varphi$ кратен 2π [19].

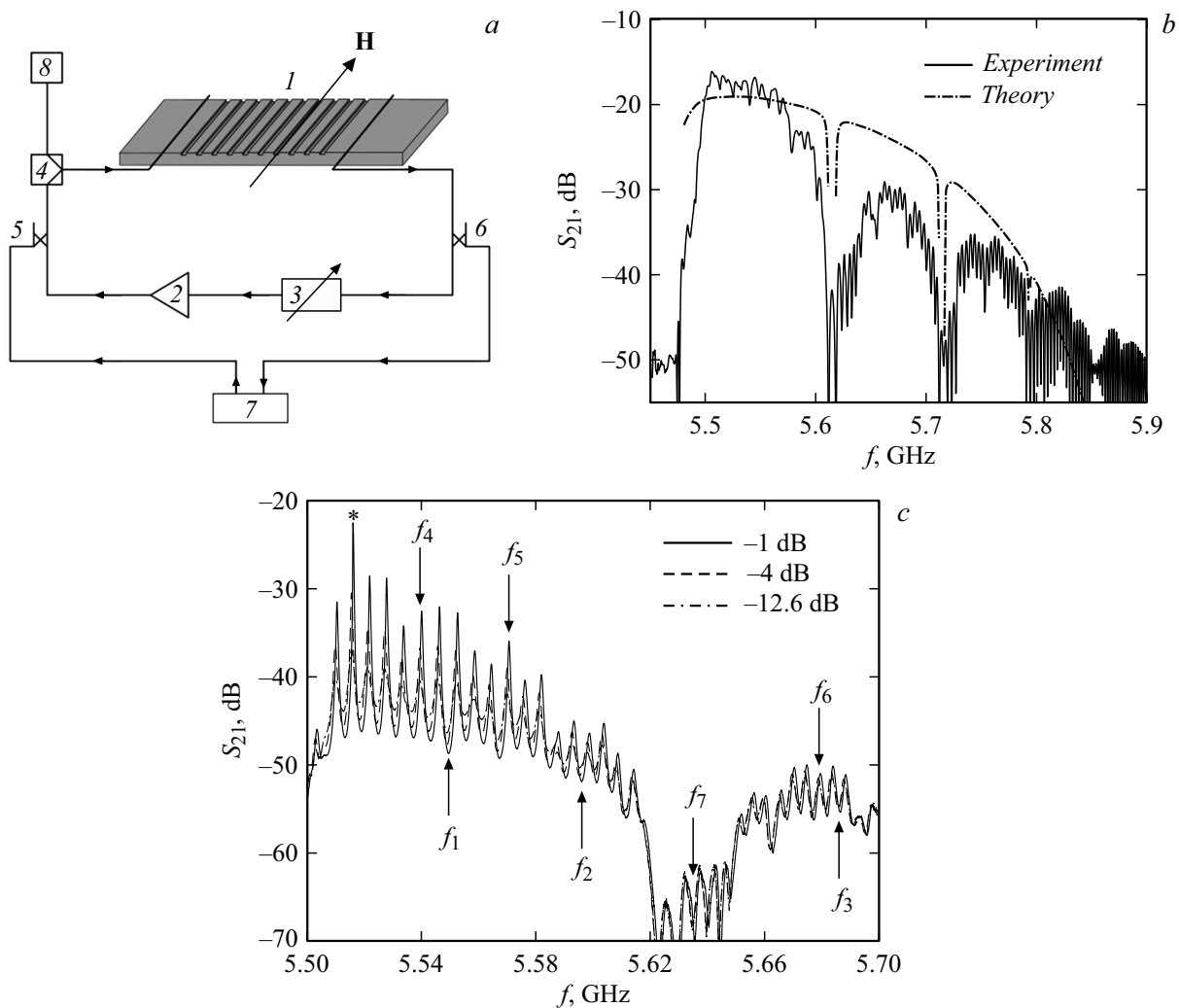


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки (a), амплитудно-частотная характеристика магнитного кристалла (b) и резонансные кривые АКР для различных значений эффективного коэффициента усиления G (c).

Суммарное усиление СВЧ-сигнала в кольце характеризуется эффективным коэффициентом усиления G , который определяется как разница между коэффициентом усиления усилителя 2 и потерями СВЧ-сигнала в остальных элементах кольца. Если $G < 0$, то активный кольцевой резонатор работает в режиме фильтрации СВЧ-сигнала. В противоположном случае кольцо генерирует СВЧ-сигнал. Подчеркнем, что наши оригинальные исследования проводились для $G < 0$, когда кольцо по сути представляло собой кольцевой резонатор [2,3].

Наведенный нелинейный сдвиг резонансных частот исследовался путем измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) АКР. Для этого сигнал с векторного анализатора цепей 7 вводился в АКР с помощью направленного ответвителя 5. Выходной сигнал АКР выводился из кольца с помощью направленного ответвителя 6 и подавался на входной порт векторного анализатора цепей. Для перестройки частоты АКР от генератора 8 через сумматор 4 на магнитный кристалл подавался СВЧ-сигнал накачки на некоторой фикси-

рованный частоте. Этот сигнал вызывал наведенный нелинейный сдвиг фазы [20] малосигнальной спиновой волны, циркулирующей в АКР. Данный сдвиг фазы приводил к сдвигу резонансных частот АКР. Нелинейным механизмом, отвечающим за нелинейный эффект, является четырехволновое параметрическое взаимодействие спиновых волн, как и в работе [20].

Сначала были проведены предварительные измерения АЧХ магнитного кристалла (сплошная линия на рис. 1, b). АЧХ имела характерные провалы на частотах, соответствующих частотам запрещенных зон магнитного кристалла. На том же рисунке штрихпунктирной линией показаны результаты расчета АЧХ, при котором были учтены потери как на распространение, так и на возбуждение спиновых волн [21]. Затем были измерены АЧХ АКР, фрагменты которых показаны на рис. 1, c. Пики на характеристиках соответствуют резонансным частотам кольца. Звездочкой обозначен резонансный пик, по положению которого исследовался нелинейный

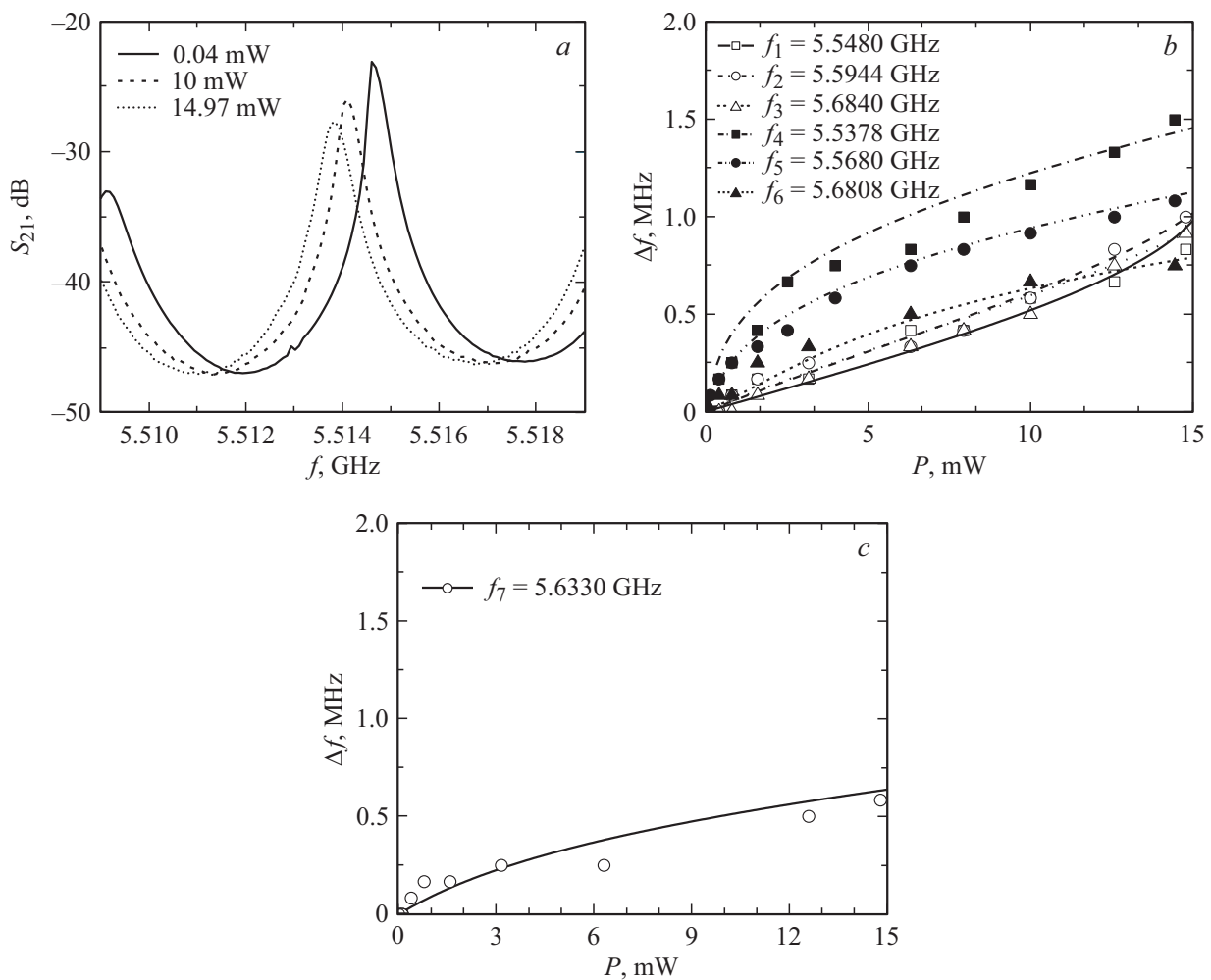


Рис. 2. Резонансные кривые при различной мощности сигнала накачки, подаваемого на частоте f_1 (a), экспериментальные (символы) и теоретические (линии) зависимости наведенного нелинейного сдвига частоты от мощности сигнала накачки на частотах минимумов f_1-f_3 , максимумов f_4-f_6 (b) и на частоте запрещенной зоны магнетонного кристалла f_7 (c).

сдвиг частоты, возникающий при введении в кольцо сигнала накачки.

Далее были проведены основные измерения, направленные на исследование наведенного нелинейного сдвига резонансных частот АКР. Для эксперимента выбирались частоты сигнала накачки между резонансными частотами (f_1-f_3), на резонансных частотах (f_4-f_6) и в запрещенной зоне магнетонного кристалла (f_7), как показано на рис. 1, c. Измерения показали, что при подаче сигнала накачки резонансные частоты АКР уменьшались. Типичный график, показывающий сдвиг исследуемого резонансного пика, приведен на рис. 2, a. Видно, что нелинейных искажений формы резонансной кривой не происходило, как в случае бистабильности [22]. С возрастанием мощности сигнала накачки уменьшалась амплитуда резонансного пика.

На рис. 2, b и c символами представлены результаты экспериментальных измерений нелинейного сдвига частоты резонансного пика в зависимости от мощности сигнала накачки, подаваемого на разных частотах. Здесь

же линиями показаны результаты расчетов по модели, которая будет описана далее. Из рисунка видно, что в случае возбуждения волны накачки на частотах f_1-f_3 (т.е. между резонансными пиками АКР) с ростом ее мощности до 15 mW возникает нелинейный сдвиг частоты порядка 1 MHz, который нарастает практически линейно. Это объясняется тем, что с ростом мощности накачки высокочастотный резонанс кольца смещается в сторону частоты накачки. Иными словами, правый резонанс смещается вниз по частоте из-за отрицательного значения нелинейного коэффициента поверхностных спиновых волн и приближается к частоте накачки. При этом низкочастотный резонанс смещается влево, удаляясь от частоты накачки. В случае подачи сигнала накачки на частотах f_4-f_6 , соответствующих максимумам АЧХ АКР, резонансный пик при низких мощностях сигнала накачки сначала демонстрирует эффективный сдвиг, затем он ограничивается. Это объясняется тем, что резонансная частота кольца уходит от частоты сигнала накачки с ростом мощности последнего. В результате

мощность волны накачки замедляет свой рост, а вместе с ней насыщается и нелинейный сдвиг частоты исследуемого резонансного пика АКР. Если же подавать сигнал накачки на частоте запрещенной зоны (рис. 2, *с*), то сдвиг резонансных частот оказывается слабым. Это является результатом быстрого затухания спиновых волн в запрещенной зоне магнетонного кристалла. В целом из графиков видно, что с ростом частоты сигнала накачки эффект ослабевает из-за уменьшения эффективности возбуждения спиновых волн.

Для объяснения экспериментально полученных зависимостей была разработана модель, описывающая наведенный нелинейный сдвиг резонансных частот АКР. Исходя из простых физических соображений ясно, что сдвиг резонансных частот обусловлен наведенным нелинейным сдвигом фазы $\Delta\varphi_{INL}$ спиновой волны, бегущей в пленке ЖИГ [20]. Поэтому коэффициент передачи АКР по мощности в отличие от линейной модели [19] имеет следующий вид:

$$H_p(|u_p|^2) = \frac{0.5 \exp(-\alpha d + g)}{\cosh(\alpha d - g) - \cos(kd + \Delta\varphi_{INL}(|u_p|^2))}, \quad (1)$$

где $|u_p|$ — нормированная амплитуда прецессии намагниченности волны накачки, α — декремент затухания, $g = \ln(10^{G/20})$ — коэффициент усиления, k — волновое число. Резонансный характер зависимости $\Delta\varphi_{INL}(|u_p|^2)$ учитывался тем же способом, что и в работе [22]. В результате выражение для $\Delta\varphi_{INL}$ имело следующий вид:

$$\Delta\varphi_{INL}(|u_p|^2) = \frac{-0.5N_{12}|U_p|^2 dV_g^{-1} \exp(-\alpha d + g)}{\cosh(\alpha d - g) - \cos(kd + \Delta\varphi_{INL}(|u_p|^2))}, \quad (2)$$

где N_{12} — нелинейный коэффициент для поверхностных спиновых волн, $|U_p|^2$ — квадрат модуля безразмерной амплитуды входного СВЧ-сигнала накачки, V_g — групповая скорость. Используя выражение (1) для H_p , можно найти нормированную амплитуду спиновой волны в резонаторе по формуле $|u_p|^2 = H_p|U_p|^2$. На рис. 2, *b* и *с* линиями показаны результаты расчета наведенного нелинейного сдвига частоты исследуемого резонансного пика АКР. Как видно, построенная модель достаточно хорошо описывает экспериментальные результаты.

Из проведенного исследования следует, что спектром резонансных частот АКР можно управлять с помощью сигнала накачки. Полученное в наших экспериментах максимальное значение наведенного нелинейного сдвига частоты 1.5 МГц составляет примерно четверть от расстояния между резонансными частотами АКР. Исследованный эффект может найти различные приложения. Например, его можно использовать для перестройки частот АКР, а также для ввода данных в магнетонные резервуарные компьютеры [12–14].

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках „Мегагранта“ (соглашение № 075-15-2021-609).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y.K. Fetisov, P. Kabos, C.E. Patton, *Electron. Lett.*, **32** (20), 1894 (1996). DOI: 10.1049/el:19961254
- [2] V.E. Demidov, B.A. Kalinikos, N.G. Kovshikov, P. Edenhofer, *Electron. Lett.*, **35** (21), 1856 (1999). DOI: 10.1049/el:19991140
- [3] A.B. Ustinov, G. Srinivasan, B.A. Kalinikos, *Appl. Phys. Lett.*, **92** (19), 193512 (2008). DOI: 10.1063/1.2931085
- [4] А.А. Порохнюк, А.Б. Устинов, Н.Г. Ковшиков, Б.А. Калиникос, *Письма в ЖТФ*, **35** (18), 17 (2009). [A.A. Porokhnyuk, A.B. Ustinov, N.G. Kovshikov, B.A. Kalinikos, *Tech. Phys. Lett.*, **35** (9), 843 (2009). DOI: 10.1134/S106378500909017X].
- [5] W. Ishak, *Electron. Lett.*, **19** (22), 930 (1983). DOI: 10.1049/el:19830635
- [6] S.N. Dunaev, Y.K. Fetisov, *Electron. Lett.*, **28** (8), 789 (1992). DOI: 10.1049/el:19920498
- [7] B.A. Kalinikos, M.M. Scott, C.E. Patton, *Phys. Rev. Lett.*, **84** (20), 4697 (2000). DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.4697
- [8] A.D. Karenowska, A.V. Chumak, A.A. Serga, J.F. Gregg, B. Hillebrands, *Appl. Phys. Lett.*, **96** (8), 082505 (2010). DOI: 10.1063/1.3318258
- [9] A.B. Ustinov, A.A. Nikitin, B.A. Kalinikos, *IEEE Magn. Lett.*, **6**, 3500704 (2015). DOI: 10.1109/LMAG.2015.2487238
- [10] A.B. Ustinov, A.V. Kondrashov, A.A. Nikitin, V.V. Lebedev, A.N. Petrov, A.V. Shamrai, B.A. Kalinikos, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1326** (1), 012015 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1326/1/012015
- [11] S.V. Grishin, O.I. Moskalenko, A.N. Pavlov, D.V. Romanenko, A.V. Sadovnikov, Y.P. Sharaevskii, I.V. Sysoev, T.M. Medvedeva, E.P. Seleznev, S.A. Nikitov, *Phys. Rev. Appl.*, **16** (5), 054029 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.054029
- [12] S. Watt, M. Kostylev, *Phys. Rev. Appl.*, **13** (3), 034057 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.034057
- [13] S. Watt, M. Kostylev, A.B. Ustinov, *J. Appl. Phys.*, **129** (4), 044902 (2021). DOI: 10.1063/5.0033292
- [14] S. Watt, M. Kostylev, A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos, *Phys. Rev. Appl.*, **15** (6), 064060 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.064060
- [15] В. Геворкян, В. Кочемасов, А. Устинов, *Компоненты и технологии*, № 4(189), 25 (2017).
- [16] A.B. Ustinov, A.V. Drozdovskii, A.A. Nikitin, A.A. Semenov, D.A. Bozhko, A.A. Serga, B. Hillebrands, E. Lähderanta, B.A. Kalinikos, *Commun. Phys.*, **2**, 137 (2019). DOI: 10.1038/s42005-019-0240-7
- [17] Y.K. Fetisov, G. Srinivasan, *Appl. Phys. Lett.*, **88** (14), 143503 (2006). DOI: 10.1063/1.2191950

- [18] M.A. Morozova, D.V. Romanenko, A.A.Serdobintsev, O.V. Matveev, Y.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov, *J. Magn. Magn. Mater.*, **514**, 167202 (2020). DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167202
- [19] А.А. НИКИТИН, А.Б. УСТИНОВ, А.А. СЕМЕНОВ, Б.А. КАЛИНИКОС, *ЖТФ*, **82** (7), 98 (2012). [A.A. Nikitin, A.B. Ustinov, A.A. Semenov, B.A. Kalinikos, *Tech. Phys.*, **57** (7), 994 (2012). DOI: 10.1134/S106378421207016X].
- [20] A.B. Ustinov, N.A. Kuznetsov, R.V. Haponchuk, E. Lähderanta, T. Goto, M. Inoue, *Appl. Phys. Lett.*, **119** (19), 192405 (2021). DOI: 10.1063/5.0074824
- [21] Б.А. КАЛИНИКОС, А.Б. УСТИНОВ, С.А. БАРУЗДИН, *Спин-волновые устройства и эхо-процессы* (Радиотехника, М., 2013).
- [22] V.V. Vitko, A.A. Nikitin, R.V. Haponchuk, A.A. Stashkevich, M.P. Kostylev, A.B. Ustinov, *Eur. Phys. J. Plus*, **137** (9), 1010 (2022). DOI: 10.1140/epjp/s13360-022-03213-5