

05,13

Интерференция магнитоупругих волн в пленке железо-иттриевого граната

© С.Л. Высоцкий, А.В. Кожевников, Ю.А. Филимонов

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия

E-mail: vysotsl@gmail.com

Поступила в Редакцию 9 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 9 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

Экспериментально исследована интерференция встречно распространяющихся в пленке железо-иттриевого граната магнитоупругих волн, возбуждаемых и принимаемых токовыми антеннами. Показано, что с помощью регулировки фазы и амплитуды одной из взаимодействующих волн на частотах вблизи частот магнитоупругих резонансов может быть обеспечена чувствительность уровня сигнала на выходной антенне к изменению величины поля подмагничивания более 250 дВ/Ое. Обнаруженный эффект может быть полезен при разработке датчиков магнитного поля.

Ключевые слова: интерференция, магнитоупругие волны, датчик магнитного поля.

DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51249.02H

1. Введение

Интерференция спиновых волн (СВ) активно изучается на протяжении более десятка лет. Экспериментальные исследования и их численное моделирование проводятся с использованием спин-волновых интерферометров типа Маха–Цендера [1–4] или на основе Ψ -образных волноводов [5–7], а также решеток из ортогонально пересекающихся волноводов [8–12], в которых возбуждение и прием СВ осуществляется токовыми антеннами. Изменение амплитуды или фазы накачки, поступающей на одну из возбуждающих антенн, позволяет на некоторых фиксированных частотах изменять характер интерференции СВ на приемной антенне с конструктивной на деструктивную (или наоборот) [13,14], что радикально сказывается на амплитуде и фазе СВ на выходе устройств и может быть использовано для разработки логических устройств [1–7], голографической памяти [8,9,11], сигнальных процессоров [15,16] и магнитных сенсоров [17,18]. В последнем случае используется тот факт, что в спектре СВ на некоторых частотах чувствительность амплитуды и фазы измеряемого на выходной антенне сигнала к изменению величины поля подмагничивания достигает 200 дВ/Ое и 10π /Ое соответственно.

Следует отметить, что измерение величины постоянного магнитного поля H с помощью устройств, использующих распространение спиновых волн в ферритовых волноводах, исследуется уже более двух десятков лет. В качестве измеряемых параметров, кроме указанных выше амплитуды и фазы сигнала с выходного преобразователя СВ, использовались величина отраженной от входного преобразователя СВ мощности [19], а для магнетных кристаллов — центральная частота полосы

непропускания [20–22]. Рассматривались варианты повышения температурной стабильности таких датчиков [23] и их интегрирования в измерительные модули [24]. Однако чувствительность описанных датчиков не превышала 100 дВ/Ое [19–22].

В настоящей работе рассматриваются эффекты, сопровождающие интерференцию магнитоупругих волн, распространяющихся в волноводе из пленки железо-иттриевого граната навстречу друг другу, а также возможность их использования для разработки датчика магнитного поля.

2. Исследуемый образец и методика измерений

Для проведения измерений использовалась пленка легированного железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной по паспорту $d \approx 1.9 \mu\text{m}$, намагниченностью насыщения $4\pi M \approx 1750 \text{ G}$, выращенная эпитаксиально на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) с кристаллографической ориентацией (111) толщиной $D = 550 \mu\text{m}$. Из пленки был вырезан волновод с плоскостными размерами $4 \times 15 \text{ mm}$, который размещался на трех микрополосковых антеннах 1, 2, 3 (см. вставки a, b к рис. 1) шириной $50 \mu\text{m}$, длиной 4.5 mm. Антенны 1 и 2 использовались для возбуждения магнитостатических волн (МСВ), антенна 3 являлась выходной. Расстояние между выходной и каждой из входных антенн составляло 3 mm. СВЧ сигнал с векторного анализатора цепей поступал на делитель S и затем на входные антенны, при этом между делителем и одной из антенн включались фазовращатель и регулируемый аттенюатор. Магнитное поле H могло прикладываться в плоскости пленки параллельно антеннам для возбуждения поверхностных МСВ

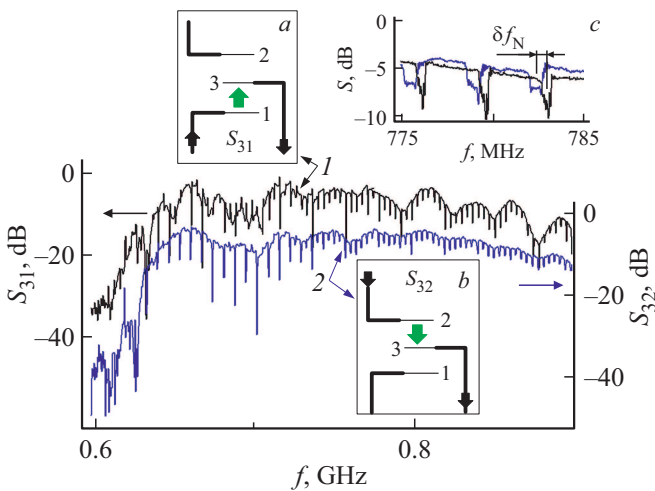


Рис. 1. Частотные зависимости модуля коэффициента передачи ПМСВ с антенны 1 S_{31} (кривая 1) и антенны 2 S_{32} (кривая 2) на антенну 3. $H = 29$ Ое.

(ПМСВ) или перпендикулярно плоскости пленки для возбуждения прямых объемных МСВ (ПОМСВ) [25]. Сигнал с выходной антенны перед подачей на вход анализатора цепей усиливался на 27 dB.

На рис. 1 приведены частотные зависимости модуля коэффициента передачи ПМСВ на выходную антенну для случаев возбуждения ПМСВ только антенной 1 $S_{31}(f)$ (см. кривую 1 и вставку *a*) или только антенной 2 $S_{32}(f)$ (см. кривую 2 и вставку *b*) при $H = 29$ Ое. При выбранном уровне выходной мощности анализатора цепей $P = -38$ dBm процессы трехмагнного распада ПМСВ [25] не наблюдались. Видно, что обе зависимости содержат эквидистантно расположенные вблизи частот f_N узкополосные участки увеличения потерь ПМСВ („провалы“), при этом для каждой кривой измеренный частотный интервал между центральными частотами соседних провалов $\Delta f_{N,N+1} \approx 3$ MHz хорошо соответствовал результатам расчета (в приближении $d \ll D$) с помощью известного для магнитоупругих волн (МУВ) соотношения [26] $\Delta f_{N,N+1} = V/(2D)$, где $V = 3.57 \cdot 10^5$ cm/s — скорость поперечных акустических волн в ГГГ, N — целое число полуволн акустической сдвиговой волны по толщине структуры. Однако абсолютные значения f_N на кривых 1 и 2 различались на величину $\delta f_N \approx 0.19 \dots 24$ MHz. С использованием экспериментально измеренных фазочастотных характеристик $\phi_{31}(f)$ и $\phi_{32}(f)$ с помощью известного соотношения [27] $q(f) = \phi(f)/L$, где q — волновое число, были построены дисперсионные зависимости ПМСВ. При сравнении полученных кривых с результатами расчета при параметрах эксперимента и варьировании толщины пленки ЖИГ оказалось, что совпадение результатов достигается при использовании толщин пленок ЖИГ 1.85 и 2 μm для случаев распространения только одной или только другой МУВ. Проведенная оценка разницы

частот $f_N \approx V_i N/[2(D+d)]$, рассчитанных с учетом толщины пленки ЖИГ при $N = 240$ (для $f_N \approx 776$ MHz) составила 0.21 MHz, что хорошо согласуется с экспериментально измеренными величинами δf_N . Таким образом, исследуемая пленка ЖИГ оказалась неоднородной по толщине.

3. Результаты измерений

При одновременной подаче СВЧ-мощности на обе входные антенны амплитуда и фаза сигнала с выходной антенны определяются как результат интерференции в месте ее расположения встречно распространяющихся поверхностных (МУВ). На рис. 2 кривые 1 и 2 представляют, соответственно, частотные зависимости амплитуды $S(f)$ и фазы $\phi(f)$ сигнала на выходной антенне при $H = 33$ Ое. Видно, что осцилляциям амплитуды на некоторых частотах f_N (например, помеченной звездочкой на кривой 1) соответствуют на характеристике $\phi(f)$ скачки фазы, достигающие 360 градусов (помечен

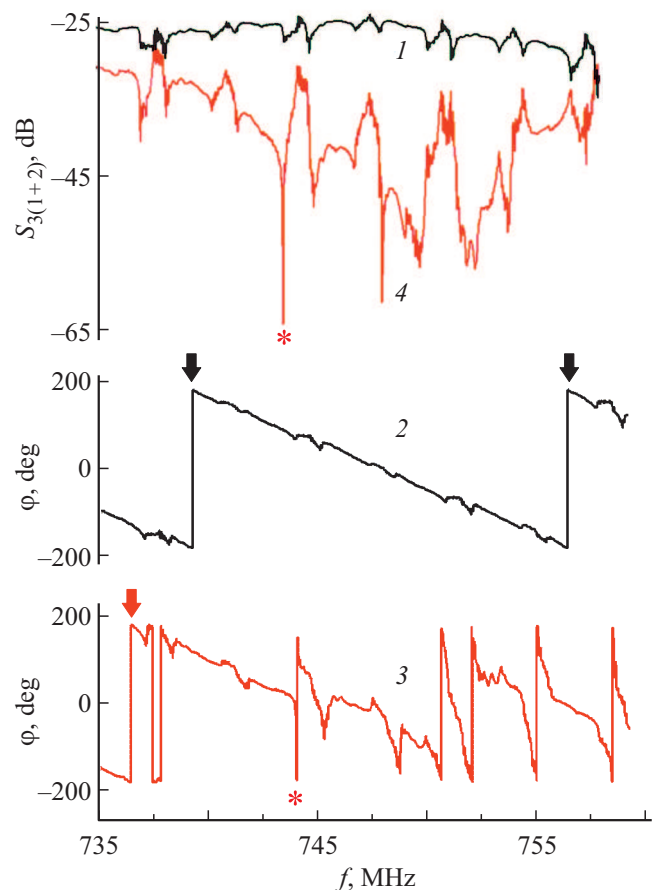


Рис. 2. Частотные зависимости модуля коэффициента передачи ПМСВ $S_{3(1+2)}$ (кривые 1 и 4) сигнала на выходной антенне в отсутствие регулировки (кривая 1) и при ее наличии (кривая 4). Кривые 2 и 3 — частотные зависимости фазы сигнала на выходной антенне в отсутствие регулировки (кривая 2) и при ее наличии (кривая 3). $H = 29$ Ое.

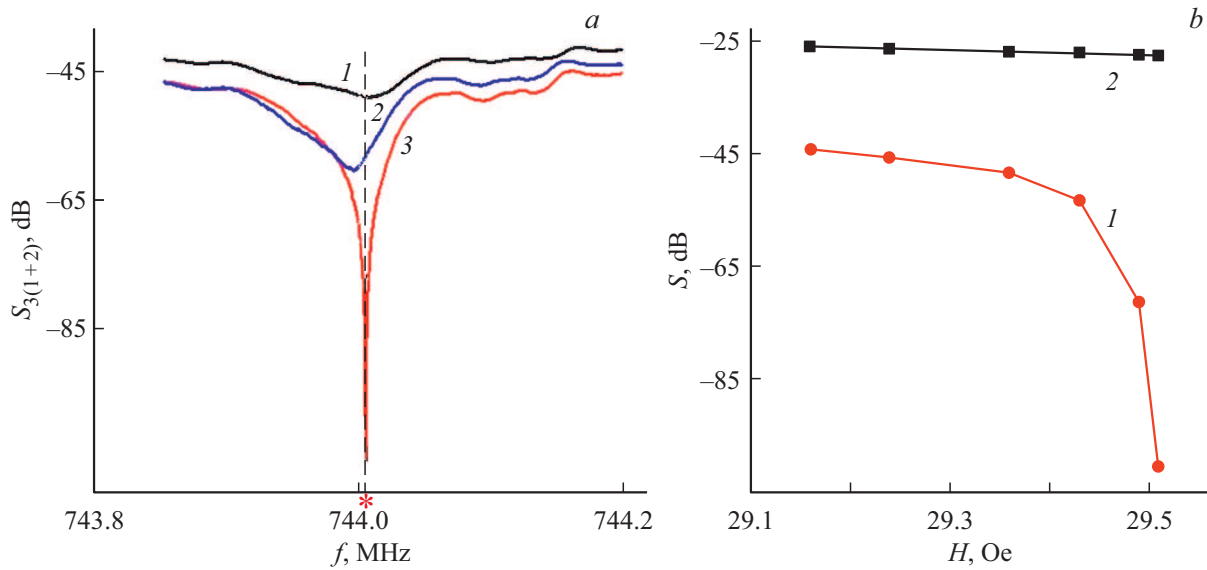


Рис. 3. *a*) частотные зависимости модуля коэффициента передачи ПМСВ $S_{3(1+2)}$ при $H = 29.16$ Oe, 29.43 Oe и 29.51 Oe (кривые 1, 2 и 3 соответственно). *b*) зависимость модуля коэффициента передачи ПМСВ от величины внешнего магнитного поля H на частоте 744.01 MHz в случае распространения двух интерферирующих волн $S_{3(1+2)}$ (кривая 1) и одной ПМСВ S_{31} (кривая 2).

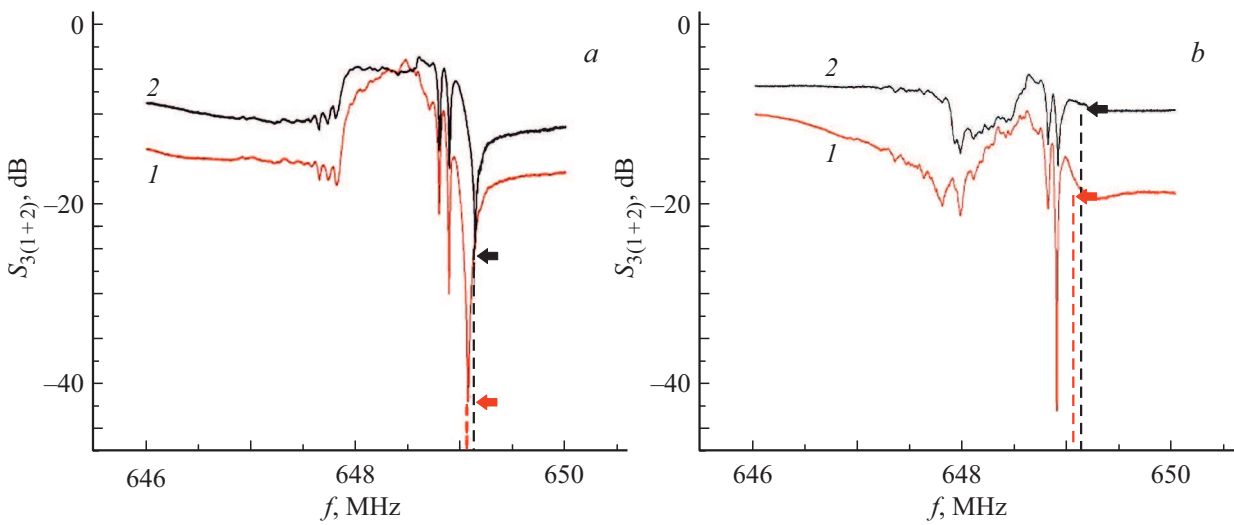


Рис. 4. Экспериментальные (кривые 1, 3) и рассчитанные (кривые 2, 4) зависимости модуля коэффициента передачи на антенну 3 для величин $H = 28.56$ Oe (*a*) и $H = 29.12$ Oe (*b*).

звездочкой на кривой 2, где, кроме того, стрелками показаны осцилляции фазы ПМСВ при кратности ее длины волны и расстояния между антеннами). Такое изменение фазы свидетельствует о смене на этой частоте характера интерференции. При этом с помощью изменения фазы и вносимого ослабления в регулируемом канале можно получить аналогичный результат и на других дискретных частотах. Так, например, кривая 4 на рис. 2 отвечает ситуации, когда в результате противофазного сложения на выходной антенне сигналов ПМСВ вклад в уровень суммарного сигнала в центре рассматриваемой полосы частот обусловлен преимущественно упругой компонен-

той магнитоупругой волны. При этом наблюдаются аналогичные описанному выше участки резкого изменения амплитуды (помечены звездочками на кривой 4 рис. 2) и фазы (помечены звездочками на кривой 3 рис. 2) выходного сигнала. Прямоугольником на кривой 3 выделена область, где уровень сигнала на выходной антенне оказывается недостаточным (сравн. с кривой 4) для определения его фазы использованным прибором.

Положение и глубина заграждения участков резкого изменения в частотной зависимости амплитуды сигнала с выходной антенны, возникающих в результате интерференции, зависит, в отличие от частот f_N , от величины

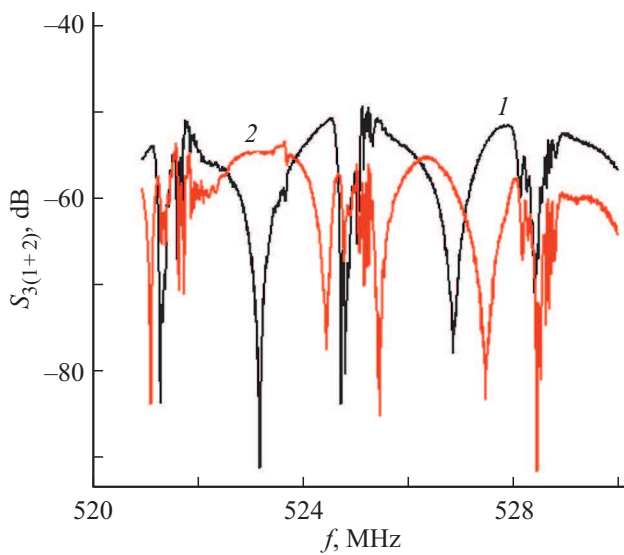


Рис. 5. Частотные зависимости модуля коэффициента передачи ПОМСВ $S_{3(1+2)}$ в отсутствие регуляции (кривая 1) и при ее наличии (кривая 2). $H = 1.63$ кОе.

поля подмагничивания, что может быть использовано на практике. На рис. 3, *a* приведены полученные для исследованной структуры частотные зависимости $S_{3(1+2)}$ для $H = 29.16$ Ое, 29.43 Ое и 29.51 Ое (кривые 1, 2 и 3, соответственно). Видно, что на частоте 744.01 МГц изменение уровня выходного сигнала при изменении величины внешнего поля в указанном интервале превышает 40 дБ. При этом в зависимости $S_{3(1+2)}(H)$ есть интервал полей H , в котором ее крутизна превышает 250 дБ/Ое (см. кривую 1 на рис. 2, *b*), что может быть использовано при разработке высокочувствительных датчиков магнитного поля. Подчеркнем, что в случае одной магнитоупругой волны для этой же частоты изменение величины поля подмагничивания в указанных пределах не приводит к заметному изменению уровня выходного сигнала (см. кривую 2 на рис. 3, *b*).

С использованием измеренных зависимостей модуля и фазы коэффициентов передачи МУВ с антенны 1 на антенну 3 и с антенны 2 на антенну 3 проведено моделирование взаимодействия этих волн в области расположения 3 антенны по правилам сложения комплексных коэффициентов передачи $\hat{S} = S_{31}e^{i\varphi_{31}} + S_{32}e^{i\varphi_{32}}$, где $i = \sqrt{-1}$. На рис. 4 показано сравнение экспериментальных (кривые 1, 3) и рассчитанных (кривые 2, 4) зависимостей модуля коэффициента передачи для величин $H = 28.56$ Ое (рис. 4, *a*) и $H = 29.12$ Ое (рис. 4, *b*). Можно видеть их хорошее качественное совпадение. Из количественного сравнения рис. 4, *a* и *b* видно, что в эксперименте на частоте 649.08 МГц (красная штриховая линия) глубина провала (показана красной стрелкой) изменяется при изменении величины H на 23 дБ, а в расчете для частоты 649.14 МГц (черная штриховая линия и черные стрелки) это изменение составляет 15 дБ.

При нормальном намагничивании пленки ЖИГ, отвечающем возбуждению ПОМСВ, наблюдались аналогичные эффекты, однако уровень потерь ПОМСВ на распространение был на 10–15 дБ выше, чем для случая ПМСВ — см. рис. 5.

4. Заключение

Таким образом, в работе исследовано взаимодействие встречно распространяющихся в пленке ЖИГ поверхностных и прямых объемных МУВ. Показано, что в частотной области наблюдения МСВ с помощью регуляции ослабления и фазы одной из взаимодействующих волн можно на дискретных частотах обеспечить чувствительность уровня сигнала к изменению величины внешнего магнитного поля более 250 дБ/Ое, что может быть применено при разработке высокочувствительных датчиков магнитного поля.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0030-2019-0013 „Спинтроника“ при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-00973).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.P. Kostylev, A.A. Serga, T. Schneider, B. Leven. Hillebrands B **87**, 153501 (2005).
- [2] T. Schneider, A.A. Serga, B. Leven, Hillebrands, R.L. Stamps, M.P. Kostylev. Appl. Phys. Lett. **92**, 022505. (2008).
- [3] A.V. Chumak, A.A. Serga, B. Hillebrands. Nature Commun. **5**, 4700. (2014).
- [4] O. Rousseau, B. Rana, R. Anami, M. Yamada, K. Miura, S. Ogawa. Otani Y. Sci. Rep. **5**, 09873 (2015).
- [5] S. Klingler, P. Pirro, T. Brächer, B. Leven, B. Hillebrands, A.V. Chumak. Appl. Phys. Lett. **105**, 152410 (2014).
- [6] S. Klingler, P. Pirro, T. Brächer, B. Leven, B. Hillebrands, F.V. Chumak. Appl. Phys. Lett. **106**, 212406 (2015).
- [7] T. Fischer, M. Kewenig, D.A. Bozhko, A.A. Serga, I.I. Syvorotka, F. Ciubotaru, C. Adelman, B. Hillebrands, A.A. Chumak. Appl. Phys. Lett. **110**, 152401 (2017).
- [8] A. Khitun. J. Appl. Phys. **113**, 164503 (2013).
- [9] F. Gertz, A. Kozhevnikov, Y. Filimonov, A. Khitun. IEEE Trans. Magn. **51**, 4, P. 1 (2014).
- [10] A. Balynsky, Y. Kozhevnikov, Khivintsev, T. Bhowmick, D. Gutierrez, H. Chiang, G. Dudko, Y. Filimonov, G. Liu. J. Appl. Phys. **121**, 024504 (2017).
- [11] A. Kozhevnikov, F. Gertz, G. Dudko, Y. Filimonov, A. Khitun. Appl. Phys. Lett. **106**, 142409 (2015).
- [12] M. Balynskiy, H. Chiang, D. Gutierrez, A. Kozhevnikov, Y. Filimonov, A. Khitun. J. Appl. Phys. **123**, 144501 (2018).
- [13] A. Khitun, M. Bao, K.L. Wang. J. Phys. D **43**, 264005 (2010).

- [14] G. Csaba, Á. Papp, W. Porod. Phys. Lett. A. **381**, 1471 (2017).
- [15] A. Papp, W. Porod, A.I. Csurgay, G. Csaba. Sci. Rep. **7**, 9245 (2017).
- [16] G. Csaba, A. Papp, W. Porod. J. Appl. Phys. **115**, 17C741 (2014).
- [17] M. Balytsky, D. Gutierrez, H. Chiang, A. Kozhevnikov, G. Dudko, Y. Filimonov, A. Balandin, A. Khitun. Sci. Rep. **7**, 11539 (2017).
- [18] M. Balinskiy, H. Chiang, A. Kozhevnikov, Y. Filimonov, A.A. Balandin, A. Khitun. J. Magn. Magn. Mater. **514**, 167046 (2020).
- [19] A.O. Kaya, S. Atalay, H. Gencer, O.A. Kaya, V.S. Kolat, T. Izgi. Acta Phys. Polonica A. **127**, 4, 937 (2015).
- [20] M. Inoue, A. Baryshev, H. Takagi, P.B. Lim, K. Hatafuku, J. Noda, K. Togo. Appl. Phys. Lett. **98**, 132511 (2011).
- [21] P. Talbot, A. Fessant, J. Gieraltowski. Proc. Eng. **120**, 1241 (2015).
- [22] R.G. Kryshnal, A.V. Medved. Appl. Phys. Lett. **100**, 192410 (2012).
- [23] T. Goto, N. Kanazawa, A. Buyandalai, H. Takagi, J. Nakamura, S. Okajima, T. Hasegava, A.B. Granovsky, K. Sekiguchi, C.A. Ross, M. Inoue. Appl. Phys. Lett. **106**, 132412 (2015).
- [24] O. Haas, D. Dufay, S. Saez, C. Dolabdjian. IEEE Sens. J. **20**, 23, 14148 (2020).
- [25] А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков. Магнитные колебания и волны. Физматлит, М. (1994). 464 с.
- [26] А.С. Бугаев, Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, Ю.А. Филимонов. ФТТ. **23**, 4, 2647 (1981).
- [27] W. Schilz. Phil. Res. Rep. **28**, 50 (1973).

Редактор Д.В. Жуманов