

05,13

## Исследование интерференции поверхностных магнитостатических волн с помощью обратного спинового эффекта Холла

© Ю.В. Никулин<sup>1</sup>, А.В. Кожевников<sup>1</sup>, С.Л. Высоцкий<sup>1,2,¶</sup>, М.Е. Селезнев<sup>1</sup>,  
Ю.В. Хивинцев<sup>1</sup>, Ю.А. Филимонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия

<sup>2</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

¶ E-mail: vysotsl@gmail.com

Поступила в Редакцию 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2022 г.

Принята к публикации 12 мая 2022 г.

Экспериментально исследован эффект генерации ЭДС за счет обратного спинового эффекта Холла при распространении поверхностных магнитостатических волн в структуре железо-иттриевый гранат — платина на основе двухслойной пленки железо-иттриевого граната с разными намагниченностями насыщения слоев ( $4\pi M_1 > 4\pi M_2$ ). Показано, что величина ЭДС резонансно увеличивается на частотах гибридизации поверхностных магнитостатических волн с обменными модами структуры. При этом на частотах поверхностных магнитостатических волн слоя с большей намагниченностью наблюдаются осцилляции ЭДС, вызванные гибридизацией с обменными модами как слоя с  $4\pi M_1$ , так и слоя с меньшей намагниченностью, что указывает на влияние межслойного обмена на эффективность спиновой накачки в рассматриваемой структуре. Исследовано влияние интерференции встречных поверхностных магнитостатических волн на генерируемую ЭДС. Показано, что величина ЭДС чувствительна к разности фаз  $\Delta\phi$  встречных поверхностных магнитостатических волн и осциллирует. При этом амплитуда осцилляций определяется соотношением длины поверхностной магнитостатической волны и протяженности пленки платины.

**Ключевые слова:** магнитостатические волны, железо-иттриевый гранат, платина, интерференция, обратный спиновый эффект Холла.

DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52822.21NN

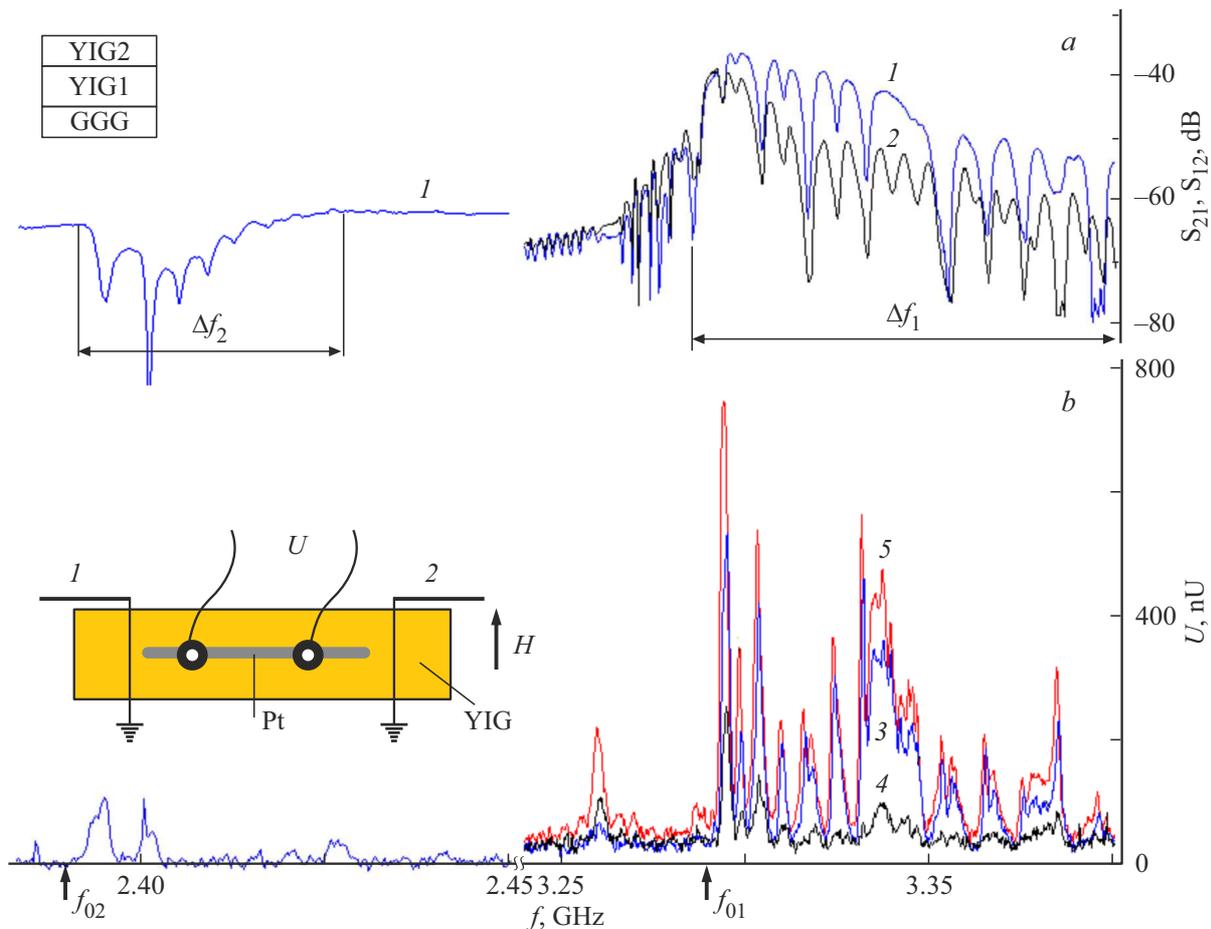
### 1. Введение

Эффекты распространения и интерференции спиновых волн (СВ) активно исследуются в связи с перспективой построения на их основе энергоэффективных информационных технологий [1–4]. Эти эффекты использованы для разработки прототипов логических устройств [4,5], голографической памяти [6], сигнальных процессоров [7], а также возможности характеристики магнитных частиц [8] и специального рода вычислений [9]. При проведении экспериментов для возбуждения спиновых волн и регистрации результата их интерференции, как правило, использовались токовые микрополосковые антенны. При этом стремление к миниатюризации устройств встречает препятствие в виде ограничения ряда параметров устройств вследствие роста уровня прямой электромагнитной наводки между антеннами.

Альтернативой токовой приемной антенне может быть расположенный на поверхности волновода спиновых волн тонкопленочный платиновый элемент, на котором вследствие обратного эффекта Холла наводится электрическое напряжение  $U$ , величина которого пропорциональна амплитуде СВ [10–12]. В [13] было показано, что при расположении платинового элемента в области интерференции обратных объемных магнитостатических волн эффект чувствителен к результату

фазового сложения волн и, следовательно, перспективен для использования в фазочувствительных спиновых логических устройствах. Особенности генерации ЭДС  $U$  в тонкопленочных структурах Pt/YIG на основе пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ), обусловленные эффектами гибридизации бегущих поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) с обменными объемными модами пленки, исследованы в [14]. Показано, что на частотах спин-волновых резонансов (СВР) величина ЭДС может увеличиваться в несколько раз по сравнению с соседними частотными областями. С этой точки зрения представляет интерес исследование генерации ЭДС в структуре платина — двухслойная обменно-связанная пленка. Дело в том, что при распространении ПМСВ в таких пленках спектр СВР не только обогащается, но и демонстрирует ряд особенностей при перестройке поля подмагничивания — таких, как осцилляции глубины „провала“ в АЧХ на частотах СВР или эффект „расталкивания“ частот СВР [15,16]. Представляет также интерес рассмотреть влияние этих особенностей на генерацию ЭДС при встречном распространении двух ПМСВ.

Целью настоящей работы является исследование интерференции поверхностных магнитостатических волн в обменно-связанных пленках ЖИГ с помощью обратного спинового эффекта Холла.



**Рис. 1.** *a* — зависимости  $S_{21}(f)$  (кривая 1) и  $S_{12}(f)$  (кривая 2), на вставке показана структура пленки; *b* — частотная зависимость  $U(f)$  для случаев подачи СВЧ-мощности на вход 1, на вход 2 и на оба входа одновременно (кривые 3, 4 и 5 соответственно). На вставке серой полоской показана конфигурация датчика из пленки платины.  $H = 572$  Ое.

## 2. Используемые образцы и методика эксперимента

Для проведения измерений использовалась двухслойная пленка железо-иттриевого граната, выращенная на подложке из гадолиний-галлиевого граната методом жидкофазной эпитаксии в два этапа. Сначала на подложку осаждалась пленка ЖИГ состава  $Y_3Fe_5O_{12}$ , а затем — пленка ЖИГ, легированная галлием и скандием состава  $Y_3Fe_4Ga_{0.8}Sc_{0.2}O_{12}$  (см. вставку на рис. 1, *a*). Намагниченности насыщения и толщины первого и второго слоев составили  $4\pi M_1 = 1750$  Г,  $d_1 = 8 \mu\text{m}$  и  $4\pi M_2 = 640$  Г,  $d_2 = 6 \mu\text{m}$  соответственно. Из пленки был вырезан волновод с плоскостными размерами  $5 \times 12$  мм, на поверхности которого с помощью магнетронного распыления и технологии фотолитографии был сформирован датчик из пленки платины толщиной 6 нм, конфигурация которого представлена на вставке к рис. 1, *b*. Ширина полоски платины составляла 500  $\mu\text{m}$ .

Полученная структура помещалась в макет линии задержки, возбуждение (и прием при подаче СВЧ-

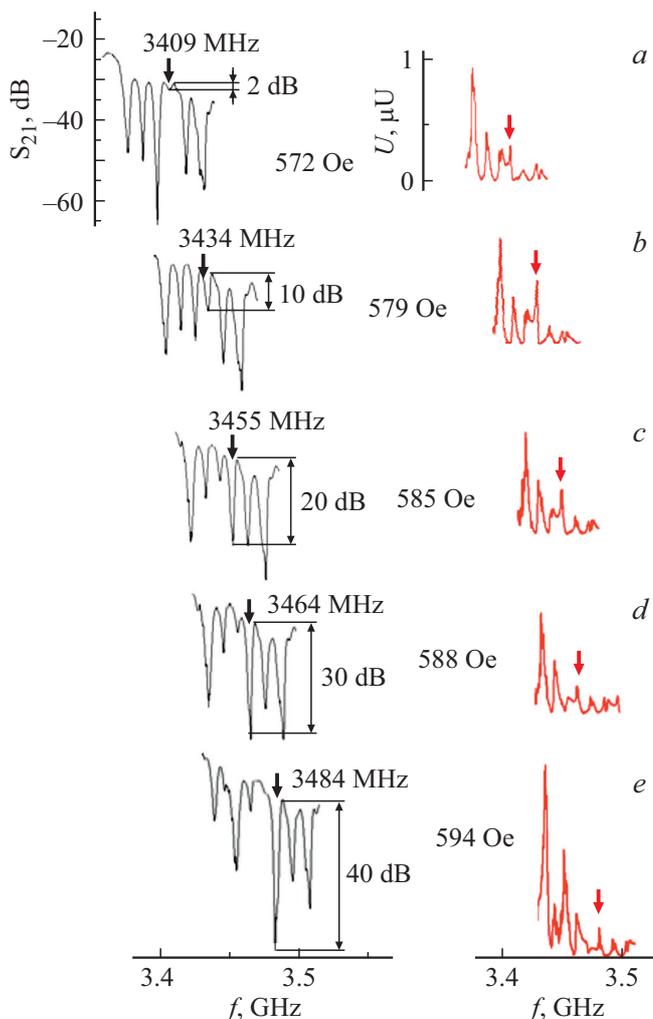
мощности только на одну антенну) спиновых волн осуществлялось проволочными антеннами 1 и 2 (см. вставку на рис. 1, *b*) диаметром 50  $\mu\text{m}$ , расстояние между антеннами 10.7 мм. Магнитное поле  $H$  прикладывалось в плоскости структуры параллельно антеннам, что позволяло возбуждать поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ) [17]. Анализатор цепей Keysight M9374A использовался для контроля частотной зависимости модуля коэффициента передачи  $S(f)$  магнитостатической волны в случае подачи СВЧ-мощности на одну или другую антенну, а также в качестве генератора СВЧ-сигнала при исследовании интерференционных эффектов. В последнем случае СВЧ-мощность с выхода векторного анализатора цепей поступала на делитель, с выходов которого подавалась на входные антенны, при этом в тракт питания антенны 1 включались фазовращатель и регулируемый аттенюатор. Проволочные контакты присоединялись к полоске платины с помощью токопроводящего клея. Расстояние между контактами  $L$  составляло 6 мм. Напряжение между контактами измерялось с помощью с помощью селективного нановольтметра SR830 DSP. Для синхронизации селективного

вольтметра использовалась модуляция СВЧ-мощности частотой 10.399 kHz.

На рис. 1, *a* кривая 1 представляет зависимость  $S_{21}(f)$ , полученную при  $H = 572$  Oe и использовании антенны 1 в качестве входной. Видно, что она содержит две области наблюдения ПМСВ: в первом слое  $\Delta f_1$  и во втором слое  $\Delta f_2$  с низкочастотными границами [17]  $f_{01,2} = \gamma \sqrt{H(H + 4\pi M_{1,2})}$  и высокочастотными границами  $f_{s1,2} = \gamma(H + 2\pi M_{1,2})$ ,  $\gamma = 2.8$  MHz/Oe. Аналогично [15,16], область  $\Delta f_1$  содержит участки резонансного роста потерь ПМСВ на распространение на частотах спин-волновых резонансов в обоих слоях пленки [14]

$$f_{N1,2} = \sqrt{(f_H + f_{ex1,2} q_{N1,2}^2)(f_H + f_{m1,2} + f_{ex1,2} q_{N1,2}^2)}, \quad (1)$$

где  $f_H = \gamma H$ ,  $f_{m1,2} = \gamma 4\pi M_{1,2}$ ,  $f_{ex1,2} = 2\gamma A_{1,2}/M_{1,2}$ ,  $A_{1,2}$  — обменные жесткости слоев,  $q_{N1,2} = \pi N/d_{1,2}$ ,  $N = 1, 2, \dots$



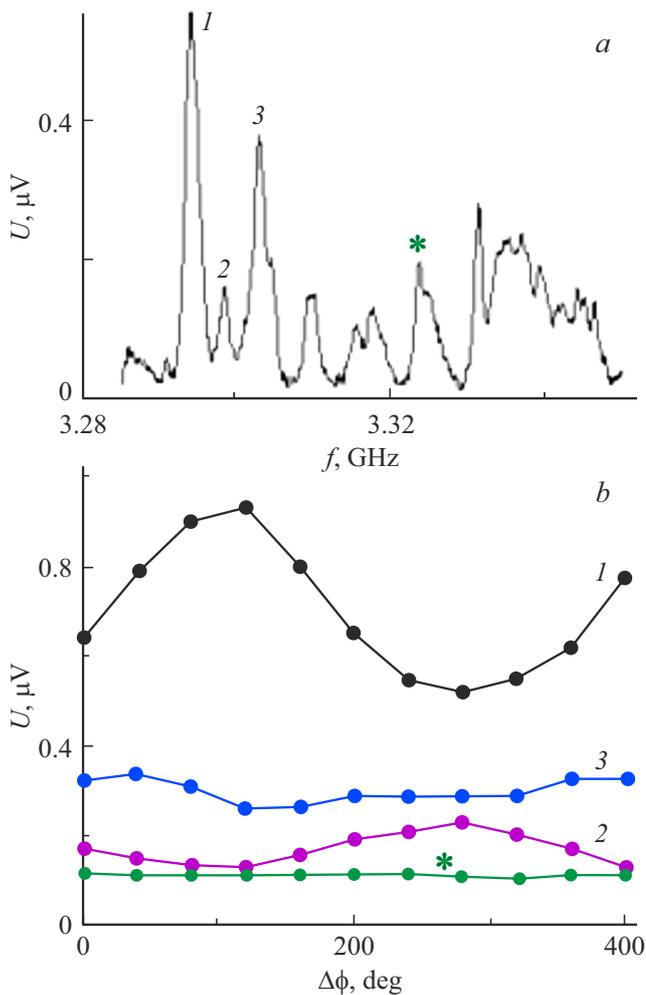
**Рис. 2.** Вид участков зависимостей  $S_{21}(f)$  (черные кривые) и  $U(f)$  (красные кривые) при  $H = 572, 579, 585, 588$  и  $594$  Oe (*a, b, c, d, e* соответственно). Масштаб вертикальной шкалы на всех рисунках одинаковый.

Следует отметить, что вследствие невязимости распространения ПМСВ [17] при выбранном направлении поля  $\mathbf{H}$  смена направления волнового вектора ПМСВ на противоположное приводит к росту потерь на распространение — см. кривую 2 на рис. 1, *a*, отвечающую использованию антенны 2 в качестве входной. Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что смена направления распространения ПМСВ не приводит к изменению частот СВР.

На рис. 1, *b* представлена частотная зависимость  $U(f)$  для случаев подачи СВЧ-мощности на вход 1 или на вход 2 (кривые 3 и 4 соответственно). Видно, что величина ЭДС в частотной области  $\Delta f_1$ , почти на порядок выше, чем в  $\Delta f_2$ . По этой причине будем рассматривать только частотную область  $\Delta f_1$ . Заметим, что наличие слоя 2, обменно-связанного со слоем 1, приводит к увеличению числа СВР в частотной области  $\Delta f_1$  (по сравнению с пленкой ЖИГ такой же толщины), что при изучении генерации ЭДС является полезным, поскольку, как отмечалось выше, вблизи частот СВР генерируемая в полоске платины ЭДС увеличивается [14]. Из сравнения кривых 3 и 4 на рис. 1, *b* видно также, что смена направления распространения ПМСВ (переключение входа с антенны 1 на антенну 2) сопровождается уменьшением величины наводимой ЭДС.

При изменении величины магнитного поля глубина „провалов“ в зависимости  $S_{21}(f)$  осциллировала аналогично [15,16], что сопровождалось изменениями в зависимости  $U(f)$ . Рис. 2 иллюстрирует эти изменения при перестройке величины  $H$  с 572 до 594 Oe. На рис. 2, *a*, отвечающем  $H = 572$  Oe, черной стрелкой помечен резонанс на частоте 3404 MHz (выбранный для наблюдения); красной стрелкой помечен соответствующий ему пик ЭДС. Видно, что глубина „провала“ в зависимости  $S_{21}(f)$  составляет 2 dB, при этом  $U = 296$  nV. При увеличении  $H$  до 579 Oe частота и глубина „провала“ изменяются до 3434 MHz и 10 dB соответственно, при этом величина  $U$  возрастает до 535 nV (рис. 2, *b*). С дальнейшим ростом величины  $H$  глубина „провала“ возрастает до 40 dB, при этом  $U$  уменьшается до 242 nV — см. рис. 2, *c–e*. Таким образом, установлено, что прямой связи величины сигнала ЭДС в рассматриваемой структуре с ростом потерь ПМСВ на частотах резонансного взаимодействия с обменными модами нет.

Для проведения интерференционных измерений уровни ЭДС выравнивались путем уменьшения мощности, поступающей на антенну 1, с помощью аттенюатора. Вид зависимости  $U(f)$  при одновременной подаче СВЧ-мощности на антенны 1 и 2 показан кривой 3 на рис. 1, *b*. На рис. 3, *a* показана часть этой зависимости для произвольной величины разности фаз  $\Delta\phi$  между антеннами, где несколько пиков пронумерованы. Зависимости максимальной величины этих пиков от разности фаз между антеннами  $\Delta\phi$  представлены на рис. 3, *b*. Периодичность этих зависимостей с периодом  $360^\circ$  свидетельствует о том, что изменение



**Рис. 3.** *a* — участок зависимости  $U(f)$  при произвольной величине разности фаз  $\Delta\phi$ ; *b* — зависимость максимальных величин пронумерованных пиков от сдвига фаз между сигналами, поступающими на входные антенны.

уровня сигнала обусловлено интерференцией встречно распространяющихся ПМСВ. При этом видно, что с ростом частоты, сопровождающимся уменьшением длины волны ПМСВ, амплитуда осцилляций пиков 1–3 уменьшается, а максимальная величина помеченной звездочкой пика практически не зависит от  $\Delta\phi$  (см. рис. 3, *b*). С использованием измеренной фазочастотной зависимости были, аналогично [18], определены длины волн ПМСВ  $\lambda$  на частотах пиков 1, 2, 3 и \*, отмеченных на рис. 3, *a*, которые составили 9, 5, 3.7 и 2.5 мм соответственно. Из сопоставления этих величин с длиной датчика  $L = 6$  мм видно, что для амплитуда осцилляций ЭДС при изменении  $\Delta\phi$  существенно уменьшается при  $L > \lambda$ .

### 3. Заключение

Экспериментально исследован эффект генерации ЭДС за счет обратного спинового эффекта Холла при рас-

пространении поверхностных магнитостатических волн в структуре железо-иттриевый гранат–платина на основе двухслойной обменно-связанной пленки ЖИГ с различными намагниченностями насыщения слоев. Показано, что на частотах ПМСВ слоя с большей намагниченностью наблюдаются осцилляции ЭДС, вызванные гибридизацией с обменными модами обоих слоев. Исследовано влияние интерференции встречных ПМСВ на генерируемую ЭДС. Показано, что величина ЭДС чувствительна к разности фаз встречных ПМСВ и осциллирует, при этом амплитуда осцилляций уменьшается с уменьшением длины взаимодействующих волн.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты РФФИ № 20-07-00973, № 20-57-00008 и № 20-07-00968).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] A. Chumak, V. Vasyuchka, A. Serga, B. Hillebrands. *Nature Phys.* **11**, 453 (2015).
- [2] С.А. Никитов, Д.В. Калябин, И.В. Лисенков, А.Н. Славин, Ю.Н. Барабаненков, С.А. Осокин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.А. Морозова, Ю.П. Шараевский, Ю.А. Филимонов, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, В.К. Сахаров, Е.С. Павлов. *УФН* **185**, 1099 (2015).
- [3] A. Khitun, M. Bao, K.L. Wang. *J. Phys. D* **43**, 264005 (2010).
- [4] A. Mahmoud, F. Ciubotaru, F. Vanderveken, A.V. Chumak, S. Hamdioui, C. Adelman, S. Cotofana. *J. Appl. Phys.* **128**, 161101 (2020).
- [5] Ю.В. Хивинцев, А.В. Кожевников, В.К. Сахаров, Г.М. Дудко, Ю.А. Филимонов, А. Khitun. *ЖТФ* **89**, 1712 (2019).
- [6] F. Gertz, A. Kozhevnikov, Y. Filimonov, A. Khitun. *IEEE Trans. Magn.* **51**, 1 (2014).
- [7] G. Csaba, A. Papp, W. Porod. *J. Appl. Phys.* **115**, 17C741 (2014).
- [8] D. Gutierrez, H. Chiang, T. Bhowmick, A.D. Volodchenkov, M. Ranjbar, G. Liu, C. Jiang, C. Warren, Y. Khivintsev, Y. Filimonov, J. Garay, R. Lake, A.A. Balandin, A. Khitun. *J. Magn. Magn. Mater.* **428**, 348 (2017).
- [9] Y. Khivintsev, M. Ranjbar, D. Gutierrez, H. Chiang, A. Kozhevnikov, Y. Filimonov, A. Khitun. *J. Appl. Phys.* **120**, 123901 (2016).
- [10] K. Ando, J. Ieda, K. Sasage, S. Takahashi, S. Maekawa, E. Saitoh. *Appl. Phys. Lett.* **94**, 262505 (2009).
- [11] L. Feiler, K. Sentker, M. Brinker, N. Kuhlmann, F.-U. Stein, G. Meier. *Phys. Rev. B* **93**, 064408 (2016).
- [12] A.V. Chumak, A.A. Serga, M.B. Jungfleisch, R. Neb, D.A. Bozhko, V.S. Tiberkevich, B. Hillebrands. *Appl. Phys. Lett.* **100**, 082405 (2012).

- [13] M. Balinskiy, H. Chiang, D. Gutierrez, A. Khitun. Appl. Phys. Lett. **118**, 242402 (2021).
- [14] М.Е. Селезнев, Ю.В. Никулин, В.К. Сахаров, Ю.В. Хивинцев, А.В. Кожевников, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов. ЖТФ **91**, 1504 (2021).
- [15] С.Л. Высоцкий, Г.Т. Казаков, А.В. Маряхин, Ю.А. Филимонов, А.С. Хе. Письма в ЖЭТФ **61**, 693 (1995).
- [16] С.Л. Высоцкий, Г.Т. Казаков, А.В. Маряхин, Ю.А. Филимонов, А.С. Хе. ФТТ **38**, 407 (1996).
- [17] А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков. Магнитные колебания и волны. Физматлит, М. (1994). 464 с.
- [18] W. Schilz. Philips Res. Rep. **28**, 50 (1973).

*Редактор Е.Ю. Флегонтова*