

07.4

## **Фильтрация поверхностных магнитостатических волн в пленках железо-иттриевого граната переменной ширины при возбуждении фокусирующими преобразователями**

© А.В. Кожевников<sup>1</sup>, Ю.В. Хивинцев<sup>1,2,¶</sup>, Г.М. Дудко<sup>1</sup>,  
В.К. Сахаров<sup>1</sup>, А.С. Джумалиев<sup>1,2</sup>, С.Л. Высоцкий<sup>1,2</sup>,  
А.В. Стальмахов<sup>2</sup>, Ю.А. Филимонов<sup>1-3</sup>

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

<sup>1</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

<sup>3</sup> Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

¶ E-mail: khivintsev@gmail.com

Поступило в Редакцию 17 января 2018 г.

Исследована фильтрация поверхностных спиновых волн в пленках железо-иттриевого граната переменной ширины при возбуждении фокусирующими преобразователями, интегрированными с пленкой.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.16.46470.17216

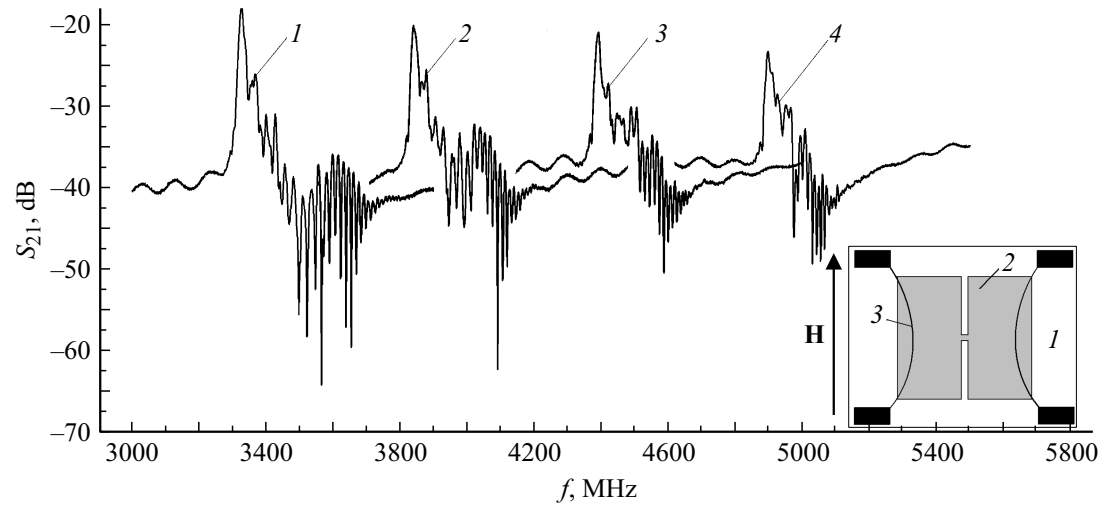
В последнее время наблюдается всплеск интереса к формированию и управлению параметрами волновых пучков спиновых волн (СВ) за счет искусственно созданных магнитных неоднородностей в пленочных волноведущих структурах [1–3]. Этот интерес во многом

обусловлен успехами в разработке технологий индукционных микроантенн спиновых волн и их интеграцией с пленочными волноводами [4,5], а также развитием методов сканирующей с пространственно-временным разрешением оптической спектроскопии, основанных на эффектах Мандельштама–Бриллюэна [6] и Керра [7]. Эти возможности и появление численных методов [8], позволяющих адекватно описывать результаты экспериментов, позволили проанализировать механизм генерации СВ в пленке железо-иттриевого граната (ЖИГ) в окрестности вытравленного отверстия в условиях однородной СВЧ-накачки [9]. Было также показано, что одномерные цепочки из таких отверстий позволяют формировать в пленке узконаправленные волновые пучки [10]. Однако подходам к использованию магнитных неоднородностей для фильтрации волновых пучков СВ в магнитных микро- и наноструктурах уделялось гораздо меньше внимания. Между тем хорошо известно [11–14], что при возбуждении СВ фокусирующими преобразователями положение фокуса из-за наличия дисперсии СВ является частотно-зависимым. Если в фокальной плоскости излучателя создается неоднородность, способная пропускать волну на частоте фокусировки и рассеивать остальные волны, то за щелью будет приниматься лишь узкий спектр частот [15]. Цель настоящей работы — исследовать фильтрацию поверхностных спиновых волн (ПСВ) в пленках ЖИГ переменной ширины при возбуждении фокусирующими преобразователями. Исследовалось распространение ПСВ в двух типах структур, изготовленных на основе пленки ЖИГ толщиной  $d \approx 5 \mu\text{m}$  (показаны на вставках к рис. 1 и 2). Структуры первого типа (I) представляли собой прямоугольные пленки с двумя симметричными прорезями, между которыми оставался узкий перешеек (см. вставку на рис. 1). Структуры второго типа (II) имели форму, напоминающую песочные часы (см. вставку на рис. 2). Изготовление структур происходило следующим образом. На поверхность эпитаксиальной пленки ЖИГ на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) после стандартной очистки в ацетоне и изопропанолу и отжига в вакууме при  $350^\circ\text{C}$  в течение 15 min методом высокочастотного магнетронного распыления наносился слой диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) толщиной  $\sim 170 \text{ nm}$ . Далее на поверхности образца с помощью позитивной фотолитографии формировался рисунок из резиста в форме структур типов I и II. Затем пленка подвергалась ионному травлению, что приводило к удалению пленки  $\text{SiO}_2$  с участков структуры, не защищенных резистом. После этого с поверхности образца смывались

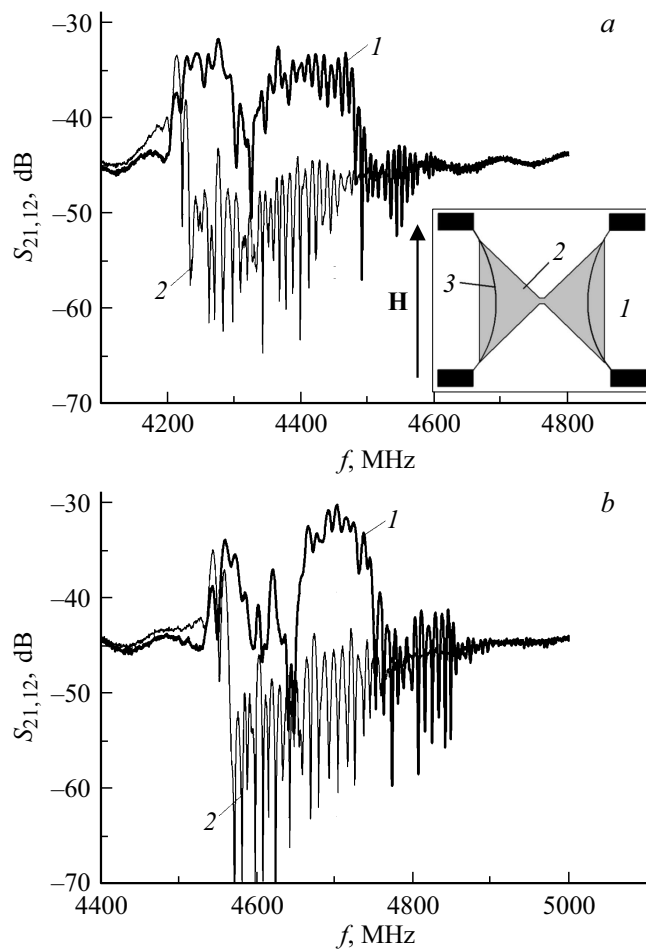
остатки фоторезиста средством Remover AZ100 и осуществлялось химическое травление в ортофосфорной кислоте, в результате которого с не защищенных окислом  $\text{SiO}_2$  участков образца удалялся слой ЖИГ. Для изготовления фокусирующих преобразователей на образец методом магнетронного распыления наносился слой меди толщиной  $\sim 1 \mu\text{m}$ . После этого методом фотолитографии на поверхности формировался рисунок из резиста в форме требуемых антенн. С помощью последующего ионного травления с не защищенных резистом участков удалялась медь. Завершающей стадией изготовления являлось удаление остатков резиста с поверхности сформированных антенн шириной  $30\text{--}35 \mu\text{m}$ . Длина каждой из структур составляла  $3.5 \text{ mm}$ , а ширина —  $3 \text{ mm}$ . Длина перешейка для структур типов I и II была равна  $\sim 80$  и  $50 \mu\text{m}$  соответственно. Ширина перешейка в обоих случаях составляла  $\sim 90 \mu\text{m}$ . Форма преобразователей рассчитывалась с использованием подхода [16], при котором с помощью пакета OOMMF [8] проводилось микромагнитное моделирование распространения СВ в рассматриваемой структуре при возбуждении на некоторой заданной частоте  $f$ , находящейся в пределах спектра ПСВ, точечным источником, помещенным в центр структуры, касательно намагниченной в заданном поле  $H$ . При этом форма волнового фронта в плоскости структур отвечала форме фокусирующего преобразователя. После оцифровки данная форма переносилась на фотошаблон, который использовался при изготовлении фокусирующих антенн так, как описано выше. В рассматриваемых здесь экспериментах использовались преобразователи, рассчитанные для частоты  $f = 4.74 \text{ GHz}$  и поля подмагничивания  $H = 1 \text{ kOe}$ .

Измерения спектров передачи  $S_{12}(f)$  и  $S_{21}(f)$  структур проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent E5071C в диапазоне частот  $3\text{--}6 \text{ GHz}$ . Касательное по отношению к образцу магнитное поле  $H$  создавалось электромагнитом и могло меняться в диапазоне  $\pm 2 \text{ kOe}$ .

На рис. 1 и 2 приведены экспериментальные данные для структур двух типов при возбуждении антеннами, рассчитанными для частоты  $f$ . Из рис. 1 можно видеть, что для структуры типа I наблюдается прохождение лишь в узкой полосе частот вблизи длинноволновой границы ПСВ. При этом вид спектра передачи  $S_{12}(f)$  практически не меняет своего характера при изменении поля подмагничивания  $H$  от  $500$  до  $1200 \text{ Oe}$ . Последнее указывает на то, что в рассматриваемом случае структуры типа I на параметрах полосы фильтрации никак не сказывается эффект хроматической аберрации фокусирующих преобразователей.



**Рис. 1.** Амплитудно-частотные характеристики  $S_{21}(f)$  макета со структурой типа I при различных значениях магнитного поля.  $H$ , Ое: 1 — 568, 2 — 718, 3 — 884, 4 — 1041. На вставке показаны вид структуры и направление магнитного поля, цифрами обозначены подложка ГГ (1), пленка ЖИГ (2), преобразователи с контактными площадками (3).



**Рис. 2.** Частотные зависимости параметров  $S_{21}(f)$  (1) и  $S_{12}(f)$  (2) структуры типа II при различной величине магнитного поля.  $H$ , Oe:  $a$  — 834,  $b$  — 935,  $c$  — 1057,  $d$  — 1247. На вставке показаны вид структуры и направление магнитного поля, обозначения те же, что на вставке к рис. 1.

Для структуры типа II эффект частотной зависимости положения фокальной плоскости преобразователей проявлялся гораздо ярче

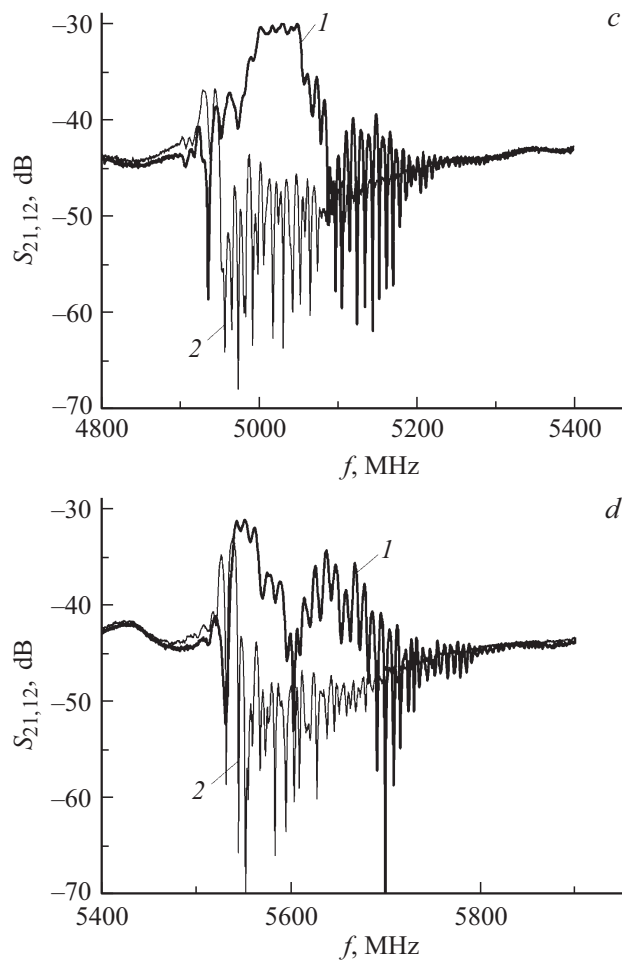


Рис. 2 (продолжение).

(рис. 2). Из сравнения вида спектров передачи  $S_{21}(f)$ , измеренных при разных значениях поля подмагничивания, можно видеть, что при значении поля подмагничивания  $H \approx 1.057$  кОе в полосе частот  $\Delta f \approx 4.95\text{--}5.05$  GHz амплитудно-частотная характеристика макета при-

нимает вид полосно-пропускающего фильтра (см. кривую  $I$  на рис. 2, *с*). Сравнение характеристик  $S_{12}(f)$  и  $S_{21}(f)$  показывает их существенное различие, что является следствием не взаимности распространения ПСВ [17]. Следует отметить, что, хотя величина поля подмагничивания, отвечающая результатам измерений  $S_{21}(f)$  на рис. 2, *с*, достаточно близка к использованному при расчетах значению  $H = 1$  кОе, полоса фильтрации  $\Delta f$  смещена относительно расчетной частоты фокусировки  $f = 4.74$  GHz. Отмеченное расхождение, а также отсутствие заметного проявления частотной зависимости положения фокальной плоскости фокусирующих преобразователей в спектрах передачи  $S_{12}(f)$  структуры типа I следует связать с отклонением геометрических параметров использованных в эксперименте структур от расчетных.

Таким образом, исследовано распространение поверхностных спиновых волн в пленке ЖИГ переменной ширины в условиях возбуждения и приема фокусирующими преобразователями. Показано, что в таких структурах может наблюдаться фильтрация сигнала на частотах, при которых фокальная плоскость преобразователя находится в области наименьшей ширины (перешейка) рассматриваемых структур.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-07-01092).

## Список литературы

- [1] Никитов С.А., Калябин Д.Б., Лисенков И.В., Славин А.Н., Барабаненков Ю.Н., Осокин С.А., Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Морозова М.А., Шараевский Ю.П., Филимонов Ю.А., Хивинцев Ю.В., Высоцкий С.Л., Сахаров В.К., Павлов Е.С. // УФН. 2015. Т. 185. № 10. С.1099–1128.
- [2] Neusser S., Grundler D. // Adv. Mater. 2009. V. 21. N 28. P. 2927–2932.
- [3] Krawczyk M., Grundler D. // J. Phys.: Condens. Matter. 2014. V. 26. N 12. P. 123202.
- [4] Khivintsev Y.V., Filimonov Y.A., Nikitov S.A. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. N 5. P. 052407.
- [5] Yu H., d'Allivy Kelly O., Cros V., Bernard R., Bortolotti P., Anane A., Brandl F., Huber R., Stasinopoulos I., Grundler D. // Sci. Rep. 2014. V. 4. P. 6848.
- [6] Jorzick J., Demokritov S.O., Hillebrands B., Baileul M., Fermon C., Guslienko K., Slavin A.N. // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. N 4. P. 047204.
- [7] Hicken R.J., Barman A., Kruglyak V.V., Ladak S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. V. 36. N 18. P. 2183–2192.
- [8] Donahue M., Porter D. // [www.math.nist.gov/oommf/](http://www.math.nist.gov/oommf/)

- [9] *Davies C.S., Sadovnikov A.V., Grishin S.V., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A., Kruglyak V.V.* // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 107. N 16. P. 162401.
- [10] *Gieniusz R., Gruszecki P., Krawczyk M., Guzowska U., Stognij A., Maziewski A.* // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 8771.
- [11] *Вашковский А.В., Гречушкин К.В., Стальмахов А.В., Тюлюкин В.А.* // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 4. С. 838–840.
- [12] *Вашковский А.В., Гречушкин К.В., Стальмахов А.В., Тюлюкин В.А.* // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 6. С. 1176–1183.
- [13] *Вашковский А.В., Стальмахов А.В., Шахназарян Д.Г.* // Изв. вузов. Физика. 1988. № 11. С. 67–75.
- [14] *Стальмахов А.В.* Распространение волновых пучков магнитостатических волн в тонкопленочных структурах. Автореф. докт. дис. М.: Ин-т радиотехники и электроники РАН, 1992. 35 с.
- [15] *Вашковский А.В., Гречушкин К.В., Казаков Г.Т., Стальмахов А.В., Тюлюкин В.А.* Полосно-пропускающий фильтр. А.с. 1329525 (СССР). 1985.
- [16] *Dudko G., Stalmakhov A., Kozhevnikov A., Khivintsev Y., Sakharov V., Filimonov Y.* Form of focusing magnetostatic wave emitter modeled by micromagnetic simulations // Moscow Int. Symp. on magnetism. Book of Abstracts. M.: PRINTLETO, 2017. P. 221.
- [17] *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.