

05,13

Распространение спиновых волн в композитной структуре YIG/FeRh в виде системы связанных микроволноводов

© Е.И. Саломатова, С.А. Одинцов, В.К. Сахаров, Ю.В. Хивинцев, А.А. Амиров, А.В. Садовников

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
Саратов, Россия

E-mail: e.salomatova2016@yandex.ru

Поступила в Редакцию 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2022 г.

Принята к публикации 12 мая 2022 г.

Продемонстрирована возможность реализации режимов управления характеристиками спиновых волн (СВ) в системе латеральных магнанных волноводов, выполненных из железо-иттриевого граната (YIG, ЖИГ) за счет изменения характеристик антиферромагнитного слоя железо-родия (FeRh), расположенного над данными волноводами. В частности, показано, что с помощью изменения геометрических параметров и намагниченности слоя FeRh можно осуществлять управление амплитудой и фазой СВ, распространяющихся в латеральных микроволноводах. Выявлены режимы, при которых на амплитудно-частотных характеристиках (АЧХ) коэффициента прохождения появляются провалы, связанные с перераспределением мощности СВ, при этом их положением можно управлять с помощью изменения свойств слоя FeRh. Полученные результаты могут быть использованы для создания на основе предлагаемой структуры демультиплексоров и ответвителей СВЧ-сигнала.

Ключевые слова: спиновые волны, антиферромагнетик, магнаника, латеральные структуры.

DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52816.12NN

1. Введение

В последнее время стремительно развивается новое направление в исследовании спин-волновых процессов в нерегулярных микро- и наноразмерных магнитных структурах — магнаника [1]. Основными достоинствами устройств магнаники являются возможные малые размеры, малые джоулевы потери и, как следствие, низкое энергопотребление. Изучение свойств структур, основанных на принципах магнаники, открывает новые возможности для создания миниатюрных устройств передачи, хранения и обработки информационных сигналов в СВЧ-диапазоне [2,3].

При изготовлении структур магнаники используются пленки ферромагнитных материалов, в первую очередь, пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), демонстрирующие рекордно низкие величины затухания СВ. Среди прочих структур на основе ЖИГ, активно изучаются системы из латеральных магнитных волноводов, используемых в качестве фильтрующих элементов в магнанных сетях. В таких структурах спиновые волны оказываются связанными за счет дипольных полей, образующихся на границах микроволноводов, при этом в системе могут реализоваться как линейные, так и нелинейные режимы распространения СВ. При этом ввиду ограничения по ширине в каждом отдельно взятом микроволноводе спектр СВ представляет собой набор ширинных мод, вследствие дискретных значений поперечных волновых чисел, определенных шириной волновода. Так в системе может реализоваться режим межмодовой спин-волновой связи в планарной топологии. Исследование нелинейных

режимов распространения связанных СВ в подобных микроволноводах является важным ввиду возможности использования таких структур в устройствах обработки информационного сигнала, таких как полусумматоры [4]. Также подобная структура представляет собой модельную систему для нелинейной физики диссипативных систем в целом [5].

Отдельный интерес представляют исследования способов управления характеристиками СВ в таких структурах. Одним из методов такого управления является создание композитной структуры, в которой за счет использования свойств добавляемого компонента (области, слоя) удастся изменять режим работы. Путем использования сегнетоэлектрических или пьезоэлектрических слоев оказывается возможным реализовать режим управления характеристиками связи СВ в латеральных микрополосках ЖИГ [6,7].

В последнее время антиферромагнитные материалы рассматриваются как один из потенциальных элементов для устройств магнаники [8]. Так, в частности, активно изучаются сплавы на основе FeRh [9,10], имеющие высокую намагниченность в ферромагнитной фазе при небольших температурах, а также обладают значительным магнитоэлектрическим, пироэлектрическим и пьезоэлектрическим эффектами, возникающими вблизи метамагнитного фазового перехода 1-го рода.

В настоящей работе проведено исследование режимов управления связью спиновых волн на основе композитной структуры, реализованной на основе латеральных ЖИГ микрополосок с расположенным над ними слоем FeRh. При этом за счет сфокусированного на слое FeRh

лазерного излучения в системе реализуется механизм переключения спин-волнового сигнала, который наблюдается как перераспределение мощности СВ между латеральными полосками.

2. Исследуемые структуры и методика численного моделирования

На рис. 1 продемонстрировано схематическое изображение исследуемой структуры, состоящей из двух микрополосок (S_1 и S_2), сориентированных вдоль направления оси x и связанных через боковую стенку, и расположенного поперек сверху слоя FeRh. Латеральный зазор между боковыми стенками микроволноводов S_1 и S_2 $\Delta w = 40 \mu\text{m}$. Каждая микрополоска представляет собой волновод длиной $d_1 = 7000 \mu\text{m}$, шириной $w_1 = 200 \mu\text{m}$ и толщиной $h_1 = 10 \mu\text{m}$. В качестве материала для микроволноводов при численном моделировании был использован железо-иттриевый гранат (YIG) $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [11] с намагниченностью насыщения $M_0 = 139 \text{ G}$ и шириной линии ферромагнитного резонанса $\Delta H = 0.54 \text{ Oe}$. Слой FeRh расположен в центре структуры над S_1 и S_2 и имеет размеры: длина d_2 варьируется от 50 до $150 \mu\text{m}$, ширина $w_2 = 440 \mu\text{m}$, высота $h_2 = 10 \mu\text{m}$. Намагниченностью материала FeRh в ферромагнитном состоянии $M_{fr} = 215 \text{ G}$, величиной намагниченности можно управлять с помощью нагрева, вблизи комнатной температуры.

Структура помещалась во внешнее статическое магнитное поле $H_0 = 1200 \text{ Oe}$ в направлении оси y для эффективного возбуждения поверхностных магнитоэлектрических волн (ПМСВ). В такой конфигурации на входную антенну P_{in} , расположенную на S_1 , подавался СВЧ-сигнал. В данной геометрии вдоль микрополосок оказывалось возможным возбуждение и управление ПМСВ [12,13]. Прием сигнала осуществлялся выходными антеннами P_1, P_2 и P_3 на S_1 и S_2 соответственно.

С помощью вибрационного магнитометра (VSM) VM-2 [14] были экспериментально измерены петли гистерезиса, из которых определены значения намагниченности сплава FeRh. Измерения проводятся по следующей схеме. Исследуемый образец был помещен в однородное магнитное поле и приводился в колебательное движение с постоянной частотой и амплитудой. В ходе эксперимента магнитное поле колеблющегося образца создавало в расположенных поблизости измерительных катушках переменное напряжение, пропорциональное магнитному моменту образца. Сигнал с измерительных катушек регистрировал зависимость магнитного момента от намагничивающего поля. Таким образом, оказывается возможным получение кривой намагничивания слоя FeRh, из которой видно, что при поле 1200 Oe намагниченность слоя FeRh составляла значение $M_{fr} = 215 \text{ G}$ при температуре $T = 300 \text{ K}$.

Путем решения системы уравнений Максвелла методом конечных элементов в программном продукте

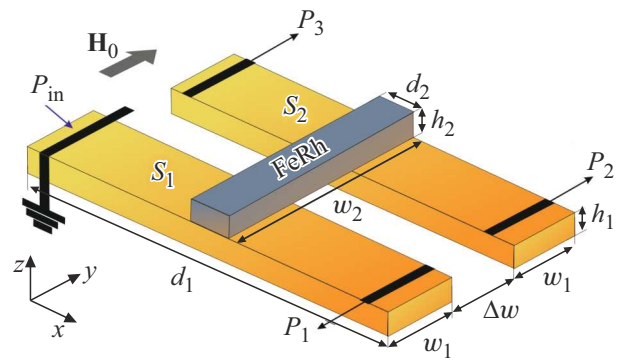


Рис. 1. Изображение исследуемой структуры.

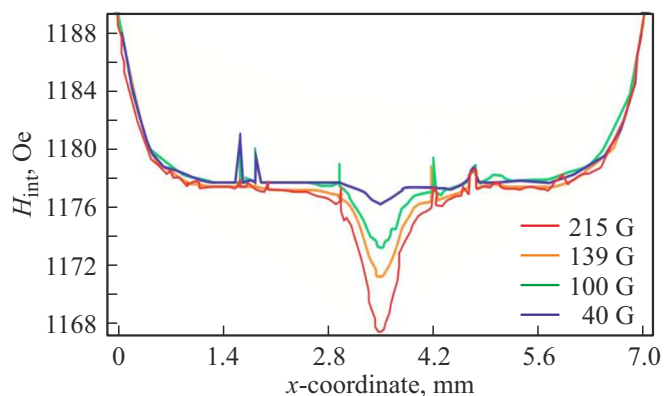


Рис. 2. График распределения величины внутреннего магнитного поля ЖИГ вдоль оси x при различных значениях намагниченности слоя FeRh M_{fr} .

COMSOL Multiphysics был проведен расчет пространственных зависимостей величины внутреннего магнитного поля $H_{int}(x)$ внутри микрополоски S_1 (тоже для S_2) при различной степени нагрева слоя FeRh, то есть, изучена степень влияния намагниченности слоя M_{fr} (рис. 2). В данном случае моделирование проводилось в частотной области и полагали, что все компоненты электромагнитного поля зависят от частоты по закону $e^{i\omega t}$. В этом случае из уравнений Максвелла для вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} следует известное уравнение второго порядка:

$$\nabla \times (\hat{\mu}^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k^2 \epsilon \mathbf{E} = 0,$$

где $k = \omega/c$ — волновое число в вакууме, $\omega = 2\pi/f$ — круговая частота, f — частота электромагнитной волны, ϵ — эффективное значение диэлектрической проницаемости. При этом тензор магнитной проницаемости для касательного намагничивания имеет вид

$$\hat{\mu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu(f) & i\mu_a(f) \\ 0 & i\mu_a(f) & \mu(f) \end{pmatrix},$$

$$\mu(f) = \frac{-f_H(f_n + f_M) - f^2}{f_H^2 - f^2},$$

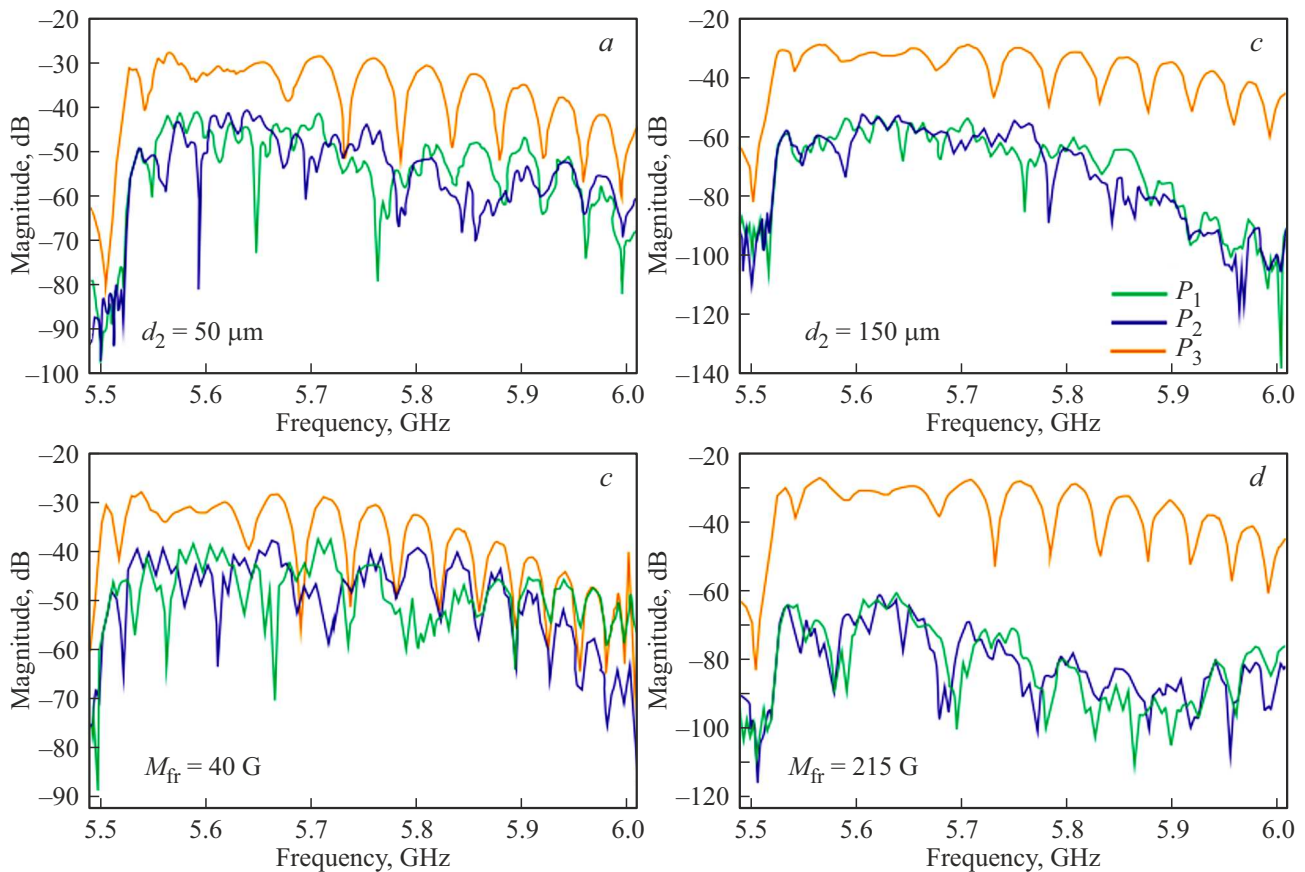


Рис. 3. Полученные методом микромагнитного моделирования АЧХ, снятые с портов P_1 , P_2 и P_3 . При изменении длины d_2 (a). При изменении намагниченности слоя M_{fr} (b).

$$\mu_a(f) = \frac{f_M f}{f_H^2 - f^2},$$

где $f_M = \gamma 4\pi M_0$, $f_M = \gamma H_{int}(x)$, γ — гиромагнитное отношение.

Изменение намагниченности слоя FeRh может происходить, например, за счет воздействия лазерного излучения разной интенсивности. На оси абсцисс на рис. 2 отложено значение координаты x в диапазоне $0 < x < d_1$. Из анализа профилей $H_{int}(x)$ следует вывод, что при увеличении намагниченности M_{fr} в месте нахождения слоя FeRh с S_1 и S_2 наблюдается сильное уменьшение величины внутреннего магнитного поля, образовавшийся провал увеличивается в размере при увеличении M_{fr} . Изменение величины внутреннего поля сопровождается изменением спектра ПМСВ, а также коэффициента связи СВ, распространяющихся вдоль латеральных микроволноводов. Также стоит отметить, что увеличение величины внутреннего поля вблизи краев расчетной области в интервале $0 < x < 1 \text{ mm}$ и $6 < x < 7 \text{ mm}$ вызвано особенностями численной модели и не сказывается на данных, полученных далее при решении задачи о распространении спиновой волны. Поскольку в этих областях были созданы регионы с повышенным значением постоянной затухания для уменьшения отражения спиновой волны от границ структуры.

Было проведено численное микромагнитное моделирование (ММ) в программе MuMax3 [15] на основе численного решения уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта [16,17]. Метод ММ позволяет численно решить задачу о возбуждении и распространении СВ в системе латеральных микроволноводов с нагрузкой из FeRh. Определяя область возбуждения и параметры входного сигнала в системе можно наблюдать стационарный режим установления волнового процесса. Для определения режимов управления работой исследуемой структуры был проведен расчет передаточных характеристик в областях, соответствующих каждой из выходных антенн (P_1 , P_2 , P_3). На рис. 3, a, b продемонстрированы частотные зависимости спектральной плотности мощности спин-волнового сигнала в исследуемой композитной структуре при двух способах управления за счет слоя FeRh, а именно при изменении длины d_2 и намагниченности M_{fr} , соответственно. Расчеты выполнены методом ММ при возбуждении P_{in} импульсным сигналом и проведением преобразования Фурье. На рис. 4 синим, зеленым и оранжевым отмечены частотные зависимости сигнала для областей выходных антенн P_1 , P_2 и P_3 структур S_1 и S_2 соответственно. Из рис. 3, a видно, что при постоянном значении намагниченности $M_{fr} = 139 \text{ G}$ (равна намагниченности ЖИГ) и выборе длины $d_2 = 150 \mu\text{m}$ значение амплитуды на P_1 и P_2

уменьшилось на 20 dB, а на P_3 не изменилось. На рис. 3, *b* можем наблюдать, что с увеличением M_{fr} происходит аналогичная ситуация, так же на портах P_1 и P_2 амплитуда падает, но уже значительно больше при $M_{fr} = 215$ G. При больших значениях намагниченности сигнал перенаправляется на P_3 . Важно отметить, что частотами провалов можно управлять, подбирая параметры слоя FeRh, что может быть использовано для пространственно-частотной селекции сигнала, подаваемого на вход P_{in} структуры.

3. Заключение

Таким образом, в настоящей работе проведено численное исследование распространения СВ в композитной структуре ЖИГ/FeRh в виде системы связанных микроволноводов. Показано, что изменяя характеристики антиферромагнетика FeRh, расположенного над латеральными микроволноводами, можно модулировать распространение СВ, в частности, перенаправлять спин-волновой сигнал на один выход. Свойства сплава Fe₄₈Rh₅₂ позволяют осуществлять несколько путей управления. Эффекты управления режимами пространственно-частотного разделения сигнала в композитной системе ЖИГ/FeRh позволяют создавать ответвители и делители мощности спин-волнового сигнала в планарных топологиях магнетонных сетей для селективной обработки информационных сигналов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRR-2020-0005).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.А. Никитов, Д.В. Калябин, И.В. Лисенков, А.Н. Славин, Ю.Н. Барабаненков, С.А. Осокин, А.В. Садовников, Е.Н. Бехинин, М.А. Морозова, Ю.П. Шараевский, Ю.А. Филимонов, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, В.К. Сахаров, Е.С. Павлов. УФН **58**, 1002 (2015).
- [2] А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов. УФН **61**, 1175 (2018).
- [3] A.V. Sadovnikov, S.A. Nikitov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharaevskii, A.I. Stognij, N.N. Novitski, V.K. Sakharov, Yu.V. Khivintsev. Phys. Rev. **99**, 054424 (2019).
- [4] Q. Wang, M. Kewenig, M. Schneider, R. Verba, F. Kohl, B. Heinz, M. Geilen, M. Mohseni, B. Lagel, F. Ciubotaru, C. Adelman, C. Dubs, S.D. Cotozana, O.V. Dobrovolskiy, T. Bracher, P. Pirro, A.V. Chumak. Nature Electron **3**, 765 (2020).
- [5] A.V. Sadovnikov, S.A. Odintsov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. Phys. Rev. B **96**, 144428 (2017).
- [6] A.V. Sadovnikov, A.A. Grachev, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. Phys. Rev. Appl. **7**, 014013 (2017).
- [7] A.V. Sadovnikov, A.A. Grachev, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharaevskii, A.A. Serdobintsev, D.M. Mitin, S.A. Nikitov. Phys. Rev. Lett. **120**, 257203 (2018).
- [8] A.R. Safin, S.A. Nikitov, A.I. Kirilyuk, D.V. Kalyabin, A.V. Sadovnikov, P.A. Stremoukhov, M.V. Logunov, P.A. Popov. J. Exp. Theor. Phys. **131**, 71 (2020).
- [9] A.A. Amirov, V.V. Rodionov, I.A. Starkov, A.S. Starkov, A.M. Aliev. J. Magn. Magn. Mater. **470**, 77 (2019).
- [10] A.A. Amirov, A.S. Starkov, I.A. Starkov, A.P. Kamantsev, V.V. Rodionov. Lett. Mater. **8**, 3, 353 (2018).
- [11] V. Cherepanov, I. Kolokolov, V. Lvov. Phys. Rep. **229**, 81 (1993).
- [12] R. Damon, J. Eshbach. J. Phys. Chem. Solids **19**, 308 (1961).
- [13] S.N. Bajpai. J. Appl. Phys. **58**, 910 (1985).
- [14] S. Foner. IEEE Trans. Magn. MAG **17**, 3358 (1981).
- [15] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B.V. Waeyenberge. AIP Advances **4**, 107133 (2014).
- [16] L. Landau, E. Lifshitz. Phys. Z. Sowj **8**, 153 (1935).
- [17] T.L. Gilbert, J.M. Kelly. American Institute of Electrical Engineers (1955). С. 253.

Редактор Т.Н. Василевская