

Интерференция спиновых волн в решетках из микроволноводов на основе пленок железо-иттриевого граната

© Ю.В. Хивинцев,^{1,2} А.В. Кожевников,¹ В.К. Сахаров,¹ Г.М. Дудко,¹ Ю.А. Филимонов,^{1,2} А. Khitun³

¹ Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 410019 Саратов, Россия

² Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 140012 Саратов, Россия

³ Department of Electrical and Computer Engineering, University of California-Riverside, 92521 Riverside, California, USA
e-mail: yuri.a.filimonov@gmail.com

Поступило в Редакцию 28 марта 2019 г.

В окончательной редакции 28 марта 2019 г.

Принято к публикации 15 апреля 2019 г.

Экспериментально и численно исследованы эффекты распространения и интерференции спиновых волн в 8-ми портовой магнотонной структуре в виде решетки 2×2 из микроволноводов на основе пленок железо-иттриевого граната с расположенными на концах волноводов микроантеннами. Показано, что изменением фазы входных сигналов могут быть реализованы условия конструктивной и деструктивной интерференции спиновых волн на выходных преобразователях, что необходимо для создания устройств спин-волновой логики.

Ключевые слова: спиновая логика, интерференция спиновых волн, магнотонные сети, микроволноводы спиновых волн.

DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48333.118-19

Введение

Эффекты интерференции спиновых волн (СВ) в волноводных структурах на основе тонких магнитных пленок представляют интерес с точки зрения создания энергоэффективных логических устройств [1–14], голографической памяти [15–17], сигнальных процессоров [18,19], вычислений простых делителей числа N [20], характеристики магнитных микрочастиц [21], конвертации спин-волновых мод [22] и магнитных сенсоров [23]. Основным элементом таких устройств является спин-волновой интерферометр, где результатом интерференции двух или более СВ могут являться в зависимости от фазы волн конструктивная или деструктивная интерференция [1–3]. Были предложены разнообразные конструкции интерферометров: типа Маха–Цендера [4–8], на основе Ψ -образных волноводов [9–11], а также на основе двух (крестах) и более (решетках) [12–17] ортогональных волноводов, где для возбуждения и приема СВ использовались индукционные антенны. Результаты микромагнитного моделирования распространения СВ в таких структурах показывают [6,10–12], что размеры интерферометров могут составлять единицы микрон при использовании СВ с длиной волны $\lambda \leq 100$ nm. На практике СВ интерферометры изготавливаются на основе пленок железоиттриевого граната (ЖИГ), полученных методом жидкофазной эпитаксии [4,5,11,13–17] и ферромагнитных металлов (ФМ) [8,12,22], полученных магнетронным распылением. Благодаря развитости технологий изготовления и наноструктуризации пленок ФМ на

их основе удалось создать интерферометры с размерами от нескольких сотен [8,22] до десятка [12] микрон, тогда как размеры экспериментально исследованных ЖИГ-интерферометров лежали до сих пор в области миллиметров [11,13–17]. В настоящей работе приведены результаты экспериментов и микромагнитного моделирования эффектов распространения и интерференции СВ в решетке 2×2 из микроволноводов на основе пленок ЖИГ с плоскостными размерами, типичными для интерферометров на основе пленок ФМ.

1. Исследуемые структуры и методика измерений

Исследуемая структура изображена на рис. 1. Структура изготавливалась из пленки ЖИГ, выращенной эпитаксиально на подложке гадолиний галлиевого граната с кристаллографической ориентацией (111). Используемая пленка ЖИГ обладала следующими параметрами: толщина $d \approx 1 \mu\text{m}$, намагниченность насыщения $4\pi M \approx 1750$ G, ширина линии ферромагнитного резонанса (ФМР) $\Delta H \approx 0.5$ Oe. С применением методов фотолитографии и ионного травления изготавливалась решетка 2×2 из микроволноводов (МКВ) шириной $w \approx 10 \mu\text{m}$ и длиной $L \approx 100 \mu\text{m}$. Расстояние между параллельными МКВ составляло $l_{C2} \approx 30 \mu\text{m}$. Участки от узлов решетки до концов МКВ имели длину $l_{C1} \approx 35 \mu\text{m}$.

Для возбуждения и приема СВ методами фотолитографии и магнетронного распыления на концах микро-

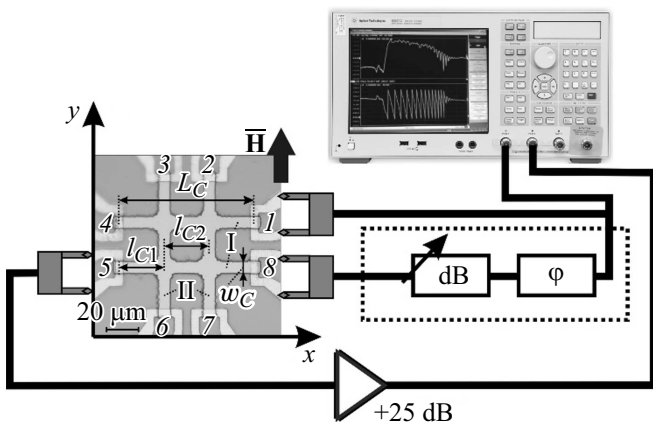


Рис. 1. Исследуемая структура и блок-схема измерительной установки. Пунктиром выделена часть блок-схемы, которая добавлялась при исследовании интерференции СВ в решетке.

волноводов изготавливались микрополосковые антенны шириной $b \approx 5 \mu\text{m}$ и длиной $\approx 14 \mu\text{m}$. На рис. 1 антенны обозначены цифрами 1–8. Расстояние от середины антенны до ближайшего края МКВ составляло $\approx 5 \mu\text{m}$.

Исследование эффектов распространения СВ в структуре проводилось с помощью векторного анализатора цепей и СВЧ зондовой станции в интервале частот 1–7 GHz (рис. 1). Макет помещался между полюсами электромагнита так, что поле H лежало в плоскости структуры и было направлено параллельно антеннам 1, 8, 4, 5, расположенным на концах волноводов, обозначенных I. При этом для волноводов, обозначенных II, внешнее поле H было направлено вдоль оси волноводов. Измерялись амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и фазочастотные характеристики (ФЧХ) коэффициентов передачи между входной (с номером i) и выходной (с номером j) антеннами S_{ji} , при различной величине поля подмагничивания $H = 120\text{--}1322$ Ое. Ниже обсуждаются результаты, полученные при $H \approx 550$ Ое для случая, когда в качестве входной антенны бралась антенна с номером 1.

2. Спектры передачи решетки микроволноводов: результаты измерений и микромагнитного моделирования

На рис. 2, *a* приведены спектры передачи S_{j1} ($j = 2, 8$) в рассматриваемой решетке 2×2 . На рис. 2, *b* приведены спектры передачи отдельных волноводов шириной $w \approx 10 \mu\text{m}$ и длиной $L \approx 100 \mu\text{m}$, намагниченных поперечно и продольно в поле $H \approx 550$ Ое. Отметим, что в волноводе, намагниченном продольно, распространяются обратные объемные магнитостатические волны (ООМСВ), а при поперечном намагничивании — поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ) [24]. Следовательно, результаты измерений на рис. 2, *a* от-

вечают случаю, когда входной преобразователь 1 возбуждал, а преобразователи 4, 5, 8 принимали ПМСВ в магнотной сети. При этом ориентация антенн 2, 3, 6, 7 отвечает эффективному приему ООМСВ.

Из сравнения спектров передачи магнотной сети и отдельных волноводов можно видеть, что интервал частот ΔF , в котором наблюдается прохождение сигнала СВ через магнотную сеть с амплитудой выше уровня -60 dB, отвечают области частот перекрытия спектров передачи ООМСВ и ПМСВ отдельных волноводов. Основной вклад в перекрытие спектров ООМСВ и ПМСВ обусловлен влиянием анизотропии формы МКВ на частоту ФМР [24]. При выбранных геометрических размерах МКВ выполняется условие $d \ll w \ll L$, что позволяет воспользоваться для оценки величины ΔF подходом, изложенным в [25,26]:

$$\Delta F \approx \frac{2N_w f_m (f_H + 0.25 f_m)}{f_0},$$

где $f_H = \gamma H$, $f_m = \gamma 4\pi M$, $f_s = f_H + f_m/2$, $f_0 = \sqrt{f_H^2 + f_H f_m}$ — частота однородного ФМР в безграничной пленке, $\gamma = 2.8$ МГц/Ое — гиромагнитное отношение ЖИГ, N_w — коэффициент тензора размагничивания волновода по ширине (в приближении $d \ll w \ll L$, $N_w \sim d/w$). Если для оценки интервала частот ΔF использовать значение коэффициента $N_w \approx 0.146$, полученное с помощью выражений Ахарони [27], то для рассматриваемого здесь случая получим $\Delta F \approx 644$ МГц, что по порядку величины согласуется с экспериментальными результатами на рис. 2. Отметим, что полученная оценка величины ΔF оказывается примерно на 100 МГц меньше, чем наблюдается в эксперименте.

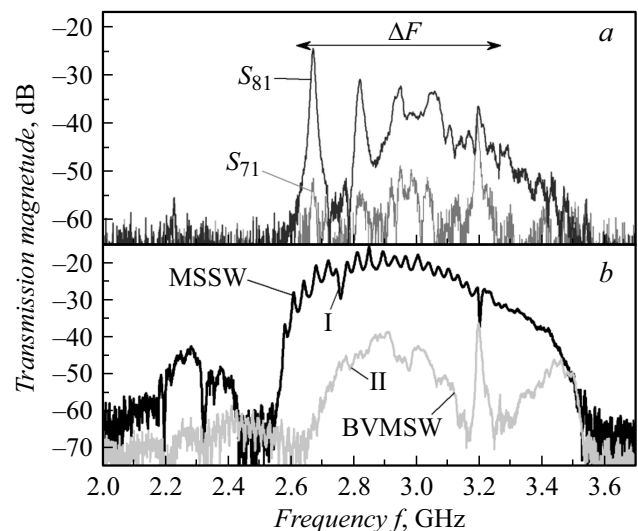


Рис. 2. Спектры передачи в решетке 2×2 из МКВ S_{j1} (показаны для $j = 7, 8$, кривые для других j лежат между указанными зависимостями) (*a*) и отдельных МКВ (*b*) при поле $H \approx 550$ Ое. Римскими I и II на рисунке (*b*) показаны спектры передачи поперечно и продольно намагниченных волноводов I и II на рис. 1. ΔF — обозначает интервал прохождения сигнала в решетке 2×2 уровня выше -60 dB (*a*).

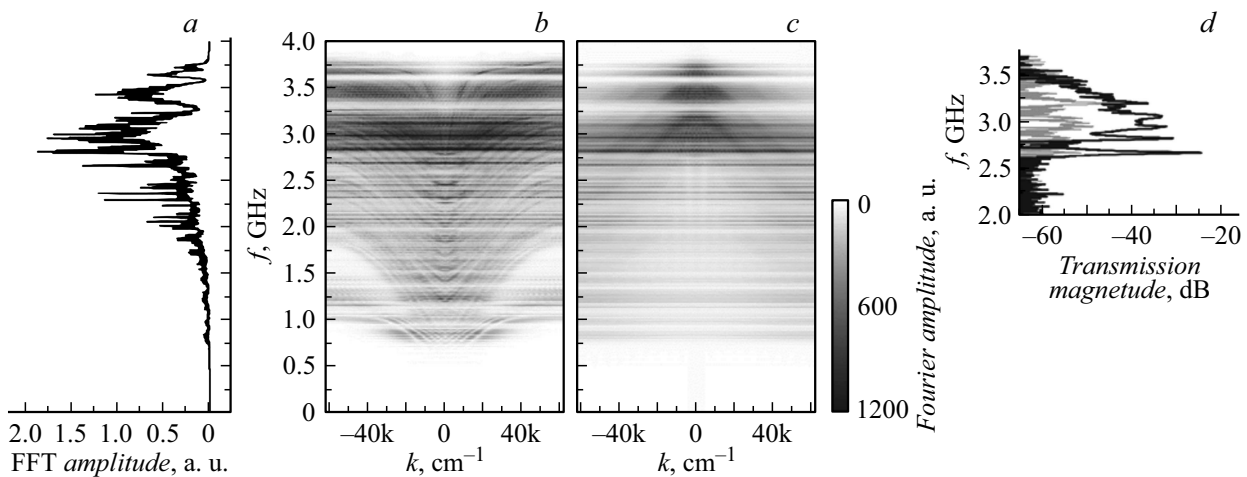


Рис. 3. Результаты микромагнитного моделирования спектра СВ в решетке 2×2 из рассматриваемых микроволноводов при параметрах эксперимента, отвечающих рис. 2: *a* — результаты расчета спектра амплитуды СВ в микроструктуре; *b, c* — результаты расчета дисперсионных зависимостей $f = f(k)$, полученные для волн с волновыми числами $k_y = 0$ и $k_x = 0$ соответственно, что отвечает волновым, обозначенным римскими I и II на рис. 1; *d* — результаты измерений спектров передачи S_{j1} ($j = 2, 8$) решетки (см. также рис. 2, *a*).

Это расхождение следует связать с влиянием эффектов квантования спектра СВ по ширине волновода w [28] и неоднородностью основного состояния, вызванного как полями размагничивания, так и параметрами пленки. Последнее обстоятельство может проявляться в заметном влиянии обменного взаимодействия на спектр СВ пленки: снимать вырождение между модами ООМСВ вблизи длинноволновой границы спектра и приводить к гибридизации ПМСВ с обменными объемными модами пленки [29].

Сопоставим теперь результаты измерений спектров передачи решетки с результатами микромагнитного моделирования дисперсионных характеристик $(f, k_{x,y})$ СВ и спектра амплитуды СВ в рассматриваемой структуре. Расчет проводился при параметрах эксперимента, отвечающих рис. 2, *a*, с помощью пакета микромагнитного моделирования OOMMF [30] по аналогии с методикой, описанной в [31]. Для расчета спектра амплитуды и дисперсионных характеристик СВ решетка возбуждалась импульсом поля амплитудой ~ 0.1 Ое, направленным по оси z и длительностью 100 ps, который подавался на антенну 1. На рис. 3 приведены результаты, полученные с помощью пространственно-временного фурье-преобразования реализаций длительностью 400 ns для компоненты намагниченности m_z с интервалом выборки 100 ps. Эти параметры позволяли проанализировать диапазон частот до 5 GHz с разрешением 2.5 MHz. При моделировании размер ячейки составлял $x \times y \times z = 500 \times 500 \times 100$ nm. Параметр затухания СВ α брался $\alpha = 10^{-6}$. Сравнение результатов измерения спектров передачи магнитной решетки и численного моделирования спектра амплитуды СВ в структуре показывает их качественное соответствие. Интервалы частот, которым отвечают максимумы сигнала СВ в

структуре, достаточно близки (рис. 3, *a, d*). На рис. 3, *b, c* приведены дисперсионные характеристики СВ в решетке (f, k_x) и (f, k_y) соответственно. Интенсивность линий на рис. 3, *b, c* коррелирует с распределением амплитуд на рис. 3, *a*. Полосы непропускания сигнала в спектре волн на частотах ≈ 3.25 и ≈ 3.6 GHz могут объясняться наличием повторяющихся элементов структуры, что может восприниматься системой как периодичность.

3. Интерференция СВ в решетке 2×2 из микроволноводов ЖИГ: результаты измерений и сопоставление с микромагнитным моделированием

Для проведения экспериментов по исследованию эффектов интерференции СВ в решетке экспериментальная установка дополнялась СВЧ узлами, выделенными пунктиром на рис. 1. Сигнал с выхода анализатора цепей разветвлялся на два канала и подавался на сдвоенный СВЧ микрозонд, позволяющий осуществить контакт с портами 1 и 8 одновременно. При этом в СВЧ тракте к антенне 8 добавлялись фазовращатель и аттенуатор, позволяющие изменять соотношение фаз φ и амплитуд входных сигналов на антеннах 1 и 8 соответственно. В качестве приемного использовался одинарный СВЧ микрозонд, подключаемый к антенне 4.

На рис. 4, *a* представлены результаты измерений спектров передачи $S_{41}(f)$ и $S_{48}(f)$ сигнала с входных 1 или 8 на выходную антенну 4. На рис. 4, *b* показан спектр выходного сигнала $S_{4(1+8)}(f)$ с порта 4 при подаче сигналов на входные антенны 1 и 8 одновременно и при изменении фазы сигнала на входной антенне 8. Из

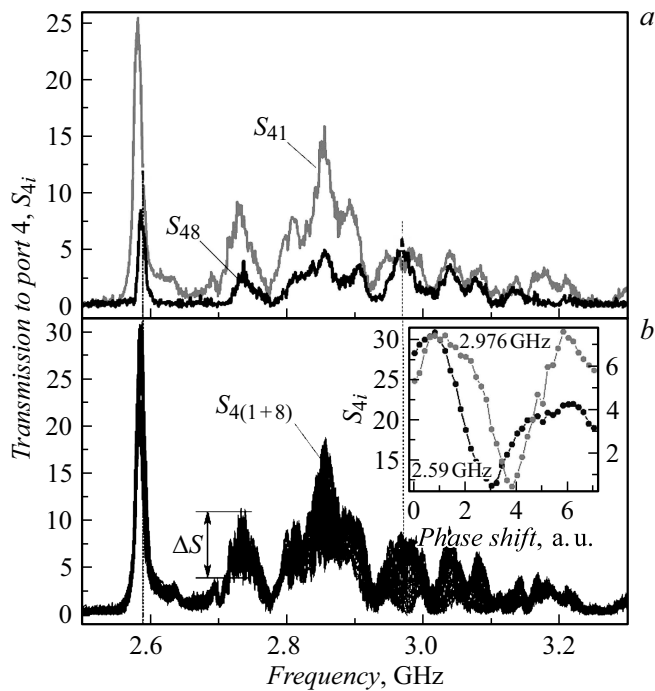


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики коэффициента передачи в порт 4 при подаче сигнала только на порт 1 или 8 (а) и на оба порта 1 и 8 одновременно при изменении фазового сдвига в одном из каналов (b). На вставке к рис. 4, b показано поведение амплитуды выходного сигнала на частотах ≈ 2.59 и 2.976 GHz. Положение частот выделено вертикальными линиями. Кружки на рис. 4, a отмечают начальное отношение амплитуд в спектрах $S_{41}(f)$ и $S_{48}(f)$. ΔS на рис. 4, b иллюстрирует интервал амплитуд, в котором осциллирует уровень сигнала $S_{4(1+8)}(f)$ при изменении фазы на антенне в пределах $\Delta\varphi \approx 0 - 2\pi$.

рис. 4, b видно, что изменение фазы сигнала на входе 8 в пределах $\Delta\varphi \approx 0 - 2\pi$ приводит к осцилляциям уровня сигнала $S_{4(1+8)}(f)$ на выходе — линии $S_{4(1+8)}(f)$ трансформируются в полосы шириной ΔS при изменении фазы. Видно, что на определенных частотах коэффициент прохождения заметно меняется от максимальных значений до практически нуля при изменении фазы в одном из каналов (см., например, данные для частоты 2.976 GHz на вставке к рис. 4, b).

В то же время для частоты 2.59 GHz, на которой также наблюдается эффективное прохождение сигнала с близкими амплитудами $S_{41}(f)$ и $S_{48}(f)$ (выделено кружком на рис. 4, a), изменение фазы не приводит к столь масштабным изменениям коэффициента передачи (см. вставку к рис. 4, b). Такая особенность в нашем случае, возможно, связана с изменением соотношения уровня мощности в каналах двойного зонда в условиях измерения сигнала интерференции $S_{4(1+8)}(f)$ по сравнению со случаем измерения отдельных характеристик $S_{41}(f)$ или $S_{48}(f)$, когда задействован лишь один из каналов двойного зонда.

Таблица 1. Таблица истинности для логической операции „эквиваленция“

Вход 1	Вход 2	Выход
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Таблица 2. Таблица истинности для логической операции „исключающее ИЛИ“

Вход 1	Вход 2	Выход
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Таблица 3. Таблица истинности для логической операции „ИЛИ“

Вход 1	Вход 2	Выход
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Результаты микромагнитного моделирования распространения волн в структуре при возбуждении антеннами 1 и 8 и временная зависимость сигнала СВ на выходной антенне 4 показаны на рис. 5. Моделирование проводилось с помощью пакета OOMMF [30]. Размеры элементарной ячейки брались $500 \times 500 \times 500$ nm, время моделирования составляло 51 ns. Шаг по времени 1 ps. Параметры выбирались отвечающими эксперименту на частоте $f = 2.976$ GHz (рис. 4). Считалось, что на входной антенне шириной $5 \mu\text{m}$ и длиной, равной ширине волновода $w = 10 \mu\text{m}$, действует СВЧ поле $h_z^a = 0.1$ Oe на частоте $f = 2.976$ GHz. Амплитуда возбуждающего поля считалась постоянной по толщине пленки под антенной. Вне площади, занятой антенной, принималось $h_z^a = 0$.

Из временной зависимости сигналов $S_{41}(t)$ и $S_{48}(t)$ на рис. 5, a можно видеть, что при возбуждении СВ с антенны 1 и 8 сигналы на выходной антенне 4 оказываются достаточно близки по амплитуде (разница в амплитудах составляет ≈ 1.56 раза) и сдвинуты по фазе почти на π . Карты распределения амплитуды СВ по плоскости структуры $m_z(x, y)$ при возбуждении антеннами 1 или 8 также показывают на выходном преобразователе 4 наличие сдвига фазы $\Delta\varphi \approx \pi$. Из распределения $m_z(x, y)$ можно получить оценку длины СВ в структуре $\lambda \approx 25 \mu\text{m}$. На рис. 5, b приведены

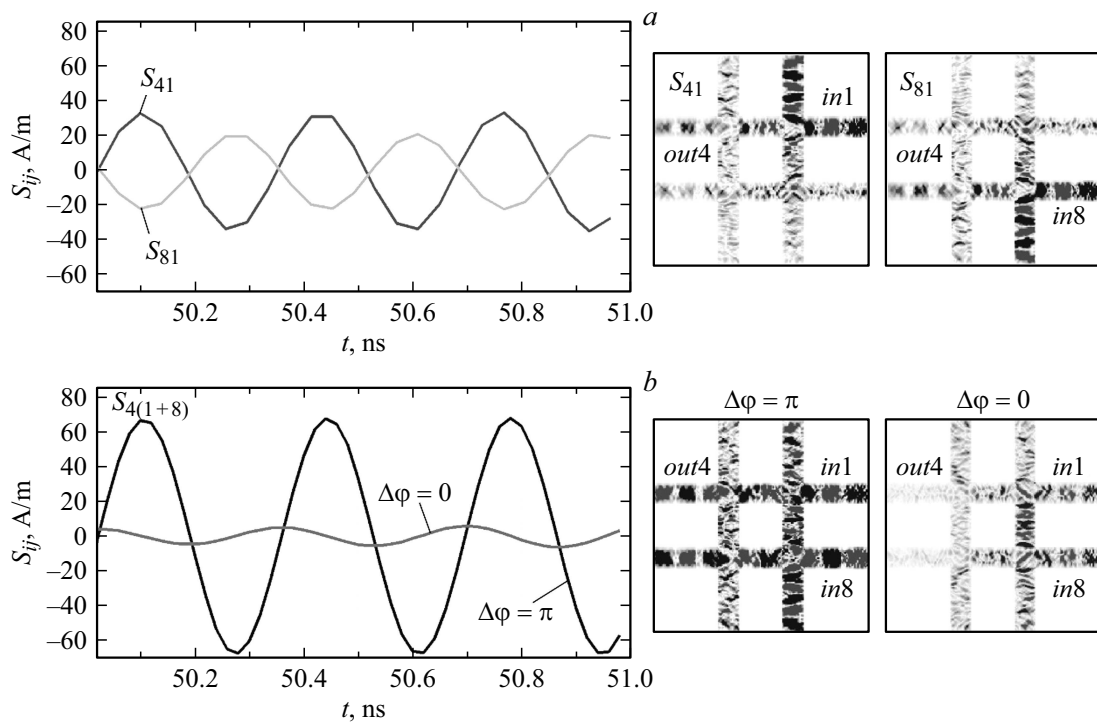


Рис. 5. Результаты микромагнитного моделирования временной зависимости компоненты намагниченности $m_z(t)$ на выходной антенне и карты распределения $m_z(x, y)$ в фиксированный момент времени $t = 50.5$ ns при распространении СВ на частоте $f = 2.976$ GHz и параметрах, отвечающих эксперименту на рис. 4, а. Зависимости $m_z(t)$ и карты $m_z(x, y)$ на выходной антенне 4 при подаче входного сигнала на антенну 1 (S_{41}) или 8 (S_{81}). Зависимости $m_z(t)$ и карты $m_z(x, y)$ на выходной антенне 4 при одновременной подаче входного сигнала на антенну 1 и 8 ($S_{4(1+8)}$) при сдвиге фазы входных сигналов $\Delta\varphi = 0$ (на выходе 4 деструктивная интерференция) и $\Delta\varphi = \pi$ (на выходе 4 конструктивная интерференция) (b).

временные зависимости выходного сигнала на антенне 4 $S_{4(1+8)}(t)$ и карты распределения $m_z(x, y)$ при одновременном возбуждении СВ антеннами 1 и 8. При этом амплитуда входного сигнала на антенне 8 была увеличена в 1.56 раза с тем, чтобы амплитуды выходных сигналов сравнялись. Можно видеть, что введение разности фаз между сигналами $\Delta\varphi = \pi$ приводит к конструктивной интерференции волн на выходной антенне. При синфазном возбуждении волны антеннами 1 и 8 характер интерференции СВ на выходной антенне 4 близок к деструктивному. Такое поведение интерференционной картины объясняется наличием начальной разности фазы $\approx \pi$ сигналов на выходной антенне 4 для СВ, пришедших от антенн 1 и 8. Эта разность фаз отчасти связана с разной длиной пробега СВ между преобразователями 1 и 4, с одной стороны, и 8 и 4 с другой. Кроме того, сигнал с преобразователя 8 часть пути проходит по участку продольно намагниченного волновода II, где СВ приобретают характер ООМСВ.

Приведенные результаты исследования интерференции показывают возможность построения ряда логических ключей на основе решеток ортогональных волноводов. Если входную информацию кодировать разностью фаз $\Delta\varphi$ относительно некоего опорного сигнала, принимая условно $\Delta\varphi = 0$ за 1, а $\Delta\varphi = \pi$ за 0, а выходной сигнал считать кодированным по амплитуде

так, что малая (ниже определенного порога) амплитуда соответствует 0, а большая (выше этого порога) — 1, то рассматриваемая структура может рассматриваться как логический ключ, отвечающий операции эквиваленции (табл. 1). Если же входная и выходная информации кодируются по амплитуде (есть сигнал — 1, нет сигнала — 0), и в одном из каналов стоит фазовращатель, обеспечивающий деструктивную или конструктивную интерференцию, то рассматриваемая магнитная решетка может выполнять функции „исключающее ИЛИ“ (табл. 2), „ИЛИ“ (табл. 3).

Заключение

Таким образом, на основе эпитаксиальной пленки ЖИГ толщиной $d \approx 1 \mu\text{m}$ с использованием методов фотолитографии и ионного травления изготовлена 8-ми портовая магнитная сеть в виде решетки 2×2 из микроволноводов с расположенными на концах волноводов микроантеннами. Микроволноводы имели ширину $\approx 10 \mu\text{m}$ и длину $\approx 100 \mu\text{m}$, что сопоставимо с размерами волноводов СВ на основе пленок ферромагнитных металлов, используемых при создании спин-волновых интерферометров. Экспериментально и численно исследовано распространение СВ в касательно намагниченной

структуре при ориентации поля вдоль одной из осей симметрии решетки. Показано, что из-за влияния полей размагничивания область перекрытия спектров СВ продольно и поперечно намагниченных волноводов магнотной сети ΔF может составлять несколько сотен МГц. Для некоторых частот из полосы ΔF показано, что на выходной микроантенне интерференция СВ, прошедших через решетку, может иметь конструктивный или деструктивный характер, в зависимости от соотношения фаз СВ на входных микроантеннах, что может быть использовано для создания логических спин-волновых устройств.

Отметим, что для создания интерферометров нанометрового масштаба, где для возбуждения и приема СВ используются индукционные антенны, использование пленок ЖИГ может оказаться более перспективным, чем пленок ферромагнитных металлов. Действительно, для возбуждения СВ в пленках ФМ между пленкой и индукционной антенной наносят изолирующий слой диэлектрика толщиной $t \approx 100$ nm [8,12,22]. При этом эффективность возбуждения СВ с длиной $\lambda \leq t$ оказывается низкой. Пленки ЖИГ, являясь диэлектриком, позволяют размещать микроантенны СВ непосредственно на поверхности, что может обеспечить возбуждение СВ с $\lambda \leq 100$ nm. К этому следует добавить, что в последнее время достигнут существенный прогресс в развитии вакуумных методов получения пленок ЖИГ на различных подложках [32–34] и литографических методов микроструктуризации таких пленок [34].

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01673).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Khitun A., Bao M., Wang K.L.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. P. 264005. DOI: 10.1088/0022-3727/43/26/264005
- [2] *Csaba G., Papp A., Porod W.* // Phys. Lett. A. 2017. Vol. 381. N 17. P. 1471–1476. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.02.042
- [3] *Хитун А.Г., Кожанов А.Е.* // Изв. Саратовского ун-та. Новая серия. Серия Физика. 2017. Т. 17. Вып. 4. С. 216–241. DOI: 10.18500/1817-3020-2017-17-4-216-241
- [4] *Kostylev M.P., Serga A.A., Schneider T., Leven B., Hillebrands B.* // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 87. N 15. P. 153501. DOI: 10.1063/1.2089147
- [5] *Schneider T., Serga A.A., Leven B., Hillebrands B.* // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. N 2. P. 022505. DOI: 10.1063/1.2834714
- [6] *Lee K.S., Kim S.K.* // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. N 5. P. 053909. DOI: 10.1063/1.2975235
- [7] *Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B.* // Nature Communications. 2014. Vol. 5. P. 4700. DOI: 10.1038/ncomms5700
- [8] *Rousseau O., Rana B., Anami R., Yamada M., Miura K., Ogawa S., Otani Y.* // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. P. 09873. DOI: 10.1038/srep09873
- [9] *Klingler S., Pirro P., Brächer T., Leven B., Hillebrands B., Chumak A.V.* // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. P. 152410. DOI: 10.1063/1.4898042
- [10] *Klingler S., Pirro P., Brächer T., Leven B., Hillebrands B., Chumak A.V.* // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106. P. 21240. DOI: 10.1063/1.4921850
- [11] *Fischer T., Kewenig M., Bozhko D.A., Serga A.A., Syvorotka I.I., Ciubotaru F., Adelman C., Hillebrands B., Chumak A.V.* // Appl. Phys. Lett. 2017. Vol. 110. P. 152401. DOI: 10.1063/1.4979840
- [12] *Nanayakkara K., Anferov A., Jacob A.P., Allen S.J., Kozhanov A.* // IEEE Trans. Magn. 2014. Vol. 50. P. 3402204. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2320632.
- [13] *Balynsky M., Kozhevnikov A., Khivintsev Y., Bhowmick T., Gutierrez D., Chiang H., Dudko G., Filimonov Y., Liu G., Jiang G., Balandin A.A., Lake R., Khitun A.* // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 121. P. 024504. DOI: 10.1063/1.4973115
- [14] *Balynskiy M., Chiang H., Gutierrez D., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Khitun A.* // J. Appl. Phys. 2018. Vol. 123. P. 144501. DOI: 10.1063/1.5011772
- [15] *Khitun A.* // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 113. P. 164503. DOI: 10.1063/1.4802656
- [16] *Gertz F., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Khitun A.* // IEEE Trans. Magn. 2014. Vol. 51. N 4. P. 4002905. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2362723
- [17] *Kozhevnikov A., Gertz F., Dudko G., Filimonov Y., Khitun A.* // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106. P. 142409. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4917507
- [18] *Papp A., Porod W., Csurgay A.I., Csaba G.* // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. P. 9245. DOI: 10.1038/s41598-017-09485-7
- [19] *Csaba G., Papp A., Porod W.* // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115. P. 17C741. DOI: 10.1063/1.4868921
- [20] *Khivintsev Y., Ranjbar M., Gutierrez D., Chiang H., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Khitun A.* // J. Appl. Phys. 2016. Vol. 120. N 12. P. 123901. DOI: 10.1063/1.4962740
- [21] *Gutierrez D., Chiang H., Bhowmick T., Volodchenkov A.D., Ranjbar M., Liua G., Jianga C., Warren C., Khivintsev Y., Filimonov Y., Garay J., Lake R., Balandin A.A., Khitun A.* // J. Magn. Magn. Mat. 2017. Vol. 428. P. 348–356. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.12.022
- [22] *Bracher T., Pirro P., Westermann J., Sebastian T., Lägél B., Van de Wiele B., Vansteenkiste A., Hillebrands B.* // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 102. P. 132411. DOI: 10.1063/1.4800005
- [23] *Balynsky M., Gutierrez D., Chiang H., Kozhevnikov A., Dudko G., Filimonov Y., Balandin A.A., Khitun A.* // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. P. 11539. DOI: 10.1038/s41598-017-11881-y
- [24] *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с. [Gurevich A.G., Melkov G.A. Magnetization oscillations and waves. N. Y.: CRC Press, 1996.]
- [25] *Balinsky M., Gutierrez D., Chiang H., Filimonov Y., Kozhevnikov A., Khitun A.* // AIP Advances. 2017. Vol. 7. P. 056633. DOI: 10.1063/1.4974526

- [26] Дудко Г.М., Кожевников А.В., Хивинцев Ю.В., Филимонов Ю.А., Хитун А.Г., Никитов С.А. // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 10. С. 1105–1109.
DOI: 10.1134/S0033849418100091 [Dudko G.M., Kozhevnikov A.V., Khivintsev Y.V., Filimonov Y.A., Khitun A.G., Nikitov S.A. // J. Communications Technology and Electronics. 2018. Vol. 63. N 10. P. 1212–1216.
DOI: 10.1134/S1064226918100091]
- [27] Aharoni A. // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 83. N 6. P. 3432–3434.
DOI: 10.1063/1.367113
- [28] O’Keeffe T.W., Patterson R.W. // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. N 9. P. 4886–4895. DOI: 10.1063/1.325522
- [29] Kalinikos B.A., Slavin A.N. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1986. Vol. 19. N 35. P. 7013–7033.
DOI: 10.1088/0022-3719/19/35/014
- [30] Donahue M.J., Porter D.G. NIST technical report, NISTIR 6376, Gaithersburg, MD, 1999.
- [31] Dvornik M. Numerical investigations of spin waves at the nanoscale. PhD thesis. University of Exeter, 2011. 158 p.
- [32] Хивинцев Ю.В., Сахаров В.К., Высоцкий С.Л., Филимонов Ю.А., Стогний А.И., Никитов С.А. // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 7. С. 1060–1066.
DOI: 10.21883/JTF.2018.07.46178.2448 [Khivintsev Y.V., Sakharov V.K., Vysotskii S.L., Filimonov Y.A., Stognij A.I., Nikitov S.A. // Tech. Phys. 2018. Vol. 63. N 7. P. 1029–1035.
DOI: 10.1134/S1063784218070162]
- [33] Sakharov V.K., Khivintsev Y.V., Vysotskii S.L., Stognij A.I., Filimonov Y.A. // IEEE Magn. Lett. 2017. Vol. 8. P. 3704105.
DOI: 10.1109/LMAG.2017.2659638
- [34] Zhu N., Chang H., Franson A., Liu T., Zhang X., Johnston-Halperin E., Wu M., Tang H.X. // Appl. Phys. Lett. 2017. Vol. 110. P. 252401. DOI: 10.1063/1.4986474