

УДК 537.6/.8:544.2:621.3

СЕЛЕКЦИЯ СПИНОВЫХ ВОЛН В АНСАМБЛЕ ЛАТЕРАЛЬНО И ВЕРТИКАЛЬНО СВЯЗАННЫХ МИКРОВОЛНОВОДОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОГО ГРАНАТА

© 2023 г. А. Б. Хутиева¹, *, В. Р. Акимова¹, Е. Н. Бегинин¹, А. В. Садовников¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”,
Саратов, Россия

*E-mail: abkhutieva@gmail.com

Поступила в редакцию 05.12.2022 г.

После доработки 23.12.2022 г.

Принята к публикации 27.02.2023 г.

На основе численного микромагнитного моделирования изучены режимы распространения спиновых волн в рассматриваемых массивах микроволноводов в конфигурации, соответствующей возбуждению в двух центральных каналах одного из слоев поверхностных и обратных объемных магнитостатических спиновых волн. Показано, что предложенная структура выполняет функции пространственно-частотной селекции сигнала, эффективность которой зависит от взаимной ориентации поля подмагничивания и направления распространения волны.

DOI: 10.31857/S0367676523701375, EDN: VKQSNS

ВВЕДЕНИЕ

Магноны, являющиеся квантами спин-волновых возбуждений, могут являться носителями информационного сигнала, в случае, когда реализуется режим распространения спиновых волн (СВ) в ферро- или ферромагнитных пленках и структурах. К основным достоинствам СВ можно отнести возможность их распространения в широком частотном диапазоне от единиц до сотен ГГц [1] при изменении длин волн от десятков нанометров до единиц миллиметров. При этом комбинация магنونных элементов на базе магнитных пленок позволяет создавать магنونные сети (МС), состоящие из связанных волноводов СВ и используемых в качестве устройств обработки информационных сигналов [2–4]. В качестве простейшего волновода может выступать полоска ферромагнетика, ограниченного в двух направлениях и представляющая собой волновод СВ или с электродинамической точки зрения – волновод с гиротропной средой, свойства которой при этом задаются направлением внешнего магнитного поля, вдоль которого в ферромагнетике ориентируется намагниченность при достаточных для насыщения величинах магнитного поля. В качестве материалов для волноводов СВ в настоящее время используются пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), которые находят применения в устройствах для обработки информации и в тоже время могут обеспечивать технологическую интеграцию с существующей полупроводниковой архитектурой [5, 6]. Недавно было показано, что

трехмерный (3D) магنونный кристалл с сечением в форме меандра [7, 8] может обеспечивать вертикальный перенос СВ за счет использования вертикальных участков магنونного волновода. При этом было также экспериментально продемонстрировано, что создание многослойных топологий трехмерных структур с нарушением трансляционной симметрии позволяет рассматривать создаваемые элементы как узлы межсоединений для вертикально интегрированных топологий МС [9] и включать магنونные наноструктуры в полупроводниковые слои интегральных схем [10]. Стоит отметить также, что использование диэлектрических пленок ЖИГ дает больше преимуществ по сравнению с металлическими пленками из-за значительно меньших потерь на распространение СВ.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим процессы распространения СВ в системе магнитных волноводов при наличии диполь-дипольной связи между ними, обменной связью между слоями будем в дальнейшем пренебрегать [11–13]. Волноводы выполнены в виде удлиненных полосок на основе пленок железо-иттриевого граната равной высоты и толщины, образующих решетку горизонтальных и вертикальных слоев, расположенных с зазорами в горизонтальной и вертикальной плоскостях так, что полоски в вертикальной плоскости расположены друг над другом (рис. 1). Количество мик-

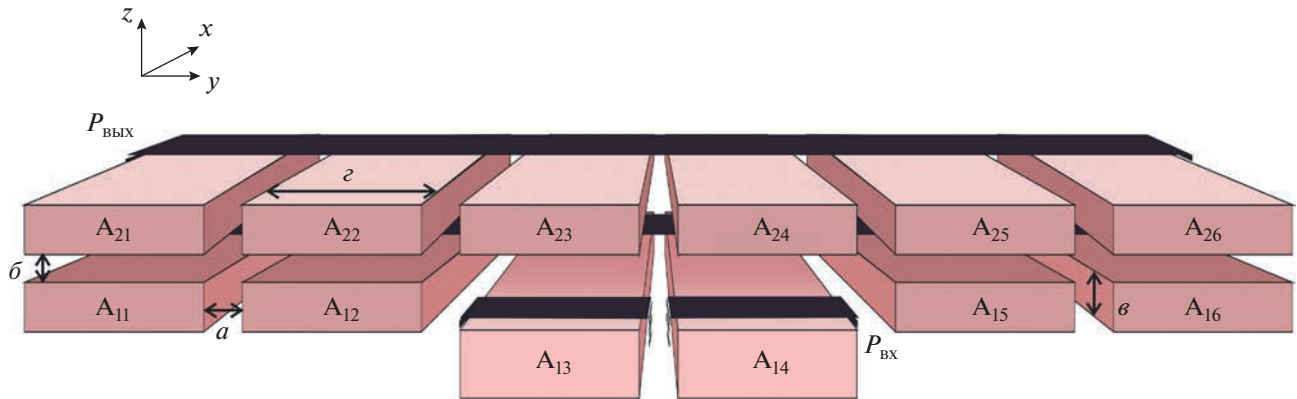


Рис. 1. Схема рассматриваемого массива микроволноводов.

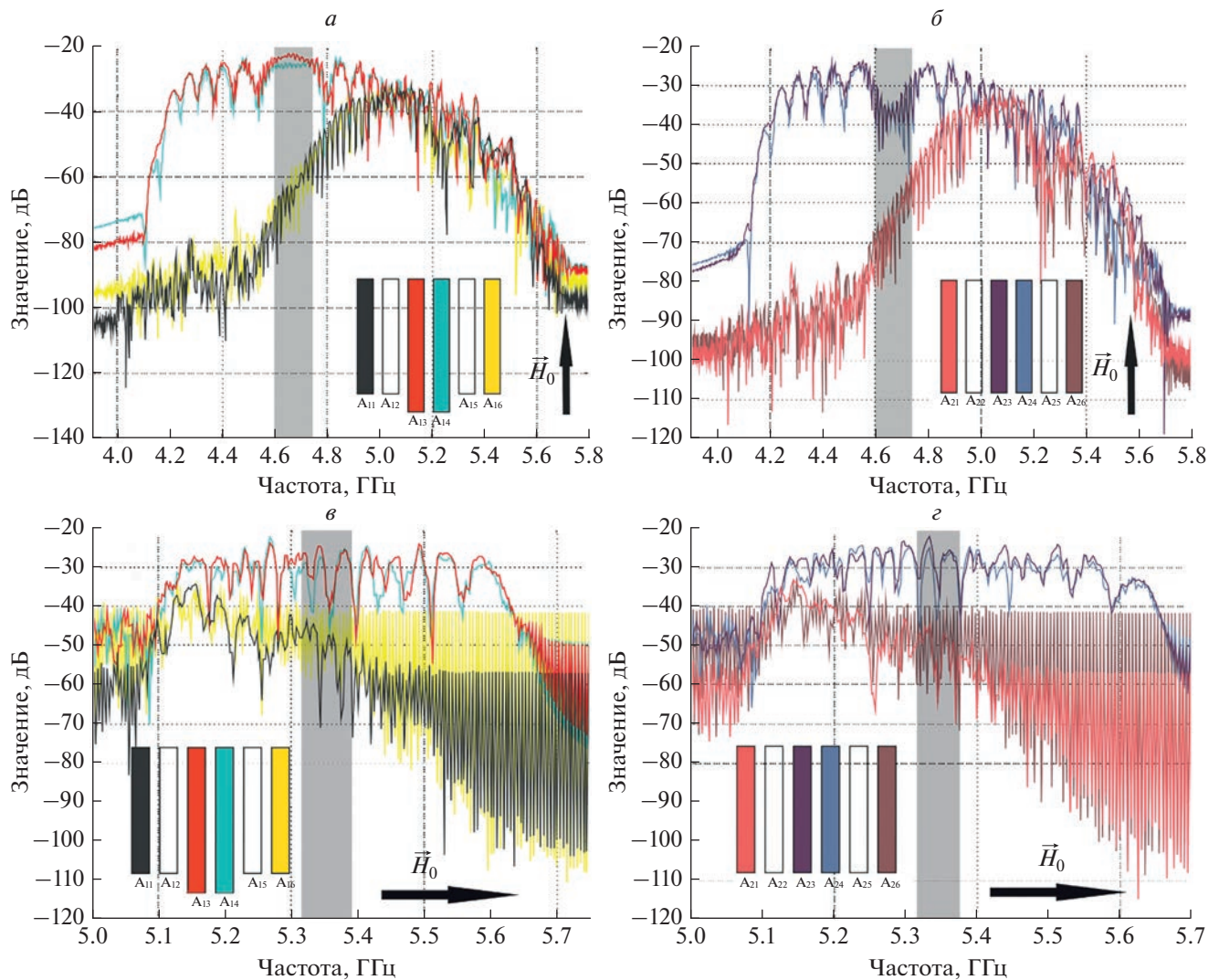


Рис. 2. АЧХ СВ на выходах отдельных микроволноводов структуры, расположенных в различных слоях при различной ориентации внешнего магнитного поля и типа СВ: ООСВ (а, б), ПСВ (в, г). Цвета графиков АЧХ соответствуют цветам и номерам микроволноводов, схематично показанных на врезках рисунков. Серым цветом выделен частотный диапазон, для которого были построены карты пространственного распределения намагниченности.

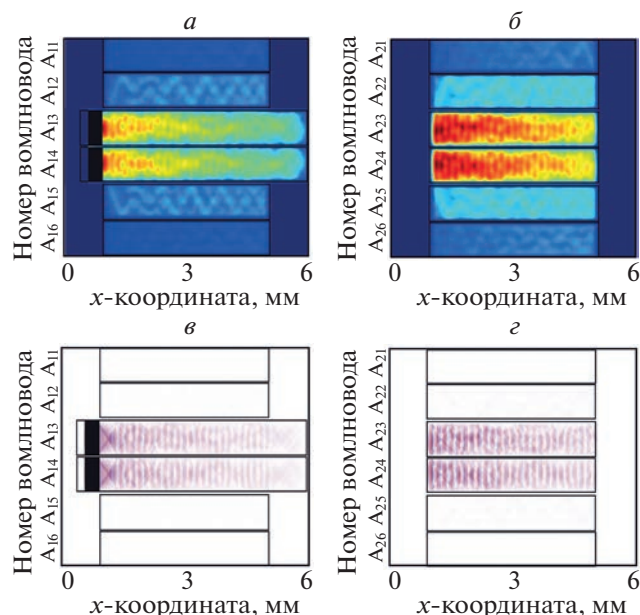


Рис. 3. Карты распределения интенсивности (а, б) и фазы СВ (в, г) в различных слоях исследуемой структуры при возбуждении ООСВ на частоте 4.6 ГГц.

роволноводов по горизонтали в каждом слое равно 6. Входные микрополосковые антенны (P_{in}) расположены в нижней части решетки латерально на двух центральных полосках микроволноводов и обеспечивают генерацию СВ. Выходные антенны (P_{out}) предназначены для приема СВ и расположены аналогичным образом в выходной части системы. Входные и выходные антенны составляют в ширину 30 мкм, где a — зазор 10 мкм между полосками в горизонтальной плоскости, b — зазор 30 мкм между полосками в вертикальной плоскости, c — ширина волновода 300 мкм, d — толщина волновода 10 мкм, H_0 — внешнее магнитное поле, намагниченность насыщения ЖИГ $4\pi M_0 = 1750$ Гс. Рассмотрим процесс распространения обратных объемных СВ (ООСВ) в исследуемой структуре, размещенной в однородном магнитном поле величиной $H_0 = 1200$ Э, ориентированном вдоль оси x , полученный методом микромагнитного моделирования.

Расчет выполнен методом микромагнитного моделирования на основе программного пакета mumax3 [14, 15]. Зададим граничные условия в виде слоев с увеличивающимся в геометрической прогрессии коэффициентом затухания [16]. На рис. 2а и 2б представлены результаты расчета амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) ООСВ, иллюстрирующие процессы распределения энергии спиновых волн. В диапазоне частот от 4 до 4.6 ГГц, соответствующему области больших волновых чисел ООСВ, наблюдается обмен энергией между центральными микроволноводами нижне-

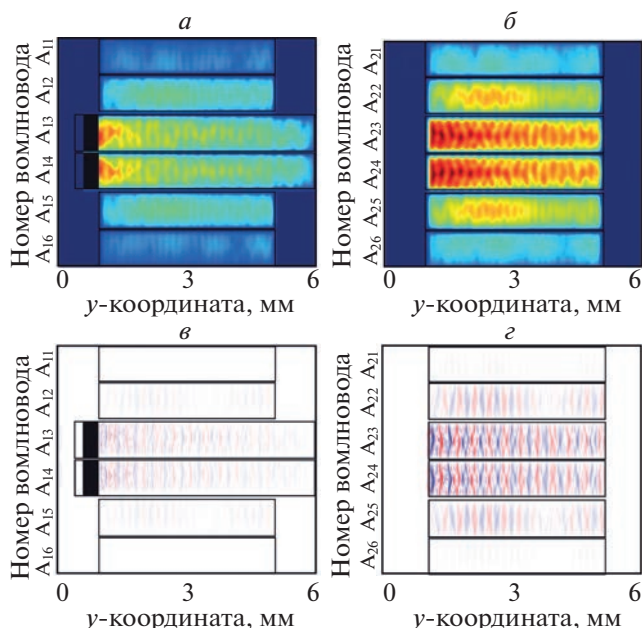


Рис. 4. Карты распределения интенсивности (а, б) и фазы СВ (в, г) в различных слоях исследуемой структуры при возбуждении ПСВ на частоте 5.376 ГГц.

го (A13 и A14) и верхнего слоев (A23 и A24). Область частот, выделенная серым цветом, соответствует случаю эффективной перекачки энергии между двумя центральными волноводами, расположенными в разных слоях структуры. В области более высоких частот (4.6–5.6 ГГц), соответствующей началу спектра ООСВ с малыми волновыми числами, мощность СВ эффективно перераспределяется между всеми ферритовыми микроволноводами.

Рассмотрим процесс распространения поверхностных СВ (ПСВ) в структуре при ориентации магнитного поля вдоль оси y . На рис. 2в и 2г представлены результаты микромагнитного моделирования АЧХ ПСВ при возбуждении двух центральных волноводов. Можно видеть, что при малых волновых числах при распространении ПСВ наблюдается перекачка энергии между микроволноводами во всех направлениях.

На рис. 3 представлены результаты микромагнитного моделирования интенсивности и фазы ООСВ на частоте 4.6 ГГц. Видно, что на этой частоте плотность энергии ООСВ максимальная в основном в центральных волноводах системы.

На рис. 4 представлены результаты микромагнитного моделирования ПСВ на частоте 5.376 ГГц. Видно, что на этой частоте режим передачи распространения сигнала аналогичен ранее рассмотренному случаю ООСВ, т.е. энергия СВ локализована в центральных волноводах, расположенных в различных слоях структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были рассмотрены процессы распространения спиновых волн в массиве ЖИГ-волноводов. Проведено микромагнитное моделирование процессов формирования АЧХ, пространственного распределения интенсивности и фазы спиновых волн различного типа в двухслойном массиве связанных магнитных микроволноводов. Выявлены особенности режимов распространения спиновых волн на различных частотах. Продемонстрировано перераспределение энергии СВ между двумя слоями структуры. Показано, что в зависимости от частоты СВ, могут существовать различные режимы распространения СВ, связанные со степенью пространственной локализации мощности СВ. Рассматриваемый двухслойный массив микроволноводов может быть использован для расширения функциональных возможностей устройств обработки информации, в основе которых лежат подходы магнотонной логики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10191).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафин А.Р., Никитов С.А., Кирилук А.И. и др. // ЖЭТФ. 2020. Т. 158. № 1. С. 85; *Safin A.R., Nikitov S.A., Kirilyuk A.I. et al.* // J. Exp. Theor. Phys. 2020. V. 131. P. 71.
2. *Khitun A., Bao M., Wang K.* // IEEE Trans. Magn. J. 2008. V. 44. P. 2141.
3. *Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B.* // J. Phys. D. 2017. V. 50. Art. No. 244001.
4. *Chumak A.V., Kabos P., Wu M. et al.* // IEEE Trans. Magn. 2022. V. 58. No. 6. Art. No. 0800172
5. *Vysotskii S.L., Sadovnikov A.V., Dudko G.M. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 117. Art. No. 102403.
6. *Sakharov V.K., Beginin E.N., Khivintsev Y.V. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 117. Art. No. 022403.
7. *Sadovnikov A.V., Talmelli G., Gubbiotti G. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2022. V. 544. Art. No. 168670.
8. *Gubbiotti G.* Three-dimensional magnonics. Layered, micro- and nanostructures. N.Y.: Jenny Stanford Publishing, 2019. 416 p.
9. *Colinge J.P.* FinFETs and other multi-gate transistors. N.Y.: Springer, 2008. 350 p.
10. *Crew D.C., Kennewell K.J., Lwin M.J. et al.* // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. Art. No. 10A707.
11. *Belmeguenai M., Martin T., Woltersdorf G. et al.* // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. Art. No. 104414.
12. *Li S., Wang C., Chu X.-M. et al.* // Sci. Reports. 2016. V. 6. Art. No. 33349.
13. *Vansteenkiste A., VandeWiele B.* // J. Magn. Magn. Mater. 2011. V. 323. P. 2585.
14. *Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornic M. et al.* // AIP Advances. 2014. V. 4. Art. No. 107133.
15. *Venkat G., Fangohr H., Prabhakar A.* // J. Magn. Magn. Mater. 2018. V. 450. P. 34.
16. *Садовников А.В., Одинцов С.А., Бегинин Е.Н. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107. № 1. С. 29; *Sadovnikov A.V., Odintsov S.A., Beginin E.N. et al.* // JETP Lett. 2018. V. 107. No. 1. P. 25.

Spin wave selection in an ensemble of laterally and vertically coupled iron-yttrium garnet microwaveguides

A. B. Khutueva^{a,*}, V. R. Akimova^a, E. N. Beginin^a, A. V. Sadovnikov^a

^aSaratov National Research State University, Saratov, 410012 Russia

*e-mail: abkhutieva@gmail.com

Numerical micromagnetic modeling used to study the modes of propagation of spin waves and processes of power transfer in the considered arrays of microwaves in the configuration corresponding to excitation in two central channels of one of the layers of surface and inverse bulk magnetostatic spin waves is conducted. It is shown that the proposed structure performs the functions of spatial-frequency signal selection, the efficiency of which depends on the mutual orientation of the submagnetization field and the direction of wave propagation.