

05,13

## Управление свойствами спиновых волн в планарном зигзагообразном ЖИГ-микроволноводе с резонатором ромбовидной формы

© И.О. Фильченков, А.А. Мартышкин, А.В. Садовников

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

E-mail: infachforever@gmail.com

Поступила в Редакцию 18 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2024 г.

Принята к публикации 8 мая 2024 г.

Исследовалась возможность использования резонансного эффекта для управления сигналом, возникающего в процессе распространения спиновых волн (СВ) в магнитной пленке на основе железа-иттрия-граната (ЖИГ) с периодическими изменениями геометрии в виде зигзагообразных изломов с добавлением ЖИГ-резонатора в секции центрального излома. С использованием методов численного моделирования было показано, что в зигзагообразной структуре могут возникать зоны непропускания СВ. Также показана возможность управления количеством и глубиной зон непропускания на амплитудно-частотных характеристиках с помощью вариации расстояния между границей ЖИГ-микроволновода и резонатора. Продемонстрировано, что при внесении в систему микрорезонатора ромбовидной формы оказывается возможным подавление двух частотных зон непропускания при одновременном образовании одной зоны с высокой добротностью, при этом причина образования зон непропускания в спектре зигзагообразной магнитной структуры схожа с механизмом образования запрещенных зон в спектрах СВ магнитных кристаллов. Предложенная структура может использоваться в качестве управляемого СВЧ-фильтра сигнала.

**Ключевые слова:** магнетика, планарные системы, неоднородность, периодические системы.

DOI: 10.61011/FTT.2024.08.58591.57NN

### 1. Введение

Бурное развитие IT-технологий увеличивает требования к системам обработки, хранения и передачи данных. Это обуславливает необходимость усовершенствования элементной базы IT-систем. Один из перспективных подходов — использование магнитных и фононных возбуждений в феррит-диэлектрических структурах. Магнетика, новое направление в области СВЧ, предлагает обработку данных с использованием магнонов или спиновых волн (СВ), исключая выделение джоулевого тепла [1–3].

Одним из методов управления спин-волновым транспортом является трансформация эффективного магнитного поля внутри микроструктуры. Такой подход может быть реализован путем изменения локальных свойств магнитных волноводов или вариации ориентации и величины поля подмагничивания. На пути увеличения количества функциональных элементов в магнитных сетях (МС) оказывается важным исследование механизмов, обуславливающих спин-волновой транспорт в многоуровневых топологиях МС на основе сложных магнитных структур. Примером таких структур могут служить периодические магнитные кристаллы [4,5].

Основным свойством периодически структурированных магнитных пленок является возможность создавать в частотном спектре СВ запрещенные и разрешенные зо-

ны или создавать выделенные направления распространения волн. Свойства запрещенных зон, как инструмента для управления характеристиками магнитных кристаллов, могут иметь сложную зависимость от внешних параметров. Например, управлять запрещенными зонами и их свойствами можно с помощью внешних магнитных полей, спин-поляризованного тока или металлизации структуры [6,7].

В настоящей работе исследовалась возможность использования резонансного эффекта для управления сигналом, возникающего в процессе распространения СВ в магнитной пленке из железо-итриевого граната (ЖИГ, YIG) с периодическими изменениями геометрии в виде зигзагообразных изломов. Кроме того, для управления свойствами СВ в периодических структурах был использован ЖИГ-резонатор, в котором возможно явление ферромагнитного резонанса (ФМР) [8]. ФМР — одна из разновидностей электронного магнитного резонанса. Суть явления заключается в том, что ферромагнетик избирательно поглощает энергию электромагнитного поля в зависимости от частот, совпадающих с собственными частотами ЖИГ-резонатора. Это явление возникает, когда кристалл ЖИГ помещают во внешнее постоянное магнитное поле. Важным достоинством ЖИГ-резонатора является возможность перестройки по частоте в широких пределах, причем с достаточно высокой скоростью. Перестройка частоты достигается

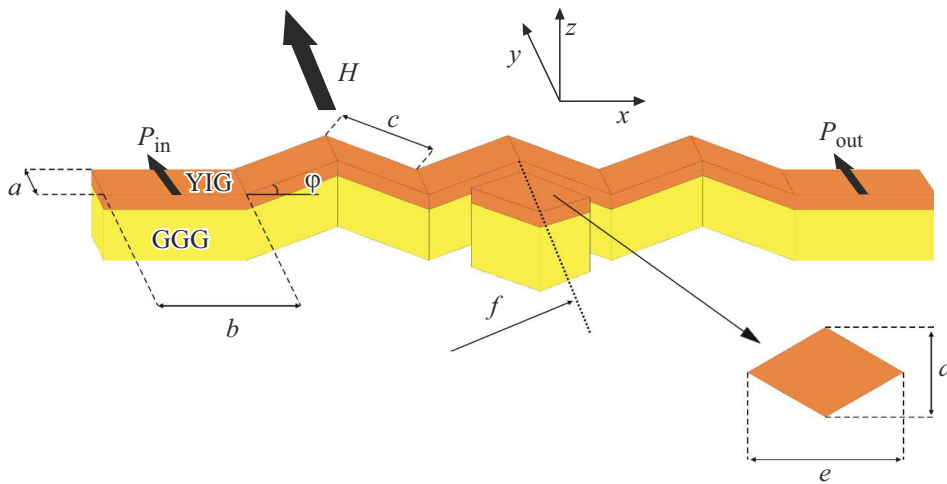


Рис. 1. Схема рассматриваемой структуры.

путем изменения величины внешнего магнитного поля. Изменяя расстояние от ЖИГ-резонатора до волновода, появляется возможность выполнять перестройку запрещенных зон в распространении СВ по частоте, а также изменять добротность запрещенных зон.

Методом микромагнитного моделирования исследованы зигзагообразные периодические структуры и построен спектр собственных мод. Выявлены режимы управления частотными диапазонами запрещенных зон в спектре СВ в зависимости от геометрии структуры. Интерес к таким структурам вызван ввиду возможности создания функциональных устройств СВЧ-электроники, таких как фильтров, шумоподавителей, ограничителей мощности и т.д. [9–11].

## 2. Исследуемая структура

В настоящей работе предлагается исследовать эффекты, возникающие при распространении СВ в магнетонных кристаллических микроволноводах с зигзагообразным профилем. Представлены результаты исследования структуры из ЖИГ на подложке из галлий-гадолиниевого граната (GGG). На рис. 1 показано схематическое изображение зигзагообразного ЖИГ-микроволновода со следующими параметрами: ширина волновода  $a = 200 \mu\text{m}$ , длина регулярной части  $b = 400 \mu\text{m}$ , длина наклонной части волновода  $c = 400 \mu\text{m}$ , общая длина структуры составляет  $2900 \mu\text{m}$ . Диагонали ЖИГ-резонатора равны  $d = 300 \mu\text{m}$  и  $e = 500 \mu\text{m}$ . Микрорезонатор изменял свое положение вдоль оси  $f$ . Угол наклона зигзагообразной части относительно входной секции  $\varphi = 30^\circ$ . Микроволновод имеет прямоугольные основания на торцах, на которых с противоположных сторон расположены входная микрополосковая антенна  $P_{\text{in}}$  для возбуждения СВ и выходная микрополосковая антенна  $P_{\text{out}}$  для считывания сигнала. Намагниченность насыщения ЖИГ составляет

$M_s = 139 \text{ G}$ , а величина напряженности внешнего магнитного поля, направленного вдоль оси  $y$ , составляет  $H_0 = 1200 \text{ Oe}$ . В качестве референсной структуры использовался волновод без изломов шириной  $a$ , также аналогичной длины.

### Численное исследование

Для численного моделирования была использована программа *mutax3* [12]. Этот программный пакет предназначен для решения временных и пространственных задач, связанных с распространением СВ в структурах. Для достижения этой цели структура разбивается на сетку, где в каждом узле решается уравнение Ландау–Лифшица–Гилберта:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = \gamma [\mathbf{H}_{\text{eff}} \times \mathbf{M}] + \frac{\alpha}{M_s} \left[ \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right],$$

где  $\mathbf{M}$  — вектор намагниченности,  $\alpha = 10^{-5}$  — параметр затухания пленки ЖИГ,  $\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{\text{demag}} + \mathbf{H}_{\text{ex}} + \mathbf{H}_a$  — напряженность эффективное магнитное поле,  $\mathbf{H}_0$  — напряженность внешнего магнитного поля,  $\mathbf{H}_{\text{demag}}$  — напряженность поля размагничивания,  $\mathbf{H}_{\text{ex}}$  — напряженность обменного поля,  $\mathbf{H}_a$  — напряженность поля анизотропии,  $M_s$  — намагниченность насыщения материала,  $\gamma = 2.8 \text{ MHz/Oe}$  — гиромагнитное отношение. Параметр обменной константы для пленки ЖИГ  $A_{\text{ex}} = 3.612 \text{ pJ/m}$ .

*Mutax3* использует метод конечных разностей для численного решения уравнений микромагнетизма. Этот метод позволяет аппроксимировать дифференциальные уравнения, описывающие магнитные процессы, с высокой точностью. Такой подход особенно полезен при моделировании сложных структур, таких как периодические волноводы.

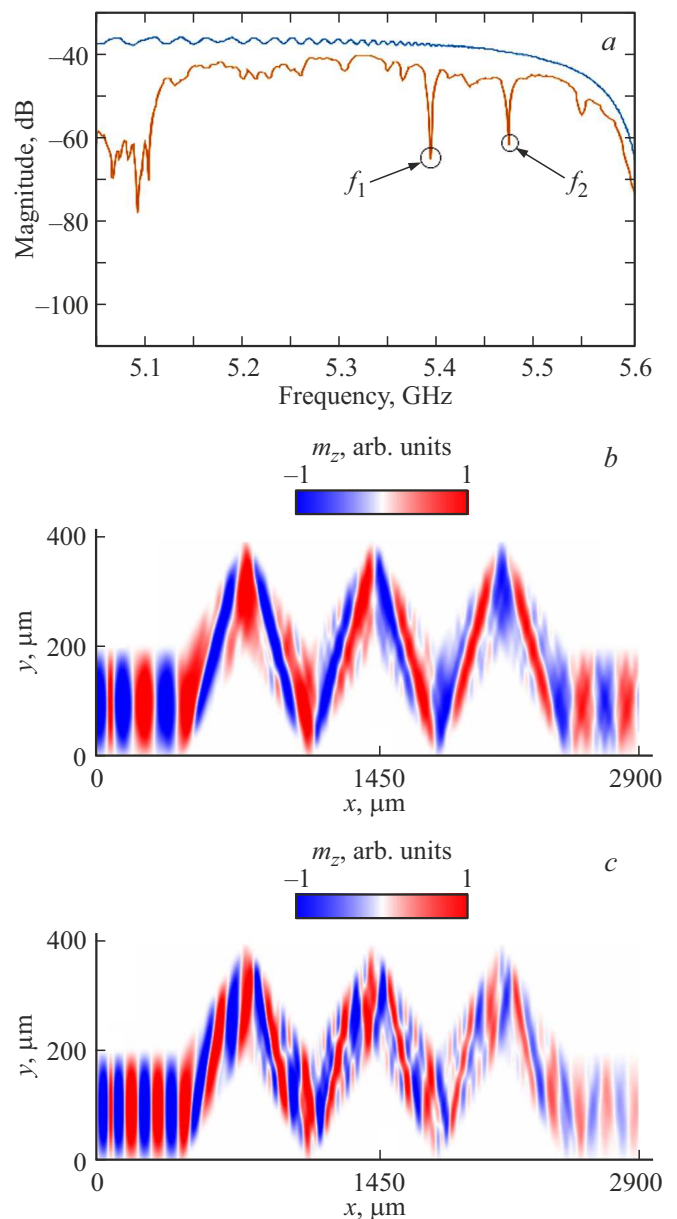
Для исследования распространения СВ в периодической зигзагообразной структуре во входной секции

исследуемой структуры расположена микрополосковая антенна шириной  $30\ \mu\text{m}$ , на которую подавался СВЧ-сигнал. Структура намагничивалась касательно вдоль оси  $y$  для успешного возбуждения поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ). Прием сигнала при проведении численного эксперимента происходил в выходной секции волновода и осуществлялся выходной антенной.

В результате численного моделирования были получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) СВ. Для получения АЧХ СВ сигнал подавался на структуру во входной секции и фиксировались значения амплитуд намагниченности в выходной секции. Обработка результатов микромагнитного моделирования проводилась в программе Matlab. С помощью двумерного преобразования Фурье строились АЧХ для различных параметров системы.

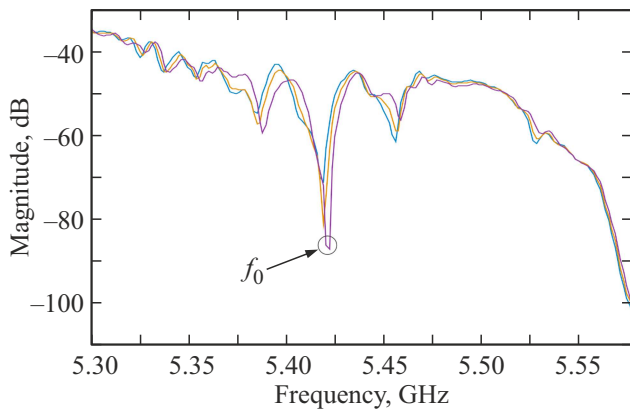
### 3. Результаты

На рис. 2 представлены численно рассчитанные АЧХ. На фоне непрерывного спектра референсного прямоугольного волновода (рис. 2, *a*, голубая линия) на АЧХ исследуемой структуры (рис. 2, *a*, оранжевая линия) при расстоянии между волноводом и микрорезонатором  $200\ \mu\text{m}$  наблюдаются 2 зоны не пропускания сигнала на частотах  $f_1 \approx 5.37\ \text{GHz}$  и  $f_2 \approx 5.46\ \text{GHz}$ , с достаточно высокой добротностью. Данный эффект возникает из-за многократного отражения СВ на каждом изломе структуры. Также были построены пространственные карты распределения динамической компоненты намагниченности  $m_z$ , которую можно трактовать как фазу СВ в волноводе на частотах  $f = 5.2\ \text{GHz}$  (рис. 2, *b*) и  $f_1$  (рис. 2, *c*). Видно, что на частоте зоны не пропускания  $f_1$  мощность СВ слабо достигает выходной области волновода. При этом на частоте  $f_1$  во входной секции микроволновода возбуждается СВ с длиной волны  $\lambda_1 = 180\ \mu\text{m}$ , а в изогнутой секции длина волны на данной частоте становится равной  $\lambda_{c1} = 240\ \mu\text{m}$ . При длине изогнутой секции  $c = \frac{b}{\cos(\varphi)} \approx 465.1\ \mu\text{m}$  можно утверждать, что выполняется соотношение  $\lambda_{c1}/c \approx 1/2$ , что соответствует условию, когда на длине одной „наклонной“ секции укладывается две длины СВ. Принимая во внимание условие брэгговского резонанса для магнетонного кристалла  $\lambda = 2D/n$ , где  $n$  — натуральное число и  $D$  — период магнетонного кристалла, можно заметить сходство механизмов образования зон не пропускания в предложенной структуре и традиционно рассматриваемых магнетонно-кристаллических структурах. Таким образом, можно указать на то, что причина образования зон не пропускания в спектре зигзагообразной магнетонной структуры схожа с механизмом образования запрещенных зон в спектрах СВ магнетонных кристаллов, образованных, например, периодической системой канавок или отверстий на поверхности ЖИГ микроволновода, расположенных на расстоянии  $D$  друг



**Рис. 2.** *a*) АЧХ для референсной структуры (голубая линия) и для структуры на рис. 1 при расстоянии между границами волновода и резонатора  $200\ \mu\text{m}$  (оранжевая линия); *b*) пространственное распределение СВ на частоте  $5.2\ \text{GHz}$ ; *c*) пространственное распределение СВ на частоте зоны не пропускания  $f_1 \approx 5.37\ \text{GHz}$ .

от друга [13–15]. При этом можно ввести эффективный период рассматриваемой структуры  $D_{\text{eff}} = 2c$ , тогда соотношение между длиной волны в изогнутой секции станет  $\lambda_{c1} = D_{\text{eff}}/4$ . Появление в спектре прохождения сигнала области не пропускания с центральной частотой  $f_2$  можно связать с укорочением длины волны, при котором на изломах структуры также возникают условия для формирования отраженной волны и деструктивной интерференции падающей и отраженных волн; при этом, используя дисперсионное соотношение для ПМСВ в



**Рис. 3.** АЧХ структуры при расстоянии между волноводом и резонатором  $40\ \mu\text{m}$  (синяя линия);  $30\ \mu\text{m}$  (желтая линия);  $20\ \mu\text{m}$  (фиолетовая линия).

пленке [1] или микроволноводе можно оценить, что при изменении частоты на  $100\ \text{MHz}$ , т.е. для частоты входного сигнала  $f_2$ , соотношение между длиной волны в изогнутой секции станет  $\lambda_{c1} = D_{\text{eff}}/8$ . Можно заметить качественную аналогию со структурами на основе меандровых волноводов, в которых ввиду выполнения условия симметрии типа „скользящая плоскость“ не наблюдается первого брэгговского резонанса в спектре СВ [16–18].

Далее для выявления эффектов влияния ромбовидного микрорезонатора на полосы непропускания была построена показанная на рис. 3 частотная зависимость спектральной плотности мощности спин-волнового сигнала при изменении расстояния между границей „изогнутой“ секции зигзагообразного микроволновода и резонатора. Из АЧХ на рис. 3 видно, что при приближении резонатора к микроволноводу зоны непропускания  $f_1$  и  $f_2$  постепенно исчезают, но в то же время появляется центральная зона непропускания  $f_0$ , которая становится все глубже. Это связано с тем, что часть мощности СВ при распространении по волноводу на частотах вблизи зоны непропускания для рассмотренной выше структуры поглощается благодаря диполь-дипольному взаимодействию бегущей волны с полем ЖИГ-резонатора. При этом механизм взаимодействия СВ и резонатора близок к описанному в работе [8]. При уменьшении расстояния между волноводом и резонатором эффективность связи в системе резонатор-волновод растет, вследствие чего сильнее изменяется АЧХ. Можно отметить, что при экспериментальной реализации такого метода управления возможным оказывается использование методов точного микромеханического передвижения [19].

Таким образом, предложенная планарная структура на основе ЖИГ-микроволновода и резонатора ромбовидной формы может использоваться в качестве управляемого СВЧ-фильтра для приложений обработки сигнала на принципах логики.

## 4. Заключение

Численные расчеты показывают, что ЖИГ-волновод с периодической секцией в виде зигзагообразных изломов может изменять частотный состав проходящей через него СВ, в результате чего в спектре прохождения сигнала образуются зоны непропускания. Кроме того, обеспечить управление этими зонами непропускания можно, добавив в структуру резонатор. Управление составом зон непропускания происходит путем изменения расстояния между волноводом и резонатором. Механизм формирования зон непропускания схож с процессом образования запрещенных зон в спектрах СВ магнитных кристаллов. Запрещенные зоны в магнитных кристаллах предоставляют ключевое преимущество в регулировании прохождения СВ. Эти запрещенные зоны служат эффективным механизмом управления передачей магнитного момента в кристаллической структуре. Такой контроль открывает перспективы для разработки новых устройств и технологий на основе магнитных свойств. Данная структура может быть использована как пространственно-частотный фильтр СВЧ-сигнала для создания устройств обработки информационных сигналов на принципах магноники.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания FSRR-2023-0008.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A.G. Gurevich, G.A. Melkov. Magnetization Oscillations and Waves. CRC Press, London (1996).
- [2] Three-Dimensional Magnonics Layered, Micro- and Nanostructures / Ed. G. Gubbiotti. Jenny Stanford Publishing, N.Y. (2019). 416 p.
- [3] C. Felser, G.H. Fecher. Spintronics: From materials to devices. Springer, Netherlands (2013). 369 p.
- [4] S.A. Nikitov, P. Tailhades, C.S. Tsai. J. Magn. Magn. Mater. **236**, 3, 320 (2001).
- [5] M. Mruczkiewicz, P. Graczyk, P. Lupo, A. Adeyeye, G. Gubbiotti, M. Krawczyk. Phys. Rev. **96**, 10, 104411 (2017).
- [6] V. Chumak, A.A. Serga, B. Hillebrands. J. Phys. D **50**, 24, 244001 (2017).
- [7] E.N. Beginin, Yu.A. Filimonov, E.S. Pavlov, S.L. Vysotskii, S.A. Nikitov. Appl. Phys. Lett. **100**, 25, 252412 (2012).
- [8] A.A. Грачев, Е.Н. Бегинин, А.А. Мартышкин, А.Б. Хутиева, И.О. Фильченков, А.В. Садовников. Изв. вузов. ПНД **29**, 2, 254 (2021).
- [9] A.V. Sadovnikov, A.A. Grachev, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharavskii, A.A. Serdobintsev, D.M. Mitin, S.A. Nikitov. Phys. Rev. Lett. **120**, 25, 257203 (2018).
- [10] A. Khitun, M. Bao, K.L. Wang. J. Phys. D **43**, 26, 264005 (2010).

- [11] V.E. Demidov, S. Urazhdin, G. de Loubens, O. Klein, V. Cros, A. Anane, S.O. Demokritov. *Phys. Rep.* **673**, 1 (2017).
- [12] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B. Van Waeyenberge. *AIP Advances* **4**, 10, 107133 (2014).
- [13] В.А. Губанов, С.Е. Шешукова, А.В. Садовников. *ФТТ* **63**, 9, 1330 (2021). [V.A. Gubanov, S.E. Sheshukova, A.V. Sadovnikov. *Phys. Solid State* **63**, 9, 1361 (2021)].
- [14] А.А. Мартышкин, С.А. Одинцов, Ю.А. Губанова, Е.Н. Бегинин, С.Е. Шешукова, С.А. Никитов, А.В. Садовников. *Письма в ЖЭТФ* **110**, 8, 526 (2019). [A.A. Martyshkin, S.A. Odintsov, Yu.A. Gubanova, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, S.A. Nikitov, A.V. Sadovnikov. *JETP Lett.* **110**, 8, 533 (2019)].
- [15] A.V. Sadovnikov, V.A. Gubanov, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. *Phys. Rev. Appl.* **9**, 5, 051002 (2018).
- [16] G. Gubbiotti, A. Sadovnikov, S.E. Sheshukova, E. Beginin, S. Nikitov, G. Talmelli, C. Adelman, F. Ciubotaru. *J. Appl. Phys.* **132**, 8, 083902 (2022).
- [17] A.V. Sadovnikov, G. Talmelli, G. Gubbiotti, E.N. Beginin, S. Sheshukova, S.A. Nikitov, C. Adelman, F. Ciubotaru. *J. Magn. Magn. Mater.* **555**, 168670 (2022).
- [18] E.N. Beginin, A.V. Sadovnikov, V.K. Sakharov, A.I. Stognij, Y.V. Khivintsev, S.A. Nikitov. *J. Magn. Magn. Mater.* **492**, 165647 (2019).
- [19] A.D. Karenowska, J.F. Gregg, A.V. Chumak, A.A. Serga, B. Hillebrands. *J. Phys.: Conf. ser.* **303**, 012018 (2011).

*Редактор Е.В. Толстякова*

*Публикация материалов Симпозиума завершена.*