



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. Ю. Шараевская, П. А. Попов, С. А. Осокин, Численное моделирование распространения магнитостатических волн в связанных магнетонных кристаллах мейандрового типа,

*Известия вузов. ПНД*, 2020, том 28, выпуск 4, 425–434

<https://www.mathnet.ru/ivp384>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.170

21 апреля 2025 г., 23:53:13





## Численное моделирование распространения магнитостатических волн в связанных магнетонных кристаллах меандрового типа

А. Ю. Шараевская<sup>1</sup>, П. А. Попов<sup>2,3</sup>, С. А. Осокин<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники имени В.А.Котельникова РАН  
Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт  
Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9  
E-mail: upark@inbox.ru, paavali.popov@gmail.com, osokinserg@gmail.com

Автор для переписки Шараевская Анна Юрьевна, upark@inbox.ru

Поступила в редакцию 17.03.2020, принята к публикации 24.06.2020, опубликована 31.08.2020

**Цель** работы состоит в обобщении результатов численных исследований для связанных магнетонных меандровых структур в случае распространения в таких структурах разных типов магнитостатических волн. **Методы.** Для решения поставленных задач использовались два известных метода – конечных элементов и конечных разностей для связанных ферромагнитных структур. Для численного решения методом конечных элементов в магнитостатическом приближении использовались уравнения магнитостатики, полученные из уравнений Максвелла. Для расчета внутренних эффективных полей было проведено микромагнитное моделирование с привлечением метода конечных разностей. **Результаты.** Проведены исследования особенностей распространения магнитостатических спиновых волн в связанных периодических сложных структурах в виде двух связанных меандровых магнетонных кристаллов, разделенных диэлектрическим слоем, на основе численного моделирования методом конечных элементов. Показано, что используемый метод позволяет получить дисперсионные уравнения для поверхностных, прямых объемных и обратных объемных магнитостатических волн, распространяющихся в таких структурах, и выявить основные особенности дисперсионных характеристик этих волн. **Заключение.** Показано, что при определенных условиях в спектрах появляются запрещенные зоны, обусловленные брэгговским отражением и сложной структурой магнетонного волновода. Ширина и положение этих запрещенных зон зависит от параметров магнитных пленок, их геометрических размеров и направления постоянного магнитного поля. Полученные результаты могут быть реализованы при создании на основе магнетонных кристаллов частотно-избирательных устройств для селективной обработки информационных сигналов в СВЧ-диапазоне.

**Ключевые слова:** магнетонный кристалл, магнитостатическая волна, микроволновый диапазон, запрещенная зона.

**Образец цитирования:** Шараевская А.Ю., Попов П.А., Осокин С.А. Численное моделирование распространения магнитостатических волн в связанных магнетонных кристаллах меандрового типа // Известия вузов. ПНД. 2020. Т. 28, № 4. С. 425–434. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2020-28-4-425-434>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

**Финансовая поддержка.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-37-00373, № 18-37-20048), а также гранта Президента РФ (№ МК-3607.2019.9).

## Numerical simulation of magnetostatic waves propagation in coupled meander-type magnon crystals

A. Yu. Sharaevskaya<sup>1</sup>, P. A. Popov<sup>2,3</sup>, S. A. Osokin<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Saratov State University

83, Astrakhanskaya str., Saratov 410012, Russia

<sup>2</sup>Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS

11-7, Mokhovaya, Moscow 125009, Russia

<sup>3</sup>Moscow Institute of Physics and Technology

9, Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

E-mail: upark@inbox.ru, paavali.popov@gmail.com, osokinserg@gmail.com

Correspondence should be addressed to Sharaevskaya Anna Yu., upark@inbox.ru

Received 17.03.2020, accepted 24.06.2020, published 31.08.2020

**Purpose** of the work is to generalize the results of numerical studies for coupled magnonic meander structures in the case of the propagation of various types of magnetostatic waves in such structures. **Methods.** In order to solve the problems two well-known methods were used – finite elements and finite differences for coupled ferromagnetic structures. For the numerical solution with the finite element method in the magnetostatic approximation, the magnetostatic equations derived from Maxwell's equations were used. To calculate the internal effective fields, a micromagnetic simulations were carried out using the finite difference method. **Results.** The features of the propagation of magnetostatic spin waves in coupled periodic complex structures in the form of two coupled meander-type magnonic crystals separated by a dielectric layer based on numerical simulation by the finite element method are studied. It is shown that the method used allows one to obtain dispersion equations for surface, forward volume and backward volume magnetostatic spin waves propagating in such structures and to reveal the main features of the dispersion characteristics of these waves. **Conclusion.** It is shown that, under certain conditions, forbidden bands gaps appear in the spectra due to the Bragg reflection and the complex structure of the magnonic waveguide. The width and position of these forbidden zones depends on the parameters of the magnetic films, their geometric dimensions and the direction of the constant magnetic field. The results can be utilized in creating frequency-selective devices for the selective processing of information signals in the microwave range based on magnonic crystals.

*Key words:* magnon crystal, magnetostatic wave, microwave range, band gap.

*Reference:* Sharaevskaya A.Yu., Popov P.A., Osokin S.A. Numerical simulation of magnetostatic waves propagation in coupled meander-type magnon crystals. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2020, vol. 28, no. 4, pp. 425–434. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2020-28-4-425-434>

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

*Acknowledgements.* This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects No. 18-37-00373, No. 18-37-20048), as well as by the President of the Russian Federation (No. MK-3607.2019.9).

### Введение

В настоящее время благодаря новым подходам в технологиях получения нано- и микро-размерных периодических структур возможно создание кристаллов, подобных фотонным, на основе магнитных материалов – магنونных кристаллов (МК) [1–6]. В таких структурах могут распространяться магнитостатические спиновые волны (МСВ), и в зависимости от направления приложения внешнего магнитного поля возможно распространение трех типов таких волн: поверхностных МСВ, прямых объемных МСВ, обратных объемных МСВ (ПМСВ, ПОМСВ, ООМСВ). Интерес к магنونным кристаллам связан, прежде всего, с тем, что возможно управление их свойствами внешним магнитным полем; можно создавать кристаллы в диапазоне сверх-высоких частот размером порядка нескольких миллиметров; возможно использование планарной технологии и др. [2–6]. Наличие пространственной периодичности приводит к возникновению

в спектре спиновых волн запрещенных зон (ЗЗ) для волновых чисел, удовлетворяющих условию брэгговского резонанса. Наличие запрещенных зон в спектре спиновых волн позволяет создавать на основе магнитных кристаллов перестраиваемые магнитным полем устройства для обработки и генерации сигналов в микроволновом диапазоне [6–11]. В этом случае актуальной является задача управления характеристиками запрещенных зон в спектре распространяющихся волн (плотностью, шириной и др.). Управление характеристиками запрещенных зон предлагалось осуществлять: динамически, например, путём создания переменного магнитного поля [9]; за счёт изменения геометрических параметров структур [10] и изменения граничных условий [11]; за счёт нарушения периодичности и создания дефектов. Магнитные периодические структуры позволят уменьшить плоскостные размеры разрабатываемых элементов, что, в частности, приведет к уменьшению потерь на распространение спиновых волн и, следовательно, к уменьшению энергетических потерь. Еще более интересная картина дисперсии возникает в связанных волноводах, когда изменяются не только свойства спиновых волн отдельных волноводов, но и свойства связанных волн [12]. Интерес к вертикально связанным структурам во многом обусловлен тенденцией к переходу к трехмерным структурам вместо двумерных [13–15].

В работах [13–15] исследовалось распространение поверхностных магнитостатических спиновых волн в структуре, выполненной в виде меандра, в которой волна может распространяться по двум направлениям. Кроме того, исследовались две вертикально симметрично связанные структуры, в которых выступы и впадины располагаются одна над другой или сдвинуты на полпериода. В [13] внешнее магнитное поле было направлено вдоль оси  $Oy$ , так что в каждом из сегментов меандра распространялась поверхностная магнитостатическая спиновая волна, при этом структура распределения магнитных полей в каждом из сегментов была идентична. В случае, когда внешнее магнитное поле направлено вдоль одной из осей, а именно  $Oz$  или  $Ox$ , в структуре будут распространяться объемные магнитостатические волны: в одних сегментах – прямая, в других – обратная и т.д. [14, 15].

В настоящей работе на основе численного моделирования рассматриваются основные особенности дисперсионных характеристик спиновых волн в периодических структурах, представляющих собой связанную систему магнитных кристаллов с конфигурацией меандра. Структуры полей спиновых волн в разных сегментах системы различны при учете разного характера дисперсии МСВ. Это приводит к более сложному взаимодействию волн при переходе из одного сегмента структуры в другой.

## 1. Модель структуры

Рассмотрим структуру, схема которой приведена на рис. 1 и которая представляет собой два связанных МК меандровой формы с одинаковыми геометрическими и магнитными параметрами, разделенных диэлектрическим слоем толщиной  $h$ . Связь между МК осуществляется через высокочастотные электромагнитные поля.

Структура помещена во внешнее магнитное поле  $H_0$ , которое может быть направлено вдоль осей (вдоль оси  $Ox$  – распространяется ООМСВ, вдоль  $Oy$  – ПМСВ, вдоль  $Oz$  – ПОМСВ) и соответствует значению, при

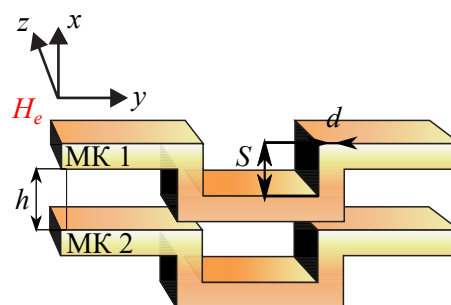


Рис. 1. Схема связанных магнитных кристаллов с конфигурацией меандра

Fig. 1. The scheme of coupled magnon crystals with a meander configuration

котором в каждом из сегментов МК распространяется МСВ (см. рис. 1). Структура имеет следующие параметры: толщина пленки ЖИГ  $d = 1$  мкм, расстояние между верхними границами сегментов структур  $h = 5.5$  мкм, высота вертикальных сегментов  $s = 4$  мкм.

**1.1. Методы.** Для численного моделирования методом конечных элементов была задана двумерная конфигурация одного периода структуры. Далее выбиралась расчетная область прямоугольной формы размером  $100 \times 250$  мкм, которая совпадает с плоскостью поперечного сечения структуры, центр расчетной области выбирался в центре пленки. На вертикальных и горизонтальных границах расчетной области устанавливались граничные условия – идеальный металл в плоскости  $yz$  и периодические граничные условия в плоскости  $xz$ . Для расчета полей задавалась треугольная сетка, с характерным размером элемента до 16 мкм, при этом вблизи выступов, где происходит локализация взаимодействия прямых и встречных волн, проводилось уменьшение этого размера до 0.075 мкм для того, чтобы поиск решений был наиболее оптимальным на сложной геометрии ступеньки меандра.

Граничные условия в расчетной области задавались следующим образом: периодические граничные условия на боковых сторонах – из условия периодичности элементарных ячеек МК; граничные условия в виде идеального электрического проводника (ПЕС) для верхней и нижней границы расчетной области. В случае приложенного внешнего магнитного поля  $H_0$  вдоль  $z$  вид тензора магнитной проницаемости для ферромагнитной области задавался в виде [16–19]:

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

где  $\mu(\omega) = \frac{\omega_H(\omega_H + \omega_M) - \omega^2}{\omega_H^2 - \omega^2}$ ,  $\mu_a(\omega) = \frac{\omega_M \omega}{\omega_H^2 - \omega^2}$ ,  $\omega_M = \gamma 4\pi M_0$ ,  $\omega_H = \gamma H$ ,  $\gamma$  – гиромагнитное отношение,  $H$  – намагниченность насыщения ферромагнетика.

Исходными уравнениями для численного решения являются уравнения магнитостатики, полученные из уравнений Максвелла [17] для гармонической временной зависимости полей  $e^{-j\omega t}$  вида

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{B} &= 0, \\ \vec{B} &= \hat{\mu}(\omega) \vec{h}, \\ \vec{h} &= -\operatorname{grad} \Psi. \end{aligned} \quad (1)$$

Для магнитостатического потенциала  $\Psi$  решение ищется в виде

$$\Psi(x, y) = \phi(x, y) e^{-jky}, \quad (2)$$

где  $k$  – волновое число.

Исходя из (1) и (2) было получено уравнение пониженной размерности («weak form» – слабая форма) [19] для дальнейшего использования этого уравнения в методе конечных элементов. Задача в магнитостатическом приближении, записанная в виде уравнения слабой формы, в этом случае сводилась к квадратичной задаче на собственные числа  $k$  и решалась также в программе Comsol [19].

Для того чтобы рассчитать внутренние эффективные поля, было проведено микромагнитное моделирование с помощью программного пакета MuMax3 [20].

## 2. Результаты

На рис. 2 представлены результаты численных расчетов дисперсионных характеристик для связанных меандровых структур всех типов МСВ с помощью метода конечных элементов (рис. 2, *a*: верхняя кривая – симметричная мода, нижняя – ассиметричная, пунктир – одиночная структура; рис. 2, *b*: верхняя кривая – симметричная мода, нижняя – ассиметричная, пунктир – одиночная структура; рис. 2, *c*: верхняя кривая – ассиметричная мода, нижняя – симметричная, пунктир – одиночная структура).

В общем случае связь между двумя пленками приводит к существованию симметричных и антисимметричных связанных мод СВ. Спектры спиновых волн в вертикально связанных ферромагнитных пленках существенно более сложные, чем в отдельных пленках. Это обусловлено тем, что помимо спектров отдельных мод появляются спектры для связанных колебаний намагниченности между магнитными структурами. С учетом особенностей распространения объемных МСВ в сложных меандровых структурах, численных решений ( $k$ ) по всему диапазону частот существенно меньше (см. рис. 2, *b, c*), чем для поверхностных МСВ. Как известно, для ООМСВ внутреннее поле уменьшается с ростом  $k$ , уменьшаются граничные частоты. Следовательно, в процессе распространения частота ООМСВ также уменьшается и вид дисперсии становится аномальным (рис. 2, *c*). Связанные волны имеют более сложную дисперсию, потому что структура состоит из двух меандровых ферромагнитных пленок, разделенных диэлектрическим слоем (в отличие от одиночной). При определенных условиях (за счет внутренних полей) в таких структурах возможно распространение ПОМСВ и ООМСВ в некоторых участках меандра [13]. На рис. 2 также показано серой заливкой расположение запрещенных зон в спектре.

На рис. 3 приведены некоторые особенности поведения МСВ в области «ступеньки» для пространственного распределения потенциала. На рис. 3, *e, h* хорошо видна локализация максимумов амплитуд для ПОМСВ и ООМСВ.

На рис. 4 показано распределение величины внутреннего эффективного магнитного поля по ширине пленки. Из результатов микромагнитного моделирования MuMax3 (см. рис. 4) видно, что особый интерес представляет неоднородность внутреннего поля для объемных МСВ, так как для поверхностных МСВ такой неоднородности не наблюдается, что обусловлено профилем внутреннего магнитного поля для объемных МСВ. Как можно заметить, у границ наблюдается неоднородность полей размером порядка толщины пластинок. Её возникновение связано

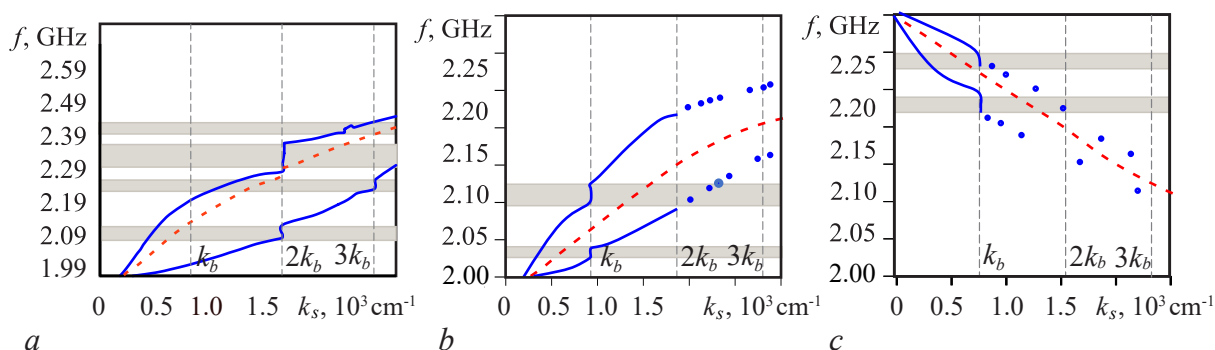


Рис. 2. Дисперсии низших связанных мод в связанных МК меандрового типа,  $4\pi M = 1750$  Гс. Параметры пластинок:  $d = 1$  мкм,  $h = 4$  мкм. *a* – ПМСВ,  $H_0 = 250$  Э; *b* – ПОМСВ,  $H_0 = 688$  Э; *c* – ООМСВ,  $H_0 = 688$  Э

Fig. 2. Dispersion of lowest coupled modes in coupled magnon crystals of meander types.  $4\pi M = 1750$  G. Parameters of the plates:  $d = 1$   $\mu\text{m}$ ,  $h = 4$   $\mu\text{m}$ . *a* – surface MSW,  $H_0 = 250$  Oe; *b* – forward volume MSW,  $H_0 = 688$  Oe; *c* – back volume MSW,  $H_0 = 688$  Oe

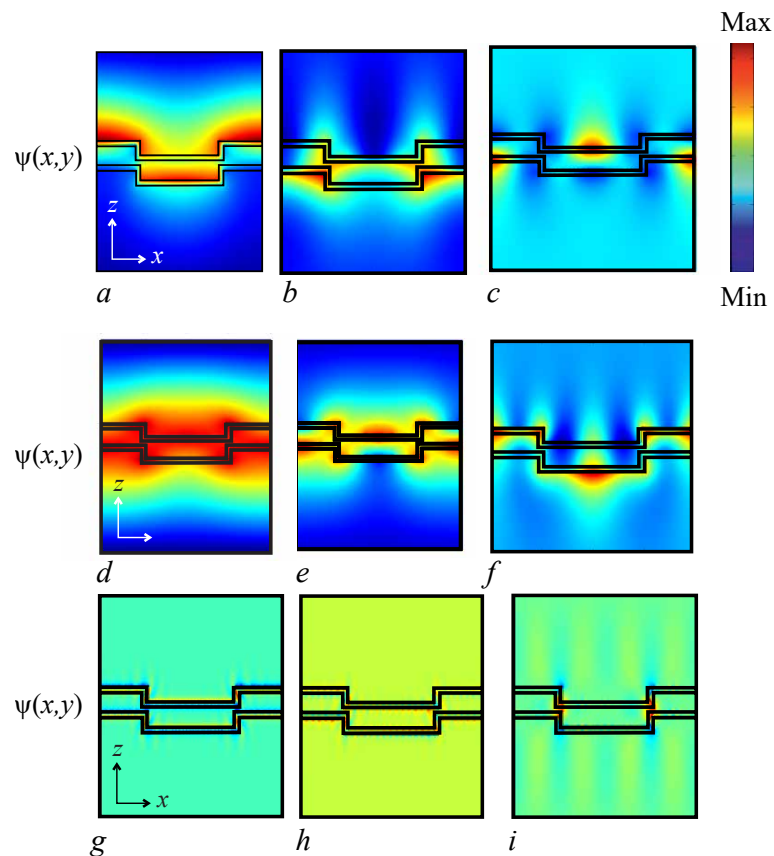


Рис. 3. Распределение потенциала в 3D меандровой связанной структуре. Параметры пластинок:  $d = 11$  мкм,  $h = 4$  мкм. Значения  $k$ ,  $\text{см}^{-1}$ , для ПМСВ: 1000 (a), 2700 (b), 1570 (c); для ПОМСВ: 1000 (d), 2700 (e), 1570 (f); для ООМСВ: 1000 (g), 2700 (h), 1570 (i)

Fig. 3. Distribution of the potential in a 3D meander-type coupled structure.  $d = 11 \mu\text{m}$ ,  $h = 4 \mu\text{m}$ . Values of parameter  $k$ ,  $\text{cm}^{-1}$ , for surface MSW: 1000 (a), 2700 (b), 1570 (c); for forward volume MSW: 1000 (d), 2700 (e), 1570 (f); for back volume MSW: 1000 (g), 2700 (h), 1570 (i)



Рис. 4. Результаты моделирования внутреннего эффективного магнитного поля. Параметры пластинок:  $d = 1$  мкм,  $h = 4$  мкм, параметры поля:  $H_0 = 2100$  Э,  $4\pi M = 1750$  Гс.  $Z$ -компоненты поля по высоте при ПОМСВ и ООМСВ (a), ПМСВ (b), ООМСВ (c)

Fig. 4. Results of modeling the internal effective magnetic field. Plate parameters:  $d = 1 \mu\text{m}$ ,  $h = 4 \mu\text{m}$ , field parameters:  $H_0 = 2100$  Oe,  $4\pi M = 1750$  G.  $Z$ -components of the field in height for forward volume MSW and for back volume MSW (a), for surface MSW (b), for back volume MSW (c)

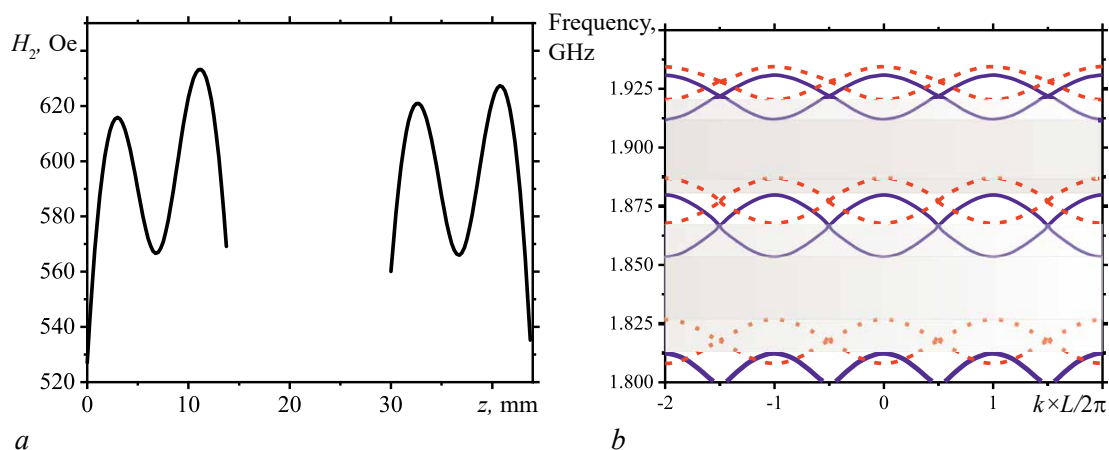


Рис. 5. *a* – результаты моделирования внутреннего эффективного магнитного поля  $z$ -компоненты в срезе меандров в нормально намагниченной структуре, *b* – дисперсионные характеристики для связанной структуры при распространении ООМСВ. Параметры пластинок:  $d = 1$  мкм,  $h = 2$  мкм,  $s = 3.5$  мкм; параметры поля:  $H_0 = 2100$  Э,  $4\pi M = 1750$  Гс

Fig. 5. *a* – simulation results of the internal effective magnetic field of the  $z$  component in the section of meanders in a normally magnetized structure, *b* – dispersion characteristics for a coupled structure during the propagation of back volume MSW. Plate parameters:  $d = 1 \mu\text{m}$ ,  $h = 2 \mu\text{m}$ ,  $s = 3.5 \mu\text{m}$ ; field parameters:  $H_0 = 2100$  Oe,  $4\pi M = 1750$  G

с несимметричностью среды у границ, которой нельзя пренебречь. Вклад в эффективное поле магнитных диполей, заключённых в объёме пластинки, расположенных диаметрально противоположно исследуемой точке, становится всё более неравноценным по мере увеличения параметра  $s$ .

На рис. 5, *b* представлены результаты численных расчетов дисперсионных характеристик для связанных меандровых структур всех типов МСВ с помощью метода конечных разностей (MuMax3). Пунктирными кривыми показаны связанные ассиметричные моды, сплошными кривыми – симметричные моды, серой заливкой показаны области запрещенных зон.

### Заключение

В работе проведено численное моделирование спиновых магнитостатических волн в связанных магнотных кристаллах с конфигурацией меандра. Найдены эффективные внутренние магнитные поля в этих структурах, и показаны особенности дисперсионных характеристик таких структур. В отличие от работ [13, 14], где были рассмотрены ПОМСВ и ПМСВ, в данной работе рассмотрены все типы магнитостатических волн и особое внимание уделено ООМСВ. Показано следующее.

1. За счет сложной геометрии и неоднородности внутренних полей при моделировании процессов распространения ПОМСВ и ООМСВ в связанных меандровых структурах, особый интерес представляют участки ступенек. За счет таких неоднородностей величина коэффициента связи на вертикальных участках может быть отлична от величины коэффициента связи на горизонтальных участках, что продемонстрировано на распределениях внутренних полей и потенциала, полученных методами конечных элементов и конечных разностей.
2. При определенных условиях в спектрах СВ в связанных меандровых МК появляются запрещенные зоны, обусловленные брэгговским отражением и сложной структурой магнотного волновода.
3. Ширина и положение этих запрещенных зон зависит от параметров магнитных пленок и их геометрических размеров, данные параметры позволяют эффективно управлять пропускными характеристиками структуры.



Наличие вертикальных и горизонтальных сегментов в магнонных периодических структурах, а также связи между ними открывает возможность создания и использования структур подобного типа в качестве спин-волновой элементной базы спинтроники.

### Библиографический список

1. *Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D.* Magnonics // *Journal of Physics: Applied Physics*. 2010. Vol. 43, no. 26. P. 264001.
2. *Chumak A.V., Vasyuchka V.I., Serga A.A., Hillebrands B.* Magnon spintronics // *Nature Physics*. 2015. Vol. 11, no. 6. P. 453.
3. *Никитов С.А., Калябин Д. В., Лусенков И.В.* Магноника – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники // *Успехи физических наук*. 2015. Т. 185, № 10. С. 1009.
4. *Nikitov S.A., Tailhades P., Tsai C.S.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 2001. Vol. 236, no. 3. P. 320.
5. *Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B.* Spin waves in periodic magnetic structures – magnonic crystals // *Journal of Physics: Applied Physics*. 2017. Vol. 50, no. 24. P. 244001.
6. *Sander D., Valenzuela S.O., Makarov D. et al.* The 2017 magnetism roadmap // *Journal of Physics: Applied Physics*. 2017. Vol. 50, no. 36. P. 363001.
7. *Krawczyk M., Puzkarski H.* Plane-wave theory of three-dimensional magnonic crystals // *Physical Review B*. 2008. Vol. 77, no. 5. 054437.
8. *Graczyk P., Krawczyk M., Dhuey S. et al.* Magnonics band gap and mode hybridization in continuous permalloy film induced by vertical coupling with an array of permalloy ellipses// <https://arxiv.org/abs/1805.12178>.
9. *Demidov V.E., Urazhdin S., Zholid A. et al.* Spin-current nano-oscillator based on nonlocal spin injection // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. P. 8578.
10. *Demidov V.E., Kostylev M.P., Rott K. et al.* Excitation of short-wavelength spin waves in magnonic waveguides // *Applied Physics Letters*. 2011. Vol. 99, no. 8. P. 082507.
11. *Spin Wave Confinement – Propagating Waves* / Ed. S.O. Demokritov. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2017.
12. *Morozova M., Sharaevskaya A., Sadovnikov A. et al.* Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic structures // *Journal of Applied. Physics*. 2016. Vol. 120, no. 22. P. 223901.
13. *Beginin E.N., Sadovnikov A.V., Sharaevskaya A.Y. et al.* Spin wave steering in three-dimensional magnonic networks // *Applied Physics Letters*. 2018. Vol. 112, no. 12. P. 122404.
14. *Popov P.A., Sharaevskaya A.Yu., Beginin E.N. et al.* Spin wave propagation in three-dimensional magnonic crystals and coupled structures // *J. Magn. Magn. Mater.* 2019. Vol. 476. P. 423–427.
15. *Popov P.A., Sharaevskaya A.Yu., Kalyabin D.V., Stognii A.I., Beginin E.N, Sadovnikov A.V., Nikitov S.A.* Magnetostatic Spin Waves in 3D Ferromagnetic Structures // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2018. Vol. 63, no. 12. P. 1431.
16. *Stancil D.D., Prabhakar A.* Spin Waves. Theory and Applications. N.Y.: Springer, 2009.
17. *Kabos P., Stalmachov V.* Magnetostatic Waves and their Application: Springer, 1994. P. 5–37. (Chapman & Hall, 1994).
18. *Damon R.W., Eschbach J.* Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // *J. Phys. Chem. Solids*. 1961. Vol. 19, no. 3–4. P. 308.
19. Calculated using COMSOL Multiphysics software from COMSOL, Inc.

20. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M. et al. The design and verification of MuMax3 // AIP Advances. 2014. Vol. 4, no. 10. P. 107133.

## References

1. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. Magnonics. *Journal of Physics: Applied Physics*, 2010, vol. 43, no. 26, p. 264001.
2. Chumak A.V., Vasyuchka V.I., Serga A.A., Hillebrands B. Magnon spintronics. *Nature Physics*, 2015, vol. 11, no. 6, p. 453.
3. Nikitov S.A., Kalyabin D.V., Lisenkov I.V. Magnonics: A new research area in spintronics and spin wave electronics. *Phys. Usp.*, 2015, vol. 58, p. 1002.
4. Nikitov S.A., Tailhades P., Tsai C.S. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2001, vol. 236, no. 3, p. 320.
5. Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B. Spin waves in periodic magnetic structures – magnonic crystals. *Journal of Physics: Applied Physics*, 2017, vol. 50, no. 24, p. 244001.
6. Sander D., Valenzuela S.O., Makarov D. et al. The 2017 magnetism roadmap. *Journal of Physics: Applied Physics*, 2017, vol. 50, no. 36, p. 363001.
7. Krawczyk M., Puszkarski H. Plane-wave theory of three-dimensional magnonic crystals. *Physical Review B*, 2008, vol. 77, no. 5, 054437.
8. Graczyk P., Krawczyk M., Dhuey S. et al. Magnonics band gap and mode hybridization in continuous permalloy film induced by vertical coupling with an array of permalloy ellipses. <https://arxiv.org/abs/1805.12178>.
9. Demidov V.E., Urazhdin S., Zholid A. et al. Spin-current nano-oscillator based on nonlocal spin injection. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, p. 8578.
10. Demidov V.E., Kostylev M.P., Rott K. et al. Excitation of short-wavelength spin waves in magnonic waveguides. *Applied Physics Letters*, 2011, vol. 99, no. 8, 082507.
11. Spin Wave Confinement – Propagating Waves / Ed. S.O. Demokritov. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2017.
12. Morozova M., Sharaevskaya A., Sadovnikov A. et al. Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic structures. *Journal of Applied. Physics*, 2016, vol. 120, iss. 22, p. 223901.
13. Beginin E.N., Sadovnikov A.V., Sharaevskaya A.Y. et al. Spin wave steering in three-dimensional magnonic networks. *Applied Physics Letters*, 2018, vol. 112, no. 12, p. 122404.
14. Popov P.A., Sharaevskaya A.Yu., Beginin E.N. et al. Spin wave propagation in three-dimensional magnonic crystals and coupled structures. *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 476, pp. 423–427.
15. Popov P.A., Sharaevskaya A.Yu., Kalyabin D.V., Stognii A.I., Beginin E.N., Sadovnikov A.V., Nikitov S.A. Magnetostatic Spin Waves in 3D Ferromagnetic Structures. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 12, p. 1431.
16. Stancil D.D., Prabhakar A. Spin Waves. Theory and Applications. N.Y.: Springer, 2009.
17. Kabos P., Stalmachov V. Magnetostatic Waves and their Application: Springer, 1994, pp. 5–37. (Chapman & Hall, 1994).
18. Damon R.W., Eschbach J. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. *J. Phys. Chem. Solids*, 1961, vol. 19, no. 3–4, p. 308.
19. Calculated using COMSOL Multiphysics software from COMSOL, Inc.
20. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M. et al. The design and verification of MuMax3. *AIP Advances*, 2014, vol. 4, no. 10, p. 107133.



*Шараевская Анна Юрьевна* – родилась в Саратове (1992). Получила степень магистра по специальности «прикладные математика и физика» на факультете нелинейных процессов Саратовского государственного университета (2015). Окончила аспирантуру в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН по специальности «радиофизика». Является постоянным участником российских и зарубежных научных конференций. Является автором и соавтором 15 публикаций в журналах, входящих в список WoS.

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
Email: upark@inbox.ru



*Попов Павел Александрович* – 1996 года рождения, студент магистратуры Московского физико-технического института (НИУ) Физтех-школы электроники, фотоники и молекулярной физики. С 2017 года является сотрудником ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Является соавтором 4 публикаций в журналах списка WoS и участником международных конференций «ICU 2019» и «EASTMAG-2019» по спинтронике, магнетизму и физике магнитных явлений. Научные интересы – магнетизм тонких пленок, магнетизма, волновые процессы в антиферромагнетиках, ТГц спиновые волны.

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7  
Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН  
Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9  
Московский физико-технический институт  
Email: paavali.popov@gmail.com



*Осокин Сергей Александрович* – родился в 1992 году. Окончил Московский физико-технический институт (2015) и аспирантуру МФТИ (2019). С 2012 года является сотрудником Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Область научных интересов – магнетизма, спинтроника, терагерцевая спинтроника. Автор принимал участие в международных научных конференциях и имеет 6 публикаций в журналах из списка WoS.

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7  
Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН  
Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9  
Московский физико-технический институт  
E-mail: osokinserg@gmail.com