

## Дисперсионные характеристики магнитоэлектрических волн в слоистых структурах на основе магнетных кристаллов

М.А. Морозова,\* А.Ю. Шараевская†  
Саратовский государственный университет  
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83

Работа посвящена исследованию механизмов формирования брэгговских запрещенных зон в ферромагнитных периодических структурах, представляющих собой два связанных одномерных МК, параметры которых могут различаться, и структуру типа МК-ферритовая пленка, при возбуждении в них магнитоэлектрических волн.

PACS: 75.30.Ds.

УДК: 537.622.4.

Ключевые слова: магнетный кристалл, магнитоэлектрическая волна, дисперсионная характеристика, запрещенная зона.

В последнее время большой интерес вызывает получение кристаллов, подобных фотонным [1], на основе магнетных плёнок — магнетных кристаллов (МК) [2, 3], в которых распространяющимися волнами являются спиновые волны (магноны). МК имеют определенные преимущества по сравнению с фотонными кристаллами: возможно управление свойствами магнетных кристаллов внешним магнетным полем; в частности, магнетной запрещенной зоной, можно создавать кристаллы в диапазоне СВЧ размером порядка нескольких миллиметров, использование планарной технологии и др.. Интерес к периодическим и структурам на основе ферромагнитных пленок связан с тем, что такие планарные структуры представляют интерес для разработки перестраиваемых магнетным полем устройств обработки информации в СВЧ диапазоне [4]. Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованиям характеристик магнетных кристаллов (см, например, [2–6]), в основном, в них рассматриваются одиночные структуры. В настоящее время особый интерес вызывают исследования структур в виде набора слоев, представляющих собой волноведущие структуры с различными параметрами и в которых существенную роль в формировании волнового процесса играет электродинамическая связь между слоями. Настоящая работа посвящена исследованию механизмов формирования брэгговских запрещенных зон в ферромагнитных периодических структурах, представляющих собой два связанных одномерных МК, параметры которых могут различаться, и структуру типа МК-ферритовая пленка, при возбуждении в них магнитоэлектрических волн (МЭВ). Важной особенностью связанных структур является возбуждение на одной частоте двух нормальных мод — быстрой и медленной волн с различными групповыми и фазовыми скоростями. Впервые механизм формирования запрещенных зон в периодической структуре, представляющей собой два связанных одномерных МК с одинаковыми па-

раметрами, рассмотрен авторами в [7]. Периодическая структура, рассматриваемая в работе, в общем случае представляет собой два МК, разделенных диэлектрическим слоем толщиной  $D$ , как показано на рис. 1.

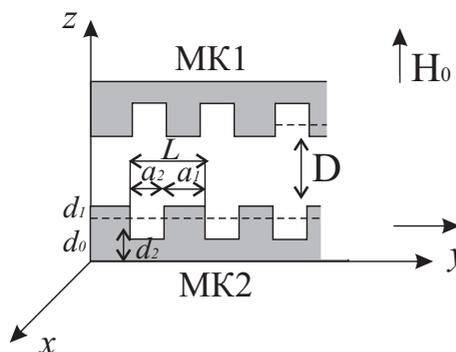


Рис. 1: Структура из двух одномерных МК, разделённых диэлектрическим слоем

Каждый из магнетных кристаллов, в свою очередь, представляет собой ферромагнитную пленку с намагниченностью насыщения  $M_0$ , на поверхности которой нанесены неоднородности в виде канавок. Толщина исходной пленки  $d_1$ , эффективная толщина пленки  $d_0$ , глубина канавки  $\Delta d = d_1 - d_2$ , её ширина  $a_2 = L - a_1$ , период структуры  $L$ . Будем считать, что указанные геометрические размеры могут быть различными для МК-1 и МК-2. На основе метода связанных волн для рассматриваемых структур построена общая модель в виде системы алгебраических уравнений для огибающих прямых и встречных волн, которая имеет вид:

$$\begin{cases} (-\omega^2 + \omega_H^2 + \beta k_0)A_{1,2} + \beta k_0 K A_{1,2} + \\ \quad + \beta \frac{\delta d_{1,2}}{2} \frac{k_{-1}^2}{k_0} (B_{1,2} + K B_{2,1}) = 0, \\ (-\omega^2 + \omega_H^2 + \beta k_{-1})B_{1,2} + \beta k_{-1} K B_{1,2} + \\ \quad + \beta \frac{\delta d_{1,2}}{2} \frac{k_0^2}{k_{-1}} (A_{1,2} + K A_{2,1}) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $A_{1,2}, B_{1,2}$  — амплитуды прямых и встречных волн

\*E-mail: maluginama@yandex.ru

†E-mail: upark@inbox.ru

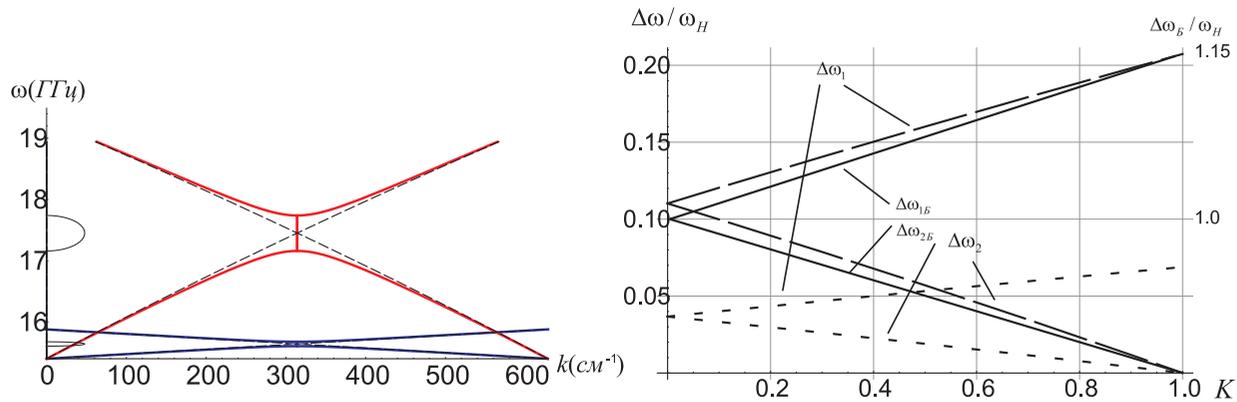


Рис. 2: Дисперсионные характеристики (а) и зависимости запрещенных зон (б) от параметров структуры МК–МК: а) — дисперсионные характеристики для быстрой (красные кривые) и для медленной (синие кривые) волн при  $\delta d_{1,2} = 0, 3$ ,  $K = 0, 8$ ; б) — ширины запрещенных зон ( $\Delta\omega_1$  — для быстрой волны,  $\Delta\omega_2$  — для медленной волны) от параметра  $K$  при  $\delta d = 0, 5$  (пунктирные прямые с короткими штрихами) и  $\delta d = 1, 5$  (с длинными штрихами). Сплошными линиями показаны зависимости центральных частот запрещенных зон ( $\Delta\omega_{B1}$  — для быстрой волны,  $\Delta\omega_{B2}$  — для медленной) от параметра  $K$

МСВ;  $\beta = \frac{\omega_M \omega_H d_0}{2}$  [4],  $K$  — электродинамический параметр, определяющий связь между магнотными кристаллами,  $\delta d_{1,2}$  — параметры, характеризующие геометрические размеры периодических структур 1 и 2, соответственно. Если параметр  $\delta d = 0$  для одного из МК, то такой случай соответствует структуре МК–ферромагнитная пленка. Используя в (1) условие Брэгга и приравнявая детерминант системы (1) к нулю, получаем дисперсионное уравнение для связанных периодических структур с разными геометрическими параметрами. Здесь и далее расчеты проводились при следующих параметрах структуры:  $\omega_M = 2\pi \cdot 4,9$  ГГц,  $\omega_H = 2\pi \cdot 2,45$  ГГц,  $d_1 = 7$  мкм,  $d_2 = 4$  мкм,  $d_0 = 5,5$  мкм,  $a_{1,2} = 50$  мкм,  $L = 100$  мкм. Результаты расчетов дисперсионных характеристик, постоянных затухания в области запрещенных зон и ширины запрещенных зон представлены на рис. 2,3.

В случае связанных однородных плёнок ( $\delta d_{1,2} = 0$ ) связь приводит к тому, что дисперсионная кривая, соответствующая одиночной однородной пленке, расщепляется на две, соответствующие быстрой и медленной волнам — нормальным модам связанной структуры (пунктирные кривые на рис. 2а и 3а). Если плёнка представляет собой периодическую структуру, то возникают встречные быстрые и медленные волны. Если в рассматриваемой структуре параметры МК одина-

ковые, то на частотах фазового синхронизма взаимодействие быстрых прямой и встречной волн, а также медленных прямой и встречной волн приводит к формированию только двух запрещенных зон (см. серые кривые на рис. 2а). В этом случае параметры запрещенных зон, как показано на рис. 2б, линейно зависят от величины связи.

Для случая связанной структуры в виде МК–пленка формируются три запрещенные зоны (рис. 3а). Аналогичный результат получается и для структуры МК–МК с разными геометрическими параметрами, что обусловлено несимметричностью структур. Из результатов, представленных на рис. 3б, видно, что ширина дополнительной зоны  $\Delta\omega_3$  увеличивается с ростом параметра несимметричности и уменьшается с ростом коэффициента связи. Таким образом, на основе результатов численного моделирования показана возможность эффективного управления характеристиками запрещенных зон в связанных периодических ферромагнитных структурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Правительства РФ (ГК № 11.G34.31.0030) и РФФИ (№ 14-07-31142) и в рамках президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (№ НШ-828.2014.2).

- [1] Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. (М.:Физматлит. 2005).  
 [2] Гуляев Ю.В. и др. Письма в ЖЭТФ. **77**, № 10. С. 670 (2003).  
 [3] Serga A.A. J. Phys. D: Appl. Phys. **43**. P. 264002. (2010).

- [4] Ustinov A.V. Appl.Phys.Lett. **96**. P. 142513. (2010).  
 [5] Kruglyak V.V. Journal of Physics D. **3**. P. 264001. (2010).  
 [6] Chumak A.V. Appl. Phys. Lett. **93**. P. 022508. (2008).  
 [7] Морозова М. А., Шараевская А. Ю. Гетеромагнитная микроэлектроника. Вып. 15. С. 82. (2013).

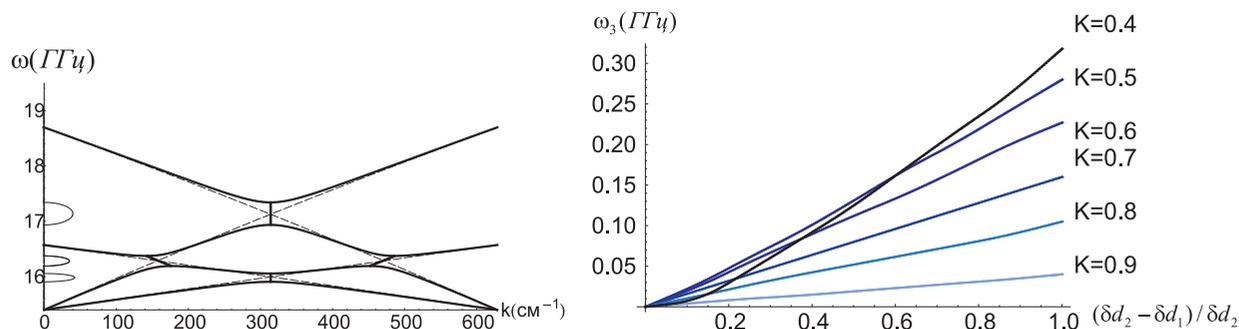


Рис. 3: Дисперсионные характеристики (а) при  $\delta d_1 = 0$ ,  $\delta d_2 = 0,5$ ,  $K = 0,5$  и зависимости дополнительной ширины дополнительной запрещенной зоны  $\Delta\omega_3$  (б) от параметров структуры МК-Пленка

## Dispersion characteristics of magnetostatic waves in layered structures based on magnon crystals

M.A. Morozova<sup>a</sup>, A.U. Sharaevskaya<sup>b</sup>

Saratov State University, Russia, 410012, Saratov, Astrakhanskaya, 83

E-mail: <sup>a</sup>maluginama@yandex.ru, <sup>b</sup>upark@inbox.ru

The present article is concerned with mechanisms formation of Bragg band gaps in ferromagnetic periodic structures that represent two coupled one-dimensional MC, whose parameters can vary, and structure type MC-ferrite film, then magnetostatic waves excite in them.

PACS: 75.30.Ds.

Keywords: magnon crystal, magnetostatic wave, dispersion characteristic, band gap.

### Сведения об авторах

1. Морозова Мария Александровна — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры нелинейной физики; e-mail: maluginama@yandex.ru.
2. Шараевская Анна Юрьевна — студент-магистрант факультета нелинейных процессов; тел.: 8(987)8058204, e-mail: upark@inbox.ru.