

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2024. Т. 32, № 1
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2024;32(1)

Научная статья
УДК 537.87

DOI: 10.18500/0869-6632-003081
EDN: ULYAJE

Влияние нелинейности на брэгговские резонансы в связанных магннных кристаллах

Н. Д. Лобанов[✉], О. В. Матвеев, М. А. Морозова

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского, Россия

E-mail: ✉nl_17@mail.ru, olvmatveev@gmail.com, mamorozovama@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.06.2023, принята к публикации 22.09.2023,

опубликована онлайн 20.12.2023, опубликована 31.01.2024

Аннотация. *Цель.* Целью данной работы является исследование влияния нелинейности на механизм формирования и характеристики брэгговских резонансов в вертикально связанных магннных кристаллах с периодической системой канавок на поверхности. В работе построена волновая модель, получено нелинейное дисперсионное соотношение для поверхностных магнитостатических волн в такой структуре; проведено численное исследование характеристик каждого из брэгговских резонансов при увеличении амплитуды сигнала. *Методы.* Используются теоретические методы исследования спин-волновых возбуждений в широком классе структур с ферромагнитными слоями. В частности, для построения теоретических моделей использованы: метод связанных волн, длинноволновое приближение. *Результаты.* В работе представлены результаты теоретического исследования влияния магнитной нелинейности на брэгговские резонансы в слоистой структуре на основе магннных кристаллов с периодическими канавками на поверхности, разделенных диэлектрическим слоем. Выявлен механизм формирования запрещенных зон на частотах брэгговских резонансов в присутствии нелинейности среды. Показано, что при увеличении амплитуды сигнала частотный интервал между запрещенными зонами сокращается. При увеличении разницы намагниченностей насыщения магннных кристаллов эффект нелинейного сближения более ярко выражен. *Заключение.* Выявленные особенности расширяют возможности слоистой структуры на основе магннных кристаллов по частотно-селективной обработке сигналов за счёт управления частотной избирательностью как с помощью статических параметров связи, периодичности и намагниченности насыщения слоев, так и динамически, с помощью изменения амплитуды волны.

Ключевые слова: ферромагнитная пленка, магнитостатическая волна, магннный кристалл, брэгговский резонанс, запрещенная зона.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-29-00759).

Для цитирования: Лобанов Н. Д., Матвеев О. В., Морозова М. А. Влияние нелинейности на брэгговские резонансы в связанных магннных кристаллах // Известия вузов. ПНД. 2024. Т. 32, № 1. С. 111–120. DOI: 10.18500/0869-6632-003081. EDN: ULYAJE

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

Influence of nonlinearity on the Bragg resonances in coupled magnon crystals

N. D. Lobanov[✉], O. V. Matveev, M. A. Morozova

Saratov State University, Russia

E-mail: ✉nl_17@mail.ru, olvmatveev@gmail.com, mamorozovama@yandex.ru

Received 23.06.2023, accepted 22.09.2023, available online 20.12.2023, published 31.01.2024

Abstract. *Purpose.* The purpose of this paper is to investigate the effect of nonlinearity on formation mechanism and characteristics of Bragg resonances in vertically coupled magnon crystals with periodic groove system on the surface. In this paper a wave model is constructed, a nonlinear dispersion relation for surface magnetostatic waves in such a structure is obtained and the characteristics of each of the Bragg resonances are numerically studied with increasing input signal power. *Methods.* Theoretical methods of investigation of spin-wave excitations in a wide class of structures with ferromagnetic layers have been used. In particular, the following theoretical models have been used: coupled wave method, long-wave approximation. *Results.* This paper presents the results of a theoretical investigation of the effect of magnetic nonlinearity on Bragg resonances in a sandwich structure based on magnon crystals with periodic grooves on the surface separated by a dielectric layer. A mechanism for the formation of band gaps at the Bragg resonance frequencies in the presence of media nonlinearity has been revealed. It is shown that with increasing input power the frequency interval between the band gaps decreases. With increasing magnetization difference of magnon crystals, the effect of nonlinear convergence is more pronounced. *Conclusion.* The identified features extend the capabilities of sandwich structures based on magnon crystals for frequency selective signal processing by controlling the frequency selectivity, both via static coupling parameters, periodicity and layer magnetisation, and dynamically via the input signal power.

Keywords: ferromagnetic film, magnetostatic wave, magnon crystal, Bragg resonance, band gap.

Acknowledgements. This work was supported by Russian Science Foundation (grant № 23-29-00759).

For citation: Lobanov ND, Matveev OV, Morozova MA. Influence of nonlinearity on the Bragg resonances in coupled magnon crystals. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2024;32(1):111–120. DOI: 10.18500/0869-6632-003081

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

Введение

В последние годы магноника привлекает широкое внимание исследователей в связи с потенциальными возможностями использования в новом поколении устройств обработки информации, в которых информация будет передаваться магнонами или спиновыми волнами [1–3]. Одной из основных структур, предлагаемых для создания магнонной компонентной базы, являются магнонные кристаллы (МК) — периодические структуры, сформированные на основе магнитных материалов [4, 5]. Использование магнонных кристаллов создает условия для формирования брэгговских резонансов в спектре магнитостатических волн для волновых чисел $k_B = \pi/L$ (L — период структуры), удовлетворяющих условию Брэгга [6]. На частотах брэгговских резонансов формируются запрещенные зоны — полосы непропускания в спектре магнитостатических волн. В этом случае важной является задача управления характеристиками резонансов (резонансной частотой, добротностью, числом резонансов в каждой зоне Бриллюэна).

Как известно, ферромагнитная среда является средой с керровским типом кубической нелинейности [7–9]. Нелинейные процессы в ферромагнитных структурах приводят к ряду новых эффектов при распространении магнитостатических волн, которые открывают широкие возможности по использованию таких структур для функциональной обработки сигналов в зависимости от входной мощности [10, 11]. Показано, что одним из основных нелинейных эффектов в МК в области четырёхмагнонных процессов распада является нелинейный сдвиг запрещенных зон [12]. В частности, в МК на основе плёнок железоиттриевого граната (ЖИГ) при увеличении мощности

входного сигнала до 80 мВт экспериментально наблюдался нелинейный сдвиг запрещенных зон на 5–15 МГц в низкочастотную область. Данная особенность позволяет рассматривать волноведущую структуру на основе МК в качестве нелинейного фазовращателя и усилителя отношения сигнал/шум.

Необходимость объединения отдельных магнанных элементов обработки сигналов в магнанные сети привлекает внимание к созданию связанных структур на основе ферромагнитных плёнок. Для этой цели предлагались структуры на основе МК, расположенных в планарной геометрии (латерально связанные МК) [13–16] и в вертикальной геометрии (вертикально связанные МК) [11, 17–19]. В частности, была продемонстрирована возможность переключения между выходными портами связанной структуры при увеличении входной мощности для частоты сигнала, совпадающей с частотой брэгговского резонанса [11]. Данная особенность позволяет рассматривать такие структуры для реализации функций нелинейного делителя мощности с четырьмя выходными портами.

Однако было показано, что в линейном случае в структуре связанных МК имеет место формирование нескольких брэгговских резонансов в первой зоне Бриллюэна [20, 21]. Данная особенность обусловлена взаимодействием на частотах фазового синхронизма симметричных и антисимметричных прямых и отраженных нормальных волн связанной периодической структуры. При этом характеристики и число резонансов зависят от типа несимметричности связанной структуры [20, 22]. Следует ожидать, что влияние нелинейности ферромагнитной среды на каждый из резонансов будет различно. Целью данной работы является исследование влияния нелинейности на механизм формирования и характеристики брэгговских резонансов в вертикально связанных МК с периодической системой канавок на поверхности. В работе построена волновая модель, получено нелинейное дисперсионное соотношение для поверхностных магнитостатических волн в такой структуре; проведено численное исследование характеристик каждого из брэгговских резонансов при увеличении амплитуды входного сигнала.

1. Модель и основные соотношения

Рассмотрим периодическую структуру, схема которой приведена на рис. 1, а, в виде двух связанных одномерных кристаллов МК-2 и МК-1, разделенных диэлектрическим слоем толщиной D . МК-1 и МК-2 представляют собой ферромагнитные пленки толщиной a с намагниченностью насыщения $M_{01,02}$, соответственно. На одну из поверхностей МК-1 и МК-2 нанесена периодическая структура в виде канавок глубиной Δ и шириной c , с периодом L . Предполагается, что в направлении осей x и y структура бесконечна. Связь между МК-1 и МК-2 осуществляется через высокочастотные магнитные поля. Система помещена во внешнее магнитное поле H_0 , направленное вдоль оси x , при этом в МК-1 и МК-2 вдоль оси y распространяются поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ).

Дисперсионное соотношение для ПМСВ, распространяющихся в исследуемой структуре, имеет вид [19, 22]:

$$\begin{vmatrix} D_1^+ & \beta_1 k_0 K & \theta_1^- & \theta_1^- K \\ \beta_2 k_0 K & D_2^+ & \theta_2^- K & \theta_2^- \\ \theta_1^+ & \theta_1^+ K & D_1^- & \beta_1 k_{-1} K \\ \theta_2^+ K & \theta_2^+ & \beta_2 k_{-1} K & D_2^- \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где $D_{1,2}^+ = -f^2 + f_{\perp 1,2}^2 + \beta_{1,2} k_0$, $D_{1,2}^- = -f^2 + f_{\perp 1,2}^2 + \beta_{1,2} k_{-1}$, $\beta_{1,2} = \frac{f_{M1,2}^2 d_0}{2}$, $\theta_{1,2}^+ = \beta_{1,2} \frac{\delta d}{2} k_0$, $\theta_{1,2}^- = \beta_{1,2} \frac{\delta d}{2} k_{-1}$, $\delta d = \frac{2\Delta}{\pi d_0} \sin\left(\frac{\pi(L-c)}{L}\right)$, $d_0 = a + \frac{\Delta(L-c)}{L}$, $f_{M1,2} = 4\pi\gamma M_{01,02}$,

$f_H = \gamma H_0$, $f_{\perp,2} = \sqrt{f_H (f_H + f_{M_{1,2}})}$, γ – гиромагнитное соотношение, $K = \exp[-kD]$, k_0 – постоянная распространения «0» гармоники, k_{-1} относится к «-1» гармонике, k_0 и k_{-1} связаны условием Брэгга [6]: $k_{-1} = -k_0 + 2k_B$, где $k_B = \pi/L$ – брэгговское волновое число.

При больших уровнях входной мощности ферромагнитная плёнка представляет собой нелинейную среду [7, 8]. Основную роль в нелинейных процессах в ферромагнетиках играет увеличение угла прецессии магнитных моментов атомов при увеличении мощности сигнала, что приводит к изменению продольной (сонаправленной с внешним магнитным полем) компоненты магнитного момента. Считаем, что нелинейность каждой плёнки зависит только от намагниченности насыщения этой плёнки, а величина намагниченности насыщения определяется полями как первой, так и второй плёнки. Для получения нелинейного закона дисперсии в одночастотном режиме, при отсутствии параметрических процессов, нелинейность ферромагнитной среды вводилась в линейный закон дисперсии (1) в виде [7, 8]:

$$f_{M_{1,2}} = 4\pi\gamma M_{01,2} \left(1 - q_{1,2}|u|^2\right), \quad (2)$$

где u – амплитуда входного сигнала, $q_{1,2} = 1/2 \left(1 + f_H^2/f_{\perp,2}^2\right)$.

2. Результаты численного исследования

Для исследования влияния нелинейности на брэгговские резонансы использовалось дисперсионное соотношение (1), с учетом соотношения (2).

В линейном случае (при $u = 10^{-5}$) в связанных однородных пленках ($\delta d = 0$ и $K \neq 0$), как известно [17, 23, 24], дисперсионная кривая для ПМСВ расщепляется на две нормальные моды – симметричную и антисимметричную. Дисперсионные характеристики для этих волн, в отсутствие связи между ними, показаны черными сплошными линиями на рис. 1, b : 1 – для симметричной прямой волны; 2 – для антисимметричной прямой волны; 1' – для симметричной волны, отраженной от периодических канавок; 2' – для антисимметричной отраженной волны. При $\delta d \neq 0$

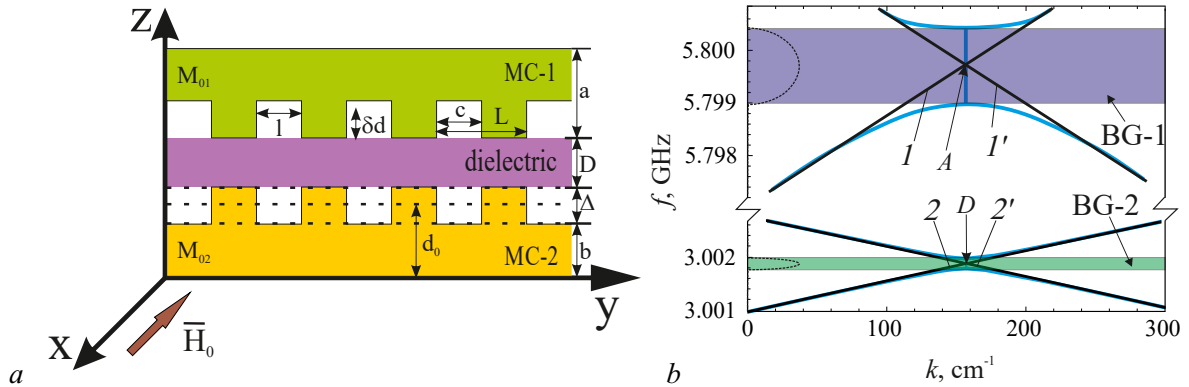


Рис. 1. a – Схема слоистой структуры в виде МК-1 и МК-2, разделённых диэлектрическим слоем. b – Дисперсионные характеристики ПМСВ в линейном случае ($u = 10^{-5}$) при $\delta d \neq 0$ (сплошные синие линии) и $\delta d = 0$ для прямых волн (линии 1 и 2) и отраженных волн (линии 1' и 2'). Области запрещенных зон BG выделены заливкой. Расчетные параметры: $L = 200$ мкм, $a = 10$ мкм, $c = L/2$, $\Delta = 1$ мкм, $D = 25$ мкм, $M_{01} = 260$ Гс, $M_{02} = 60$ Гс, $H_0 = 800$ Э (цвет онлайн)

Fig. 1. a – Layered structure scheme as MC-1 and MC-2 separated by a dielectric layer. b – The dispersion characteristics of the MSSW in the linear case ($u = 10^{-5}$) at $\delta d_{1,2} \neq 0$ (solid blue lines) and $\delta d = 0$ for direct waves (lines 1 and 2) and reflected waves (lines 1' and 2'). Areas of band gaps BG are highlighted by a filler. Calculated parameter: $L = 200$ μm , $a = 10$ μm , $c = L/2$, $\Delta = 1$ μm , $D = 25$ μm , $M_{01} = 260$ G, $M_{02} = 60$ G, $H_0 = 800$ Oe (color online)

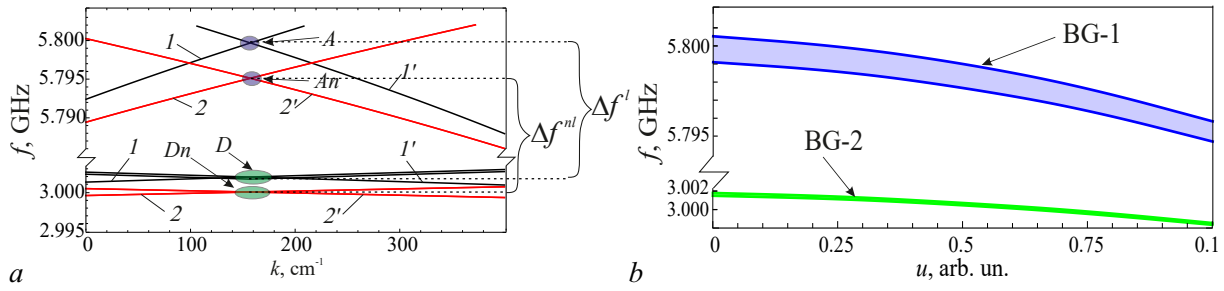


Рис. 2. *a* — Дисперсионные характеристики ПМСВ при $\delta d = 0$ для прямых волн (линии 1 и 2) и отраженных волн (линии 1' и 2') в линейном случае ($u = 10^{-5}$, черные прямые) и нелинейном случае ($u = 0.05$, красные прямые). *b* — Зависимость ширины и положения зон BG-1 (синяя закрашенная область) и BG-2 (зеленая закрашенная область) от амплитуды входного сигнала u . Расчетные параметры те же, что на рис. 1 (цвет онлайн)

Fig. 2. *a* — Dispersion characteristics of MSSW at $\delta d = 0$ for direct waves (lines 1 and 2) and reflected waves (lines 1' and 2') in the linear case ($u = 10^{-5}$, black lines) and nonlinear case ($u = 0.05$, red lines). *b* — Dependence of the width and position of the gaps BG-1 (blue shaded area) and BG-2 (green shaded area) on the input signal amplitude u . The calculated parameters are the same as in Fig. 1 (color online)

на частотах фазового синхронизма при волновом числе, соответствующем первому брэгговскому резонансу $k_B = \pi/L$, взаимодействие четырех описанных типов волн приводит к формированию запрещенных зон (закрашенные области на рис. 1, *b*). Запрещенная зона BG-1 (синяя закрашенная область) формируется за счёт взаимодействия прямой и отраженной симметричных волн, при этом центральная частота совпадает с точкой пересечения линий 1 и 1' (точка A). Запрещенная зона BG-2 (зеленая закрашенная область) формируется за счёт взаимодействия прямой и отраженной антисимметричных волн, при этом центральная частота совпадает с точкой пересечения линий 2 и 2' (точка D). На частотах, соответствующих запрещенным зонам, $\text{Im}(k)$ отлична от 0 (пунктирные кривые на рис. 1, *b*), что свидетельствует о затухании волны.

На рис. 2, *a* приведены дисперсионные характеристики ПМСВ в исследуемой структуре при $\delta d = 0$ для прямых симметричной (линия 1) и антисимметричной (линия 2) волн и отраженных симметричной (линия 1') и антисимметричной (линия 2') волн в линейном режиме при $u = 10^{-5}$ (черные линии) и в нелинейном режиме при $u = 0.05$ (красные линии). Центральная частота зоны BG-1 совпадает с точкой A, отмеченной фиолетовым овалом, а центральная частота зоны BG-2 совпадает с точкой D, отмеченной зеленым овалом. При увеличении входной амплитуды $u = 0.05$ центральная частота зоны BG-1 совпадает с точкой A_n , отмеченной фиолетовым овалом, а центральная частота зоны BG-2 совпадает с точкой D_n , отмеченной зеленым овалом. Видно, что при увеличении входной амплитуды центральные частоты зон BG-1 и BG-2 сдвигаются в низкочастотную область. Частотный сдвиг виден и на рис. 2, *b*, на котором приведена зависимость ширины и положения зоны BG-1 (фиолетовая закрашенная область) и BG-2 (зеленая закрашенная область) от амплитуды входного сигнала u . Частотный сдвиг объясняется уменьшением продольной компоненты магнитного момента при увеличении амплитуды входного сигнала u в соответствии с соотношением (2). Кроме того, видно, что частотный интервал между зонами BG-1 и BG-2 при $u = 10^{-5}$ ($\Delta f^l = f(A) - f(D)$) больше, чем частотный интервал при $u = 0.05$ ($\Delta f^{nl} = f(A_n) - f(D_n)$), то есть имеет место эффект нелинейного сближения зон BG-1 и BG-2.

Для объяснения данной особенности на вставке к рис. 3, *a* приведены зависимости частоты f_M от амплитуды u , построенной по соотношению (2) для разных намагниченностей насыщения M_0 . Видно, что с увеличением u частота f_M уменьшается. На рис. 3, *a* приведены зависимости частоты f_M от намагниченности насыщения M_0 в линейном $u = 10^{-5}$ (черная прямая) и нелинейном случае $u = 0.5$ (красная прямая)¹, построенные с использованием соотношения (2)

¹Выбор большого значения u при расчетах связан с наглядностью данных, представленных на рис. 3, *a*.

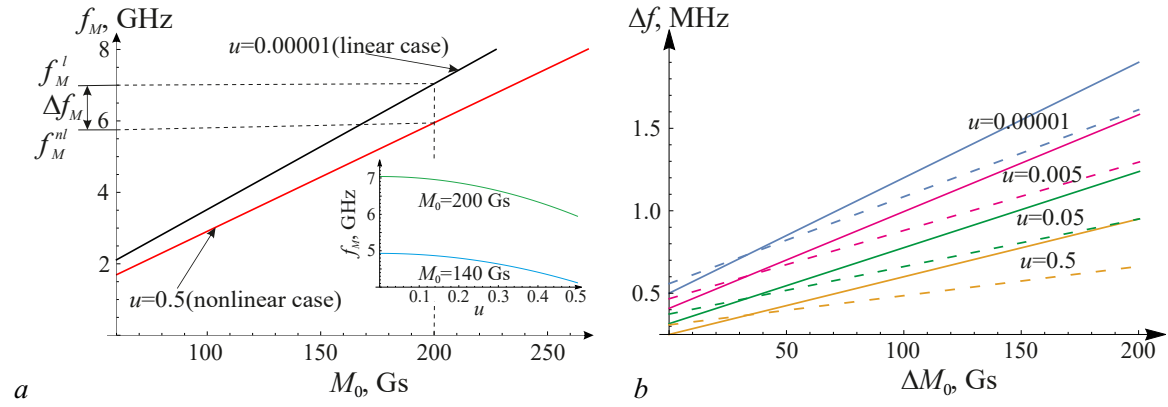


Рис. 3. *a* — Зависимости частоты намагничивания от намагниченности насыщения M_0 в линейном (черная прямая) и нелинейном (красная прямая) случаях. На вставке — зависимости частоты f_M от амплитуды u для разных намагниченностей насыщения M_0 . *b* — Зависимость изменения частотного интервала между зонами BG-1 и BG-2 при увеличении входной амплитуды от разности намагниченностей насыщения МК-1 и МК-2. При разных значениях u и при $H_0 = 800$ Э (сплошные кривые) и $H_0 = 1000$ Э (пунктирные кривые)

Fig. 3. *a* — Dependences of the magnetization frequency on the saturation magnetization M_0 in linear (black line) and nonlinear (red line) cases. The inset shows the dependence of the frequency f_M on the amplitude u for different saturation magnetizations M_0 . *b* — Dependence of the change in the frequency interval between the BG-1 and BG-2 gaps with increasing input amplitude on the difference between the saturation magnetizations of MC-1 and MC-2. At different values of u and at $H_0 = 800$ Oe (solid curves) and $H_0 = 1000$ Oe (dashed curves)

при $M_{0,2} = M_0$ и $f_{M,2} = f_M$. Видно, что при фиксированном значении M_0 частота намагничивания в линейном случае — f_M^l , а в нелинейном — f_M^{nl} . То есть при увеличении входной амплитуды u имеет место уменьшение частоты f_M на величину $\Delta f_M = f_M^l - f_M^{nl}$. Видно, что Δf_M увеличивается при увеличении M_0 . То есть чем больше намагниченность насыщения в линейном случае (M_0), тем больше нелинейное изменение Δf_M .

Для исследуемой структуры, состоящей из МК с разными намагниченностями насыщения, поведение дисперсионных характеристик симметричных волн (линии 1 и 1') определяется значением намагниченности МК, обладающего большей намагниченностью (M_{01}), а поведение дисперсионных характеристик антисимметричных волн (линии 2 и 2') определяется значением намагниченности МК, обладающего меньшей намагниченностью (M_{02}). Нелинейное изменение частоты намагничивания будет больше для симметричных волн (за счёт взаимодействия которых образуется зона BG-1), чем для антисимметричных волн (за счёт взаимодействия которых образуется зона BG-2). Соответственно, нелинейный сдвиг зоны BG-1 ($f(A) - f(A_n)$) больше, чем нелинейный сдвиг BG-2 ($f(D) - f(D_n)$).

На рис. 3, *b* приведена зависимость изменения частотного интервала между зонами BG-1 и BG-2 $\Delta f = \Delta f^l - \Delta f^{nl}$ при увеличении входной амплитуды от $u = 10^{-5}$ до $u = 0.05$ от разности намагниченностей насыщения МК-1 и МК-2 $\Delta M_0 = M_{01} - M_{02}$. Видно, что, чем больше разница между намагниченностями насыщения МК-1 и МК-2, тем больше Δf , то есть эффект нелинейного сближения запрещенных зон более ярко выражен. При увеличении внешнего магнитного поля данный эффект становится менее ярко выраженным.

Заключение

В работе выявлены особенности брэгговских резонансов в периодической слоистой ферромагнитной структуре на основе магнетонных кристаллов. Показано, что в структуре, состоящей из двух связанных МК, разделенных слоем диэлектрика, в первой зоне Бриллюэна возможно формирование двух запрещенных зон — полос непропускания магнитостатических волн.

Высокочастотная запрещенная зона BG-1 формируется на частоте фазового синхронизма прямой и отраженной симметричных нормальных волн связанной структуры, а низкочастотная зона BG-2 формируется на частоте синхронизма прямой и отраженной антисимметричных волн. Зоны формируются при брэгговском волновом числе и на частотах, отличных от брэгговских частот для каждого из МК в отдельности.

Исследовано влияние амплитуды входного сигнала на частотное положение запрещенных зон. Показано, что при увеличении амплитуды входного сигнала имеет место сдвиг обеих запрещенных зон BG-1 и BG-2 вниз по частоте. Однако нелинейность по-разному влияет на частотное положение каждой из зон. В частности, нелинейный сдвиг высокочастотной запрещенной зоны BG-1 при увеличении амплитуды больше нелинейного сдвига низкочастотной запрещенной зоны BG-2. При этом в нелинейном случае частотный интервал между зонами BG-1 и BG-2 становится меньше, чем в линейном случае. Чем больше разница между намагниченностями насыщения МК-1 и МК-2, тем больше нелинейное сближение запрещенных зон. При увеличении внешнего магнитного поля данный эффект также становится более ярко выраженным.

Таким образом, установленные особенности расширяют возможности исследуемой структуры по частотно-селективной обработке сигналов за счёт управления частотной избирательностью как с помощью статических параметров связи, периодичности и намагниченности слоев, так и динамически, с помощью мощности входного сигнала.

Список литературы

1. Никитов С. А., Сафин А. Р., Калябин Д. В., Садовников А. В., Бегинин Е. Н., Логунов М. В., Морозова М. А., Одинцов С. А., Осокин С. А., Шараевская А. Ю., Шараевский Ю. П., Кирилюк А. И. Диэлектрическая магноника – от гигагерцев к терагерцам // УФН. 2020. Т. 190, № 10. С. 1009–1040. DOI: 10.3367/UFNr.2019.07.038609.
2. Barman A., Gubbiotti G., Ladak S., Adeyeye A. O., Krawczyk M., Gräfe J., Adelmann C., Cotozana S., Naeemi A., Vasyuchka V. I., Hillebrands B., Nikitov S. A., Yu H., Grundler D., Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Sheshukova S. E., Duquesne J.-Y., Marangolo M., Csaba G., Porod W., Demidov V. E., Urazhdin S., Demokritov S. O., Albisetti E., Petti D., Bertacco R., Schultheiss H., Kruglyak V. V., Poimanov V. D., Sahoo S., Sinha J., Yang H., Münzenberg M., Moriyama T., Mizukami S., Landeros P., Gallardo R. A., Carlotti G., Kim J.-V., Stamps R. L., Camley R. E., Rana B., Otani Y., Yu W., Yu T., Bauer G. E. W., Back C., Uhrig G. S., Dobrovolskiy O. V., Budinska B., Qin H., van Dijken S., Chumak A. V., Khitun A., Nikonov D. E., Young I. A., Zingsem B. W., Winklhofer M. The 2021 magnonics roadmap // Journal of Physics: Condensed Matter. 2021. Vol. 33, no. 41. P. 413001. DOI: 10.1088/1361-648X/abec1a.
3. Barman A., Sinha J. Spin Dynamics and Damping in Ferromagnetic Thin Films and Nanostructures. Cham: Springer, 2018. 156 p. DOI: 10.1007/978-3-319-66296-1.
4. Krawczyk M., Grundler D. Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure // Journal of Physics: Condensed Matter. 2014. Vol. 26, no. 12. P. 123202. DOI: 10.1088/0953-8984/26/12/123202.
5. Chumak A. V., Serga A. A., Hillebrands B. Magnonic crystals for data processing // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. Vol. 50, no. 24. P. 244001. DOI: 10.1088/1361-6463/aa6a65.
6. Brillouin L. Wave Propagation in Periodic Structures: Electric Filters and Crystal Lattices. 2d edition. Dover Publications, 1953. 255 p.
7. Wigen P. E. Nonlinear Phenomena and Chaos in Magnetic Materials. Singapore: World Scientific, 1994. 260 p. DOI: 10.1142/1686.
8. Львов В. С. Нелинейные спиновые волны. М.: Наука, 1987. 272 с.
9. Лукомский В. П. Нелинейные магнитостатические волны в ферромагнитных пластинах // Укр. физ. журн. 1978. Т. 23, № 1. С. 134.
10. Wang Q., Kewenig M., Schneider M., Verba R., Kohl F., Heinz B., Geilen M., Mohseni M., Lägél B., Ciubotaru F., Adelmann C., Dubs C., Cotozana S. D., Dobrovolskiy O. V., Brächer T.,

- Pirro P., Chumak A. V. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders // *Nature Electronics*. 2020. Vol. 3, no. 12. P. 765–774. DOI: 10.1038/s41928-020-00485-6.
11. Morozova M. A., Matveev O. V., Romanenko D. V., Trukhanov A. V., Mednikov A. M., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. Nonlinear spin wave switches in layered structure based on magnonic crystals // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. Vol. 508. P. 166836. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166836.
 12. Ustinov A. B., Drozdovskii A. V., Kalinikos B. A. Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing // *Applied Physics Letters*. 2010. Vol. 96, no. 14. P. 142513. DOI: 10.1063/1.3386540.
 13. Castera J. P., Hartemann P. Adjustable magnetostatic surface-wave multistrip directional coupler // *Electronics Letters*. 1980. Vol. 16, no. 5. P. 195–196. DOI: 10.1049/el:19800140.
 14. Wang Q., Pirro P., Verba R., Slavin A., Hillebrands B., Chumak A. V. Reconfigurable nanoscale spin-wave directional coupler // *Science Advances*. 2018. Vol. 4, no. 1. P. e1701517. DOI: 10.1126/sciadv.1701517.
 15. Vogt K., Fradin F. Y., Pearson J. E., Sebastian T., Bader S. D., Hillebrands B., Hoffmann A., Schultheiss H. Realization of a spin-wave multiplexer // *Nature Communications*. 2014. Vol. 5, no. 1. P. 3727. DOI: 10.1038/ncomms4727.
 16. Klingler S., Pirro P., Brächer T., Leven B., Hillebrands B., Chumak A. V. Spin-wave logic devices based on isotropic forward volume magnetostatic waves // *Applied Physics Letters*. 2015. Vol. 106, no. 21. P. 212406. DOI: 10.1063/1.4921850.
 17. Sasaki H., Mikoshiba N. Directional coupling of magnetostatic surface waves in a layered structure of YIG films // *Journal of Applied Physics*. 1981. Vol. 52, no. 5. P. 3546–3552. DOI: 10.1063/1.329134.
 18. An K., Bhat V. S., Mruczkiewicz M., Dubs C., Grundler D. Optimization of spin-wave propagation with enhanced group velocities by exchange-coupled ferrimagnet-ferromagnet bilayers // *Physical Review Applied*. 2019. Vol. 11, no. 3. P. 034065. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.11.034065.
 19. Morozova M. A., Romanenko D. V., Matveev O. V., Grishin S. V., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. Suppression of periodic spatial power transfer in a layered structure based on ferromagnetic films // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018. Vol. 466. P. 119–124. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.06.077.
 20. Morozova M. A., Sharaevskaya A. Y., Sadovnikov A. V., Grishin S. V., Romanenko D. V., Beginin E. N., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic structures // *Journal of Applied Physics*. 2016. Vol. 120, no. 22. P. 223901. DOI: 10.1063/1.4971410.
 21. Morozova M. A., Grishin S. V., Sadovnikov A. V., Romanenko D. V., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. Tunable bandgaps in layered structure magnonic crystal–ferroelectric // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. Vol. 51, no. 11. P. 2802504. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2446763.
 22. Морозова М. А., Лобанов Н. Д., Матвеев О. В., Никитов С. А. Механизм формирования запрещенных зон спиновых волн в связанных магнетонных кристаллах // *Письма в ЖЭТФ*. 2022. Т. 115, № 12. С. 793–800. DOI: 10.31857/S1234567822120072.
 23. Louisell W. H. *Coupled Mode and Parametric Electronics*. New York: Wiley, 1960. 268 p.
 24. Ваишковский А. В., Стальмахов В. С., Шараевский Ю. П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1993. 312 с.

References

1. Nikitov SA, Safin AR, Kalyabin DV, Sadovnikov AV, Beginin EN, Logunov MV, Morozova MA, Odintsov SA, Osokin SA, Sharaevskaya AY, Sharaevsky YP, Kirilyuk AI. Dielectric magnonics: from gigahertz to terahertz. *Physics-Uspekhi*. 2020;63(10):945–974. DOI: 10.3367/UFNe.2019.07.038609.
2. Barman A, Gubbiotti G, Ladak S, Adeyeye AO, Krawczyk M, Gräfe J, Adelmann C, Cotofana S, Naeemi A, Vasyuchka VI, Hillebrands B, Nikitov SA, Yu H, Grundler D, Sadovnikov AV,

- Grachev AA, Sheshukova SE, Duquesne J-Y, Marangolo M, Csaba G, Porod W, Demidov VE, Urazhdin S, Demokritov SO, Albisetti E, Petti D, Bertacco R, Schultheiss H, Kruglyak VV, Poimanov VD, Sahoo S, Sinha J, Yang H, Münzenberg M, Moriyama T, Mizukami S, Landeros P, Gallardo RA, Carlotti G, Kim J-V, Stamps RL, Camley RE, Rana B, Otani Y, Yu W, Yu T, Bauer GEW, Back C, Uhrig GS, Dobrovolskiy OV, Budinska B, Qin H, van Dijken S, Chumak AV, Khitun A, Nikonov DE, Young IA, Zingsem BW, Winklhofer M. The 2021 magnonics roadmap. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2021;33(41):413001. DOI: 10.1088/1361-648X/abec1a.
3. Barman A, Sinha J. *Spin Dynamics and Damping in Ferromagnetic Thin Films and Nanostructures*. Cham: Springer; 2018. 156 p. DOI: 10.1007/978-3-319-66296-1.
 4. Krawczyk M, Grundler D. Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2014;26(12):123202. DOI: 10.1088/0953-8984/26/12/123202.
 5. Chumak AV, Serga AA, Hillebrands B. Magnonic crystals for data processing. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017;50(24):244001. DOI: 10.1088/1361-6463/aa6a65.
 6. Brillouin L. *Wave Propagation in Periodic Structures: Electric Filters and Crystal Lattices*. 2d edition. Dover Publications; 1953. 255 p.
 7. Wigen PE. *Nonlinear Phenomena and Chaos in Magnetic Materials*. Singapore: World Scientific; 1994. 260 p. DOI: 10.1142/1686.
 8. L'vov VS. *Nonlinear Spin Waves*. Moscow: Nauka; 1987. 272 p. (in Russian).
 9. Lukomsky VP. Nonlinear magnetostatic waves in ferromagnetic plates. *Ukrainian Physical Journal*. 1978;23(1):134 (in Russian).
 10. Wang Q, Kewenig M, Schneider M, Verba R, Kohl F, Heinz B, Geilen M, Mohseni M, Lägél B, Ciubotaru F, Adelmann C, Dubs C, Cotofana SD, Dobrovolskiy OV, Brächer T, Pirro P, Chumak AV. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders. *Nature Electronics*. 2020;3(12):765–774. DOI: 10.1038/s41928-020-00485-6.
 11. Morozova MA, Matveev OV, Romanenko DV, Trukhanov AV, Mednikov AM, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Nonlinear spin wave switches in layered structure based on magnonic crystals. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020;508:166836. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166836.
 12. Ustinov AB, Drozdovskii AV, Kalinikos BA. Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing. *Applied Physics Letters*. 2010;96(14):142513. DOI: 10.1063/1.3386540.
 13. Castera JP, Hartemann P. Adjustable magnetostatic surface-wave multistrip directional coupler. *Electronics Letters*. 1980;16(5):195–196. DOI: 10.1049/el:19800140.
 14. Wang Q, Pirro P, Verba R, Slavin A, Hillebrands B, Chumak AV. Reconfigurable nanoscale spin-wave directional coupler. *Science Advances*. 2018;4(1):e1701517. DOI: 10.1126/sciadv.1701517.
 15. Vogt K, Fradin FY, Pearson JE, Sebastian T, Bader SD, Hillebrands B, Hoffmann A, Schultheiss H. Realization of a spin-wave multiplexer. *Nature Communications*. 2014;5(1):3727. DOI: 10.1038/ncomms4727.
 16. Klingler S, Pirro P, Brächer T, Leven B, Hillebrands B, Chumak AV. Spin-wave logic devices based on isotropic forward volume magnetostatic waves. *Applied Physics Letters*. 2015;106(21):212406. DOI: 10.1063/1.4921850.
 17. Sasaki H, Mikoshiba N. Directional coupling of magnetostatic surface waves in a layered structure of YIG films. *Journal of Applied Physics*. 1981;52(5):3546–3552. DOI: 10.1063/1.329134.
 18. An K, Bhat VS, Mruczkiewicz M, Dubs C, Grundler D. Optimization of spin-wave propagation with enhanced group velocities by exchange-coupled ferrimagnet-ferromagnet bilayers. *Physical Review Applied*. 2019;11(3):034065. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.11.034065.
 19. Morozova MA, Romanenko DV, Matveev OV, Grishin SV, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Suppression of periodic spatial power transfer in a layered structure based on ferromagnetic films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018;466:119–124. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.06.077.

20. Morozova MA, Sharaevskaya AY, Sadovnikov AV, Grishin SV, Romanenko DV, Beginin EN, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic structures. *Journal of Applied Physics*. 2016;120(22):223901. DOI: 10.1063/1.4971410.
21. Morozova MA, Grishin SV, Sadovnikov AV, Romanenko DV, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Tunable bandgaps in layered structure magnonic crystal–ferroelectric. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015;51(11):2802504. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2446763.
22. Morozova MA, Lobanov ND, Matveev OV, Nikitov SA. Mechanism of band gap formation in the spin-wave spectrum of coupled magnon crystals. *JETP Letters*. 2022;115(12):742–748. DOI: 10.1134/S0021364022600963.
23. Louisell WH. *Coupled Mode and Parametric Electronics*. New York: Wiley; 1960. 268 p.
24. Vashkovskii AV, Stalmakhov VS, Sharaevskii YP. *Magnetostatic Waves in Microwave Electronics*. Saratov: Saratov University Publishing; 1993. 312 p. (in Russian).



Лобанов Никита Дмитриевич — лаборант-исследователь Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
 Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
 E-mail: nl_17@mail.ru

Матвеев Олег Валерьевич — родился в Саратове (1991). Окончил с отличием факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета по направлению «Физика открытых нелинейных систем» (2013). Кандидат физико-математических наук по специальности «Радиофизика» (2019). Старший научный сотрудник лаборатории «Метаматериалы» СГУ имени Н. Г. Чернышевского. Область научных интересов — спиновые волны в магнитных материалах, нелинейные явления (солитоны, автомодуляция, хаос) в тонких ферромагнитных плёнках и структурах на их основе, магنونная логика, обработка спинволновых сигналов в магнитных материалах. Автор свыше 50 научных работ по данной тематике.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
 Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
 E-mail: olvmatveev@gmail.com
 ORCID: 0000-0003-2320-907X
 AuthorID (eLibrary.Ru): 786916



Морозова Мария Александровна — родилась в Саратове (1977). Окончила Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского (1999). Доктор физико-математических наук (2021), профессор кафедры нелинейной физики, ведущий научный сотрудник лаборатории «Метаматериалы» Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского. Область научных интересов — элементная база магноники и спинтроники, обработка и генерация информационных сигналов в диапазоне СВЧ, волновые явления в магнитных материалах (в магнонных кристаллах, в многослойных ферромагнитных, мультиферроидных и гетероструктурах). Автор свыше 200 научных публикаций по указанным направлениям.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
 Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
 E-mail: mamorozovama@yandex.ru
 ORCID: 0000-0003-4442-2443
 AuthorID (eLibrary.Ru): 112875

Лобанов Н. Д., Матвеев О. В., Морозова М. А.
 Известия вузов. ПНД, 2024, т. 32, № 1