

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Формирование запрещенных зон в несимметричной структуре на основе  
магнитных кристаллов**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 411 группы  
направления 03.03.01 Прикладные математика и физика  
Факультета нелинейных процессов  
Никоновой Ирины Александровны

Научный руководитель

Доцент по кафедре нелинейной  
физики, к.ф-м.н.

\_\_\_\_\_

Морозова М. А.

Заведующий кафедрой

Доцент по кафедре нелинейной  
физики, к.ф-м.н.

\_\_\_\_\_

Бегинин Е. Н.

Саратов 2019 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1	ВВЕДЕНИЕ.....	3
2	ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.....	5
3	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	14
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	16

# 1 ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования в работе является система связанных периодических структур, созданных на основе плёнок из ферромагнитного материала – магнетонных кристаллов (МК). В таких системах могут распространяться магнитостатические волны (МСВ) – спиновые волны, обусловленные диполь-дипольным взаимодействием.

Наличие в системе периодической структуры приводит к образованию в спектре частот магнитостатических волн запрещённых зон для волновых чисел, удовлетворяющих условию брэгговского резонанса.

$$k_B^n = \frac{2\pi}{\lambda_n} = \frac{(2n-1)\pi}{L}, n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots, (1)$$

где  $k_B^n$  – брэгговское волновое число,  $\lambda_n$  – брэгговская длина волны,  $L$  – период периодической структуры.

Наличие запрещённых зон в спектре частот магнитостатических волн позволяет создавать приборы на основе магнетонных кристаллов для обработки сигналов. Актуальной является задача управления характеристиками запрещённых зон.

В отличие от системы с одиночным магнетонным кристаллом, в системе двух связанных магнетонных кристаллов появляется дополнительный управляющий параметр – коэффициент связи. Наличие связи приводит к расщеплению МСВ на быструю и медленную волну, и к образованию двух запрещённых зон. Возникновению в такой системе несимметричности может привести к образованию третьей запрещённой зоны.

Целью работы является изучение особенностей формирования запрещённых зон в системе двух связанных магнетонных кристаллов. А именно изучение зависимости ширины и положения запрещённых зон от изменения геометриче-

ских параметров системы двух магнетонных кристаллов и от величины коэффициента связи.

Выпускная работа состоит из двух глав. Первая глава: «Модель и дисперсионное соотношение», вторая глава: «Результаты численного моделирования», которая состоит из двух параграфов: «Одиночный магнетонный кристалл» и «Структура из двух связанных магнетонных кристаллов».

## 2 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлена рассматриваемая структура из двух магнитных кристаллов, разделённых диэлектрическим слоем толщиной  $D$  (см. рис. 1). В направлении осей  $x$  и  $y$  система бесконечна. Вектор внешнего поля направлен вдоль оси  $x$ . Вдоль оси  $y$  распространяются поверхностные магнитоэлектрические волны (ПМСВ).

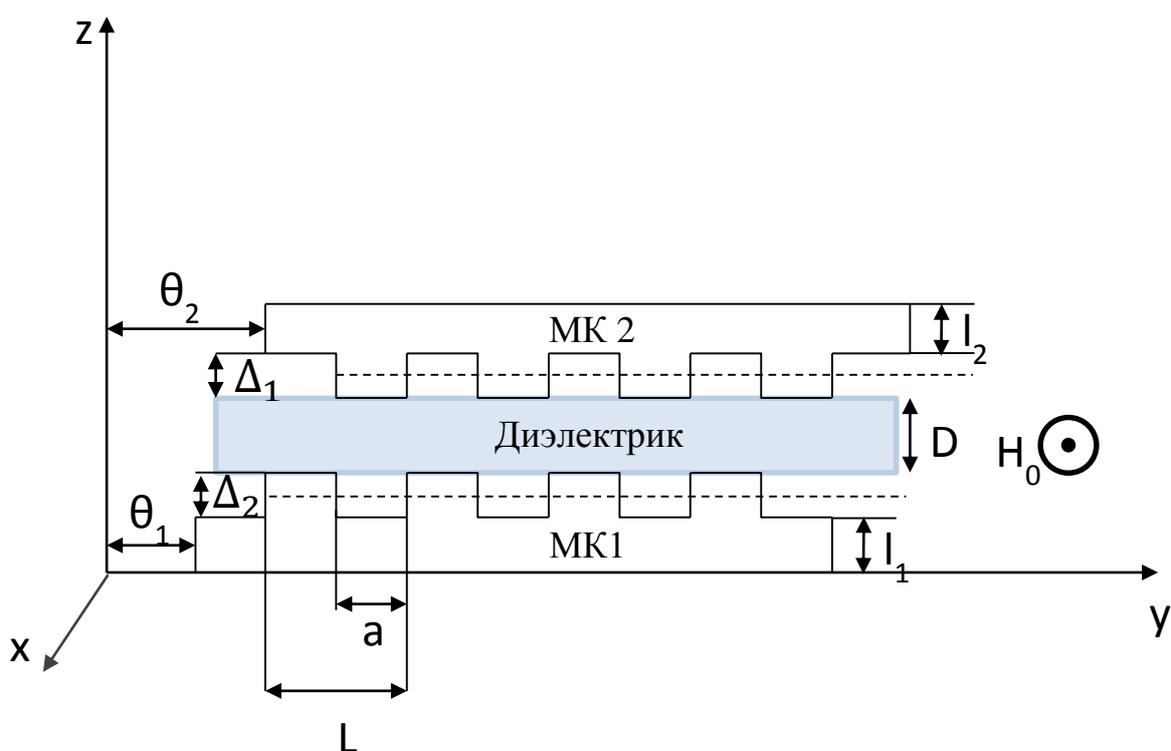


Рисунок 1 – Схема двух связанных магнитных кристаллов в сечении плоскостью  $Oyz$ .  $L$  - период магнитного кристалла,  $a$  - ширина канавки,  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  - глубина канавки первого и второго кристаллов соответственно,  $l_1$ ,  $l_2$  - толщина плёнки первого и второго кристаллов соответственно,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  - сдвиг относительно оси  $z$  первого и второго кристаллов соответственно,  $H_0$  - внешнее поле

Связь между магнотными кристаллами осуществляется через высокочастотные магнитные поля, а величина коэффициента связи зависит от толщины диэлектрика  $D$  ( $K = e^{-\alpha D}$ ). В отсутствии связи ( $K=0$ ), система представляет собой два одномерных магнотных кристалла, которые являются тонкими плёнками ферромагнитного материала с периодически вытравленными в них канавками.

Исследуемое дисперсионное соотношение для ПМСВ, распространяющихся в такой системе[2]:

$$\text{Det} \begin{pmatrix} D_1^+ & \beta_1 k_0 K & \theta_1^- & \theta_1^- K \\ \beta_2 k_0 K & D_2^+ & \theta_2^- K & \theta_2^- \\ \theta_1^+ & \theta_1^+ K & D_1^- & \beta_1 k_- K \\ \theta_2^+ K & \theta_2^+ & \beta_2 k_- K & D_2^- \end{pmatrix} = 0, \quad (2)$$

где

$$D_{1,2}^{\pm} = -\omega^2 + \omega_H^2 + \omega_H \omega_{M_{1,2}} + \beta_{1,2} k^{0,-}, \quad (3)$$

$$\beta_{1,2} = \frac{\omega_M^2 d_{01,02}}{2}, \quad (4)$$

$$\theta_{1,2}^{\pm} = e^{\pm i \psi_{1,2}} \delta_{1,2}^{\pm}, \quad (5)$$

$$k_- = 2k_b - k_0, \quad (6)$$

$$k_b = \frac{\pi}{L}, \quad (7)$$

$$\delta_{1,2}^{\pm} = \beta_{1,2} k^{0,-} \frac{\delta_{1,2}}{2}, \quad (8)$$

$$\psi_1 = 0, \quad (9)$$

$$\psi_2 = \psi, \quad (10)$$

$$\psi = \frac{2\pi}{L} \Theta, \quad (11)$$

$$d_{01, 02} = l_{1,2} + \frac{\Delta_{1,2}(L-a)}{L}, \quad (12)$$

$$\omega_{M_{1,2}} = 4 * \pi * \gamma * (M_{01,02}), \quad (13)$$

$$\omega_H = \gamma * (H_0). \quad (14)$$

Здесь  $H_0$  – внешнее магнитное поле,  $\gamma$  – гиромагнитное соотношение,  $M_{01,02}$  – намагниченность насыщения,  $l_{1,2}$  – толщина плёнок,  $\Delta_{1,2}$  – глубина канавок,  $L$  – период структуры,  $a$  – ширина канавки,  $\Theta$  – смещение плёнок относительно друг друга,  $k_0$  – волновое число,  $\omega$  – частота.

В первом параграфе второй главы рассматривается ситуация, когда коэффициент связи  $K$  равен нулю и рассматриваемое дисперсионное соотношение описывает одиночный магнетонный кристалл.

Пространственный период в такой системе приводит к возникновению запрещённой зоны в спектре частот магнитоэлектронных волн (см. рис. 2).

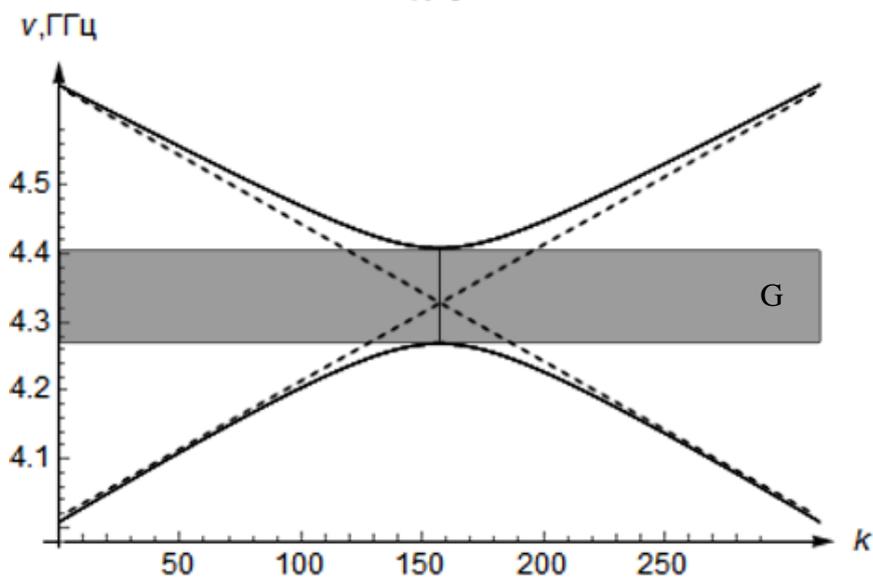


Рисунок 2 – Дисперсионная характеристика одиночного магнонного кристалла при значении коэффициента связи  $K=0$

На рисунке 2 сплошными линиями представлена дисперсионная характеристика одиночного магнонного кристалла, а пунктирными - дисперсионные характеристики для прямой и встречной волн без их взаимодействия друг с другом. G – запрещённая зона.

Результаты расчёта представлены в виде графиков зависимостей характеристик запрещённой зоны от управляющих параметров: величины внешнего магнитного поля (см. рис. 3), глубины канавки (см. рис. 4), ширины канавки (см. рис. 5), периода структуры (см. рис. 6).

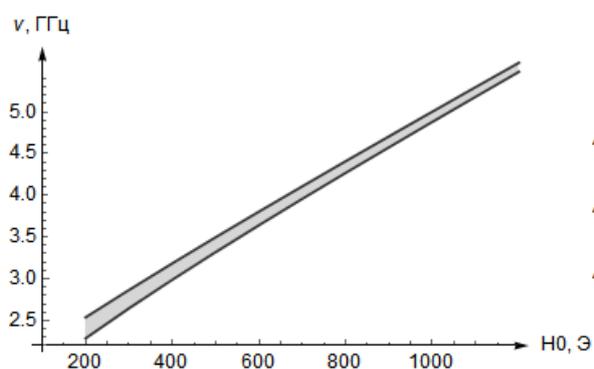


Рисунок 3 – Зависимость ширины и положения запрещённой зоны одиночного магнетонного кристалла от величины внешнего магнитного поля

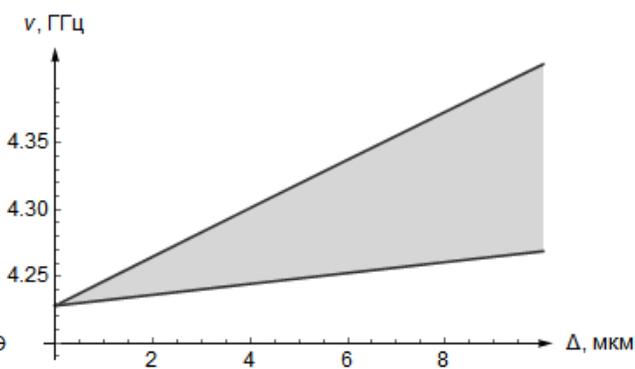


Рисунок 4 – Зависимость ширины и положения запрещённой зоны одиночного магнетонного кристалла от глубины канавки

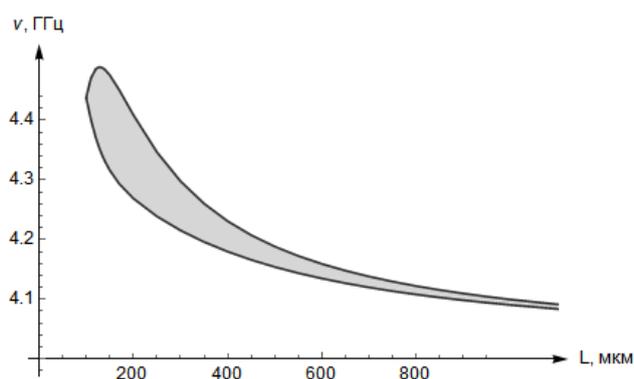


Рисунок 5 – Зависимость ширины и положения запрещённой зоны одиночного магнетонного кристалла от ширины канавки

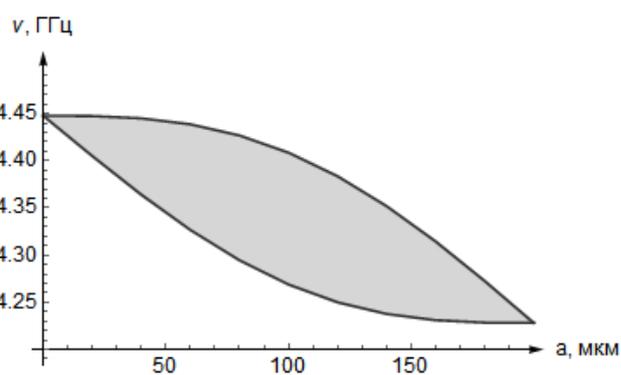


Рисунок 6 – Зависимость ширины и положения запрещённой зоны одиночного магнетонного кристалла от периода структуры

Во втором параграфе второй главы рассматривается ситуация, когда коэффициент связи  $K$  отличен от нуля и рассматриваемое дисперсионное соотношение описывает структуру из двух связанных магнетонных кристаллов.

В такой структуре магнитостатическая волна расщепляется на быструю и медленную волны. Если магнетонные кристаллы одинаковы и не сдвинуты отно-

нительно друг друга, в спектре спиновых волн образуется две запрещённые зоны (см. рис. 7 (а)). Если в система будет несимметричной (добавится сдвиг между магнетонными кристаллами или магнетонные кристаллы будут неодинаковыми), в спектре спиновых волн образуются третья дополнительная зона в окрестности первого брегговского резонанса (см. рис. 7 (б)).

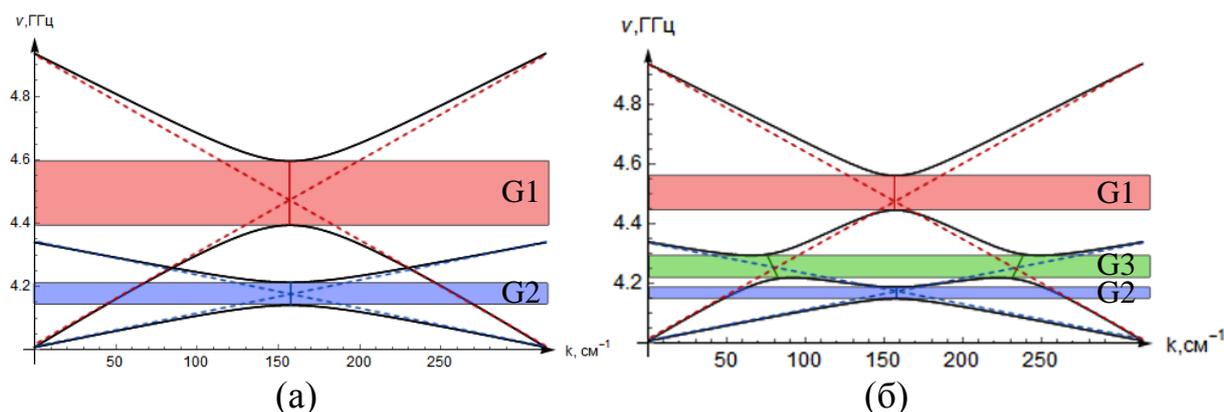


Рисунок 7 – Дисперсионная характеристика при значении коэффициента связи  $K=0.5$  со сдвигом между магнетонными кристаллами: (а)  $\psi = 0$ ; (б)  $\psi = 0,6 \pi$

На рисунке 7 сплошными линиями представлена дисперсионная характеристика структуры двух связанных магнетонных кристаллов, а пунктирными - дисперсионные характеристики для прямых и встречных волн без их взаимодействия друг с другом. G1 – высокочастотная запрещённая зона, которая обусловлена взаимодействием прямой и встречной быстрых волн. G2 – низкочастотная запрещённая зона, которая обусловлена взаимодействием прямой и встречной медленных волн. G3 – дополнительная зона, обусловленная взаимодействием прямой быстрой и обратной медленной или прямой медленной и обратной быстрой волн.

Результаты расчёта представлены в виде графиков зависимостей характеристик запрещённых зон от управляющих параметров: коэффициента связи (см. рис. 8), отношения толщины плёнки (см. рис. 9), сдвига между магнетонными кристаллами (см. рис. 10), отношения глубины канавок (см. рис. 11), отношения намагниченности плёнок (для одинаковых магнетонных кристаллов (см. рис. 12

(а) и для кристаллов с различными глубинами канавок (см. рис. 12 (б)), отношения намагниченности плёнок со сдвигом между магнетонными кристаллами  $\psi = \pi$  (для одинаковых магнетонных кристаллов (см. рис. 13 (а)) и для кристаллов с различными глубинами канавок (см. рис. 13 (б))). Также представлены зависимости моментов исчезновения зон на графиках зависимостей характеристик запрещённых зон от отношения намагниченности плёнок со сдвигом  $\psi = \pi$  от глубины канавки второго магнетонного кристалла (см. рис. 14).

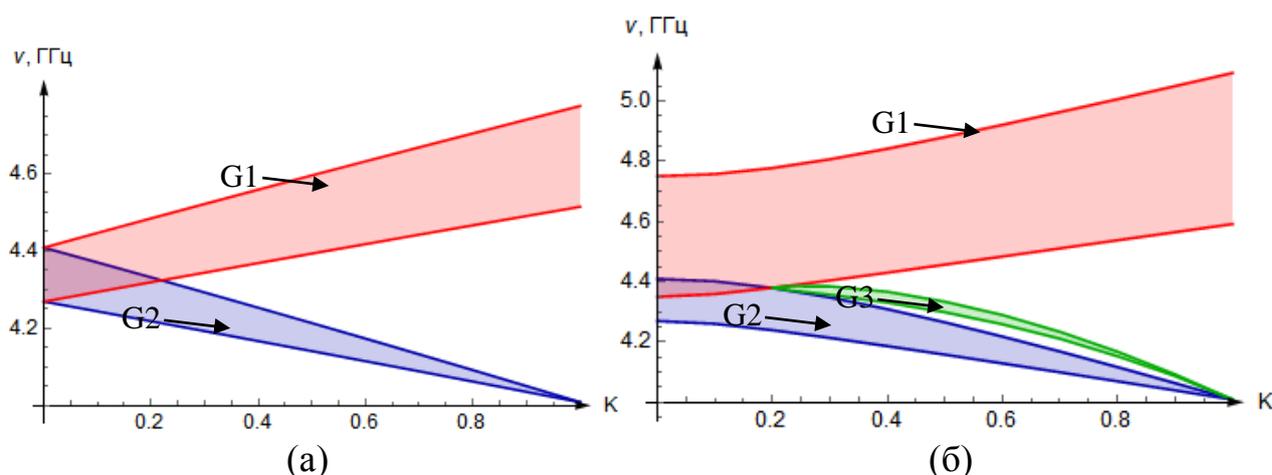


Рисунок 8 – Зависимость ширины и положения запрещённых зон от величины коэффициента связи для: (а) симметричных магнетонных кристаллов, (б) магнетонных кристаллов с разной глубиной канавки

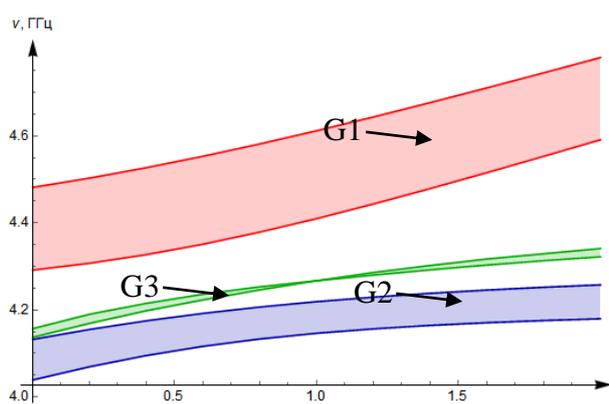


Рисунок 9 – Зависимость ширины и положения запрещённых зон от отношения толщины плёнок

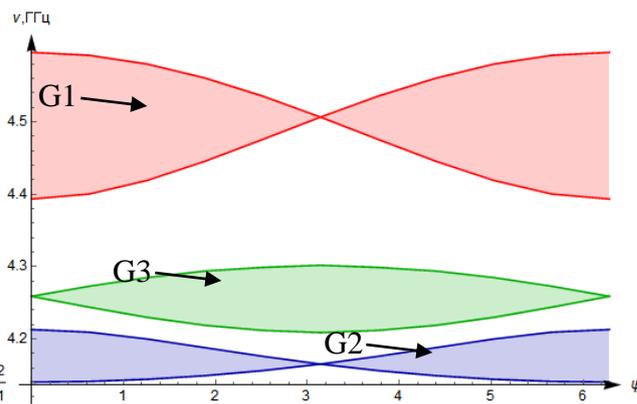


Рисунок 10 – Зависимость ширины и положения запрещённых зон от сдвига между магнетонными кристаллами

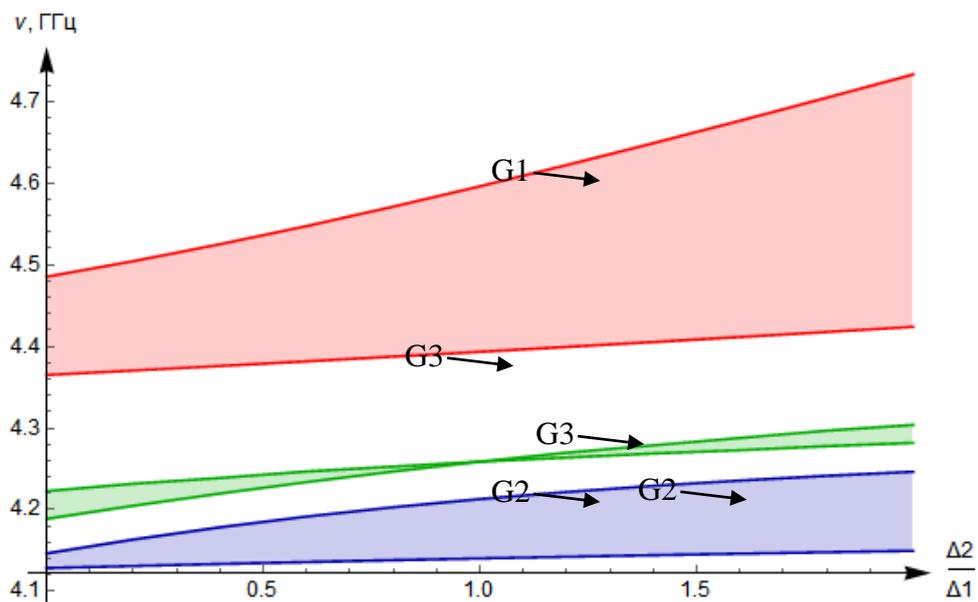


Рисунок 11 – Зависимость ширины и положения запрещённых зон от отношения глубины канавок

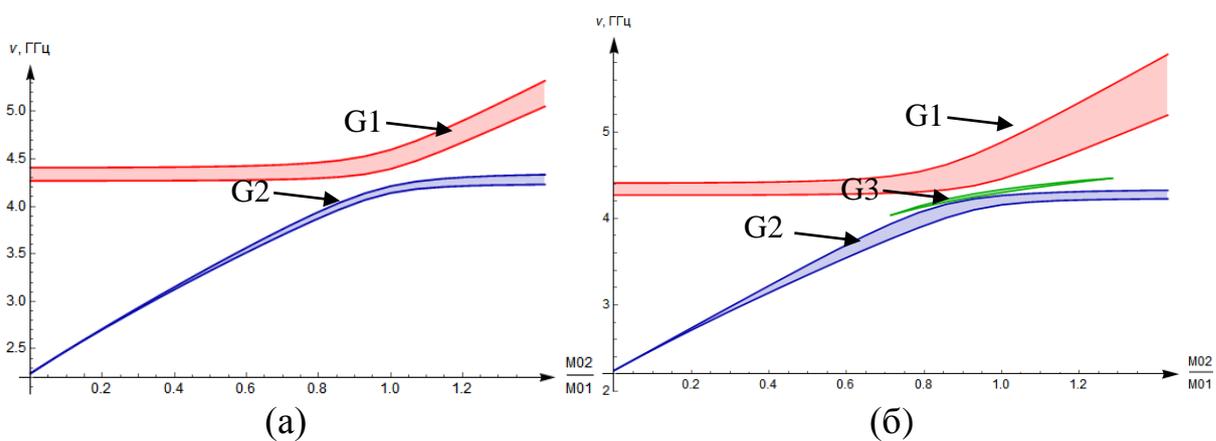


Рисунок 12 – Зависимость ширины и положения запрещённых зон от отношения намагниченности плёнок при: (а) одинаковых глубинах канавки, (б) разных глубинах канавки

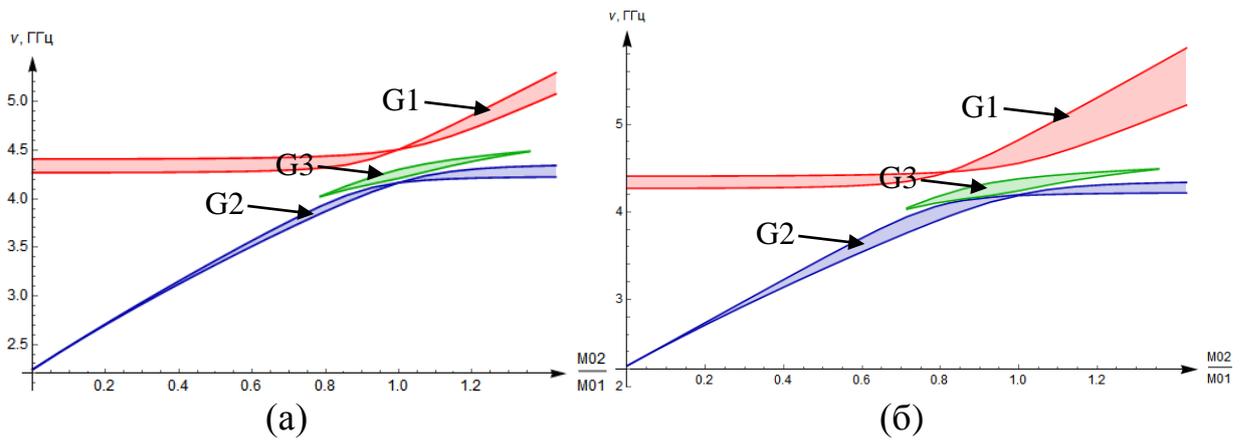


Рисунок 13 – Зависимость ширины и положения запрещённых зон от отношения намагниченностей магнетонных кристаллов со сдвигом между магнетонными кристаллами  $\psi = \pi$  при: (а) одинаковых глубинах канавки, (б)разных глубинах канавки

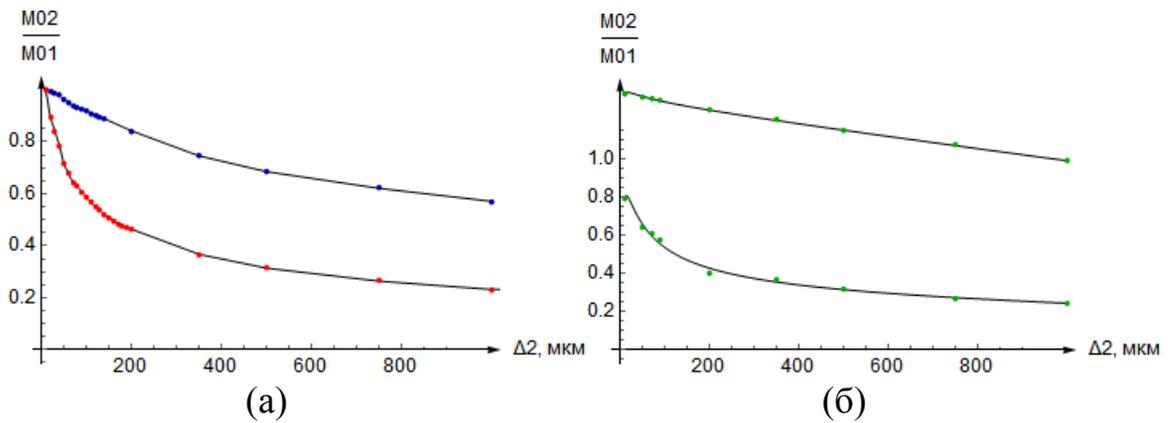


Рисунок 14 – Точки исчезновения запрещённых зон от глубины канавки второй плёнки: (а) зоны G1 и G2; (б) левый и правый край зоны G3

### 3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были рассмотрены особенности формирования запрещённых зон в системе из двух связанных магнетонных кристаллов.

Показано, что в исследуемой модели из двух связанных магнетонных кристаллов, разделённых диэлектриком, при выполнении условия первого брэгговского резонанса образуются две запрещённые зоны. И что при нарушении симметрии в системе возможно образование третьей запрещённой зоны вблизи первого брэгговского резонанса.

Показано, что в зависимости от изменения отношения толщины плёнок меняется положение основных запрещённых зон  $G1$  и  $G2$ , ширина их остаётся постоянной. Также появляется и расширяется дополнительная запрещённая зона  $G3$  при значении отношения толщины плёнок отличного от единицы. Таким образом, меняя отношение толщины плёнок, можно добиться существования либо только двух запрещённых зон  $G1$  и  $G2$ , либо трёх  $G1$ ,  $G2$  и  $G3$ .

В зависимости от фазового сдвига положение запрещённых зон не меняется, меняется только их ширина. При сдвиге  $\psi = 0$  и  $\psi = 2\pi$  существуют лишь две запрещённые зоны  $G1$  и  $G2$ , при сдвиге  $\psi = \pi$  существует лишь запрещённая зона  $G3$ . Меняя фазовый сдвиг, можно добиться существования либо двух запрещённых зон  $G1$  и  $G2$ , либо трёх  $G1$ ,  $G2$  и  $G3$ , либо лишь одной  $G3$ .

В зависимости от отношения глубины канавок меняются ширина и положение запрещённых зон. Как и в случае разной толщины плёнок, при отклонении отношения глубины канавок от единицы образуется третья запрещённая зона  $G3$ . Меняя отношение глубины канавок, можно добиться существования либо только двух запрещённых зон  $G1$  и  $G2$ , либо трёх  $G1$ ,  $G2$  и  $G3$ .

В зависимости от изменения отношения намагниченностей меняется положение и ширина запрещённых зон. Если добавить несимметричность в виде разной глубины канавок, появляется дополнительная запрещённая зона. Меняя отношение намагниченностей, можно получить две ситуации: Когда в диспер-

сионной характеристике существуют лишь две запрещённые зоны G1 и G2, и когда существует три запрещённые зоны G1, G2 и G3. Если добавить фазовый сдвиг  $\psi = \pi$ , то зоны G1 и G2 при  $\frac{M_{02}}{M_{01}} = 1$  исчезают. При изменении отношения глубины канавок значения  $\frac{M_{02}}{M_{01}}$ , при котором исчезают запрещённые зоны G1 и G2, смещаются для каждой зоны. Меняя намагниченность и отношение глубины канавок можно получить ситуации, в которых существуют зоны: 1) G1; 2) G1 и G2; 3) G1 и G3; 4) G2 и G3; 5) G1, G2 и G3; 6) G3; 7) G2.

Таким образом в результате выпускной работы показано, что, вводя несимметричность в структуру двух связанных магнетонных кристаллов (путем изменения отношения толщин...), можно управлять количеством, положением и шириной запрещённых зон.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вашковский, А. В. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот/ А. В. Вашковский, В. С. Стальмахов, Ю. П. Шараевский. - Саратов: Издательство Саратовского университета, 1993. - 311 с.
2. M. A. Morozova, A. Yu. Sharaevskaya, A. V. Sadovnikov, S. V. Grishin, D. V. Romanenko, E. N. Beginin, Yu. P. Sharaevskii, and S. A. Nikitov. Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic Structures//Journal of Applied Physics. - 2016. - Vol. 120, 223901
3. Гуляев, Ю. В. Спинволновая электроника/ Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман. - Москва: Знание, 1988. - 64 с.
4. Зависляк, И. В. Физические основы функциональной микроэлектроники/ И. В. Зависляк, А. В. Тычинский. - Киев: УМК ВО, 1989. - 105 с.
5. Гуревич, А. Г. Магнитные колебания и волны/ А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков - Москва: Физматлит, 1994. - 464 с.
6. Берегов, А. С. Свойства и применение магнитостатических волн в устройствах функциональной СВЧ электроники/ А. С. Берегов, В. В. Данилов, Е. В. Кудинов. - Киев: о-во "Знание" УССР, 1983. - 16 с.
7. Никитов, С. А. Кристаллы нового поколения/ С. А. Никитов// Природа. - 2012. - №1. - С. 51-60