

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

Моделирование процессов распространения спиновых волн в

периодических магнитных структурах

название темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента(ки) 4 курса 431 группы

направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии»

код и наименование направления (специальности)

Факультета нелинейных процессов

наименование факультета, института, колледжа

Пономаревой Эльмиры Рифатовны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

дата, подпись

Садовников А.В.

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

дата, подпись

Короновский А.А.

инициалы, фамилия

Саратов 2018 год

**Введение.** В настоящее время возможно получение кристаллов, подобных фотонным, на основе магнитных материалов - магнетонных кристаллов, в которых распространяющимися волнами являются спиновые волны [1-5].

Размерные эффекты, разнообразие дисперсионных свойств, возможность реализации широкого спектра резонансных явлений, перестраиваемых внешним магнитным полем, все это способствует формированию уникальных электродинамических и нелинейных характеристик при распространении спиновых волн в таких структурах.

В последние годы активно исследуется сверхвысокочастотные свойства магнетонных кристаллов, изготовленных на основе ферромагнитных пленок. На основе структур с ферромагнитными пленками можно создавать перестраиваемые магнитным полем устройства обработки информации в СВЧ диапазоне.

Одно из перспективных направлений в усовершенствовании вычислительных информационных технологий основано на замещении электронов квазичастицами, такими как магнеты или фотоны. Такое замещение будет иметь преимущество в параллельных вычислениях, реверсивной логике, где идентичные элементы одновременно обрабатывают данные на разных частотах.

В магнитных диэлектриках наблюдаются разнообразные физические эффекты, применимые для возбуждения и распространения спиновых волн. Благодаря большому разнообразию нелинейных спин-волновых эффектов в устройствах на этой основе, данные могут передаваться на большие расстояния без искажений в виде спиновых волн, солитонов, также могут быть буферизированы, если устройство в не распространяющем режиме работы и восстановлены впоследствии.

Цель дипломной работы исследовать характеристики распространения магнитостатических волн (МСВ) в периодических кристаллах, а именно, смоделировать систему, рассчитать дисперсионные характеристики и

коэффициент передачи МСВ в зависимости от частоты. Оценить возможности создания различных управляемых свойств МСВ с заданными характеристиками.

В данной работе были рассмотрены магнитостатические и спиновые волны в пространственно-ограниченных структурах. На первом этапе рассматривалась модель одномерного магнетонного кристалла. Был проведен расчет передаточной характеристики такого кристалла. Для численного моделирования использовался программный пакет COMSOL. Расчет производился методом конечных элементов.

Кроме периодических магнетонных кристаллов представляет интерес рассмотрение кристаллов с нарушенной трансляционной симметрией-дефектом. В литературе экспериментально показано, что в области локального дефекта происходит резонанс с возникающей, так называемой, дефектной модой. Для теоретического расчета разработан подход, основанный на известном методе матриц передачи. Кроме того, как известно, кроме одиночных структур, большое количество работ посвящено связанным магнитным структурам, поскольку наличие электродинамической связи между ферритовыми слоями приводит к перекачке волн из одной пленки в другую. При этом в связанных магнитных кристаллах имеется возможность управлять положением и количеством запрещенных зон. Исследование связанных кристаллов - сравнительно новое и перспективное направление в изучении периодических структур [6]. В работе исследованы передаточные характеристики для латерально связанных магнетонных кристаллов.

**МСВ в планарных магнитных структурах.** Магнитостатические волны принадлежат к типу волн, в которых существенную роль играет движение намагниченности. Магнитный момент прецессирует по поверхности конусов так, что каждый следующий имеет определенный фазовый сдвиг по сравнению с предыдущим, и этот фазовый сдвиг остается постоянным при переходе от момента к моменту. В результате вдоль цепочки магнитных векторов бежит спиновая волна. Если длина этой волны

возмущения значительно больше размера кристаллической решетки, то в магнитных структурах могут распространяться МСВ.

Устройства основанные на использовании МСВ обычно изготавливаются из пленки железо-иттриевого граната  $Y_3Fe_5O_{12}$ . Пленка ЖИГ является активной средой, в которой и происходит обработка информационного сигнала, а магнитостатические волны являются динамическими носителями информации в такой среде.

В зависимости от взаимной ориентации внешнего постоянного магнитного поля  $H_0$  и волнового вектора  $k$  МСВ в пленке ферромагнетика могут распространяться различные типы МСВ.

Рассмотрим ферритовую пленку толщиной  $d$ , представленную на рисунке 1.

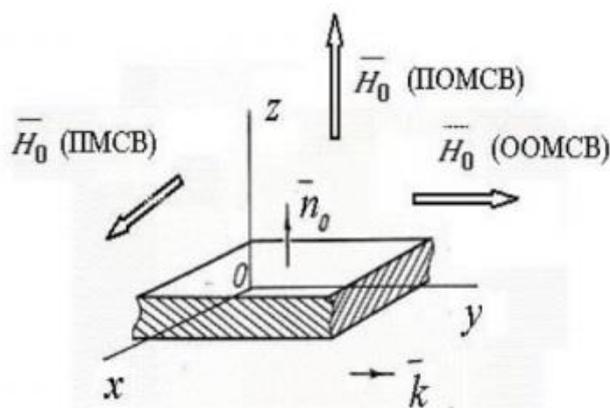


Рисунок 1- Ферритовая пленка толщиной  $d$  в магнитном поле.

Рассмотрим случай, когда отсутствуют свободные заряды и токи. В этом случае граничные условия заключаются в непрерывности тангенциальных к поверхности составляющих электрической и магнитной индукции [2].

Решение имеет вид плоских волн. В справедливом для любых значений граничных условий уравнении распространения электромагнитных волн в ограниченной ферромагнитной среде положим  $k_z = 0$  и получим уравнение для волн в безграничной среде и редуцируем его на два более простых уравнения:  $k^2 = k_0^2 \epsilon$ , которое соответствует электромагнитной волне со

скоростью света в диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  и  $c\mu = 1$  и имеет вид  $k_1 = \pm \frac{\omega}{c_1}$ , а второе уравнение  $k^2 = k_0^2 \varepsilon \left( \mu - \frac{\mu_a^2}{\mu} \right)$ .

Используем программный пакет WolframMathematica для построения дисперсии магнитостатических волн в неограниченной среде.

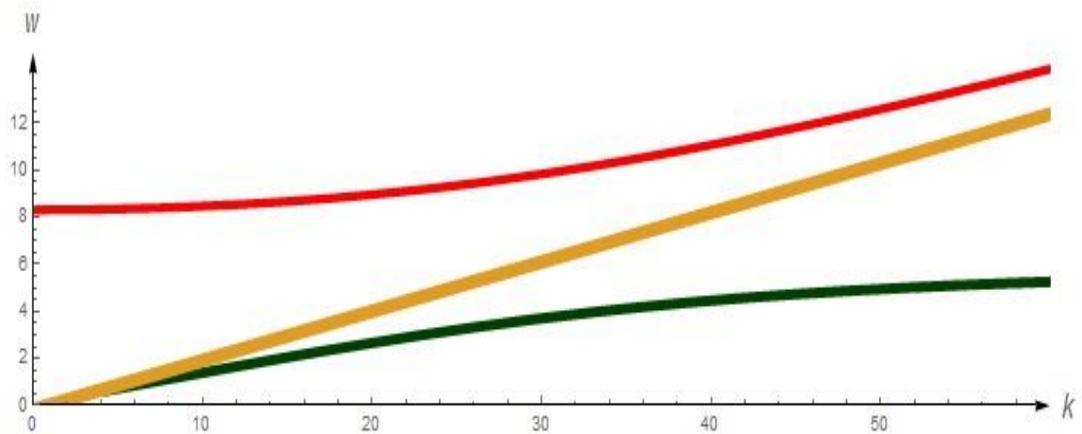


Рисунок 2- Дисперсия МСВ в безграничной среде.

Дисперсионная кривая имеет две ветви. Верхняя ветвь, обозначенная красным цветом, соответствует электромагнитной волне с  $v_f > c_1$ . Нижняя кривая, зеленая - медленная волна  $v_f < c_1$ . Желтая кривая проходящая между ними является сильно замедленной волной.

Теперь рассмотрим пленку на которой вектор статической намагниченности  $\overline{M}_0$  перпендикулярен поверхностям  $z = \pm \frac{s}{2}$ .

Уравнение Уокера выглядит так:

$$\mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0, |z| < \frac{s}{2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0, |z| > \frac{s}{2} \quad (2)$$

Решение ищем в виде:

$$\psi = \psi(z) e^{i(\omega t - kz)} \quad (3)$$

Для функции  $\psi(z)$  решения разбиваются на симметричные и антисимметричные.

У ПОМСВ основная мода симметричная.

Диапазон существования ПОМСВ

$$\Delta\omega = \sqrt{\omega_H(\omega_H - \omega_M)} - \omega_H + \omega_M \rightarrow \frac{\omega_M}{2} \quad (4)$$

Исследуем зависимость волнового числа от частоты в пленке, используем пакет COMSOL.

Теперь рассчитаем дисперсионную характеристику такой же пленки, но по аналитической формуле. В программном пакете Wolfram Mathematica. Для расчета волнового числа  $k$  использовалось следующее дисперсионное соотношение [7].

$$k = \frac{2}{\sqrt{-\mu}} n\pi + \arctan \frac{1}{\sqrt{-\mu}} \quad (5)$$

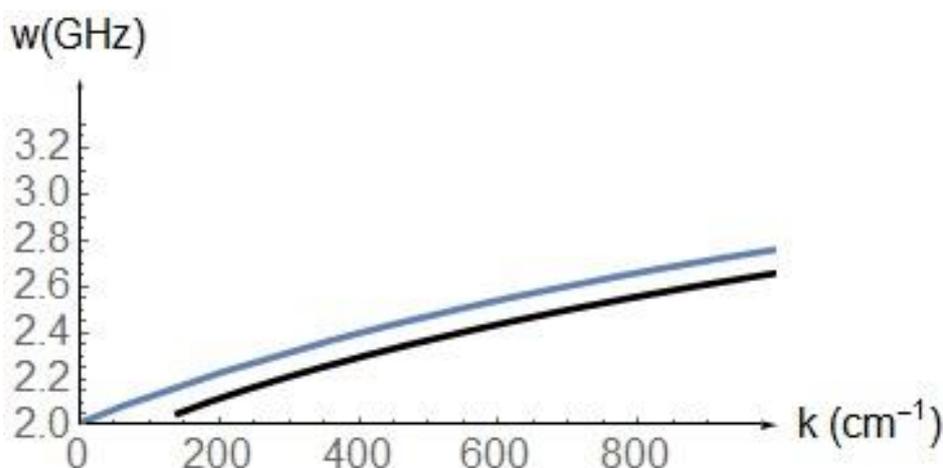


Рисунок 3- Сравнение аналитического расчета с численным.

На рисунке 3. Расхождение в 50 МГц не является существенным, учитывая разницу в подходах.

В результате, исследуя дисперсионные характеристики, было выявлено, что ограничение ферромагнитного слоя сильно влияет на поведение МСВ, в частности на ширину спектра.

**МСВ в периодических структурах.** Рассмотрим модель одномерного магنونного кристалла. Для создания магنونного кристалла использовалась ферромагнитная пленка железо-иттриевого граната. Схема кристалла представлена на рисунке 4.

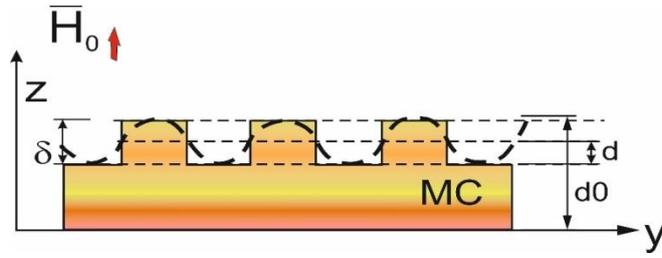


Рисунок 4- Схема одномерного магнитного кристалла.

Для численного анализа проводилось решение волнового уравнения, с учетом фактора периодической толщины и вида дисперсионного соотношения. Дисперсионное соотношение имеет вид

$$\left(\omega - \omega_H^2 - \frac{\omega_M \omega_H}{2} k d_0\right) \left(\omega^2 - \omega_H^2 - \frac{\omega_M \omega_H}{2} \left(\frac{2\pi}{L} - k\right) d_0\right) + \frac{\omega_H^2 \omega_M^2 d_0^2 \delta d}{16} k \left(\frac{2\pi}{L} - k\right) = 0 \quad (6)$$

Периодическая функция толщины

$$d = d_0 \left[ 1 + \frac{\delta d}{d_0} \cos\left(\frac{2\pi}{L} y\right) \right] \quad (7)$$

Для численного моделирования имеющейся задачи была задана двумерная конфигурация одного периода структуры  $L$ . Для численного моделирования методом конечных элементов выбиралась расчетная область прямоугольной формы размером  $100 * 250$  мкм. Для решения задачи численного моделирования использовалась система уравнений Максвелла в магнитоэлектростатическом приближении с учетом многомодовости магнитоэлектростатических волн.

Для решения поставленной в программном пакете COMSOL Multiphysics использовались следующие параметры:  $L = 100$  мкм,  $H_0 = 2438$  Ое,  $M_0 = 140$  Ое,  $d = 10 * 10^{-6}$  мкм,  $\omega_H = g(H_0 - 4\pi M_0)GHz$ ,  $\omega_M = g4\pi M_0$ . Ферромагнитный материал можно задать автоматически из имеющейся базы материалов.

Полученная характеристика представлена на рисунке 5 в сравнении с численным анализом. Красные кривые на рисунке обозначают результаты аналитического расчета, синие точки- результаты численного моделирования.

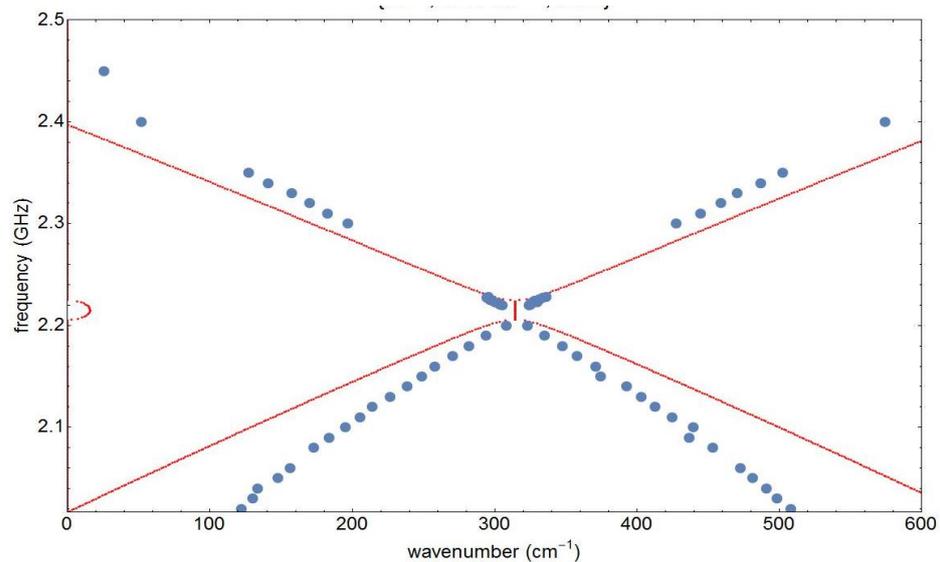


Рисунок 5- Результаты расчетов дисперсии для МК, аналитические и численные.

Видно, что в спектре появляется запрещенная зона, соответствующая брэгговским волновым числам, при которых распространение волны в периодической структуре становится невозможным. Положение запрещенной зоны зависит от параметров пленки, а так же от внешнего магнитного поля. Меняя магнитное поле, можно управлять спектром распространяющихся волн в кристалле.

Расхождение данных в области малых и больших  $k$  обуславливается особенностями линейного приближения теоретического метода, поэтому в данном случае более точный результат дает численный расчет.

**МСВ в структурах с дефектами.** В данном разделе для решения рассматриваемой задачи использовался справедливый метод матриц передачи.

Исследуемая периодическая структура представляет собой каскадное соединение отрезков с различными волновыми сопротивлениями. Рассмотрим волноведущую структуру на основе ферритовой пленки, в которой имеется неоднородность, эта область ограничена плоскостями  $y = 0, y = L$ . Следовательно, в такой структуре можем наблюдать падающие и отраженные от неоднородности волны.

Применимо к волноведущей структуре с распространяющейся МСВ, которая имеет волновое число  $k$ , и распространяется вдоль оси  $y$  матрица передачи будет иметь вид:

$$\vec{M} = \begin{pmatrix} e^{-jky} & 0 \\ 0 & e^{jky} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Как обсуждалось ранее, основной особенностью распространения МСВ в МК является появление запрещенной брэгговской зоны в частотном спектре распространяющейся волны. Периодические структуры весьма чувствительны к различным дефектам решетки. Наличие в структуре магнетонного кристалла дефекта приводит к нарушению его симметрии [8-10].

Наличие дефекта с различными пространственными параметрами может привести к возникновению одной или нескольких дефектных мод в зависимости от размера дефекта. Изучение дефектных мод может быть использовано для подробного изучения уникальных нелинейных свойств, которые могут использоваться в устройствах с СВЧ фильтрами [11].

Рассмотрим одномерный магнетонный кристалл из пленки железоиттриевого граната (рисунок 10) (YIG) на поверхности которой была создана неоднородность в виде канавок и выступов.

Получим матрицу передачи для рассматриваемого магнетонного кристалла со структурным дефектом:

$$\overline{A(0)} = \overrightarrow{M_{L1}} \overleftarrow{G} \overrightarrow{M_{L2}} \quad (9)$$

$$\text{где } G_s = \begin{pmatrix} (1 - s\Gamma)^{-1} & s\Gamma(1 - s\Gamma)^{-1} \\ s\Gamma(1 - s\Gamma)^{-1} & (1 - s\Gamma)^{-1} \end{pmatrix};$$

$$\Gamma_+ = \frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2} = \Gamma;$$

$$\Gamma_- = \frac{d_2 - d_1}{d_1 + d_2} = -\Gamma.$$

В данном случае волна единичной амплитуды подается в систему, состоящую из двух портов, и существует два вида волн: падающие и отраженные. Так как мы возбуждаем только одну волну, введем

коэффициент отражения:  $R_1 = B_1(0)/A_1(0)$ , и коэффициент пропускания

$$T_1 = E_1(L)/A_1(0).$$

На рисунке 6 изображена передаточная характеристика  $T_1$  магнонного кристалла с дефектом. Видно, что в области запрещенной зоны (на частоте 4.97) присутствует узкая полоса пропускания (дефектная мода).

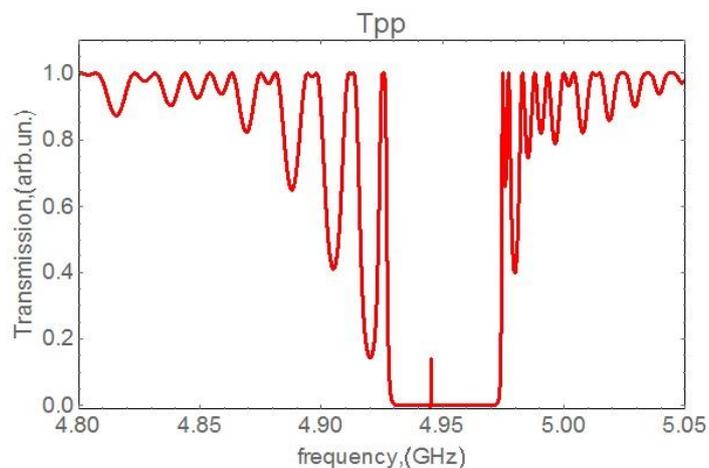


Рисунок 6- Расположение дефектной моды для  $L_d = 4L_1$

Внесенный дефект является резонатором, если его длина равна целочисленному значению  $N = 1,2 \dots$  от половины длины волны.

Теперь рассмотрим модель структуры, состоящей из двух латерально - связанных через дефект одномерных магнонных кристаллов с нарушенной трансляционной симметрией в каждом кристалле. Интерес именно к такой четырехпортовой структуре с дефектами основан на возможности применения узкого коммутационного элемента [10-11].

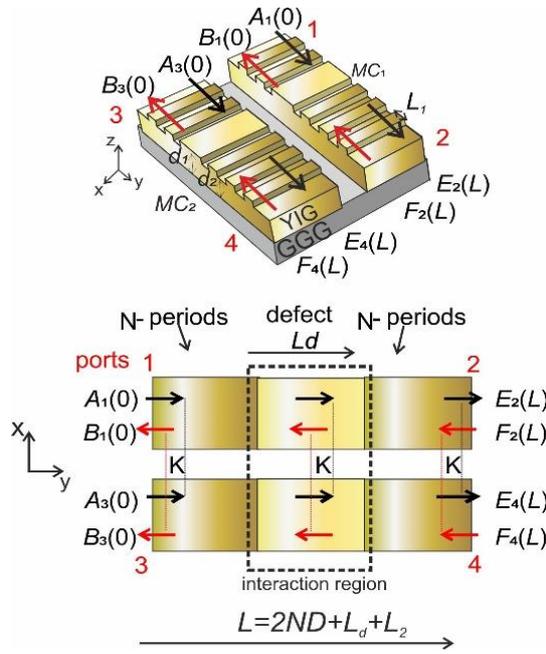


Рисунок 7- Модель двух связанных магнонных кристаллов с нарушенной симметрией.

Используя метод матриц передачи, получаем матрицу передачи для рассматриваемых связанных магнонных кристаллов с симметричным расположением дефектов. Такая матрица имеет вид:

$$\bar{M} = \bar{M}_D^N M_d \bar{G}_+ M_2 \bar{G}_- \bar{M}_D^N \quad (10)$$

где  $N$  это число периодов магнонного кристалла расположенных «до» и «после» дефекта.

Выражение для матрицы передачи регулярного волновода включает коэффициент связи  $K$ , который является параметром и подлежит определению. Для этого необходимо решить задачу о собственных волнах в системе двух связанных волноводов. Введем коэффициент связи в форме:

$$K = \frac{\pi}{2L} Z \quad (11)$$

где  $Z$  – число «перекачек» волны между магнонными кристаллами  $L = 2ND + L_d + L_2$ - длина соединенной стороны магнонных кристаллов.

В случае, когда волна определенной амплитуды распространяется в 4-портовой системе связанных магнонных кристаллов, существует два вида волн: падающие и отраженные. В случае возбуждения только одного порта,

введем коэффициенты отражения от портов  $R_1 = B_1(0)/A_1(0)$ ,  $R_3 = B_3(0)/A_1(0)$  и коэффициенты пропускания  $T_2 = E_2(L)/A_1(0)$ ,  $T_4 = E_4(L)/A_1(0)$ .

Получаем частотные зависимости коэффициентов отражения и пропускания для магнитоэлектрических волн для связанных магнитных кристаллов с нарушенной симметрией, решая

$$\bar{\psi}(0) = \bar{M}\bar{\psi}(L) \quad (12)$$

с учетом соотношения дисперсии

$$k_j = \frac{1}{2d_j} \ln \left( \frac{(\mu-1)^2 - \mu\alpha}{(\mu+1)^2 - \mu\alpha} \right) \quad (13)$$

Результаты расчета характеристик в структуре связанных магнитных кристаллов с нарушенной симметрией на основе представленных соотношений показаны на следующих рисунках.

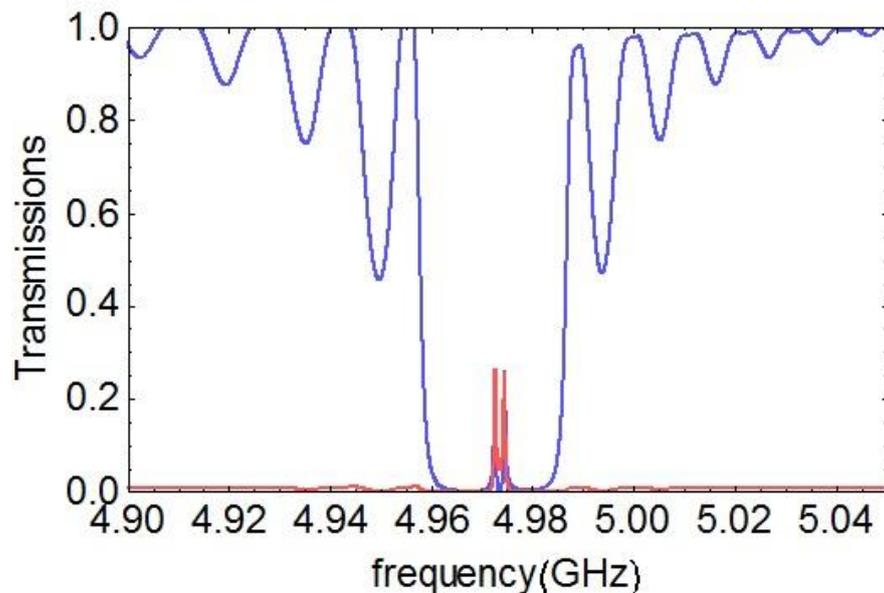


Рисунок 8- В кристаллах присутствует дефект, число перекачек из одного МК в другой равно  $Z=2$ .

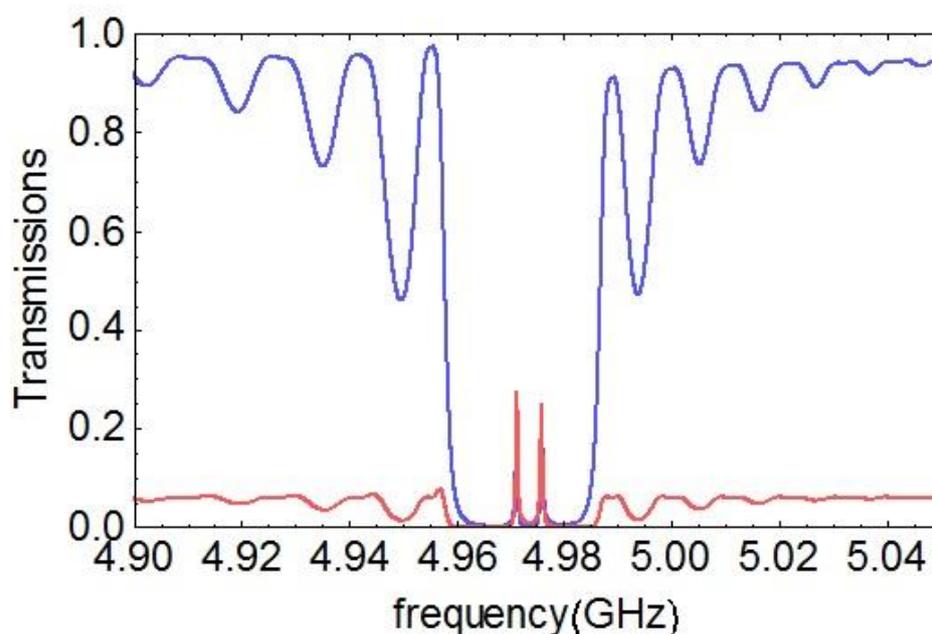


Рисунок 9- Внесен в структуру дефект, число перекачек равно  $Z=5$ .

Сравнивая полученные результаты с экспериментами в одномерном магннном кристалле, можно сказать, что расположение дефектных мод в основном зависят от размеров дефектов и соотношения между размерами дефектов и периодом магннных кристаллов. При этом наличие дефектных мод на передаточных характеристиках сохраняется с увеличением числа перекачек, а значит усилении связи между МК.

Следует отметить, что данные результаты могут быть использованы для создания управляемых устройств спин -волновой логики.

**Заключение.** В работе получены следующие основные результаты:

1. С использованием аналитического и численного метода была рассчитана дисперсионная характеристика в ферромагнитной пленке при распространении в ней ПМСВ и показано хорошее совпадение с помощью разных методов.

2. Так же с помощью двух разных подходов была рассчитана дисперсионная характеристика в одномерном периодическом магннном

кристалле при прохождении ПОМСВ в нем и проведен сравнительный анализ.

3. С помощью метода матриц передачи была рассчитана передаточная характеристика в магнном кристалле с геометрическим дефектом при распространении ПМСВ, показаны варианты данной характеристики при различных длинах дефекта

4. С помощью метода матриц передач были рассчитаны передаточные характеристики в латерально связанных магнных кристаллах при связи только в области дефекта. Показано, что за счет наличия связи формируются две дефектные моды, вместо одной.

### Список литературы.

- [1] S. A. Nikitov, Ph. Tailhades, C.S. Tsai “Spin waves in periodic magnetic structures - magnonic crystals”, JMMM, vol. 236, no. 3, 320-330, 2001.
- [2] Ю.В.Гуляев, С.А. Никитов, “Магнонные кристаллы и спиновые волны в периодических структура”, ДАН. -2001. -Т.380. -С.469
- [3] Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. Физматлит. 2005.
- [4] V. V. Kruglyak, S. O. Demokritov and D. Grundler, “Magnonics”, Journal of Physics D, vol. 43, 264001, 2010.
- [5] A V Chumak, T Neumann, AASerga, B Hillebrands and M P Kostylev, “A current-controlled, dynamic magnonic crystal”, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 42, 205005, 2009.
- [6] Morozova M.A., Sharaevskaya A.Yu., Sadovnikov A.V., Grishin S.V., Romanenko D.V., Beginin E.N., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S.A., “Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic structures”, J. Appl. Phys, vol. 120, 223901, 2016.
- [7] Зависляк И.В., Тычинский А.В., Физические основы функциональной микроэлектроники, издательство Киев, УМКВО, 1989 г.
- [8] K. H. Chi, Y. Zhu, C. S. Tsai “Confinement of magnetostatic forward volume waves in two-dimensional magnonic crystals with line defects”, J. Appl. Phys., vol. 115, 17D125, 2014.
- [9] Yu. Filimonov, E. Pavlov, S. Vystostkii, and S. Nikitov “Magnetostatic Surface Wave Propagation in a One-Dimensional Magnonic Crystal with Broken Translational Symmetry”, Appl. Phys. Lett. 101, 242408, 2012.
- [10] E. N. Beginin, Yu. A. Filimonov, E. S. Pavlov, S. L. Vysotskii, and S. A. Nikitov “Bragg resonances of magnetostatic surface spin waves in a layered structure: Magnonic crystal-dielectric-metal”, Appl. Phys. Lett., vol. 100, 252412, 2012.

- [11] J. W. Kłos, D. Kumar, M. Krawczyk, A. Barman “Influence of structural changes in a periodic antidot waveguide on the spin-wave spectra”, *Phys. Rev.B*, vol. 89, 014406, 2014.