

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

Кафедра нелинейной физики

**Распространение поверхностных и объемных магнитостатических волн
в периодических ферромагнитных структурах**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 411 группы
направления 03.03.01 Прикладные математика и физика
Факультета нелинейных процессов
Бисеровой Екатерина Николаевны

Научный руководитель
профессор, д. ф. – м. н.

Ю.П. Шараевский

Заведующий кафедрой
профессор, д. ф. – м. н.

Н.М.Рыскин

Саратов 2016 год

Введение

Актуальность работы. В настоящее время одним из основных этапов развития электроники СВЧ, связанным с развитием твердотельной электроники, стало использование в качестве волноведущих сред периодических решеток кристаллов. В твердом теле в зависимости от его характеристик, внешних условий и частоты возбуждения могут распространяться волны различных типов - электромагнитные, акустические, спиновые [1-3]. Спиновые волны можно условно разделить на дипольные и обменные. Они могут существовать в очень широком частотном диапазоне от единиц до сотен гигагерц. При малых значениях волнового числа обменное взаимодействие в большинстве случаев не играет существенной роли в формировании спектра волн, такие волны называют дипольными спиновыми или магнитостатическими волнами (МСВ). Различают три типа магнитостатических волн – прямые объемные волны в нормально намагниченных пленках феррита (ПОМСВ), обратные объемные волны в касательно намагниченных пленках (ООМСВ) и, наконец, поверхностные МСВ (ПМСВ) также в касательно намагниченных пластинах феррита [1].

Магнитостатические волны обладают целым рядом преимуществ перед другими типами волн в твердых телах. Во-первых, такие волны легко возбуждаются и принимаются практически во всем диапазоне СВЧ, во-вторых, ими легко можно управлять внешним магнитным полем, и, в-третьих, одно из наиболее существенных и важных преимуществ - дисперсия МСВ зависит от внешних нагрузок, таких как металлические экраны, периодические границы и др. [1-3]. Использование магнитостатических волн в магнитоупорядоченных средах позволяет создавать на их основе перестраиваемые устройства в СВЧ диапазоне с широкими функциональными возможностями [3].

В последние годы интенсивно развиваются исследования, связанные с распространением световых волн в оптических периодических структурах, которые получили название фотонные кристаллы [4]. В таких кристаллах свет может распространяться только в определенных направлениях или вовсе может оказаться локализованным. В области сверхвысоких частот аналогами фотонных кристаллов являются магنونные кристаллы - структуры, созданные на основе магнитных материалов, в которых распространяющимися волнами являются спиновые волны (магноны) [5-10].

Создание кристаллов, подобных фотонным, на основе магнитных материалов, в которых могут распространяться спиновые волны, имеет ряд преимуществ по сравнению с фотонными кристаллами. Во-первых, длина спиновой волны, а соответственно, и свойства таких кристаллов зависят от внешнего магнитного поля. Во-вторых, для широкого класса ферромагнитных материалов в СВЧ-диапазоне длина волны распространяющихся спиновых волн порядка десятков или сотен микрон. Фазовая и групповая скорости спиновых волн также зависят от размеров образца и приложенного внешнего поля и могут изменяться в широких пределах [1,2]. Сегодня на базе магنونных кристаллов конструируются образцы 1D и 2D волноведущих структур и экспериментально исследуются свойства распространяющихся в них магностатических волн [8,10].

Простейший одномерный магنونный кристалл – это периодическая многослойная структура, состоящая из магнитных слоев с разной намагниченностью, либо такая же структура, но состоящая из магнитных и немагнитных слоев. Реализовать такую структуру довольно сложно, поскольку при росте слоев может легко нарушиться периодичность их магнитных свойств, что приведет к разрушению структуры магنونного кристалла, обладающего магنونной запрещенной зоной. Более предпочтительным с точки зрения практических приложений является однослойная ферромагнитная пленка, на поверхности которой нанесена

одномерная периодическая структура, либо в виде вытравленных канавок, либо напыленных металлических полосок [6,7,11]. Поэтому исследование особенностей распространения МСВ в таких структурах представляет особый интерес.

Целью настоящей дипломной работы является построение простой волновой модели, описывающей распространение поверхностных и обратных объемных магнитостатических волн в одномерном магнетонном кристалле на основе ферромагнитной пленки и изучение особенностей дисперсионных характеристик МСВ в таких структурах.

Рассматриваемая в работе ферромагнитная структура (рис.0.1) представляет собой касательно намагниченную ферромагнитную пленку, на одной поверхности которой нанесена система периодических канавок с периодом L , расположенных перпендикулярно направлению распространения МСВ. Структура считается бесконечной в направлениях x, z . Если магнитное поле H_0 направлено перпендикулярно направлению волны (вектору k), то в структуре будет возбуждаться ПМСВ, а если вдоль направления k – в пленке возбуждаются ООМСВ.

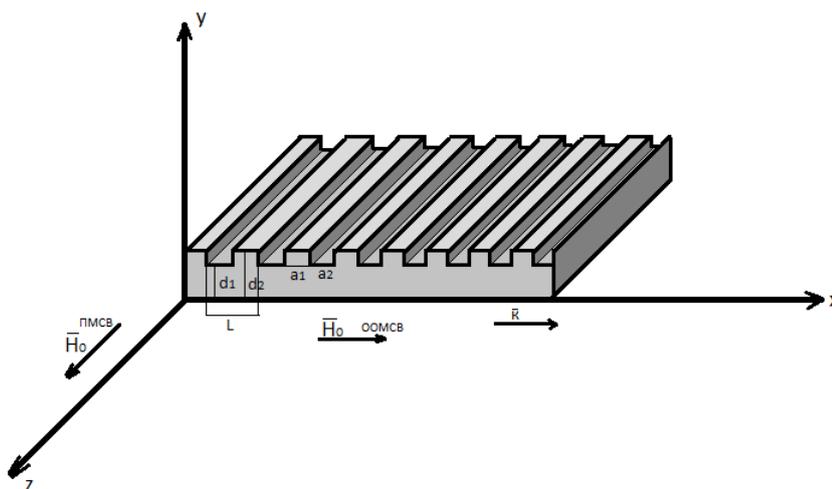


Рис.1. Схема периодической ферромагнитной структуры

В такой периодической структуре фазовая скорость волны будет в разных участках пленки различна за счет разной толщины пленки (d_1 и d_2) на периоде L .

Задачи, решаемые в настоящей бакалаврской работе заключаются в следующем:

1. расчет и анализ дисперсионных характеристик поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в периодической структуре
2. расчет и анализ дисперсионных характеристик обратных объемных магнитостатических волн (ОМСВ) в периодической структуре.

В первом разделе «Общий метод получения дисперсионных соотношений для периодической структуры» представлен метод получения общего дисперсионного соотношения для периодической структуры на основе метода, указанного в [12].

Второй раздел «Дисперсионные характеристики ПМСВ в периодической структуре на основе ферромагнитной пленке» состоит из двух подразделов: дисперсионные характеристики для свободной пленки; получение дисперсионных характеристик для периодической ферромагнитной структуры, указанной на рис.1.

Третий раздел «Анализ дисперсионных характеристик для ОМСВ в периодической ферромагнитной структуре» включает в себя два подраздела: получение дисперсионных характеристик обратных объемных МСВ в одиночной пленке; получение дисперсионных характеристик обратных объемных МСВ в периодической структуре.

Основное содержание работы

В первом разделе было получено общее дисперсионное уравнение для периодической структуры, представленной на рис.2. на основе метода, приведенного в [12].

$$\cos(L K) = \cos(k_1 a_1) \cos(k_2 a_2) - \frac{1}{2} \left(\frac{k_1}{k_2} + \frac{k_2}{k_1} \right) \sin(k_1 a_1) \cos(k_2 a_2), \quad (1)$$

где K – волновое число для волны, распространяющейся в периодической структуре, a_1 и a_2 – толщины слоев, $k_1 = k_1(\omega)$ и $k_2 = k_2(\omega)$.

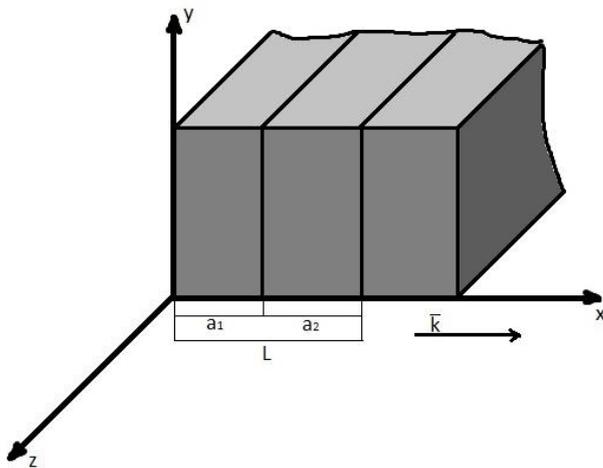


Рис.2 Схема анализируемой периодической структуры.

Во втором разделе были рассчитаны и построены дисперсионные характеристики ПМСВ для свободной ферромагнитной пленки. Для этого было рассмотрено дисперсионное уравнение для структуры, указанной на рис.3, которое имеет вид:

$$thkl_1 thkl_2 + \mu(thkl_1 + thkl_2)cthkt + \rho\mu_a(thkl_1 - thkl_2) + \mu^2 + \mu_a^2 = 0, \quad (2)$$

где, t – толщина пленки, l_1 и l_2 – расстояния до металлических экранов.

Полагая в (2) $l_1, l_2 \rightarrow \infty$, получим дисперсионное уравнение для ПМСВ в свободной пленке:

$$1 + 2\mu cthkt + \mu^2 - \mu_a^2 = 0, \quad (3)$$

$$\text{где } \mu_a = \frac{\omega_M \omega}{\omega_H^2 - \omega^2}, \quad \mu = \frac{\omega_H(\omega_H + \omega_M) - \omega^2}{\omega_H^2 - \omega^2}, \quad \omega_M = 4\pi\gamma M_0, \quad \omega_H = \gamma H_0 \quad (4)$$

где M_0 - намагниченность насыщения, γ - гиромагнитное отношение.

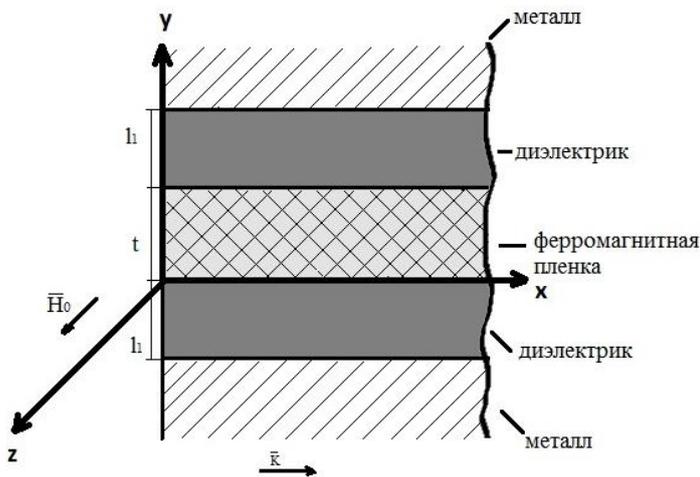


Рис. 3 Схема структуры пластины, нагруженной металлом

На основе уравнения (3) были построены дисперсионные характеристики ПМСВ в свободной пленке (рис.4).

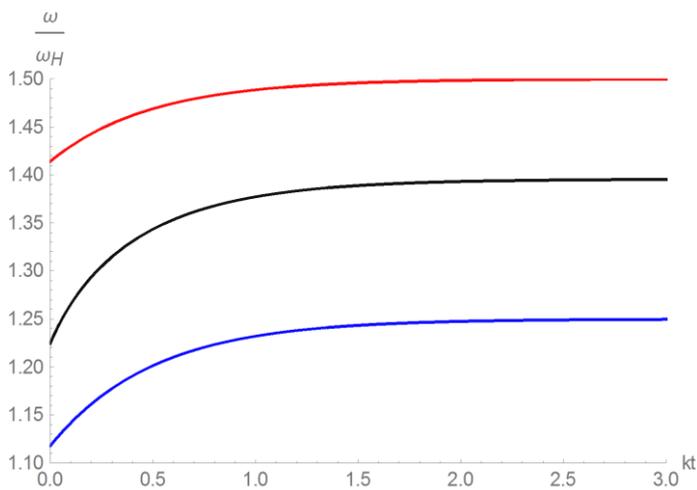
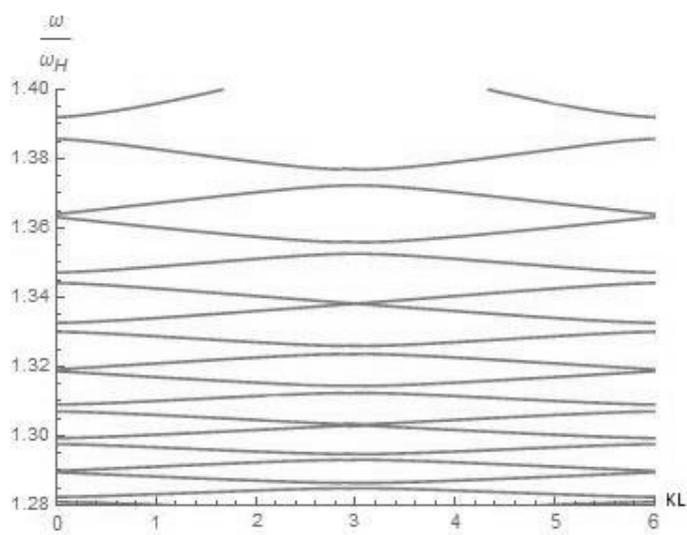


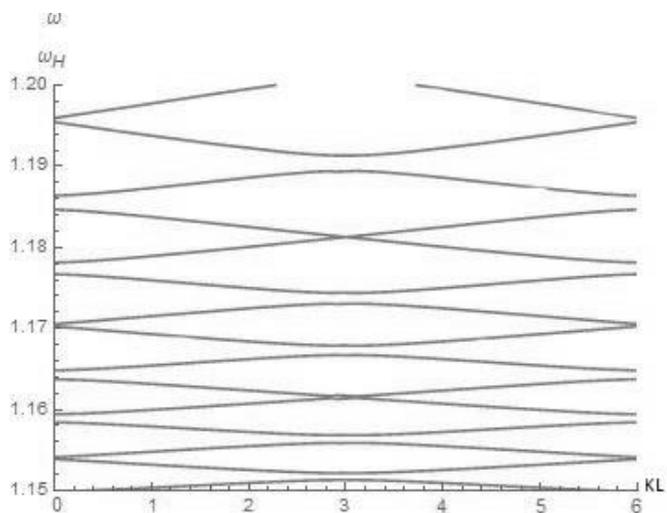
Рис.4 Дисперсионные характеристики ПМСВ для свободной пленки при различных значениях $\frac{\omega_M}{\omega_H}$: красная кривая соответствует $\frac{\omega_M}{\omega_H} = \frac{1}{4}$, черная - $\frac{\omega_M}{\omega_H} = \frac{1}{2}$, синяя - $\frac{\omega_M}{\omega_H} = 1$

В ходе анализа дисперсионных соотношений для магнитоэстатических волн в одиночной пластине видно, что дисперсионные свойства спиновых волн в структурах, изготовленных на основе ферромагнитных пленок, определяются не только геометрическими параметрами структуры, но также в большей мере физическими параметрами исходной ферромагнитной пленки, то есть дисперсионные характеристики сильно меняются в зависимости от параметра $\frac{\omega_M}{\omega_H}$. При увеличении толщины пленки меняется и постоянная распространения k , то есть меняется и фазовая скорость распространения волны $V_\phi (k = \frac{\omega}{V_\phi})$.

Далее были получены дисперсионные характеристики для периодической структуры на основе уравнений (1) и (3). Эти характеристики для различных параметров приведены ниже на рис.5.



а)



б)

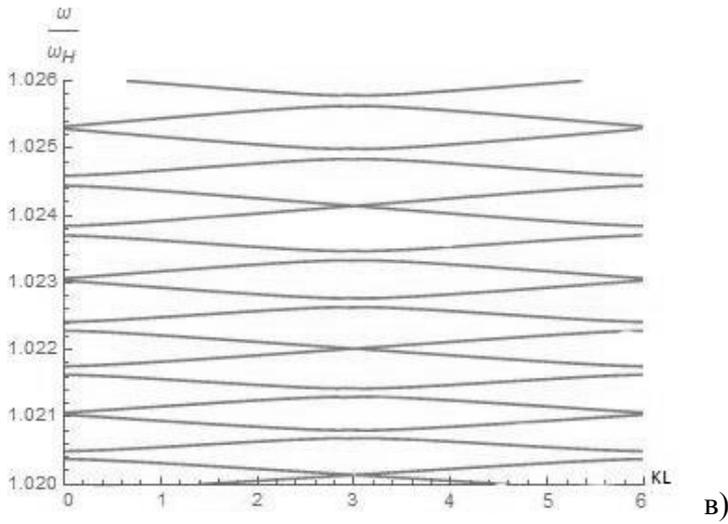


Рис.5 Дисперсионные характеристики ПМСВ в периодической структуре при разных параметрах $\frac{\omega_M}{\omega_H}$: а) $\frac{\omega_M}{\omega_H} = 1, a_1=a_2=0.5, D_1=0.02, D_2=0.01$, б) $\frac{\omega_M}{\omega_H} = \frac{1}{2}, a_1=a_2=0.5, D_1=0.02, D_2=0.01$, в) $\frac{\omega_M}{\omega_H} = \frac{1}{4}, a_1=a_2=0.5, D_1=0.02, D_2=0.01$

В третьем разделе были получены дисперсионные характеристики ООМСВ для свободной ферромагнитной пленки на основе уравнения (5):

$$1 + 2\zeta \operatorname{ctg}(kt/\zeta) + \mu = 0, \quad (5)$$

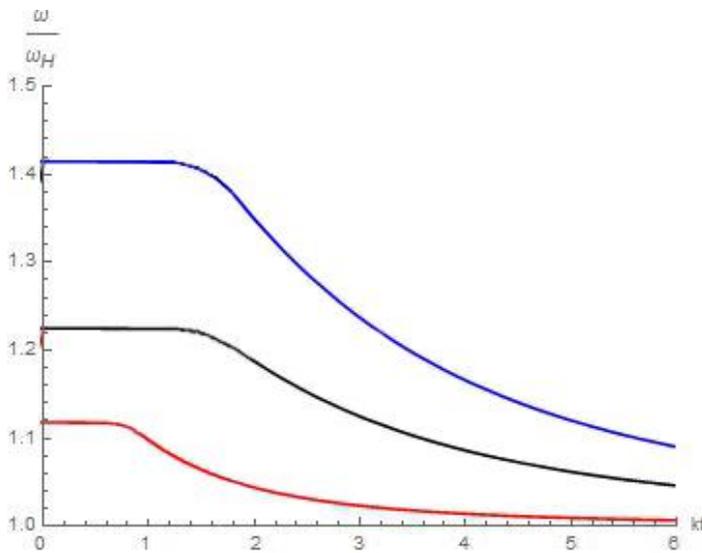


Рис.6. Дисперсионные характеристики ООМСВ в свободной пластине, $t=0.01$. Верхняя кривая соответствует $\frac{\omega_M}{\omega_H} = 2$, средняя – при 1, нижняя - при $\frac{1}{2}$.

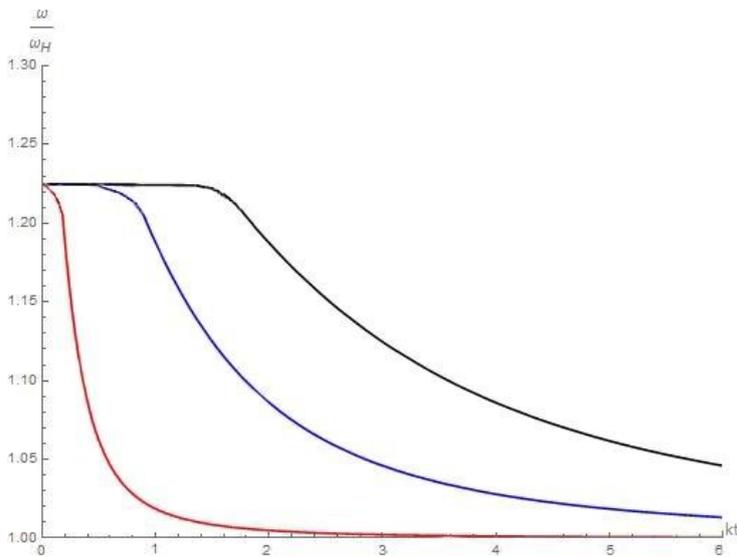
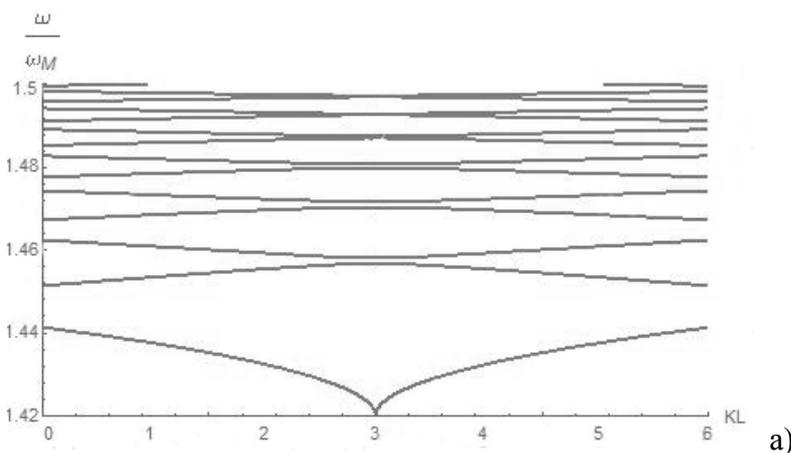


Рис.7 Дисперсионные характеристики ООМСВ в свободной пленке, $\frac{\omega_M}{\omega_H} = 1$. Красная кривая соответствует $t=0.001$, синяя - $t=0.01$, черная - при $t=0.02$

Из полученных кривых можно сделать вывод, что дисперсия обратных объемных МСВ в свободной пластине сильно зависит как от частоты внешнего поля, так и от толщины слоя t . Видно, что с ростом величины ω_M диапазон частот распространения ООМСВ сдвигается в сторону более высоких частот, а при уменьшении толщины слоя t фазовая скорость V_ϕ распространения МСВ увеличивается.

Также были получены дисперсионные кривые для ООМСВ в периодической структуре при различных параметрах. Для их расчета было использовано дисперсионное уравнение для периодической структуры (1), с учетом дисперсионного уравнения ООМСВ в свободной ферромагнитной пленке (5). Эти кривые приведены ниже на рис.8.



а)

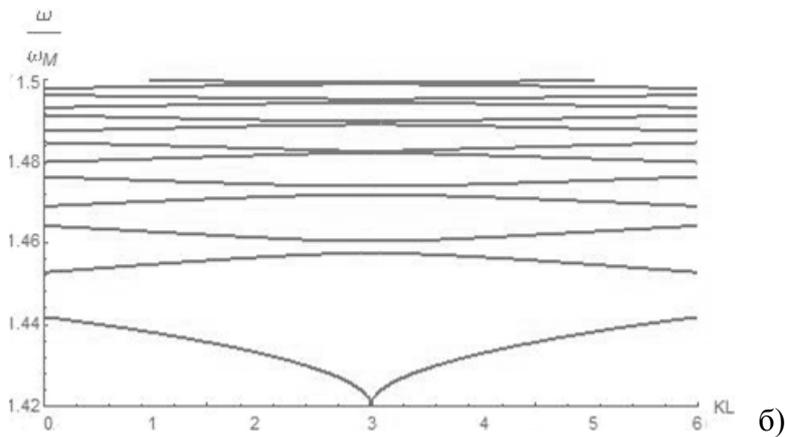


Рис.8 Дисперсионные характеристики ОМСВ в периодической структуре при разных значениях параметра D_1 : а) $\frac{\omega_M}{\omega_H} = 1, a_1=a_2=0.5, D_1=0.015, D_2=0.01$, б) $\frac{\omega_M}{\omega_H} = 1, a_1=a_2=0.5, D_1=0.019, D_2=0.01$

Сравнив полученные дисперсионные характеристики, приведенные на рис.6 видно, что при увеличении параметра D_2 при $D_1=0.01$ количество запрещенных в полосе первого брэгговского резонанса ($0 \leq K \leq \frac{2\pi}{L}$) в этом диапазоне меняется незначительно.

Заключение

В ходе выполнения дипломной работы получены следующие основные результаты:

1. Проведён вывод дисперсионного соотношения для периодической структуры на основе использования волнового уравнения с периодическими коэффициентами. Полученное дисперсионное соотношение использовалось для расчета дисперсионных характеристик для поверхностных и объемных МСВ в одномерной периодической структуре в виде системы канавок на одной из поверхности ферромагнитной пленки.
2. Проведен анализ положения запрещенных зон и зон пропускания в полосе распространения поверхностной МСВ в зависимости от различных параметров структуры (различной ширины и глубины канавки, параметра намагниченности). Показано, что запрещенные

зоны, соответствующие первому брэгговскому резонансу, в случае распространения поверхностных МСВ формируются при значениях волнового числа $K=\pi/L$, что характерно для волн с нормальной дисперсией. С ростом параметра ω_M количество запрещенных зон при $L=const$ в полосе пропускания ПМСВ увеличивается.

3. Проведен анализ положения запрещенных зон и зон пропускания в полосе распространения обратной объемной МСВ в зависимости от различных параметров периодической структуры. Показано, что для ООМСВ с отрицательной дисперсией (фазовая скорость волны увеличивается с ростом частоты), первая запрещенная зона в полосе первого брэгговского резонанса $\cos(KL)\leq 2\pi$ формируется вблизи верхней границы полосы пропускания, в отличие от случая поверхностной ПМСВ.

Список использованных источников

1. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. "Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот". Саратов 1993
2. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука. 1994.
3. Моргенталлер Ф.Р. Электромагнитные и спиновые волны в ферритовых средах:Обзор// ТИИЭР. 1988, Т. 76.
4. Ю.С.Кившарь, Г.П.Агравал. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. Москва, ФИЗМАЛИТ, 2005.
5. Nikitov, S.A. Spin waves in periodic magnetic structures / S.A. Nikitov, Ph. Taihades, C.S. Tsai // J. Magn. Magn. Mater. -2001. -V.236. -No.3. -P.320

6. Гуляев, Ю.В., Никитов С.А., Магнонные кристаллы и спиновые волны в периодических структурах / Ю.В.Гуляев, С.А. Никитов, // ДАН. -2001. - Т.380. -С.469.
7. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Животовский Л.В., Климов А.А., Ч. Цай, Ф. Тайед, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов "Ферромагнитные пленки с периодическими структурами с магнонной запрещенной зоной - магнонные кристаллы"//Письма в ЖЭТФ, 2003, т.77, вып.10, с.670-674.
8. Chumak A.V., Serga A.A., and Kostylev M.P. Scattering of backward spin waves in a one-dimensional magnonic crystal. Applied Physics Letters, 2008. Vol. 93, 022508 Hillebrands B
9. Serga A.A., Chumak A.V. and Hillebrands B., YIG magnonics // J.Phys.D^Appl.Phys. 43(2010) 264002
- 10.Kruglyak V.V., Demokritov S.O. and Grundler D., Magnonics, Journal of Physics D, 2010. Vol.43, 264001
- 11.Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Плесский В.П. Брэгговское отражение поверхностных магнитостатических волн от периодической системы тонких проводящих полосок // ЖТФ. 1982. Т. 52, вып. 4. С. 799-801
- 12.Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.:Физ-мат-лит. 1979, 384с (глава 4)