

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

Кафедра Нелинейной физики

**Дисперсионные характеристики поверхностных магнитоэлектрических  
волн в ограниченных периодических ферромагнитных структурах**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 4011 группы

направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»

института физики

Галаниной Елизаветы Дмитриевны

Научный руководитель ассистент  
кафедры нелинейной физики \_\_\_\_\_

Д.В.Романенко

Зав. кафедрой нелинейной физики  
к.ф.-м.н., доцент \_\_\_\_\_

Е.Н.Бегинин

Саратов 2021 г.

## Оглавление

1. Введение.....	2
2. Волновое уравнение для поверхностных МСВ.....	3
3. Изменения дисперсионных кривых в зависимости от магнитных параметров структуры.....	4
4. Исследование положения запрещенной зоны в зависимости от магнитных параметров структуры.....	5
5. Радиофизический эксперимент с магнетонным кристаллом по измерению АЧХ и ФЧХ.....	8
6. Заключение.....	11
7. Список литературы.....	12

## 1. Введение

Распространение волн в физических системах и средах с периодически изменяющимися параметрами изучалось в течение многих лет [2,3,5].

Последние годы значительно увеличился интерес к исследованию магнитных периодических структур на основе ферромагнитных пластин. Тонкие пленки и структуры на их основе, обладают рядом уникальных физических и химических свойств не встречающихся у объемных материалов, что делает их актуальным объектом экспериментального и теоретического исследования уже не одно десятилетие, такие структуры получили название “магнетонных кристаллов”. Магнетонный кристалл является удобной экспериментальной моделью для исследования линейных и нелинейных спиновых волн. Спиновые волны — волны намагниченности в ферро-, антиферро- и ферримагнитных материалах с большими волновыми числами.

Возможно управление свойствами магнетонных кристаллов внешним магнитным полем; в частности, магнетонной запрещенной зоной, можно создавать кристаллы в диапазоне СВЧ размером порядка нескольких миллиметров и др.

Магнетонный кристалл может быть использован для создания устройств обработки информации сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн с новыми функциональными возможностями: перестраиваемые узкополосные фильтры, волноведущие системы с частотным разделением каналов, нелинейные элементы с насыщающимся поглощением, нелинейные переключатели и делители мощности, планарные антенны на вытекающих волнах и др. [5]

Целью данной работы является исследование влияния конечной ширины магнетонного кристалла на положение и ширину запрещенной зоны.

Актуальность дипломной работы заключается в доработке стандартной модели с безгранично-широкими магнетонными кристаллами и сопоставление её с экспериментом. Под доработкой понимается учет конечной ширины магнетонного кристалла.

## 2. Волновое уравнение для поверхностных МСВ

Геометрию, которую мы рассматриваем, представлена ниже

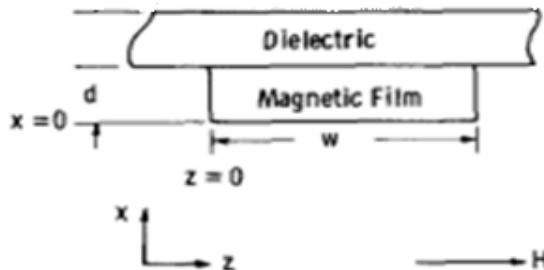


Рисунок 1. Схематическое изображение ферромагнитной пленки [1].

Магнетонная пленка толщиной  $d$  и шириной  $W$  соприкасается с диэлектрическим слоем. Однородное магнетонное поле  $H$  приложено в направлении оси  $z$ , магнетостатические волны распространяются в направлении оси  $x$ .

Дисперсионное уравнение для поверхностных МСВ можно представить в виде[1]:

$$\exp(2Md) = \frac{\Omega_H M + \Omega k + (\Omega_H^2 - \Omega^2)(M-N)}{\Omega_H M - \Omega k + (\Omega_H^2 - \Omega^2)(M+N)} * \frac{\Omega_H M - \Omega k + (\Omega_H^2 - \Omega^2)[M-N]}{\Omega_H M + \Omega k + (\Omega_H^2 - \Omega^2)[M+N]} \quad (1),$$

где  $\Omega_H = \frac{\gamma H_0}{4\pi\gamma M_0}$  - частота воздействия магнитного поля;

$k$  – волновое число МСВ;

$M$ -модуль волновых чисел в ферромагнетике , т.е. геометрическая сумма продольного и поперечного волновых чисел;

$N$ -модуль волновых чисел в вакууме, т.е. геометрическая сумма продольного и поперечного волновых чисел;

$\Omega = \frac{\omega}{4\pi\gamma M_0}$  – частота МСВ;

$d$  – толщина однородной плёнки.

Уравнение (1) описывает магнитостатические волны распространяющиеся в намагниченной ферромагнитной пленке конечной ширины.

### 3.Изменения дисперсионных кривых в зависимости от магнитных параметров структуры

Зафиксируем значение шириной моды  $n=1$  и будем менять  $W=0,05\text{см}$ (Blue);  $0,5\text{см}$ (Green); $1\text{см}$ (Red). Получился график, представленный ниже

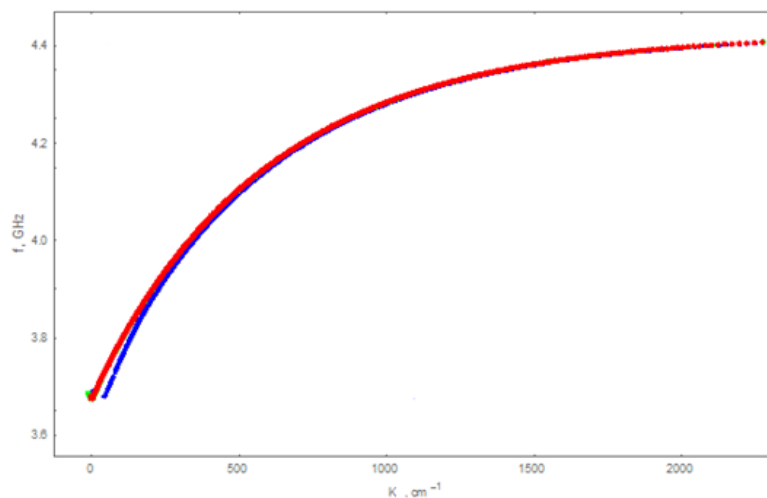


Рисунок 2. Дисперсионная характеристика для ферромагнитной плёнки с параметрами  $n=1$ ;  $W=0,05\text{см}$ (Blue);  $W=0,5\text{см}$ (Green);  $W=1\text{см}$ (Red);  $M_0 = 140$  Гс;  $H_0 = 700$  Э;  $d_1 = 8 * 10^{-4}$  см,  $d_2 = 10 * 10^{-4}$  см.

Нижняя частота отсечки ПМСВ для первой шириной моды не зависит от ширины волновода и определяется величиной внешнего магнитного поля и намагниченностью.

Зафиксируем значение шириной моды  $n=2$  и будем менять  $W=0,05\text{см}$ (Blue);  $0,5\text{см}$ (Green);  $1\text{см}$ (Red). Получился график, представленный ниже

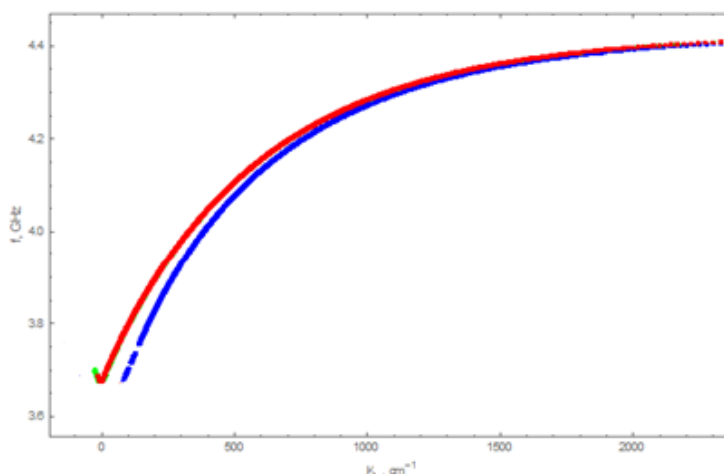


Рисунок 3. Дисперсионная характеристика для ферромагнитной плёнки с параметрами  $n=2$ ;  $W=0,05\text{см}$ (Blue);  $W=0,5\text{см}$ (Green);  $W=1\text{см}$ (Red);  $M_0 = 140$  Гс;  $H_0 = 700$  Э;  $d_1 = 8 * 10^{-4}$  см,  $d_2 = 10 * 10^{-4}$  см.

Частоты отсечки высших шириных мод уменьшаются с ростом номера моды в нижнюю часть спектра и с уменьшением ширины ферромагнитного волновода. Сдвиг синей кривой связан с увеличением поперечного волнового числа.

#### **4. Исследование положения запрещенной зоны в зависимости от магнитных параметров структуры**

Рассмотрим периодическую намагниченную пластину ферромагнетика, которая имеет толщины  $d_1, d_2$

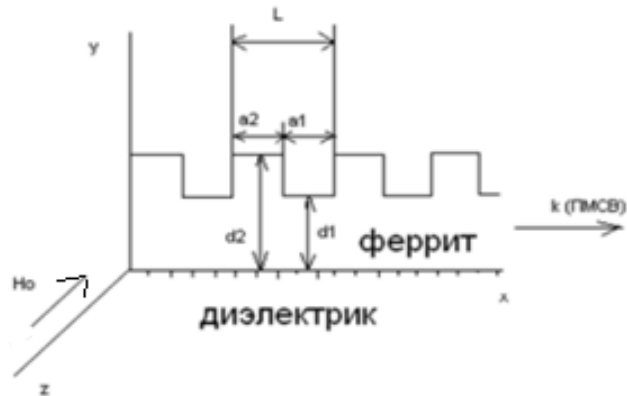


Рисунок 5. Схематическое изображение периодической намагниченной пластины ферромагнетика.[6]

Дисперсионное уравнение для слоистой периодической структуры можно представить как [4]:

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

где  $d_1, d_2$ -толщины пленки,

$k$  - волновое число в периодической структуре,

$k_1, k_2 = \omega_{1,2}/c$  - волновые числа волн, распространяющихся в однородных структурах,

$a_1, a_2$ - ширины толстой и тонкой части ,

$L = a_1 + a_2$  -период структуры,

$H_0$ -внешнее магнитное поле ,

$W$  – ширина пленки.

Данное уравнение показывает ,как волновое число в периодической структуре связано с волновыми числами волн,распространяющихся в однородных структурах.

### **Изменение положения запрещенной зоны в зависимости от ширины плёнки**

При параметрах  $M_0 = 140\text{Гс}$ ,  $H_0 = 700\text{Э}$ ,  $d_1 = 8 * 10^{-4}\text{ см}$ ,  $d_2 = 10 * 10^{-4}\text{ см}$ . мы получаем графики положений запрещенных зон представленных ниже:

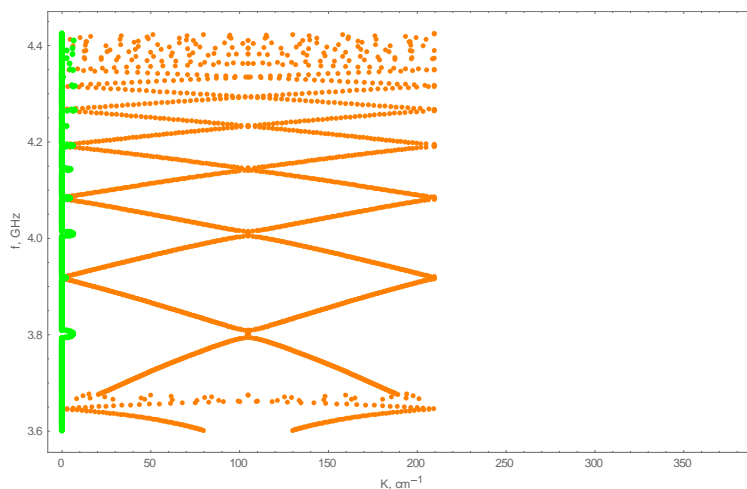


Рисунок 6. График зависимости волнового числа от частоты, при  $W=0.1\text{см}$ ,  $n=1$ ,  $M_0 = 140\text{Гс}$ ,  $H_0 = 700\text{Э}$ ,  $d_1 = 8 * 10^{-4}\text{ см}$ ,  $d_2 = 10 * 10^{-4}\text{ см}$ . Оранжевым цветом обозначены действительные части волнового числа, зеленым - мнимые части волнового числа.

1 зона - 3.785 до 3.82

2 зона - 3.904 до 3.929

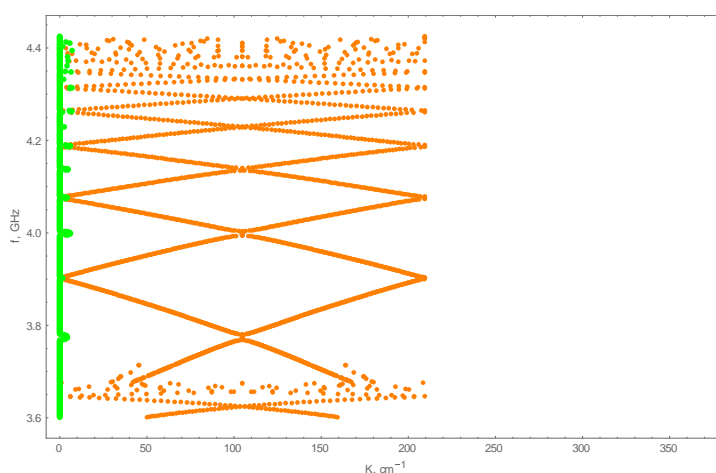


Рисунок 7. График зависимости волнового числа от частоты, при  $W=0.1\text{см}$ ,  $n=2$ ,  $M_0 = 140\text{Гс}$ ,  $H_0 = 700\text{Э}$ ,  $d_1 = 8 * 10^{-4}\text{ см}$ ,  $d_2 = 10 * 10^{-4}\text{ см}$ . Оранжевым

цветом обозначены действительные части волнового числа ,зеленым - мнимые части волнового числа.

1 зона-3.763 до 3.785

2 зона-3.896 до 3.912

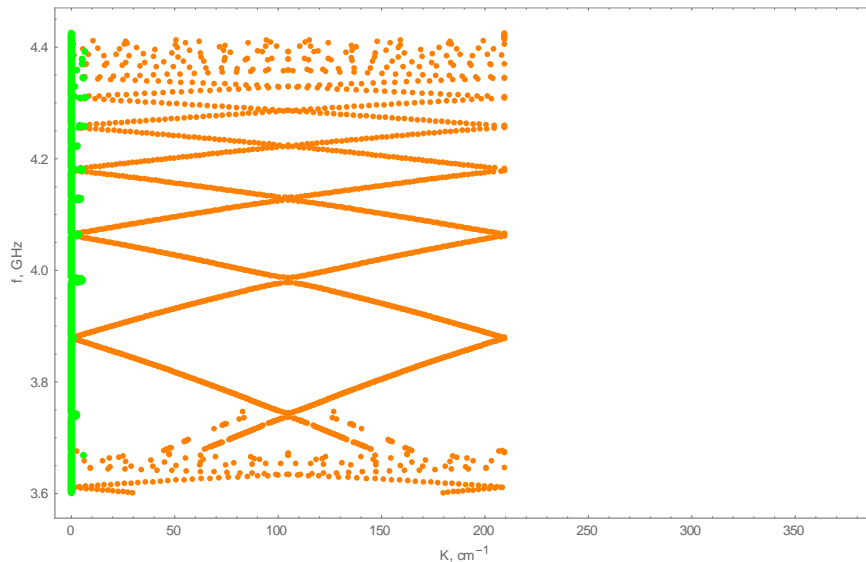


Рисунок 8. График зависимости волнового числа от частоты, при  $W=0.1$  см,  $n=3$ ,  $M_0 = 140$  Гс,  $H_0 = 700$  Э,  $d_1 = 8 * 10^{-4}$  см,  $d_2 = 10 * 10^{-4}$  см. Оранжевым цветом обозначены действительные части волнового числа ,зеленым - мнимые части волнового числа.

1 зона-3.73 до 3.746

2 зона-3.867 до 3.886

При ширине плёнки  $W=0.1$  см. зона непропускания, с ростом шириной моды  $n$  от 1 до 3, уменьшается по частоте.

## 5. Радиофизический эксперимент с магнетонным кристаллом по измерению АЧХ и ФЧХ

Радиофизический эксперимент с магнетонным кристаллом проводится на анализаторе цепей ,схема которого представлена ниже



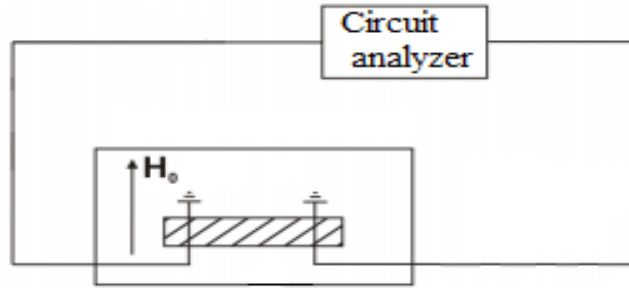


Рисунок 15. Схематическое изображение анализатора цепей.

Анализатор цепей состоит из:

- электромагнита,
- макета с пленками с двумя микрополосковыми преобразователями,
- прибора, который меряет в том числе АЧХ, магнит и макет не входят в него и подключаются отдельно.

**Измерение амплитудно-частотной характеристики в зависимости от внешнего магнитного поля.**

В ходе эксперимента при параметрах  $M_0 = 140$  Гс,  $d_1 = 8 * 10^{-4}$  см,  $d_2 = 10 * 10^{-4}$  см.,  $W=0,2$  см.,  $n=1$  мы получаем графики АЧХ представленные ниже:

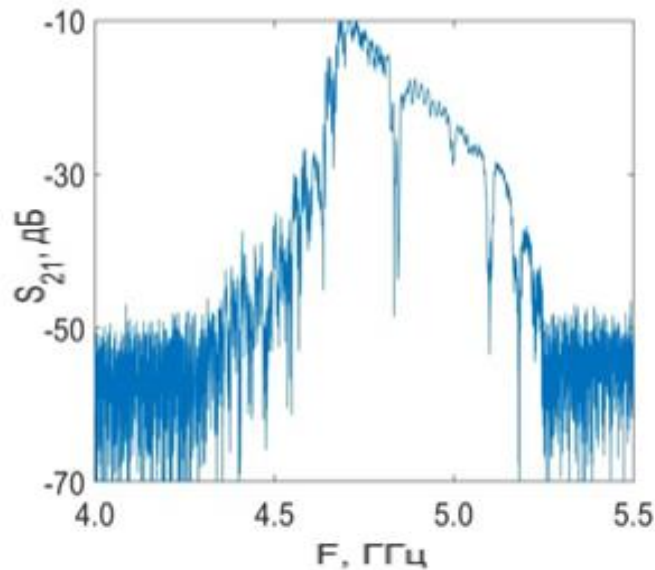


Рисунок 17. График зависимости частоты от коэффициента передачи с 1 порта устройства на 2, при  $H_0=950$  Э,  $W=0.2$  см.,  $n=1$ ,  $M_0 = 140$  Гс,  $d_1 = 8 *$

$10^{-4}$  см,  $d_2 = 10 * 10^{-4}$  см. Запрещенные зоны представлены большими провалами на АЧХ.

1 зона – 4.83 до 4.845

### **Измерение фазо-частотной характеристики в зависимости от внешнего магнитного поля.**

В ходе эксперимента при параметрах  $M_0 = 140$  Гс,  $d_1 = 8 * 10^{-4}$  см,  $d_2 = 10 * 10^{-4}$  см.,  $W=0,2$  см.,  $n=1$  мы получаем графики ФЧХ представленные ниже:

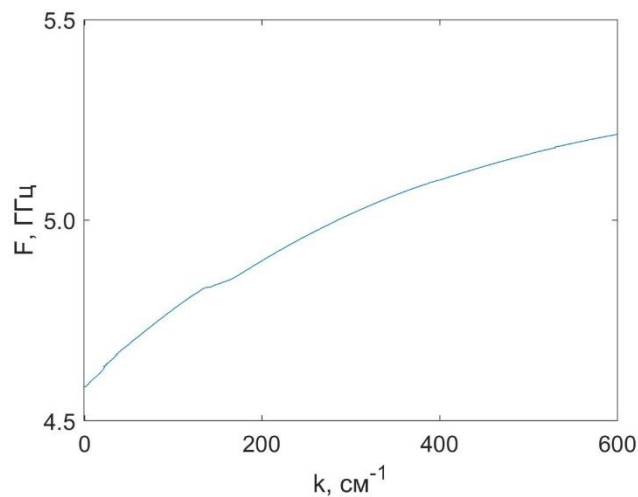


Рисунок 20. График зависимости волнового числа от частоты, при  $H_0=950$  Э,  $W=0.2$  см.,  $n=1$ ,  $M_0 = 140$  Гс,  $d_1 = 8 * 10^{-4}$  см,  $d_2 = 10 * 10^{-4}$  см.

Были построены дисперсионные зависимости, на которых видно, что провалы на экспериментальных АЧХ соответствуют брегговскому волновому числу ( $\sim 157$  см<sup>-1</sup> для первой зоны) и являются запрещенными зонами.

### **Изменение положения запрещенной зоны в зависимости от внешнего магнитного поля.**

При параметрах  $M_0 = 140\text{Гс}$ ,  $n=1$ ,  $W=0.2\text{см}$ ,  $d_1 = 8 * 10^{-4}\text{ см}$ ,  $d_2 = 10 * 10^{-4}\text{ см}$ ., мы получаем графики положений запрещенных зон представленных ниже:

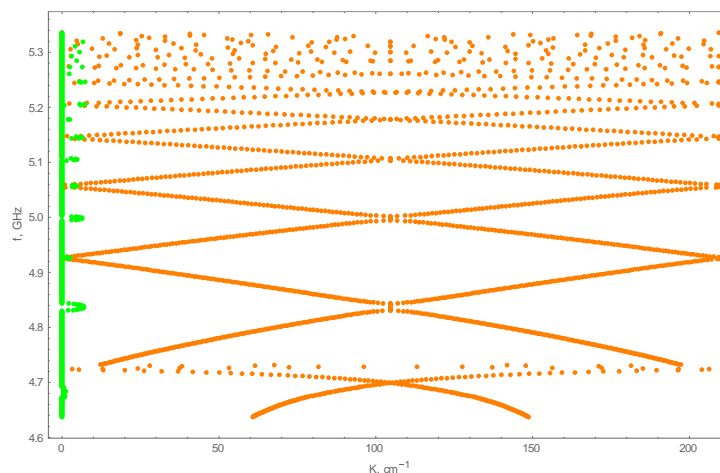


Рисунок 23. График зависимости волнового числа от частоты, при  $H_0= 950\text{Э}$ ,  $W=0.2\text{см}$ ,  $n=1$ ,  $M_0 = 140\text{Гс}$ ,  $d_1 = 8 * 10^{-4}\text{ см}$ ,  $d_2 = 10 * 10^{-4}\text{ см}$ . Оранжевым цветом обозначены действительные части волнового числа, зеленым - мнимые части волнового числа.

1 зона -4.83 до 4.845

Наблюдается хорошее соответствие в положениях запрещенных зон рассчитанных теоретически и измеренных в результате физического эксперимента.

### Заключение

В данной работе было проведено исследование зависимостей параметров запрещённых зон магнетонного кристалла от ширины и модового состава. В итоге были получены следующие результаты:

1) Нижняя частота отсечки ПМСВ для первой ширинной моды не зависит от ширины волновода и определяется величиной внешнего магнитного поля и намагниченностью.

2) Частоты отсечки высших ширинных мод смещаются в нижнюю часть спектра с ростом номера моды и с уменьшением ширины ферромагнитного волновода.

3) Зона непропускания смещается вниз по частоте при уменьшении ширины магнетонного кристалла для фиксированной ширинной моды.

4) Зона непропускания смещается вниз по частоте при увеличении номера ширинной моды для фиксированной ширины магнетонного кристалла.

5) Наблюдается хорошее соответствие в положениях запрещенных зон рассчитанных теоретически и измеренных в результате физического эксперимента.

### Список литературы

1. T.W.O'Keeffe, R.W.Patterson. Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples. Westinghouse Research and Development Center. Pittsburgh, Pennsylvania 15235.

2. А.В.Вашковский, В.С.Стальмахов, Ю.П.Шараевский. Магнитостатические волны в электронике СВЧ. Изд-во Саратов. ун-та, Саратов (1993). 316 с.

3. G.P.Agrawal Applications of Nonlinear Fiber Optics (Academic press, San Diego, 2001).

4. М.Б.Виноградова, О.В.Руденко, А.П.Сухоруков. Теория волн. Изд-во Москва «Наука». Главная редакция физико-математической литературы 1979.

5. М.А.Морозова, С.Е.Шешукова, Ю.П.Шараевский. Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 18, 113 (2010).

