

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

Кафедра физики открытых систем

«Латеральная магнетонно-кристаллическая структура как направленный
ответитель спиновых волн для систем обработки информационного
сигнала.»

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 4041 группы
направления (специальности) 09.03.02 Информационные системы и
технологии

код и наименование направления (специальности)

института физики

наименование факультета, института, колледжа

Матвеевой Александры Алексеевны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

А.В. Садовников

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

А.А. Короновский

инициалы, фамилия

Саратов 2021 год

Введение

В настоящее время интенсивно развиваются исследования магнитоупорядоченных кристаллов — ферромагнетиков, антиферромагнетиков и ферритов. Многие свойства этих кристаллов определяются в области низких температур специфическими волнами, которые могут распространяться в этих телах, так называемыми спиновыми волнами, представляющими собой передающиеся от атома к атому колебания атомного магнитного момента. Спиновые волны – собственные возбуждения электронной подсистемы спинов в магнитоупорядоченных средах, которые наблюдаются в ферромагнетиках. Магнонно-кристалл – это объект с периодической структурой, который содержит магнитоупорядоченную компоненту. Благодаря её присутствию, свойствами магнонных кристаллов можно управлять внешним магнитным полем. Магнитоупорядоченные вещества – это все вещества, которые в отсутствии внешнего магнитного поля обладают упорядоченными магнитными структурами. Для ферромагнетиков характерна спонтанная параллельная ориентация элементарных магнитных моментов, приводящая к большей намагниченности. ЖИГ - железиттриевый гранат, ферромагнитный материал из которого сделан волновод.

Исследования планарных магнонных кристаллов сильно развились за последнее десятилетие, и будущие задачи заключаются в обширных исследованиях нетрадиционных структур, квазипериодических решеток и управляемых модуляторов. Также успешно развивается область создания делителей мощности, ответвителей информационного сигнала. Благодаря развитию новых направлений исследования спин-волновых процессов в микро и наноразмерных магнитных структурах и совершенствованию методов изготовления и структурирования магнитных материалов открываются новые перспективы для создания миниатюрных устройств генерации, передачи и обработки информационных сигналов в СВЧ.

В моей работе предлагается использовать магнитные кристаллы для создания направленных ответвителей.

В работе исследуются латеральные магнитные микроструктуры, поддерживающие режим распространения спиновых волн. Заметим, что латеральное расположение магнитных волноводов приводит как к сложной нелинейной динамике спиновой волны, так и к многомодовой спин-волновой связи. Изучение нелинейных режимов распространения спиновых волн в латеральных магнитных микроволноводах имеет важное значение для нелинейной физики диссипативных систем в целом. Исследование структуры, состоящей из двух латеральных микроволноводов, помещённых в магнитное поле, производилось численным методом конечных разностей. Показано, что изменение частоты и мощности спин-волнового сигнала в системах латеральных магнитных микроволноводов позволяют создавать нелинейные ответвители и делители мощности спин-волнового сигнала для селективной обработки информационных сигналов.

Цель исследования: разработка направленных ответвителей сигнала состоящих из магнитно - кристаллических латеральных структур и исследование динамики распространения спиновой волны системы.

Численные вычисления

В настоящей работе было произведено численное моделирование магнотно-кристаллической структуры для разных частот входного сигнала.

Исследуемая структура показана на схематическом рисунке 1.

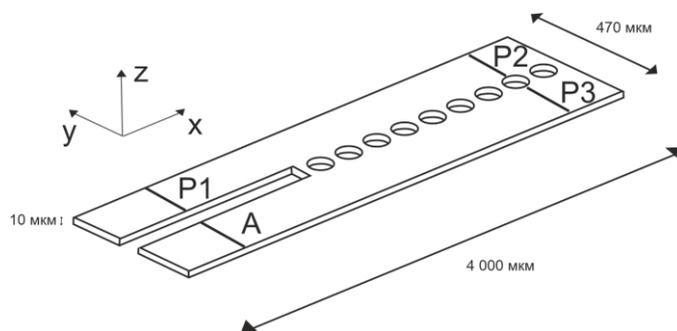


Рисунок 1 — Схематическое изображение магнотно-кристаллической структуры

Она сформирована из тонкой магнитной плёнки железо - иттриевого граната толщиной в 10 мкм, на которой сконструирован массив сквозных отверстий с периодом в 125 мкм. Диаметр отверстий составляет 70 мкм. Ряд отверстий создаёт два канала на поверхности плёнки железо – иттриевого граната. Длина ряда отверстий в направлении оси x равняется 2400 мкм. Между двумя волноводами расположена разделительная дорожка. Ширина дорожки 70 мкм, длина равна 1600 мкм. Длина всей магнотно-кристаллической структуры 4000 мкм, а ширина 470 мкм.

Для возбуждения спиновой волны в магнотном кристалле была использована входная микрополосковая антенна поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ). В моей работе антенной я буду называть локальную область, в которую записывается интегральное распределение намагниченности как функция от времени. Для снятия спиновой волны также используются выходные микрополосковые антенны. На рисунке 1 схематично показаны места размещения антенн A, P1, P2, P3 относительно магнотного кристалла. ПМСВ возбуждается входной антенной в области A и может распространяться в трех направлениях: в сторону выходных антенн P1

или P2 или P3. Внешнее магнитное поле было направлено вдоль оси x и было равно 1200 эрстед.

Было проведено моделирование для частот в диапазоне от 5 ГГц до 5.3 ГГц. На рисунках 2-4 видно, что в исследуемой магнито-кристаллической структуре режим распространения спиновой волны меняется в зависимости от частоты спиновой волны.

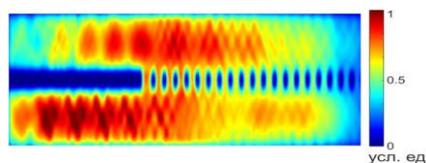


Рисунок 2 — Стационарное пространственное распределение интенсивности спиновой волны на частоте 5.1 ГГц

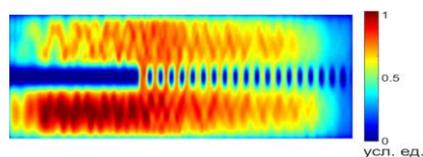


Рисунок 3 — Стационарное пространственное распределение интенсивности спиновой волны на частоте 5.2 ГГц

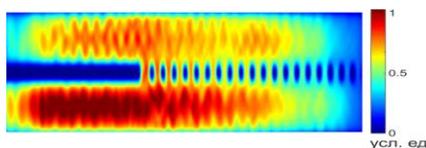


Рисунок 4 — Стационарное пространственное распределение интенсивности спиновой волны на частоте 5.27 ГГц

Следовательно, в исследуемой структуре можно управлять режимами работы путем изменения частоты спиновой волны.

На частоте СВЧ-сигнала 5,45 ГГц (рисунок 5а) наблюдается передача сигнала, возбуждаемого входной антенной А в области А за счет брэгговского отражения от периодической решетки, образованной отверстиями магнитного кристалла. При этом видно, что наблюдается затухание ПМСВ в положительном направлении оси X, за счет чего сигнал почти не достигает областей P2 и P3. Соответственно выходной сигнал будет присутствовать на выходной антенне P1 и отсутствовать на антеннах P2, P3.

На частоте СВЧ-сигнала 5,3 ГГц ПМСВ распространяется в область P2 (рисунок 5б). Сигнал будет присутствовать на выходной антенне P2, а на антеннах P1, P3 — почти отсутствовать.

На частоте СВЧ-сигнала 5,1 ГГц (рисунок 5в) ПМСВ, возбуждаемая входной антенной А, локализуется в области А и достигает области P3, ввиду малой, перекачки энергии ПМСВ из области А. Соответственно, выходной сигнал будет присутствовать на выходной антенне P3, а на выходных антеннах P1, P2 — практически отсутствовать.

Таким образом, представленные данные подтверждают возможность управления режимом работы структуры на основе магнетонного кристалла путем изменения частоты СВЧ-сигнала, что позволяет использовать его в устройствах магнетонной логики.

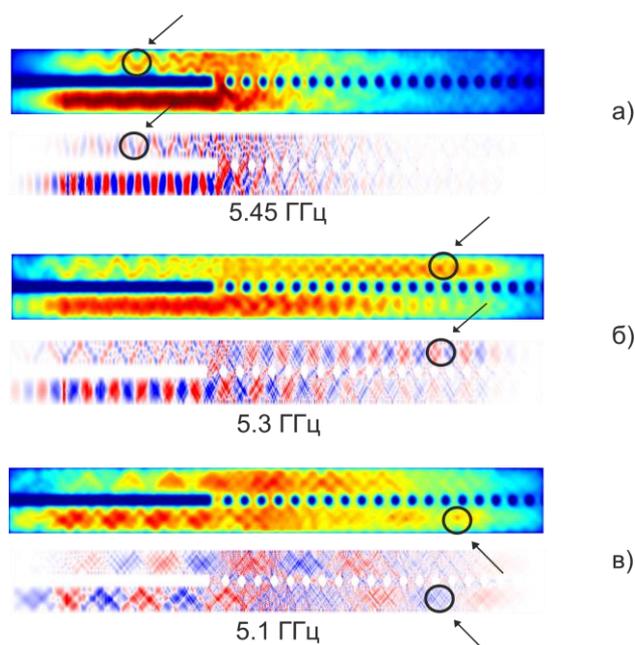


Рисунок 5 — Результаты моделирования для частот в диапазоне от 5 ГГц до 5.4 ГГц демонстрирующие распространение сигнала в разные области выхода

Далее были построены спектральные характеристики ПМСВ зависимости коэффициента прохождения волны от частоты на выходных антеннах P2, P3, P4. Спектр ПМСВ с коэффициентом прохождения

$$T_0 = 20 \log \left(\frac{P_n}{P_1} \right),$$

где P_n — мощность на входной антенне, P_1 — мощность на выходной антенне, представлен на рисунке 6.

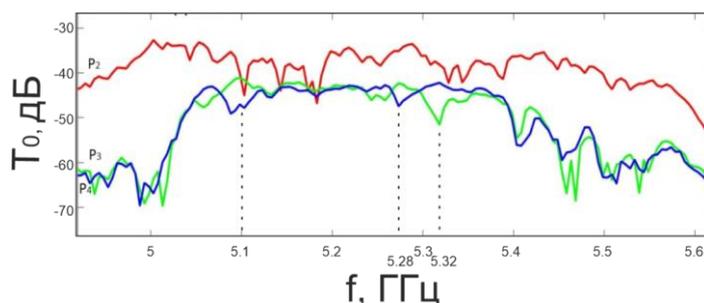


Рисунок 6 — Спектральные характеристики зависимости коэффициента прохождения волны от частоты на выходных антеннах

Далее на спектральной характеристике были найдены экстремумы с наибольшей амплитудой, а именно точки на частоте спиновой волны: 5.1 ГГц, 5.27 ГГц, 5.3 ГГц. На спектре видно, что в максимумах спиновая волна проходит хорошо, а в минимумах спиновая волна практически не проходит. Для этого с помощью численного моделирования распространения ПМСВ в пакете прикладных программ MATLAB были построены графики стационарного пространственного распределения компоненты динамической намагниченности M_z , представленные на рисунках 7-11.

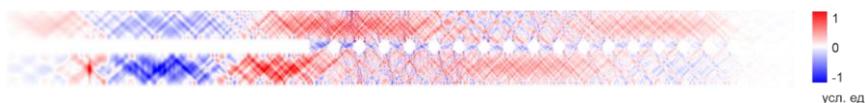


Рисунок 7 — Стационарное пространственное распределение компоненты динамической намагниченности M_z на частоте 5.05 ГГц

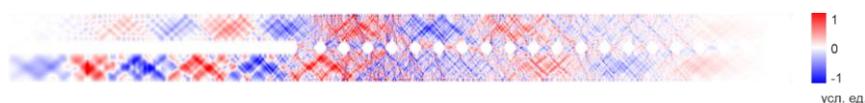


Рисунок 8 — Стационарное пространственное распределение компоненты динамической намагниченности M_z на частоте 5.1 ГГц

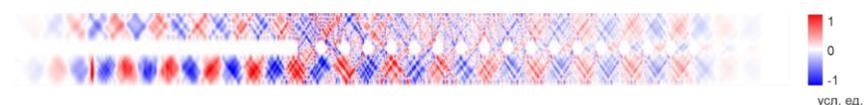


Рисунок 9 — Стационарное пространственное распределение компоненты динамической намагниченности M_z на частоте 5.28 ГГц

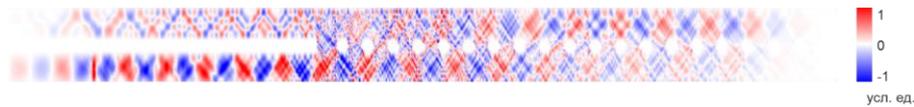


Рисунок 10 — Стационарное пространственное распределение компоненты динамической намагниченности M_z на частоте 5.32 ГГц

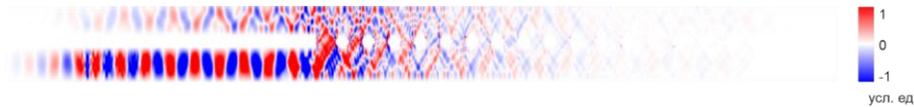


Рисунок 11 — Стационарное пространственное распределение компоненты динамической намагниченности M_z на частоте 5.45 ГГц

Оценим длину волны для ранее выбранных частот. Это можно увидеть на таблице 1.

Таблица 1

Частота, ГГц	Длина волны, мм
5,05	0,57
5,1	0,28
5,28	0,09
5,32	0,09
5,45	0,06

Период исследуемой структуры равен 0,125 мм. Вычислим длину волны по формуле:

$$\lambda = 2D = 2 \times 0,125 = 0,25 \text{ мм,}$$

где D – период структуры. Длина волны структуры составляет 0,25 мм. Из таб.1 видно, что длине волны 0,25 мм соответствует частота 5,1 ГГц. Следовательно, на частоте 5.51 ГГц выполняется условие брэгговского резонанса, и волна будет отражаться. То есть формируется волна, которая бежит в обратную сторону. Она интерферируется с волной, которая бежит прямо. Затем складывается в противофазе и затухает.

Далее была построена многоканальная структура с пространственной селекцией на основе двумерного магнетонного кристалла. Исследуемая структура изображена на рисунке 12.

Магنونно-кристаллическая структура – тонкая ферромагнитная пленка из железо-иттриевого граната. В длину структура 9500 мкм, в ширину 940 мкм. Толщина плёнки 10 мкм. Магنونно-кристаллическая структура содержит два ряда отверстий, образующих двумерный магنونный кристалл, при этом ряды отверстий расположены симметрично относительно центральной оси структуры, период следования отверстий составляет 400 мкм. Магنونно-кристалл состоит из 40 отверстий по 20 в каждом ряду, диаметр отверстий в пленке составляет 200 мкм, а расстояние между центрами отверстий – 400 мкм.

Принцип работы магنونно-кристаллической структуры заключается в том, что входной СВЧ сигнал, подается на входную антенну ПМСВ шириной 30 мкм и длиной 200 мкм. Далее сигнал преобразуется в ПМСВ, распространяющуюся вдоль структуры. Для снятия спиновой волны также используются выходные микрополосковые антенны ПМСВ шириной 30 мкм и длиной 200 мкм. На рисунке 12 схематично показаны места размещения входной А и выходных антенн Р1, Р2, Р3 относительно магنونного кристалла.

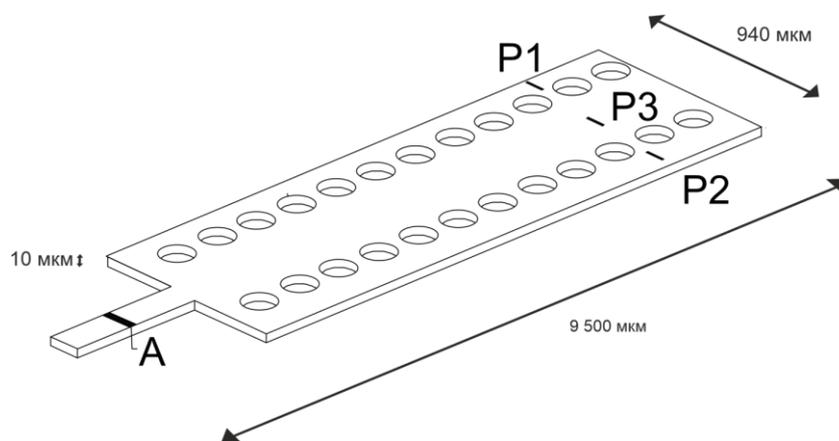


Рисунок 12 — схематическое изображение структуры на основе двумерного магنونного кристалла

Далее были построены спектральные характеристики ПМСВ зависимости коэффициента прохождения волны от частоты на выходных антеннах Р2, Р3, Р4. Спектр ПМСВ с коэффициентом прохождения

$$T_0 = 20 \log \left(\frac{P_n}{P_1} \right),$$

где P_n — мощность на входной антенне, P_1 — мощность на выходной антенне, представлен на рисунке 13.

Из спектра видно, что на частотах в диапазоне от 4.9 до 5.6 ГГц происходит основное распространение сигнала, а на частоте 5.1 ГГц сигнал распространяется активнее всего. Следовательно, и производительность прибора на этой частоте будет максимальная.

Далее на рисунке 14 представлено стационарное пространственное распределение интенсивности спиновой волны на частоте 5.1 ГГц, полученное численным моделированием.

Из спектральных характеристик видно, что сигнал, приходящий на антенны P2, P3 отличается от сигнала, приходящего на антенну P1, следовательно, фильтром можно управлять, меняя значение частоты.

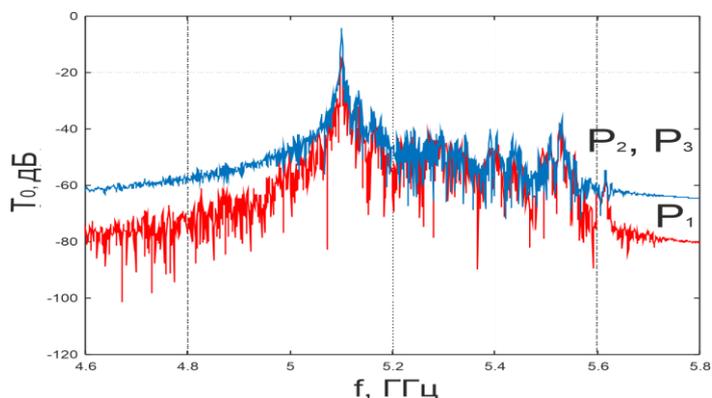


Рисунок 13 — спектральные характеристики зависимости коэффициента прохождения волны от частоты на выходных антеннах P1, P2, P3

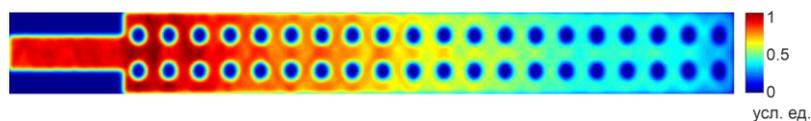


Рисунок 14 — Стационарное пространственное распределение интенсивности спиновой волны на частоте 5.1 ГГц

Далее была построена дисперсионная характеристика для исследуемой

структуры, представленная на рисунке 15.

Рассчитаем длину волны по рисунку 16 на частоте 5.3 ГГц. Для этого измерим расстояние между красными или синими линиями. У нас это 792 мкм, рассчитаем волновое число по формуле

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 79,3 \text{ (1/см)},$$

где k – волновое число, λ – длина волны. Посмотрим на рисунок 15. По рисунку видно, что длине волны 792 мкм ($k=79,3$) соответствует частота 5.54 ГГц. Теперь рассчитаем длину волны на частоте 5.4 ГГц. Здесь уже длина волны – 332 мкм, тогда $k = 189,2$. Из рисунка 15 видно, что длине волны 332 мкм ($k=189,2$) соответствует частота 5.63 ГГц. Составим таблицу по полученным данным.

Таблица 2

λ , мкм	Частота полученная по формуле Ландау — Лифшица, ГГц	Частота, полученная по формуле Деймона-Эшбаха, ГГц
1425	5,25	5,4
792	5,3	5,57
665	5,35	5,6
332	5,4	5,67

Видно, что для каждого значения длины волны частота, посчитанная двумя способами, отличается. Это происходит из-за того, что формула Деймона-Эшбаха предназначена для плёнки безграничной в плоскости. А мы рассматриваем волновод длиной 8000 мкм и шириной 940 мкм. Следовательно, формула Деймона-Эшбаха приближённая.

Результаты, полученные в программе MuMax3 (рисунки 16, 17) с помощью уравнения Ландау – Лифшица, описываются дисперсией, полученной с помощью уравнения Деймона-Эшбаха рисунок 15.

Следовательно, то, что мы видим на рисунках 16, 17 – это нормальный волновой процесс.

Условие Брэгговского резонанса может быть записано следующим образом:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\pi}{D}.$$

Следовательно,

$$\lambda = 2D = 2 \times 400 = 800 \text{ мкм},$$

где D – период структуры, равный 400 мкм. На рисунке 15 хорошо видно, что длине волны 793-800 мкм соответствует частота 5.57 ГГц. Следовательно, на частоте 5.57 ГГц выполняется условие Брэгговского резонанса и волна будет отражаться. То есть формируется волна, которая бежит в обратную сторону. Она интерферирует с волной, которая бежит прямо. Затем складывается в противофазе и затухает.

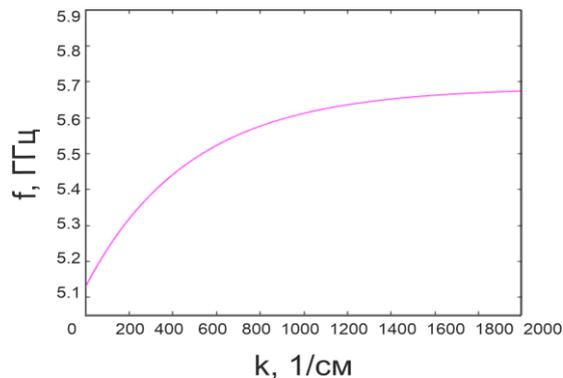


Рисунок 15 — Дисперсионная характеристика структуры на основе двумерного магнетонного кристалла

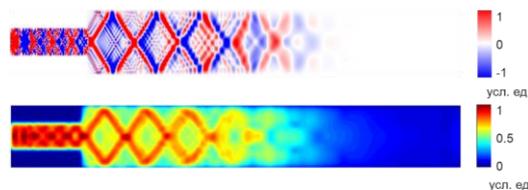


Рисунок 16 — Стационарное пространственное распределение интенсивности спиновой волны и распределение компоненты динамической намагниченности M_z на частоте 5.1 ГГц 5.3 ГГц

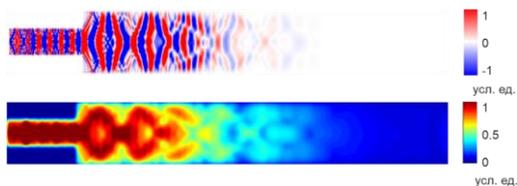


Рисунок 17 — Стационарное пространственное распределение интенсивности спиновой волны и распределение компоненты динамической намагниченности M_z на частоте 5.1 ГГц 5.4 ГГц

Заключение

Таким образом, в рамках данной работы было проведено численное исследование нелинейной динамики распространения спиновых волн в латеральных магнитных ЖИГ структурах.

Было проведено моделирование магнотно-кристаллических структур для частот в диапазоне от 4 до 6 ГГц. Были найдены частоты распространения спиновой волны при которых сигнал ответвлялся и попадал на порты: P1, P2, P3. Это даёт возможность управлять режимами работы магнотно-кристаллической структуры путем изменения частоты СВЧ-сигнала, что позволяет использовать её в устройствах магнотной логики. Далее были построены спектральные характеристики прохождения спиновой волны и найдены экстремумы с наибольшей амплитудой. На частотах экстремумов построены с помощью численного моделирования в пакете прикладных программ MATLAB графики стационарного пространственного распределения интенсивности спиновой волны и распределения компоненты динамической намагниченности M_z . Далее была построена многоканальная структура с пространственной селекцией на основе двумерного магнотного кристалла. Было доказано, что двумерный магнотный кристалл даёт возможность создания трёх каналов с хорошим сигналом. Для структуры на основе двумерного магнотного кристалла также с помощью численного моделирования в пакете прикладных программ MATLAB были построены графики стационарного пространственного распределения интенсивности спиновой волны, распределения компоненты динамической намагниченности M_z и построена дисперсионная характеристика.