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

Кафедра физики открытых систем

# Спиновые волны в латеральных связанных магнонно-кристаллических структурах

## АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4041 группы

направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии»

#### института физики

Кострикина Антона Валерьевича

Научный руководитель доцент, к.ф.-м.н.

подпись, дата

А.В. Садовников

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

А.А. Короновский

подпись, дата

Саратов 2021 год

## Введение

Магноника - это перспективная область исследований в области наномагнетизма и нанонауки, которая занимается использованием спиновых волн (магнонов), распространяющихся В магнитных материалах, В перспективных системах обработки информационных сигналов с низким энергопотреблением на разных пространственных и временных масштабах [1]. По принципу корпускулярно-волнового дуализма, спиновые волны, одновременно, являются и частицами. Эти частицы получили название магнонов. Общие представления о спиновых волнах были введены Ф. Блохом в 1930 году [2]. Обработка данных на спиновых волнах является одним из перспективных направлений в области без зарядных схем будущего. Преимуществом спиновых волн для обработки данных являются: широкий диапазон частот, эффективные нелинейные магнонные явления, шины спиновой волны. Спиновая волна - это коллективное колебание спиновой системы в магнитной решетке. Он естественным образом заключен в магнитном носителе с нулевой вероятностью утечки в немагнитную среду. Эта особенность позволяет построить спиновую шину для передачи информации с использованием магнитных нанопроводов. [3-5]

Магнонный кристалл представляют собой магнитный аналог фотонных, фононных и плазменных кристаллов. Как и в любом кристалле, основным компонентом магнонного кристалла является периодическая модуляция потенциала спиновой волны. Согласно закону Брэгта и теореме Блоха, такая периодическая модуляция потенциала, следовательно, приводит к формированию структуры полосы спиновых волн. Главной особенностью магнонных кристаллов является наличие брэгтовских резонансов, которые приводят к возникновению в спектре спиновых волн запрещенных зон для волновых чисел, удовлетворяющих условию Брэгта. [6]

Управление характеристиками запрещенных зон осуществляется посредством нарушения периодичности, изменения мощности входного сигнала и т. д. Наличие запрещенных зон в магнонном кристалле открывают широкие возможности использования магнонных кристаллов в СВЧустройствах для функциональной обработки сигналов на спиновых волнах, в том числе в СВЧ-фильтрах, для инверсии частоты, буферизации данных и т. д. [7]

Цель дипломной работы: рассмотреть пространственное распределение динамической намагниченности спиновой волны одиночного магнонного кристалла и в системе из двух магнонных кристаллов, и также в системе из волновода и магнонного кристалла. Выявить частоту, при которой наблюдается перекачка волны из одного магнонного кристалла в другой. Построить спектр прохождения и дисперсию спиновой волны.

# Численные моделирования

В данной дипломной работе были рассмотрены моделирования одиночных и двух связанных магнонных кристаллов. Также будут рассматриваться связанные волновод и магнонный кристалл. Были выявлены частоты, при которой волна лучше и хуже всего распространяется в волноводе.



Рисунок 1 - Схема магнонного кристалла

На рисунке 1 схематически приведен магнонный кристалл с определенными параметрами. Длина волновода равняется b = 6000 мкм, а ширина с = 500 мкм. Глубина ямок изменялась от а = 12,5 до 80 мкм. Период магнонного кристалла равнялся T = 160 мкм и T= 350 мкм. Микрополосковая антенна, с помощью которой волна возбуждается, обозначена буквой т. H – направление магнитного поля.

На рисунке 2 представлены спектры прохождения спиновой волны в магнонном кристалле с периодом T= 160 мкм и глубиной ямок а= 80 мкм.



Рисунок 2 - Спектр прохождения спиновой волны в магнонном кристалле с периодом T= 160 мкм и глубиной ямок а= 80 мкм.

При периоде T= 160 мкм и глубиной ямок 80 мкм наблюдается широкая полоса непропускания для выхода p2 на частоте от 5,28 ГГц до 5,36 ГГц.

Ha рисунке 3 пространственное распределение представлено динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны на частоте входного сигнала 5,25 ГГц, глубиной 160 мкм. На рисунке 4 представлено ямок 80 мкм И периодом пространственное распределение динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны на частоте входного сигнала 5,3 ГГц, глубиной ямок 80 мкм и периодом 160 мкм. На рисунке 5 представлено пространственное распределение динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны на частоте входного сигнала 5,35 ГГц, глубиной ямок 80 мкм и периодом 160 мкм.



Рисунок 3 - Пространственное распределение динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны на частоте входного сигнала 5,25 ГГц и глубине ямок а= 80 мкм.



Рисунок 4 - Пространственное распределение динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны на частоте входного сигнала 5,3 ГГц и глубине ямок а= 80 мкм.



Рисунок 5 - Пространственное распределение динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны на частоте входного сигнала 5,35 ГГц и глубине ямок а= 80 мкм.

Видно, что при частоте 5,25 ГГц волна хорошо распространяется по волноводу, а на частоте 5,35 волна не доходит до конца волновода. Самое плохое распространение волны наблюдается на частоте 5,3 ГГц, что соответствует АЧХ для данного волновода.



Рисунок 6 - Дисперсионная характеристика магнонного кристалла с периодом T= 160 мкм и глубиной ямок а= 80 мкм.

Частота 5,13 ГГц – это начало спектра, с этой частоты начинается дисперсия. Здесь проходит большой сигнал. По этой дисперсии мы можем увидеть на какой частоте какая длина волны. Рассчитаем длину волны для магнонного кристалла при периоде T= 160 мкм и глубине ямок a= 80 мкм при частоте 5,25 ГГц. Для этого измерим расстояние между красными или синими линиями. У нас это 483 мкм= 0.0483, рассчитаем k по формуле  $k = 2\pi/\lambda$ =6,28/0,0483=130(1/см). Посмотрим на рисунок 6. По рисунку видно, что длине волны 483мкм (k=130) соответствует частота 5,25 ГГц. Теперь рассчитаем длину волны на частоте 5,35 ГГц. Здесь длина волны меньше - 156 мкм= 0.0156, тогда k= 402.5. из графика видно, что длине волны 156 мкм (k=402.5) соответствует частота 5.41 ГГц. Составим табличку по полученным данным.

| <b>λ</b> , мкм               | Частота титах, ГГц | Частота по         |
|------------------------------|--------------------|--------------------|
|                              |                    | дисперсии(Деймона- |
|                              |                    | Эшбаха), ГГц       |
| 483                          | 5,25               | 5,24               |
| 156                          | 5,35               | 5,41               |
| 320 (Брэгговское<br>условие) | 5,3                | 5,3                |

Таблица 1

Условие Брэгговского резонанса может быть представлена в виде  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\pi}{D}$ , следовательно  $\lambda = 2D = 2 \cdot 160 = 320$ мкм. По рисунку 6 видно, что длине волны 320 мкм соответствует частота 5,3 ГГц. Следовательно на частоте 5.3 ГГц выполняется условие  $\lambda = 2D$  и волна будет отражаться. Это прекрасно видно на рисунке 4. То есть формируется волна, которая бежит в обратную сторону. Она интерферируется с волной, которая бежит в прямую сторону. Затем складывается в противофазе и затухает.

Далее будут рассматриваться связанные микроволновод и магнонный кристалл.



Рисунок 7 - Схема связанного волновода и магнонного кристалла

На рисунке 7 схематически приведен связанный волновод и магнонный кристалл с определенными параметрами. Длина волноводов равняется b = 6000 мкм, а ширина с = 500 мкм. Глубина ямок изменялась от а = 25 до 80 мкм. Период магнонного кристалла равнялся T= 160 мкм и T=350мкм. Микрополосковая антенна, с помощью которой волна возбуждается, обозначена буквой т. H – направление магнитного поля.

На рисунках 8 и 9 представлены спектры прохождения спиновой волны в связанном волноводе и магнонном кристалле с периодом T= 160 мкм, но с разной глубиной ямок a= 40 мкм до 80 мкм.



Рисунок 8 - Спектр прохождения спиновой волны в связанном волноводе и магнонном кристалле с периодом T= 160 мкм и глубиной ямок a= 40 мкм.



Рисунок 9 - Спектр прохождения спиновой волны в связанном волноводе и магнонном кристалле с периодом T= 160 мкм и глубиной ямок а= 80 мкм.

Видно, что когда глубина ямок у магнонного кристалла равняется а= 80 мкм, запрещенная зона для выходов p3 и p4 остается на одном месте - на частоте 5,25 ГГц. При глубине ямок в магнонном кристалле равной а= 40 мкм для выхода p3 наблюдается глубокий провал на частоте 5,28 ГГц.

10 Ha рисунке представлено пространственное распределение динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны в связанном волноводе и магнонном кристалле на частоте входного сигнала 5,28 ГГц, глубиной ямок 40 мкм и периодом 160 Ha рисунке 11 представлено пространственное распределение МКМ. динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны в связанном волноводе и магнонном кристалле на частоте входного сигнала 5,3 ГГц, глубиной ямок 40 мкм и периодом 160 МКМ.



Рисунок 10 - Пространственное распределение динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны в связанном волноводе и магнонном кристалле на частоте входного сигнала 5,28 ГГц и глубине ямок а= 40 мкм.



Рисунок 11 - Пространственное распределение динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны в связанном волноводе и магнонном кристалле на частоте входного сигнала 5,3 ГГц и глубине ямок а= 40 мкм.

Видно, что при частоте 5,28 ГГц волна не доходит до конца волновода, а на частоте 5,3 ГГц волна хорошо распространяется в волноводах, что соответствует АЧХ для данной структуры.

Ha рисунке 12 представлено пространственное распределение динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны в связанном волноводе и магнонном кристалле на частоте входного сигнала 5,2 ГГц, глубиной ямок 80 мкм и периодом 160 На рисунке 13 представлено пространственное распределение МКМ. динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны в связанном волноводе и магнонном кристалле на частоте входного сигнала 5,25 ГГц, глубиной ямок 80 мкм и периодом 160 мкм.



Рисунок 12 - Пространственное распределение динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны в связанном волноводе и магнонном кристалле на частоте входного сигнала 5,2 ГГц и глубине ямок а= 80 мкм.



Рисунок 13 - Пространственное распределение динамической намагниченности (левая колонка) и интенсивности (правая колонка) спиновой волны в связанном волноводе и магнонном кристалле на частоте входного сигнала 5,25 ГГц и глубине ямок а= 80 мкм.

Видно, что при частоте 5,2 ГГц волна хорошо распространяется в волноводах, а на частоте 5,25 волна не доходит до конца волноводов, что соответствует АЧХ для данной структуры.

# Заключение

В ходе дипломной работы была рассмотрена динамика распространения спиновой волны в системе, состоящей из 1) одиночного магнонного кристалла (МК); 2) системы МК-микроволновод; 3) двух латерально-связанных МК.

Выявлен механизм, определяющий частотно-селективные режимы распространения сигнала в периодических и связанных структурах. А именно, показано влияние периода и глубины модуляции (размеров «ямок») на амплитудно-частотные характеристики спин-волнового сигнала на разных выходах (портах, выходных антеннах) рассматриваемых структур.

Показано существование режимов, при которых наблюдается перекачка волны из одного магнонного кристалла в другой. Была вычислена длина перекачки для двух связанных магнонных кристаллов и двух связанных волноводов.

Были получены амплитудно-частотные характеристики сигнала в виде спектральной плотности мощности и показано, что для выходов p3 и p4 волноводов происходит смещение запрещенной зоны при изменении периода.

На основе построенных дисперсионных характеристик выявлено значение частоты, на которой выполняется условие брэгговского резонанса, которое определяется существованием полос непропускания в спектрах спиновой волны.

Получено, что полоса непропускания может составлять величину от 25 до 100 МГЦ при частотах входного сигнала в области 5 ГГц.