

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

Кафедра физики открытых систем

**Управление спиновых волн в композитных структурах**  
**ЖИГ/FeRh**

название темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки   4   курса  4041  группы  
направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии»

код и наименование направления

института физики

наименование факультета

Саломатовой Елены Ивановной

фамилия, имя, отчество

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

должность, уч. ст., уч. зв.

личная подпись, дата

А.В. Садовников

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой  
д.ф.-м.н., профессор

уч. ст., уч. зв.

личная подпись, дата

А.А. Короновский

инициалы, фамилия

Саратов 2022 г.

## Введение

Благодаря развитию технологий изготовления планарных магнитных структур большой интерес представляет исследование динамики спиновых волн (СВ) при их возбуждении и распространении в волноведущих структурах микронных и нанометровых размеров [1, 2]. Как было показано в ряде работ [3–4], СВ являются перспективными переносчиками информационных сигналов. В последнее время стремительно развивается магноника – новое направление в исследовании спин-волновых процессов в нерегулярных микронных и наноразмерных магнитных структурах. Преимуществами устройств магноники являются возможные малые размеры и малые джоулевы потери и, как следствие, низкое энергопотребление. Изучение свойств в структурах, основанных на принципах магноники, открывает новые возможности для создания миниатюрных устройств передачи, хранения и обработки информационных сигналов в СВЧ-диапазоне [5, 6].

В качестве магнитного материала, для которого есть возможность формирования волноведущих структур, используются пленки ферромагнитных материалов, в первую очередь, плёнки железо-иттриевого граната (ЖИГ), демонстрирующие рекордно низкие величины затухания СВ.

Отдельный интерес представляют исследования способов управления характеристиками СВ в таких структурах. Одним из методов управления является создание композитной структуры, в которой за счёт использования свойств добавляемого компонента удаётся изменить характеристики основного элемента и изменять свойства СВ. Путем использования сегнетоэлектрических или пьезоэлектрических слоев оказывается возможным реализовать режим управления характеристиками связи СВ в микрополосках ЖИГ [7, 8].

В последнее время антиферромагнитные материалы рассматриваются как один из потенциальных элементов для устройств магноники. Антиферромагнетики – это вещества, в которых установился антиферромагнитный порядок элементарных магнитных моментов. В антиферромагнетиках спиновые магнитные моменты электронов

самопроизвольно ориентированы антипараллельно друг другу. Такая ориентация охватывает попарно соседние атомы. В результате антиферромагнетики обладают очень малой магнитной восприимчивостью и ведут себя как слабые парамагнетики. Так, в частности, активно изучаются сплавы на основе железо-родий (FeRh) [9, 10], имеющие высокую намагниченность в ферромагнитной фазе при небольших температурах, а также обладают значительным магнитоэлектрическим, пироэлектрическим и пьезоэлектрическим эффектами, возникающими вблизи метамагнитного фазового перехода 1-го рода.

Целью данной работы является исследование влияния антиферромагнитного материала FeRh на СВ в микроволноводах из ЖИГ, а также изучение способов реализации механизма переключения спин-волнового сигнала за счет изменения характеристик добавляемого слоя FeRh, которое наблюдается как перераспределение мощности СВ между латеральными полосками.

## Описание работы

Основная часть работы состоит из двух глав.

В первой главе рассмотрены свойства спин-волновых возбуждений в структуре, продемонстрированной на рисунке 1 и представляющей собой микроволновод из пленки ЖИГ и расположенного сверху по центру слоя FeRh. Изучено как с помощью внешнего воздействия на FeRh возможно изменять характеристики спиновых волн, распространяющихся в волноводе. На основе результатов расчетов показано, что эта структура может быть использована в качестве функциональной единицы в плоских магнанных сетях.

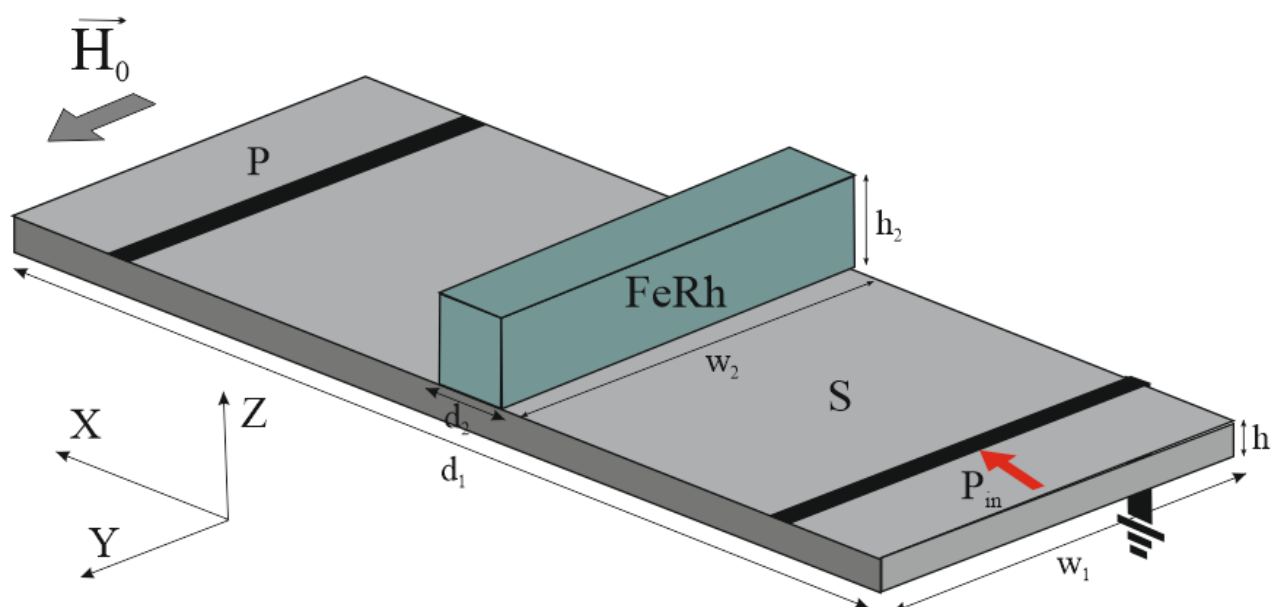


Рисунок 1 – Схематическое изображение исследуемой структуры.

Одним из методов управления спин-волновым сигналом является воздействие на слой FeRh с помощью нагрева. Задача о нагреве слоя FeRh с помощью лазерного излучения была исследована благодаря программному продукту COMSOL Multiphysics. Этот пакет моделирования решает системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов в одном, двух и трех измерениях. Нагрев осуществлялся точечным нагревом слоя FeRh. На рисунке 2 показан график распределения температуры в микроволноводе ЖИГ, из графика следует вывод, что нагревая слой FeRh, тепло передается нижележащему волноводу и рассеивается к краям.

Следовательно, изменяются свойства микроволновода, так как он состоит из ЖИГ, а намагниченность ферромагнетика зависит от температуры.

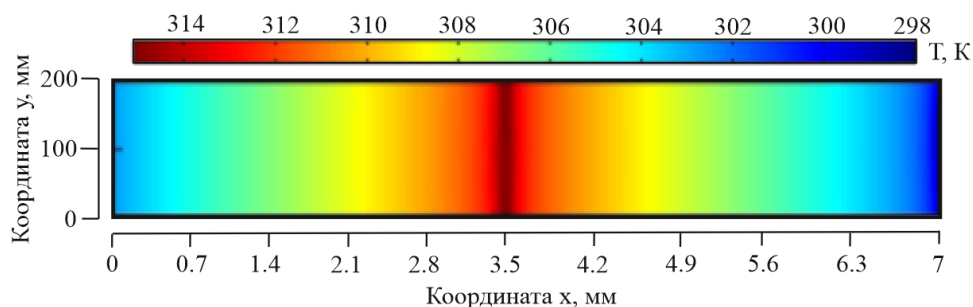


Рисунок 2 – Распределение температуры при нагреве слоя FeRh вид сверху

В работе рассматривался также второй метод управления, а именно с помощью изменения длины  $d_2$ . Поэтому, учитывая изменение намагниченности в ЖИГ, в COMSOL Multiphysics совместно решили задачу пространственных зависимостей величины внутреннего магнитного поля  $H_{int}(x)$  внутри микроплатки при двух методах управления. На рисунке 3а и 3б вместе изображены профили внутреннего магнитного поля ЖИГ при разном значении  $M_{fr}$  и для разных  $d_2$ . На оси абсцисс отложено значение координаты  $x$  в диапазоне  $0 < x < d_1$ . Из анализа профилей  $H_{int}(x)$  следует вывод, что при увеличении намагниченности  $M_{fr}$  в месте контакта слоя FeRh с микроволноводом наблюдается сильное уменьшение величины внутреннего магнитного поля. При этом образовавшийся провал увеличивается в размере при увеличении намагниченности слоя FeRh. Изменение величины внутреннего поля сопровождается изменением спектра ПМСВ, а также коэффициента связи СВ, распространяющихся вдоль микроволновода.

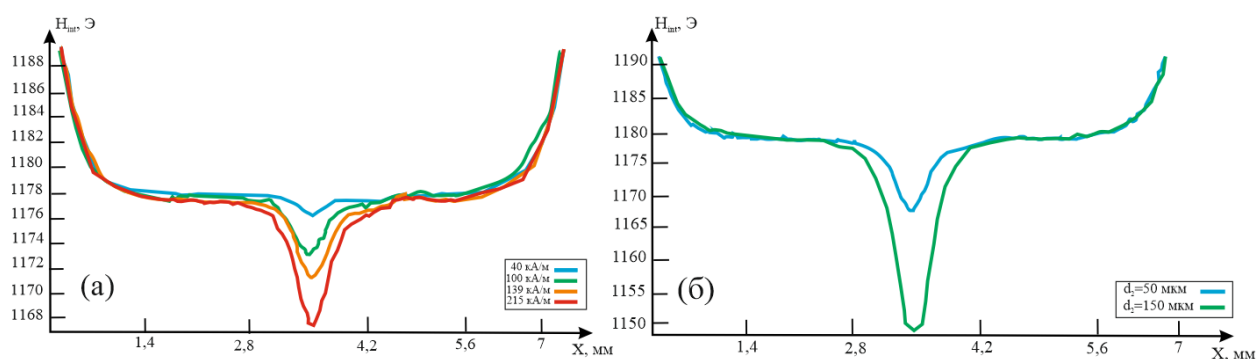


Рисунок 3 – График распределения величины внутреннего магнитного поля ЖИГ вдоль оси x (а) при различных значениях  $M_{fr}$ , (б) при различных значениях  $d_2$ .

Методом микромагнитного моделирования (ММ) численно решили задачу о возбуждении и распространении СВ в композитной структуре в виде системы микроволновод с нагрузкой из материала FeRh при двух методах управления. На рисунке 4.а продемонстрированы графики АЧХ после прохождения слоя FeRh при разном значении намагниченности, из которых видно, что при увеличении  $M_{fr}$  смещается амплитуда на частоте возмущения, что приводит к изменению частотного диапазона, в частности можем наблюдать, что он уменьшается, и появляются провалы. При значении  $M_{fr} = 100$  кА/м начинается существенное изменение профиля, именно около этого значения материал становится антиферромагнетиком, так как FeRh ведет себя как ферромагнетик ниже определенной температуры, а выше – проявляет антиферромагнетизм. Так же были построены АЧХ для второго случая, когда управление осуществляется за счет изменения длины  $d_2$  слоя FeRh. На рисунке 4.б продемонстрированы графики для  $d_2 = 50$  мкм и  $d_2 = 150$  мкм, при этом все прочие параметры были зафиксированы и  $M_{fr} = M_0$ . Из полученных данных можем сделать вывод, что происходит аналогичная ситуация, что и при первом методе управления. А именно, смещается частотный диапазон, появляются провалы.

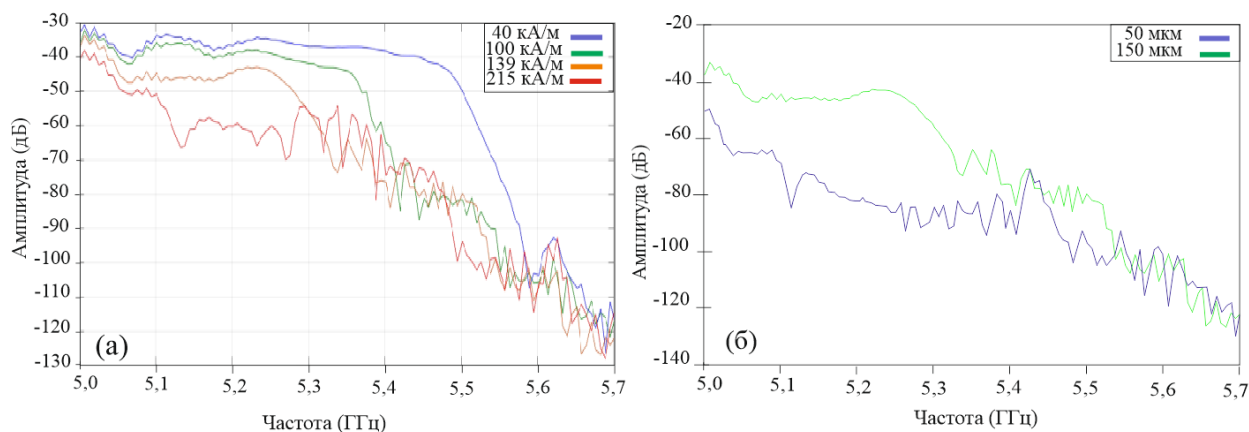


Рисунок 4 – Полученные методом микромагнитного моделирования АЧХ (а) – при изменении намагниченности слоя  $M_{fr}$ , (б) – при изменении длины слоя  $d_2$ .

Частотами, появившихся провалов при изменении параметров FeRh, можно управлять, что может быть использовано для пространственно-частотной селекции сигнала. На частоте провала  $f_1=5.132$  ГГц, появившегося при  $M_{fr}=215$  кА/м, были построены карты пространственного распределения величины интенсивности спиновой волны  $I = \sqrt{m_z^2 + m_x^2}$  в микроволноводе. На рисунке 5 можем видеть, что после прохождения места контакта FeRh при значении  $M_{fr}=100$  кА/м, сигнал еще не претерпел существенных изменений. А при  $M_{fr}=215$  кА/м заметно наблюдается появление нескольких мод.

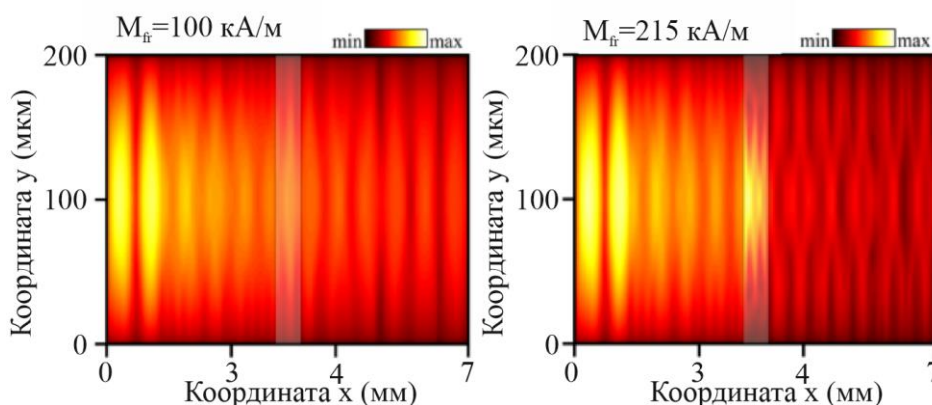


Рисунок 5 – Пространственное распределение интенсивности при частоте  $f=5.132$  ГГц.

Таким образом, в первой главе исследованы свойства спин-волновых возбуждений в структуре, представляющей собой микроволновод ЖИГ и присоединенный антиферромагнитный материал FeRh. Показано, что возможно оказывать влияние на спин-волновой сигнал, распространяющийся в микроволноводе, с помощью изменения характеристик слоя FeRh. Так же продемонстрировано качественное изменение внутреннего поля, амплитуды и фазы СВ при двух способах управления.

Во второй главе продемонстрирована возможность реализации режимов управления характеристиками СВ в структуре, изображенной на рисунке 6 в виде системе двух волноводов, связанных через боковую стенку, за счёт изменения характеристик антиферромагнитного слоя FeRh, расположенного над данными волноводами. В частности, показано, что с помощью изменения геометрических параметров и намагниченности слоя FeRh можно осуществлять

управление амплитудой и фазой СВ, распространяющихся в связанных микроволноводах.

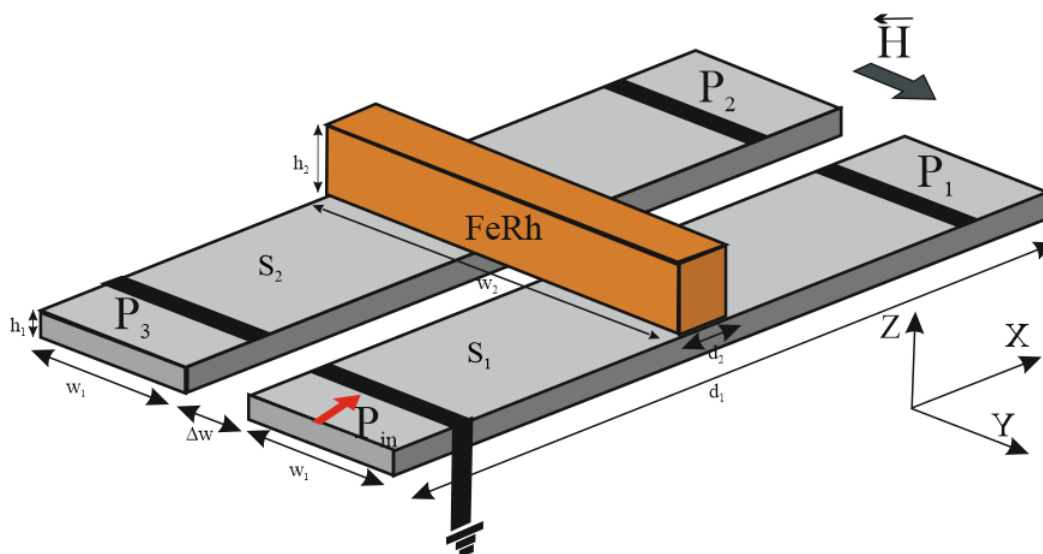


Рисунок 6 – Изображение исследуемой структуры виде двух связанных волноводов и сверху расположенного слоя FeRh.

Исследуемая в этой главе структура представляет собой расширение структуры, представленной в первой главе, поэтому использовали все полученные данные и учитывали при расчетах. Для исследования режимов и способов управления спин-волнового сигнала, была изучена возможность осуществлять управление амплитудой и фазой СВ, распространяющихся в связанных расположенных микроволноводах, путём изменения намагниченности  $M_{fr}$  или длины  $d_2$ . Были рассмотрены АЧХ при разном значении  $M_{fr}$  и из полученных графиков на рисунке 7а следует вывод, что с увеличением изменяемого параметра произошло уменьшение значения амплитуды на  $P_1$  и  $P_2$  на 20 дБ, а на  $P_3$  не изменилось. При больших значениях намагниченности сигнал полностью перенаправляется на  $P_3$ . Важно отметить, что частотами провалов можно управлять, подбирая параметры слоя FeRh, что может быть использовано для пространственно-частотной селекции сигнала, подаваемого на вход  $P_{in}$  структуры. С помощью ММ были также построены АЧХ для второго случая, когда управление осуществляется с помощью изменения длины  $d_2$  слоя FeRh. На рисунке 7б показаны графики для  $d_2 = 50$



мкм и  $d_2 = 150$  мкм, при этом все прочие параметры были зафиксированы и  $M_{fr} = M_0$ . Из полученных данных следует вывод, что так же происходит увеличение прохождения только на порт  $P_3$ , а в остальных двух коэффициент прохождения падает, что говорит о пренебрежении сигнала, как и при первом методе управления.

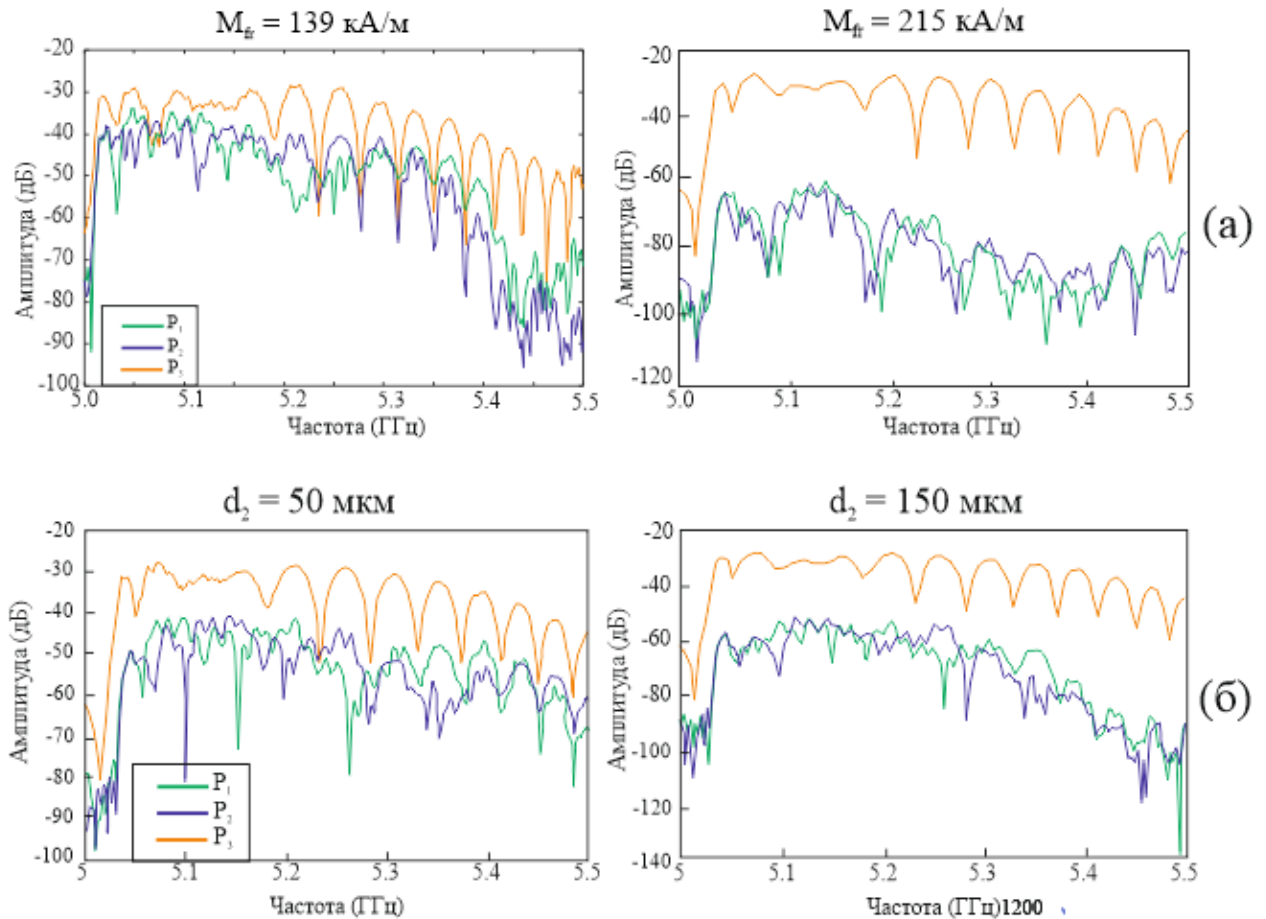


Рисунок 7 – Амплитудно-частотные характеристики (а) при разных значениях намагниченности насыщения FeRh  $M_{fr}=139$  кА/м и  $M_{fr}=215$  кА/м, (б) при разных значениях длины FeRh.

Интерес представляют частоты, на которых наблюдается провал сигнала, которым можно управлять изменением намагниченности  $M_{fr}$ . При частоте  $f_1=5.221729$  ГГц на  $P_1$  отмечается провал, при чем его частота не изменяется, а амплитуда меняется. А именно при  $M_{fr} = 40$  кА/м значение амплитуды составляет 42 дБ, при  $M_{fr} = 139$  кА/м 60 дБ и при  $M_{fr} = 215$  кА/м 100 дБ. На выбранной частоте  $f_1$  построены карты намагниченности при разных значениях изменяемого параметра, построенные графики продемонстрированы на рисунке

15. Эти карты представляют собой графики одной компоненты намагниченности, которая пропорциональна фазе, и квадрата намагниченности, который пропорционален интенсивности намагниченности волны.

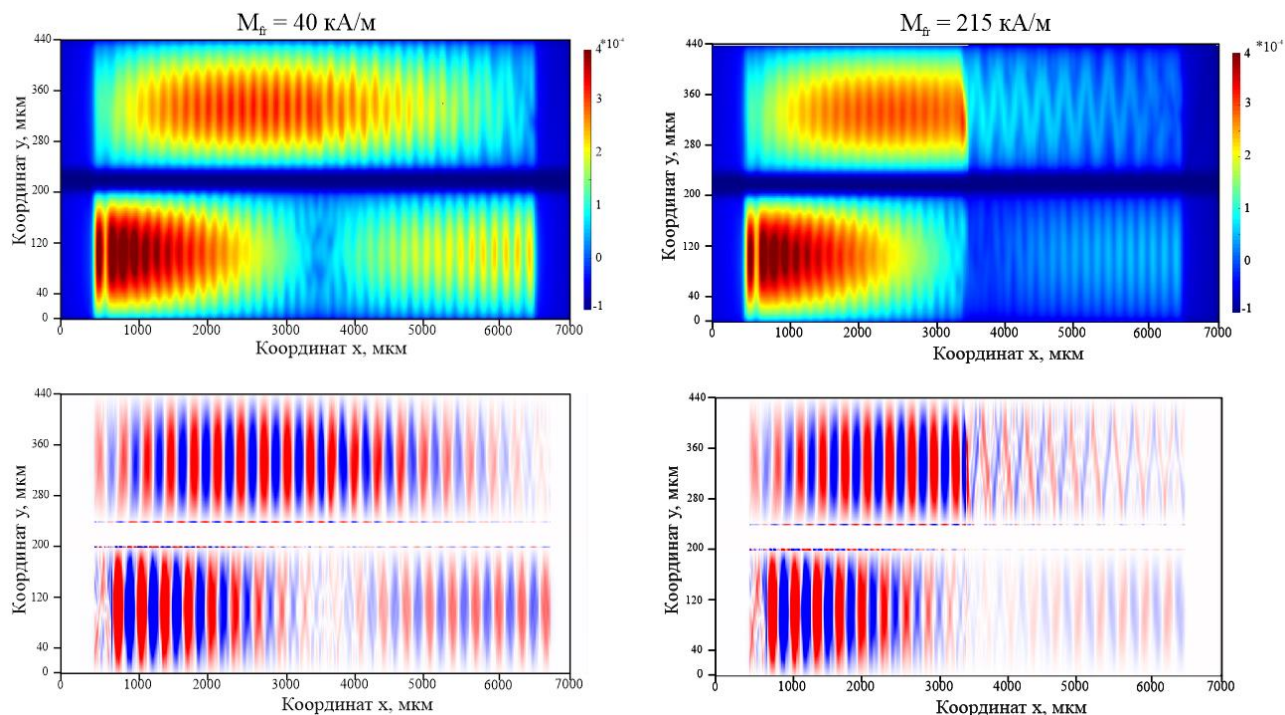


Рисунок 15 – Пространственное распределение в структуре на частоте  $f_1=5.221729$  ГГц.

Как видно из графиков при  $M_{fr} = 40$  кА/м справа от слоя FeRh на нижней волновод передается примерно в 2,5 раза больше сигнала чем в верхний. А при значении  $M_{fr} = 139$  кА/м спин-волновой сигнал на портах слева выравнивается и в верхнем становится зигзагообразным, что может говорить об многочисленных отражениях от стенок и как следствие появляется влияние на амплитуду. На выбранных частотах при намагниченности слоя FeRh  $M_{fr} = 215$  кА/м сигнал практически весь перенаправляется на порт  $P_3$ , что подтверждается построенными АЧХ.

Таким образом, в данной главе было исследовано управление свойствами спиновых волн в системе связанных через боковую стенку двух волноводов с добавлением слоя FeRh. На основе разработанной численной модели методом изменения намагниченности и длины слоя FeRh было выявлено изменение

характеристик спин-волнового сигнала, были построены амплитудно-частотные характеристики для разных значений намагниченности FeRh. Также было изучено влияние антиферромагнетика на пространственное распределение интенсивности СВ на разных частотах и на внутреннее магнитное поле.

## Заключение

Таким образом, в работе изучено и продемонстрировано управление спиновыми волнами в композитных структурах ЖИГ/FeRh, а именно в структурах на основе одного микроволновода и двух связанных микроволноводов через боковую стенку с слоем антиферромагнетика FeRh, расположенного в центре поперек.

Благодаря численному моделированию обнаружено влияние на спин-волновой сигнал с помощью изменения свойств слоя FeRh. Обнаружено изменение амплитуды и фазы СВ при прохождении антиферромагнетика, а также возможность перенаправления сигнала на один из портов.

В ходе изучения было обнаружено, что предлагаемые структуры можно использовать в качестве функциональных единиц в плоских магнетонных сетях, а также на их основе возможно создавать ответвители и делители мощности спин-волнового сигнала в планарных топологиях магнетонных сетей для селективной обработки информационных сигналов.

## Список литературы

1. Sadovnikov A. V. et al. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic waveguide //Physical Review B. – 2017. – Т. 96. – №. 6. – С. 060401.
2. Никитов С. А. и др. Магноника—новое направление спинтроники и спин-волновой электроники //Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185. – №. 10. – С. 1099-1128.
3. Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D. Magnonics //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2010. – Т. 43. – №. 26. – С. 264001.
4. Sadovnikov A. V. et al. Magnon straintronics: Reconfigurable spin-wave routing in strain-controlled bilateral magnetic stripes //Physical review letters. – 2018. – Т. 120. – №. 25. – С. 257203.
5. Бухараев А. А. и др. Стрейнтроника—новое направление микро-и наноэлектроники и науки о материалах //Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – №. 12. – С. 1288-1330.
6. Sadovnikov A. V. et al. Route toward semiconductor magnonics: Light-induced spin-wave nonreciprocity in a YIG/GaAs structure //Physical Review B. – 2019. – Т. 99. – №. 5. – С. 054424.
7. Sadovnikov A. V. et al. Voltage-controlled spin-wave coupling in adjacent ferromagnetic-ferroelectric heterostructures //Physical Review Applied. – 2017. – Т. 7. – №. 1. – С. 014013.
8. Sadovnikov A. V. et al. Magnon straintronics: Reconfigurable spin-wave routing in strain-controlled bilateral magnetic stripes //Physical review letters. – 2018. – Т. 120. – №. 25. – С. 257203.
9. Amirov A. A. et al. Magneto-electric coupling in Fe<sub>48</sub>Rh<sub>52</sub>-PZT multiferroic composite //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – Т. 470. – С. 77-80.
10. Amirov A. A. et al. Electric field controlled magnetic phase transition in Fe<sub>49</sub>Rh<sub>51</sub> based magnetoelectric composites //Letters on Materials. – 2018. – Т. 8. – №. 3. – С. 353-357.