

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, пьезоэлектрическим 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.

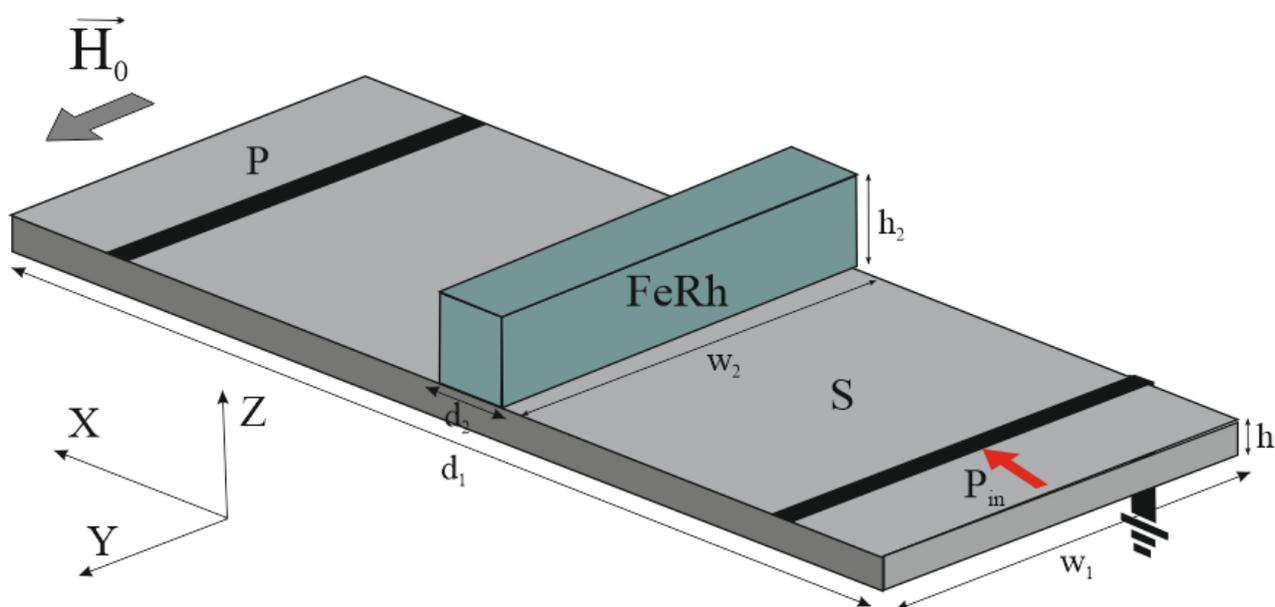


Рисунок 1 – Схематическое изображение исследуемой структуры.

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.

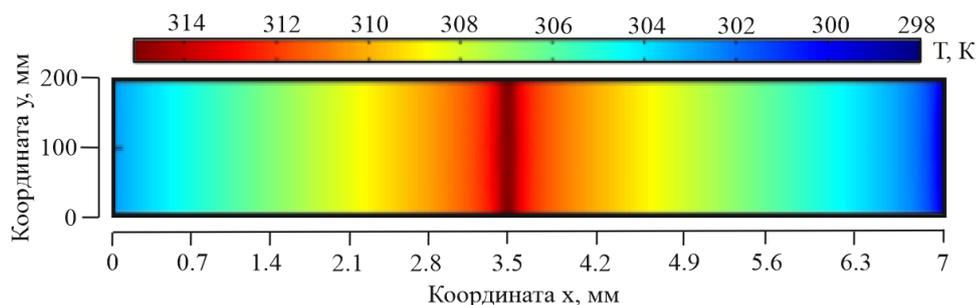


Рисунок 2 – Распределение температуры при нагреве слоя FeRh вид сверху

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.

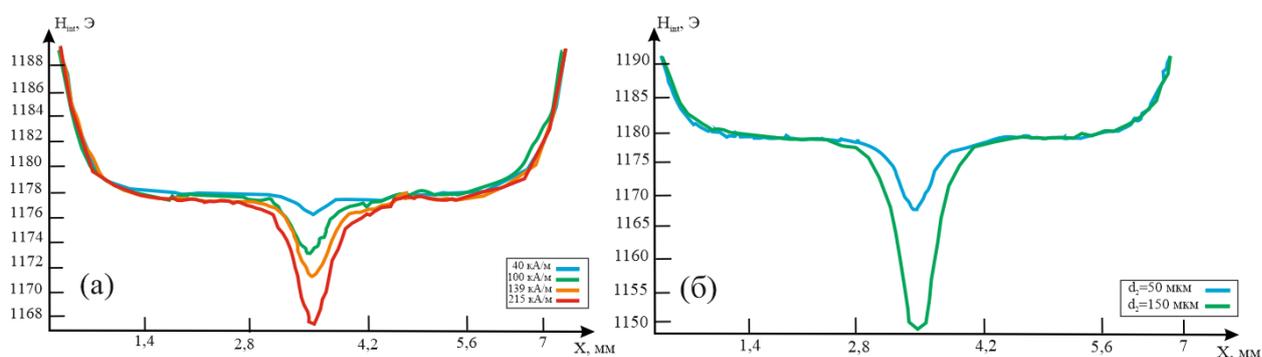


Рисунок 3 – График распределения величины внутреннего магнитного поля ЖИГ вдоль оси x (а) при различных значениях M_{fr} , (б) при различных значениях d_2 .

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.

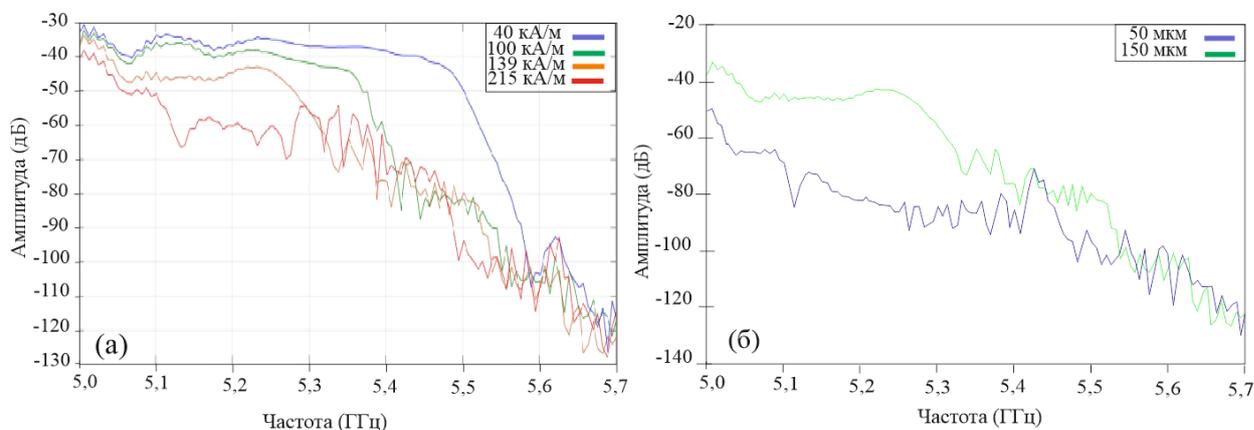


Рисунок 4 – Полученные методом микромагнитного моделирования АЧХ (а) – при изменении намагниченности слоя M_{fr} , (б) – при изменении длины слоя d_2 .

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.

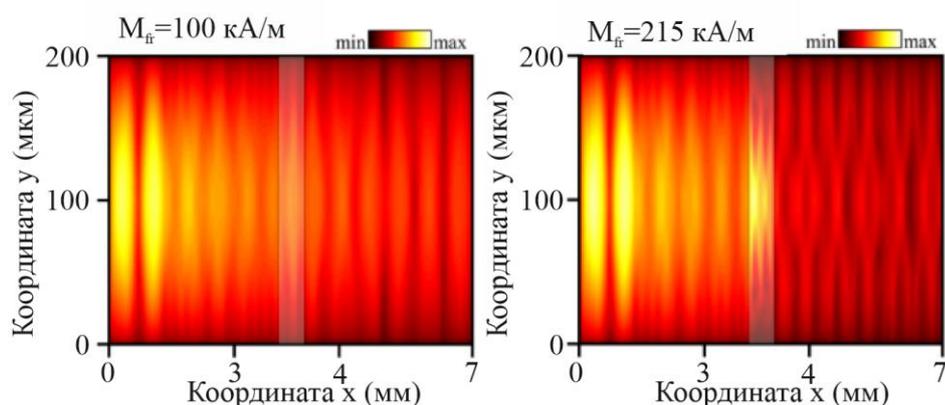


Рисунок 5 – Пространственное распределение интенсивности при частоте $f=5.132$ ГГц.

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.

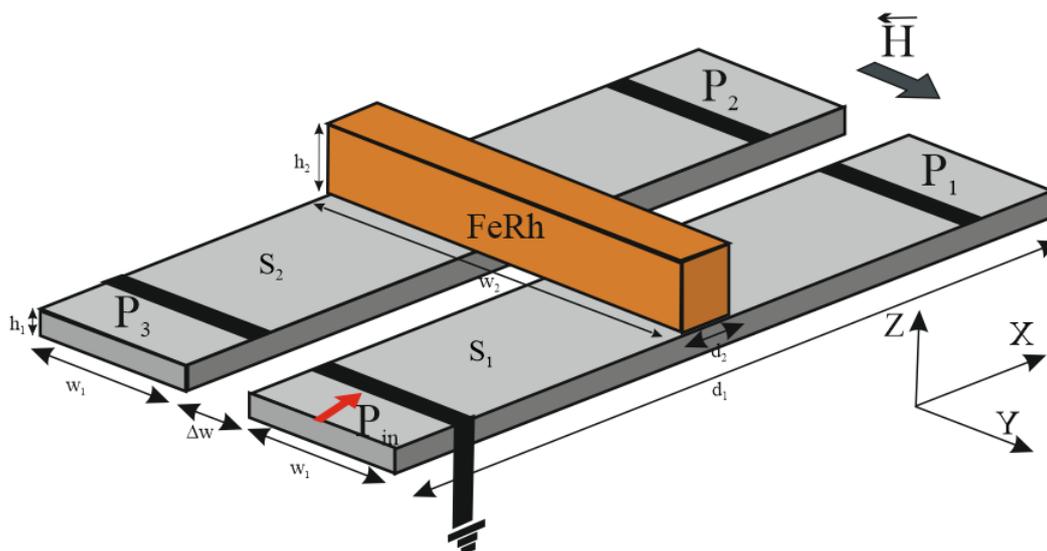


Рисунок 6 – Изображение исследуемой структуры в виде двух связанных волноводов и сверху расположенного слоя FeRh.

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.

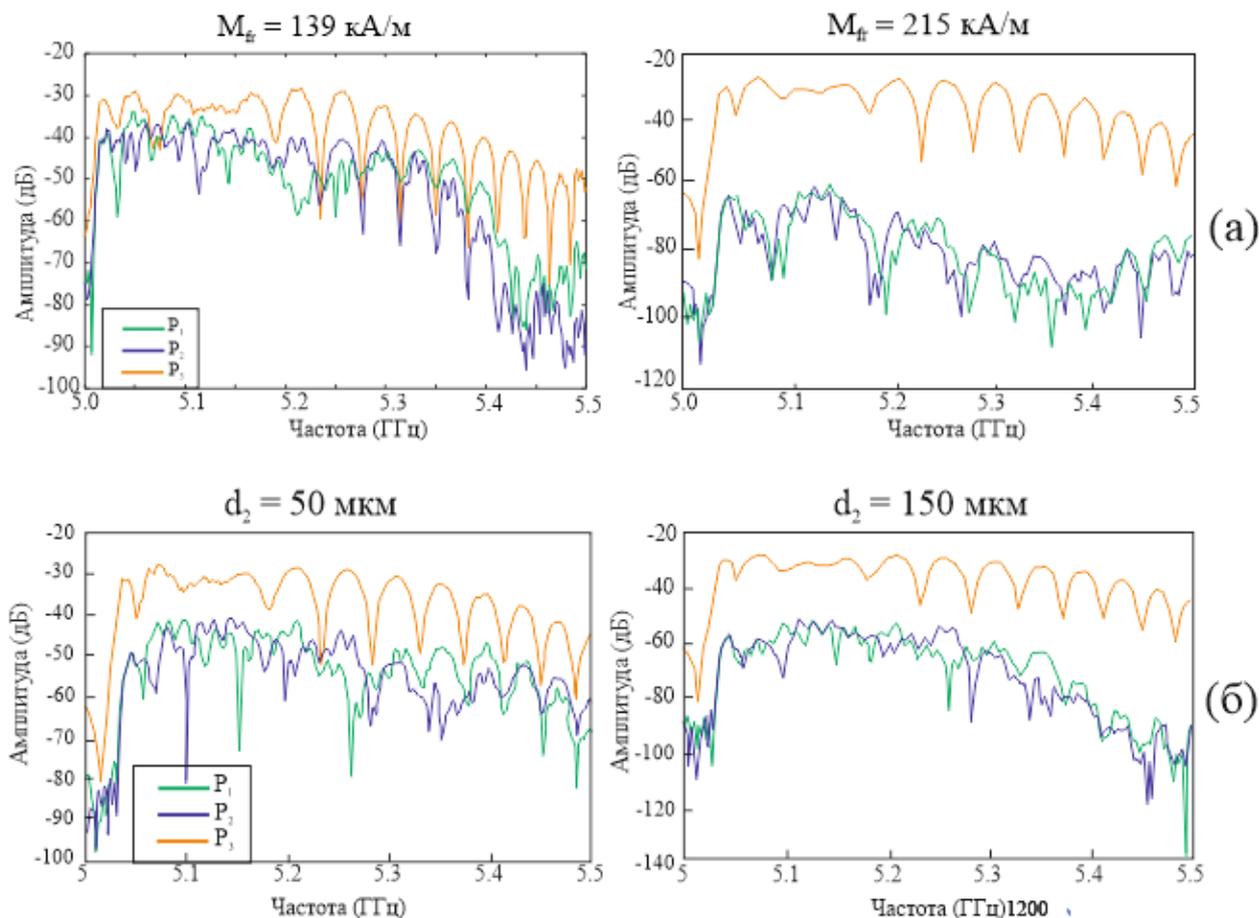


Рисунок 7 – Амплитудно-частотные характеристики (а) при разных значениях намагниченности насыщения FeRh $M_{fr}=139$ кА/м и $M_{fr}=215$ кА/м, (б) при разных значениях длины FeRh.

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.

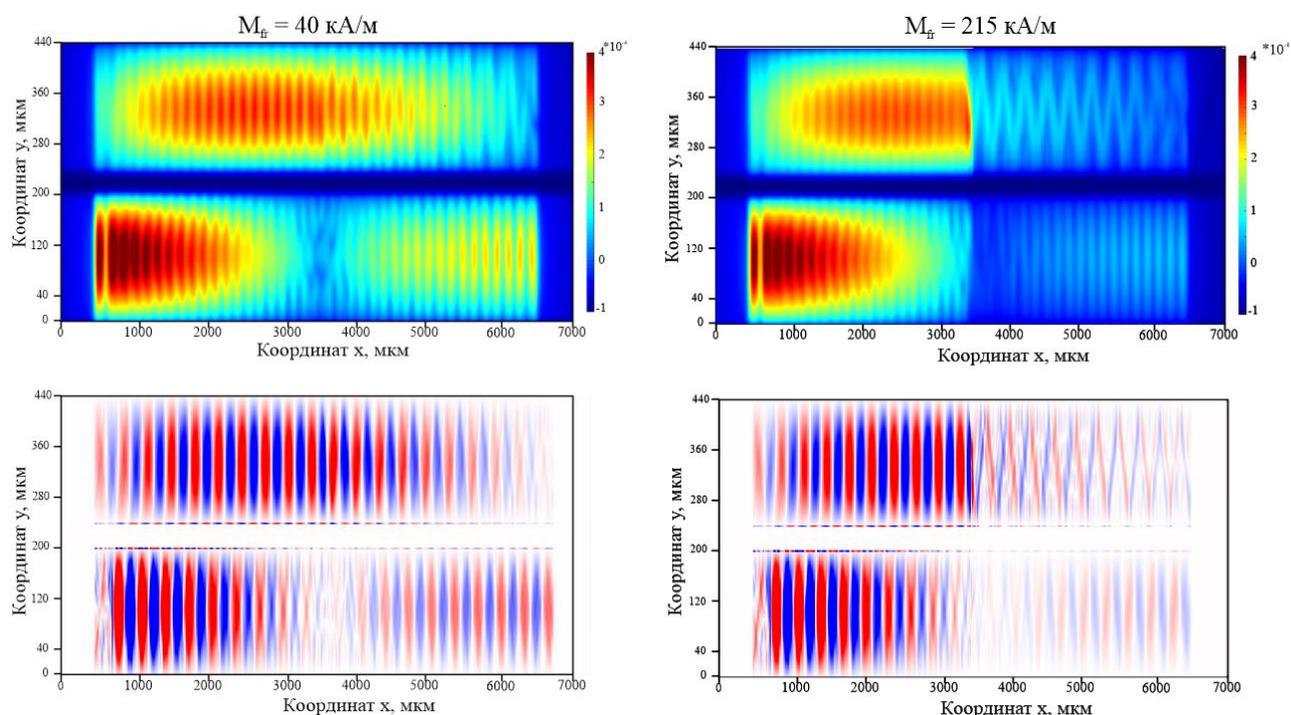


Рисунок 15 – Пространственное распределение в структуре на частоте $f_1=5.221729$ ГГц.

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 магнонных сетях, а также на их основе возможно создавать ответвители и делители мощности спин-волнового сигнала в планарных топологиях магнонных 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 Fe₄₈Rh₅₂-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 Fe₄₉Rh₅₁ based magnetoelectric composites //Letters on Materials. – 2018. – Т. 8. – №. 3. – С. 353-357.