

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра электроники, колебаний и волн

Управляемый спин-волновой транспорт в магнитных микроструктурах

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 225 группы

направления 03.04.03 Радиофизика

факультета нелинейных процессов

Мартышкина Александра Александровича

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

А.В. Садовников

Зав. кафедрой электроники, колебаний и волн

чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор

Д.И. Трубецков

Саратов 2019 г.

Введение

Благодаря развитию технологий изготовления 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 [4–6], СВ являются перспективными переносчиками информационных сигналов. При этом был реализован целый класс устройств обработки сигналов на принципах магноники и магнонной спинтроники [3,4]. Непрерывное развитие технологий формирования интегральных схем позволяет создавать структуры с большей плотностью магнитных функциональных элементов. При этом важно отметить, что увеличения удельного тепловыделения в линиях связи при этом не происходит, ввиду того что распространение спиновых волн в диэлектрических магнитных материалах не сопровождается транспортом электронов [7]. В настоящее время активно исследуется возможность создания магнонных структур, позволяющих организовывать спин-волновой транспорт [8] в том числе для систем обработки информационных сигналов на нейроморфных принципах [9]. В качестве магнитного материала, для которого показана возможность формирования волноведущих структур [8], были выбраны пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), демонстрирующие рекордно низкие величины затухания СВ [9–11]. Одним из преимуществ использования СВ для систем обработки информационных сигналов является возможность построения элементной базы приборов обработки, передачи и хранения информации в микроволновом и терагерцевом диапазоне [4–6]. Так, например, управляя направлением и величиной поля подмагничивания возможно изменение характеристик распространения СВ, определяющихся дипольным и обменным взаимодействием [9, 11]. Путем управления анизотропией формы магнитных структур также удастся управлять свойствами СВ, распространяющихся в нерегулярных магнонных

волноводах [1,12]. Стоит отметить, что интерес к исследованию магнитных структур обусловлен возможностью создания ЖИГ пленок на структурированных подложках галлий гадоллиниевого граната, как показано в работе [8]. При этом осаждение ЖИГ на структурированные подложки происходит методом ионно-лучевого распыления с дальнейшим отжигом. Толщины получаемых таким образом пленок ЖИГ достигают 1 μm .

Программа MuMax 3 позволяет решать временные и пространственные задачи эволюции намагниченности в нано и микро масштабах с использованием методов конечных разностей. Данное программное обеспечение является свободно распространяемым и не требует высокой производительности в связи с чем можно провести масштабные исследования на недорогом оборудовании [13]. Для решения задач MuMax 3 применяет МКР в пространстве, которое разбивается сеткой. Такие величины как намагниченность и величина поля рассматриваются в центре каждой ячейки. Такие величины как силы обмена рассматриваются на границах ячеек. MuMax 3 использует конструктивную сплошную геометрию для определения формы магнита и областей материалов внутри него. Любая фигура представляется как функция $f(x,y,z)$. Фигуры можно поворачивать, масштабировать и комбинировать с помощью различных логических операторов. Также можно использовать возможность задания геометрии с помощью готовых монохромных изображений. Это позволяет определить сложные и параметрические формы в программе.

Глава 1. Динамика спиновых волн в планарных Г-образных структурах

В данной главе исследованы свойства спин-волновых возбуждений в структурах, представляющих собой нерегулярные планарные ферритовые волноводы. На основе результатов расчетов с помощью методики микромагнитного моделирования показано, что планарные волноведущие системы с нарушением трансляционной симметрии могут использоваться для передачи сигнала в устройствах, основанных на принципах спинтроники. Планарная топология волноведущих структур обеспечивает управление фазовыми характеристиками спиновых волн и локализацию энергии волны по мере её распространения вдоль структуры. Анизотропия ферритовых структур даёт возможность возбуждать в них спиновые волны с неколлинеарным характером, характеризующиеся отличными от законов геометрической оптики изотропных сред закономерностями распространения, отражения и преломления.

Исследовались Г-образные волноводы с различным типом сочленения волноведущих структур в нерегулярной части (рис.1.). В качестве материала для изготовления волноведущих структур использовались пленки, сформированные из железо-иттриевого граната толщиной $w = 1 \mu\text{m}$ [(YIG) $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (111)].

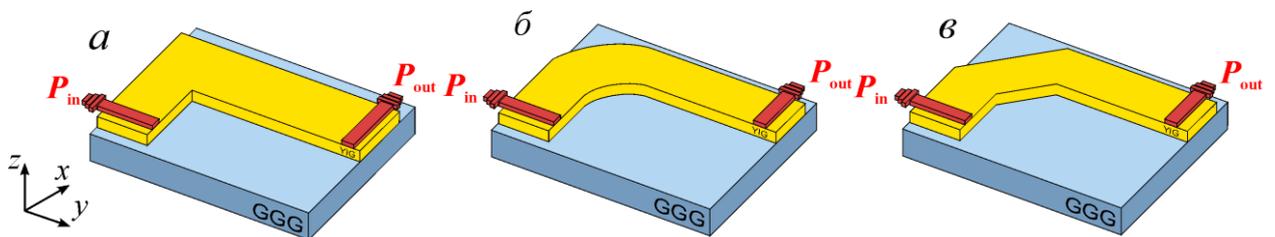


Рисунок 1 – схематическое изображение L-образных волноводов а) с перпендикулярным соединением б) с закруглением, в) с сочленением под углом 45 градусов.

На рисунке 2 показаны дисперсионные характеристики для ПМСВ и ООМСВ полученные в области S_1 и S_2 для волноводов с шириной

$w = 250, 500, 750 \mu\text{m}$ и толщиной $d = 2.5, 5, 10 \mu\text{m}$. Частота возбуждения ПМСВ и ООМСВ для первой и последующих мод сильно зависит от ширины и толщины волновода. При увеличении толщины волноведущей структуры растёт наклон дисперсионных характеристик, а также частота возбуждения ПМСВ растёт. При увеличении ширины волноведущей структуры частота возбуждения ПМСВ растёт. Для ООМСВ частота возбуждения первой и последующих мод не зависит от ширины и толщины волновода, поскольку внешнее магнитное поле H_0 коллинеарно волноводу.

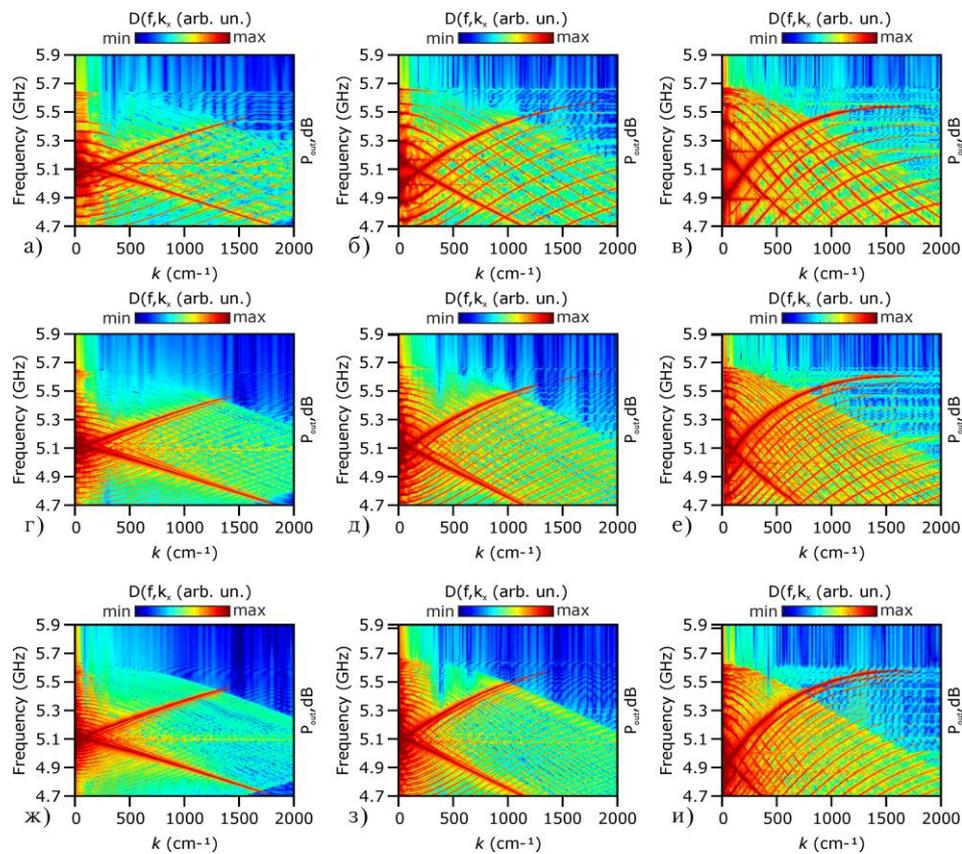


Рисунок 2 – Дисперсионные характеристики ПОМСВ и ООМСВ совмещенные на одном графике для областей S_1 и S_2 Г-образных структур с закругленным соединением: а) шириной $w = 250 \mu\text{m}$ и толщиной пленки $d = 2.5 \mu\text{m}$, б) $w = 250 \mu\text{m}$ и толщиной пленки $d = 5 \mu\text{m}$ в) $w = 250 \mu\text{m}$ и толщиной пленки $d = 10 \mu\text{m}$, г) $w = 500 \mu\text{m}$ и толщиной пленки $d = 2.5 \mu\text{m}$, д) $w = 500 \mu\text{m}$ и толщиной пленки $d = 5 \mu\text{m}$, е) $w = 500 \mu\text{m}$ и толщиной пленки $d = 10 \mu\text{m}$, ж) $w = 750 \mu\text{m}$ и толщиной пленки $d = 2.5 \mu\text{m}$, з) $w = 750 \mu\text{m}$ и толщиной пленки $d = 5 \mu\text{m}$, и) $w = 750 \mu\text{m}$ и толщиной пленки $d = 10 \mu\text{m}$.

Далее проводился расчет спектральной плотности мощности выходного сигнала для Г-образных волноведущих структур с различным типом соединения (рис.3).

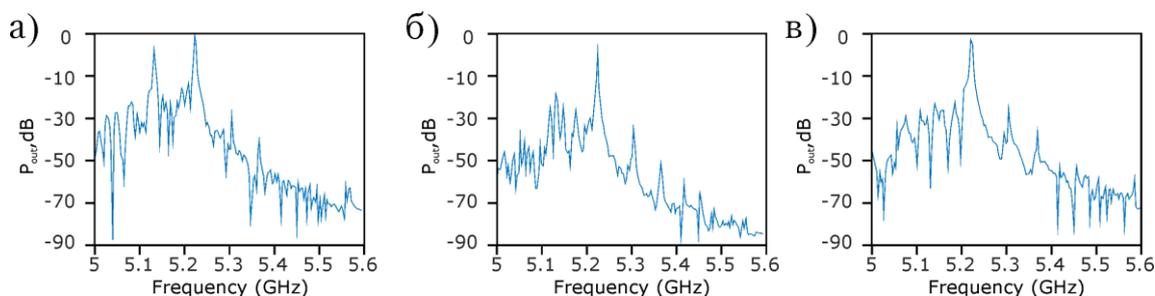


Рисунок 3 – амплитудо-частотные характеристики для волноведущих структур а) с соединением с закруглением б) с перпендикулярным соединением, в) с соединением под углом 45 градусов.

Амплитудо-частотный спектр Г-образных волноведущих структур обладает резонансным характером. Характерные пики можно объяснить наличием ширинных мод в данных структурах.

Таким образом, исследованы свойства спин-волновых возбуждений в структурах, представляющих собой сочленение тонкопленочных магнитных структур. Показано, что предложенные структуры позволяют осуществлять передачу спин-волновых сигналов в нерегулярных структурах в режиме трансформации ПМСВ в ООМСВ в узком частотном диапазоне. Показано, что система с нарушением трансляционной симметрии может использоваться для передачи сигнала в планарных конфигурациях магнитных сетей, при этом важно учитывать изменение локальных характеристик магнитных структур, например, величин внутренних магнитных полей. Такие структуры могут быть использованы в устройствах нейроморфной обработки информационного сигнала, работающих на принципах небулевой и нечеткой логики. При этом распространяющиеся в ЖИГ микроструктурах спин-волновые возбуждения можно использовать в качестве информационного сигнала.

Глава 2. Функциональные блоки магнонных сетей на основе структур с нарушением трансляционной симметрии

В качестве опорной или референсной структуры рассмотрим неограниченную в направлении y магнитную тонкопленочную структуру S_0 (рис.4а). Для исследования передачи спин-волнового сигнала в 3D топологиях будем рассматривать Г-образную структуру, представляющую собой сочленение в вертикальной плоскости двух магнонных микроволноводов (рис. 4б).

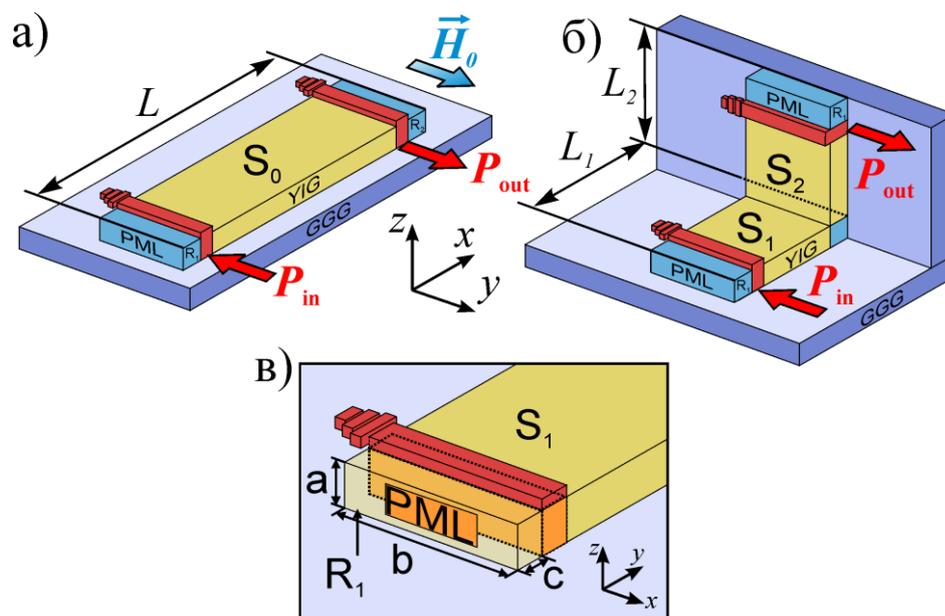


Рисунок 4 –схематическон изображение а) референсной структуры и б) элемента межсоединений в виде вертикального сочленения магнонных микроволноводов; в) схема области PML и области источника сигнала T_s .

Решалась задача о возбуждении и распространении спиновых волн. Для расчета спектра выходного сигнала была дважды решена задача о возбуждении СВ: в референсной структуре S_0 и затем для Г-образной структуры методом возбуждения в области микроволновода S_1 и приема СВ в волноводе S_2 .

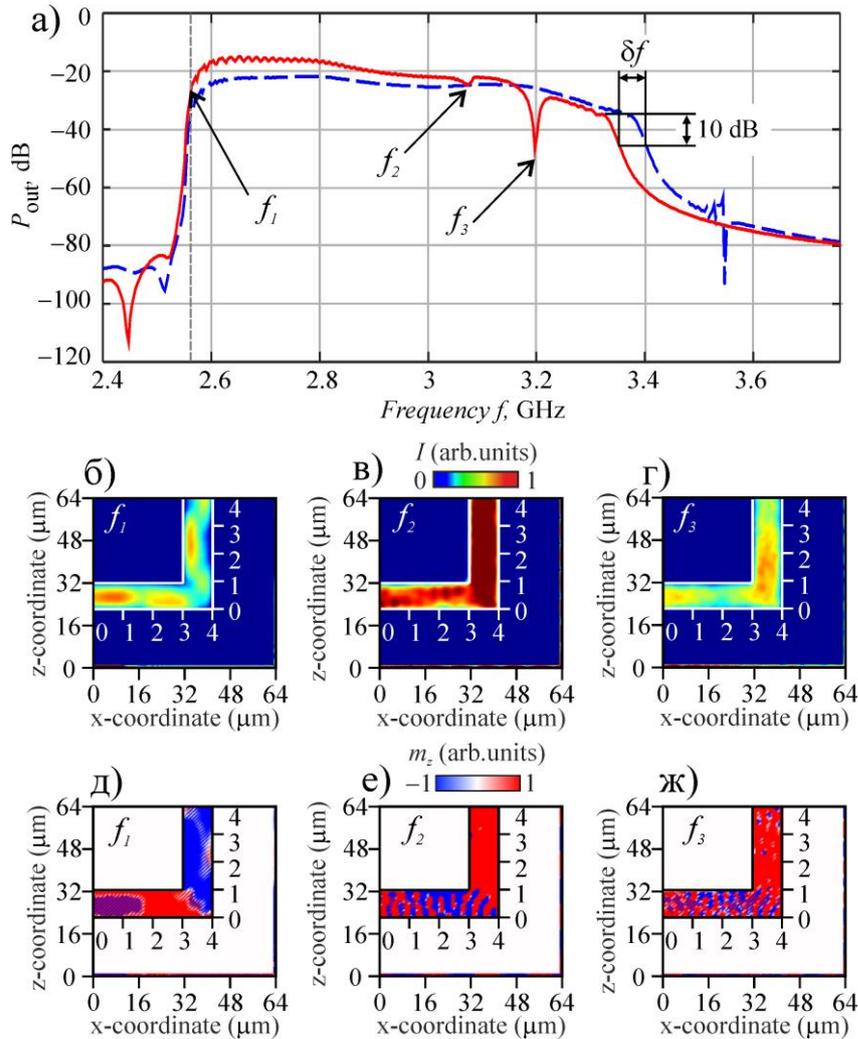


Рисунок 5 – а) спектр мощности выходного сигнала для Γ -образной структуры (сплошная кривая) и референсного микроволновода (пунктирная кривая). Распределение интенсивности I , б-г) и компоненты m_z динамической намагниченности, д-ж) в Γ -образной структуре на частотах $f_1 = 2.57$ GHz, $f_2 = 3.074$ GHz и $f_3 = 3.19733$ GHz.

Таким образом, исследованы свойства спин-волновых возбуждений в структуре, представляющей собой сочленение тонкопленочных магнитных структур. Показано, что предложенная структура позволяет осуществлять передачу спин-волновых сигналов в нерегулярной структуре в режиме распространения поверхностной магнитостатической волны в широком частотном диапазоне. Показано, что система с нарушением трансляционной симметрии может использоваться для передачи сигнала в трехмерных конфигурациях магнетонных сетей, при этом важно учитывать изменение

локальных характеристик магнитных структур, например, величин внутренних магнитных полей. Стоит отметить, что предложенная структура позволяет осуществлять передачу спин-волновых сигналов в нерегулярной структуре в режиме распространения ПМСВ без трансформации ПМСВ в ООМСВ, как это было показано в работе. Преимуществом такого подхода является, во-первых, возможность создавать вертикальные связи в трехмерных топологиях магнетонных сетей путем ортогонального сочленения микроволноводных секций и, во-вторых, данная геометрия обеспечивает широкополосную передачу СВ в нерегулярной структуре. Последнее обстоятельство является важным на пути миниатюризации трехмерных магнетонных сетей, для использования в устройствах нейроморфной обработки информационного сигнала, работающих на принципах небулевой и нечеткой логики.

Глава 3. Управление межмодовой связью спиновых волн в латеральных системах магнитных микроструктур с нарушением трансляционной симметрии.

В данной главе показана возможность управления свойствами спиновых волн в латеральной системе магнитных микроструктур с нарушением трансляционной симметрии. Методом Манделъштам-Бриллюэновской спектроскопии и в численном эксперименте исследованы режимы пространственной и частотной селекции спин-волнового сигнала. Методом микромагнитного моделирования исследовано влияние геометрических параметров на свойства дипольно-связанных спиновых волн и выявлены особенности связи поперечных мод, распространяющихся в системе с нарушением трансляционной симметрии. Полученные результаты могут быть использованы для создания на основе латеральной системы магнитных микроструктур демультимплексоров, делителей мощности, ответвителей и устройств обработки сверхвысокочастотного сигнала на нейроморфных принципах. На рис. 3а показано схематическое изображение исследуемой структуры, состоящей из двух нерегулярных структур (G_1 и G_2). G_1 можно при этом рассматривать как структуру с нарушением трансляционной симметрии вдоль оси z . В прямоугольной области R_c , отмеченной пунктиром, микроструктуры образуют систему параллельно расположенных микрополосок длиной L_c (длина области связи), что необходимо для реализации режима спин-волновой связи.

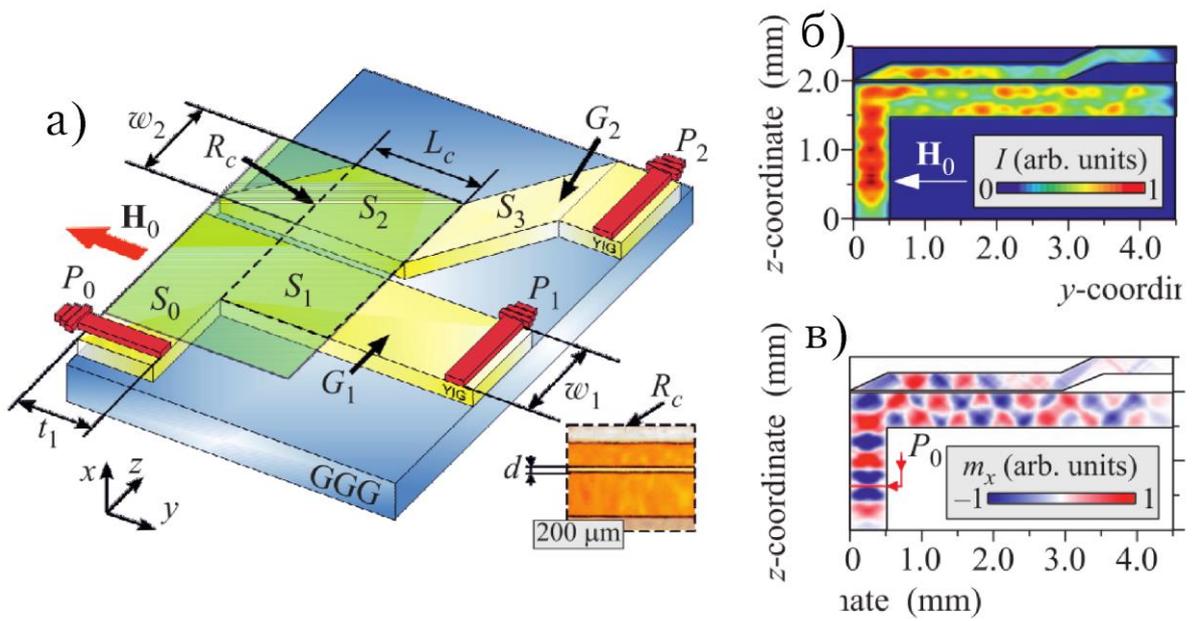


Рисунок 6 – а) схематическое изображение исследуемой структуры; б) распределение интенсивности и в) распределение m_x компоненты динамической намагниченности на частоте 5.114 GHz.

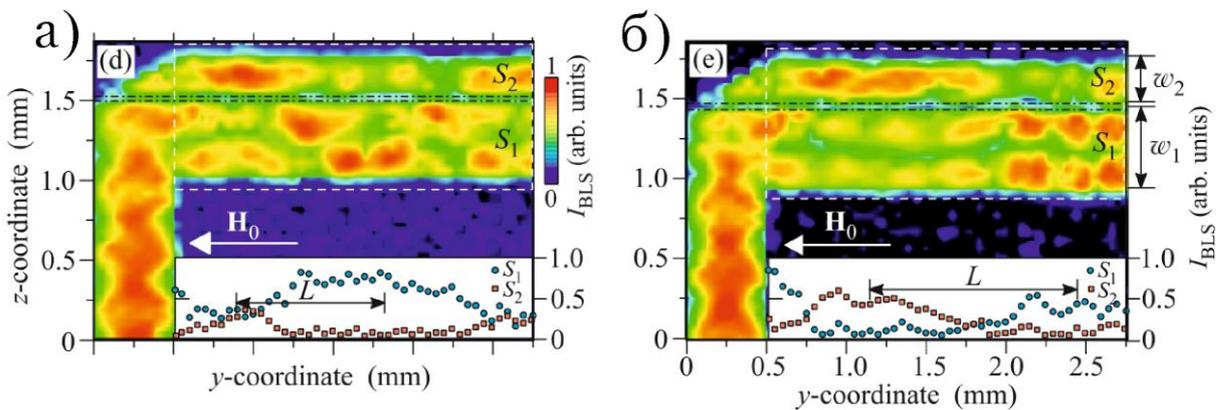


Рисунок 7 – пространственное распределение МБС-сигнала на частоте а) 5.091 GHz и б) 5.114 GHz. На вставках к панелям а) и б) показана интегральная интенсивность МБС-сигнала $I_{BLS}(y)$ в секции S_1 (кружки) и S_2 (квадраты) как функция продольной координаты y .

В качестве материала для изготовления микроволноводов был использован железоиттриевый гранат $[Y_3Fe_5O_{12}(111)]$ (ЖИГ), выращенный методом жидкофазной эпитаксии на подложке галлий гадолиниевый граната $[Gd_3Ga_5O_{12},(111)]$ (ГТГ). Для определения геометрических размеров

структуры было проведено микромагнитное моделирование (ММ) на основе численного решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта.

Таким образом, с помощью метода Манделъштам-Бриллюэновской спектроскопии и численного моделирования исследованы режимы распространения связанных СВ в системе неидентичных латеральных магнитных микроструктур. Продемонстрирована возможность управления межмодовой связью спиновых волн в магнитных микроструктурах с нарушением трансляционной симметрии. Показано, что за счет увеличения разницы волновых чисел спин-волновых мод при уменьшении ширины микроволноводов оказывается возможным уменьшать величину длины связи спиновых волн. Полученные результаты могут быть использованы для создания на основе латеральной системы неидентичных магнитных микроволноводов функциональных элементов обработки информационного сигнала, например, демультиплексеров, делителей мощности и ответвителей сигнала в СВЧ диапазоне.

Глава 4. Пространственно-частотная селекция спиновых волн в структуре с пространственно-периодической неоднородностью.

На рисунке 8а показано схематическое изображение исследуемой структуры, образованной двумя магннными микроволноводами в латеральной конфигурации, разделенными одномерным массивом цилиндрических отверстий диаметром $D = 70 \mu\text{m}$, расположенными в центральной части вдоль оси симметрии x с периодом $L = 150 \mu\text{m}$.

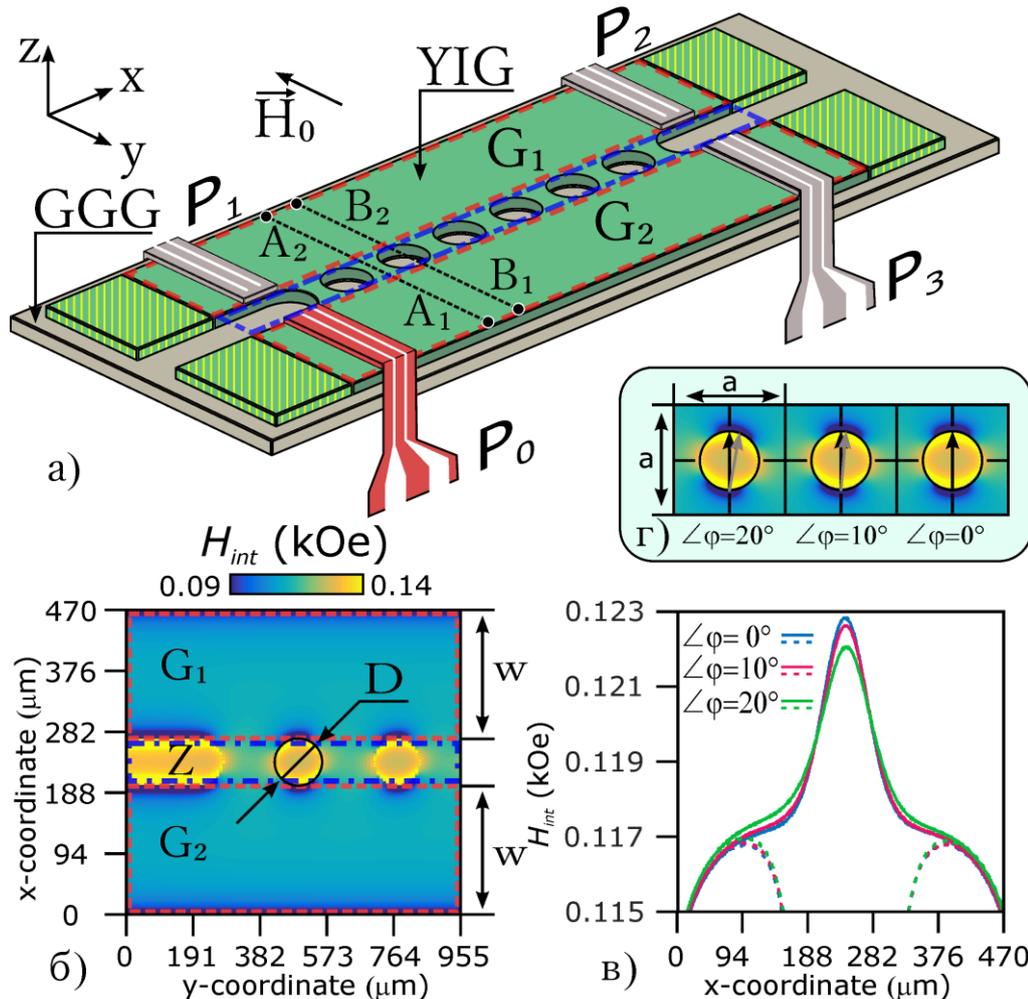


Рисунок 8 – а) схематическое изображение исследуемой структуры. б) карта распределения внутреннего поля намагничивания. в) распределение внутреннего магнитного поля в области A_1A_2 (сплошная) и B_1B_2 (пунктиром). г) распределение внутреннего магнитного поля при отклонении внешнего однородного магнитного поля H_0 от оси Oy .

На рисунке 8б показана карта распределения внутреннего магнитного поля в исследуемой структуре при внешнем однородном магнитном поле

H_0 направленным вдоль оси y . Как видно на рисунке 8г отклонение внешнего однородного магнитного поля H_0 от нормального состояния уменьшает величину внутреннего магнитного поля H_{int} области соединения волноводов $G1$ и $G2$. Внутреннее магнитное поле H_{int} в регионе A_1A_2 показанное пунктирной линией на рис. 8б увеличивается в области периодической неоднородности. В регионе B_1B_2 H_{int} соответствует распределению магнитного поля в системе латеральных волноводов. Таким образом внутри каждой из областей $G1$ $G2$ образуются каналы для распространения СВ, причем из распределений внутреннего поля видно, что путем изменением угла подмагничивания оказывается возможным управлять величиной барьера в области A_1A_2 в диапазоне от 121 Ое до 123 Ое на (рис 8в), что позволяет изменять длину связи между СВ, распространяющимися вдоль каналов.

По данным полученным в области P_1, P_2, P_3 распределений интенсивности построены пространственно-частотные карты (рис.9).

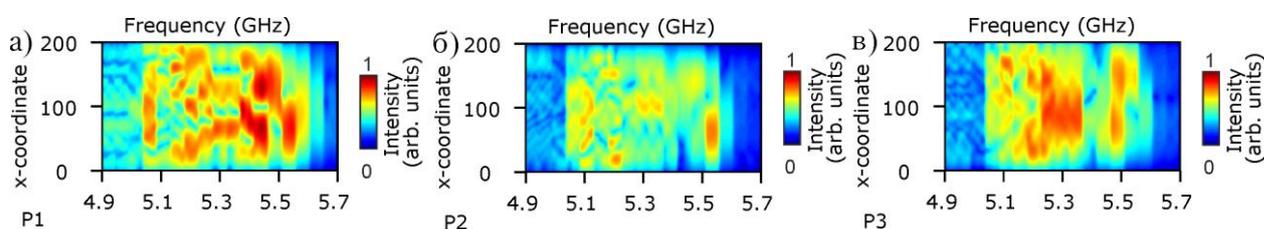


Рисунок 9 – а-в) пространственно-частотные распределения интенсивности спиновой волны в каналах P_1, P_2, P_3 соответственно.

Видно, что в структуре с периодической неоднородностью реализуются несколько режимов распространения сигнала. Системы магнитных микроволноводов с периодической неоднородностью могут использоваться для разработки устройств, работающих на принципах небулевой и нечеткой логики (“fuzzy logic”), при этом отличительной особенностью является кодирование сигнала как с помощью амплитуды спиновой волны.

Заключение

Таким образом, в ходе дипломной работы исследованы свойства спин-волновых возбуждений в магнитных структурах.

В первой главе рассмотрены тонкопленочные магнитные структуры, представляющие собой волноводы с различным типом сочленения. Показано, что предложенные структуры позволяют осуществлять передачу спин-волновых сигналов в нерегулярных структурах в режиме трансформации ПМСВ в ООМСВ в узком частотном диапазоне.

Во второй главе исследованы свойства спин-волновых возбуждений в структуре, представляющей собой сочленение тонкопленочных магнитных структур. Показано, что предложенная структура позволяет осуществлять передачу спин-волновых сигналов в нерегулярной структуре в режиме распространения ПМСВ в широком частотном диапазоне. В третьей главе с помощью метода Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии и численного моделирования исследованы режимы распространения связанных СВ в системе неидентичных латеральных магнитных микроструктур. Продемонстрирована возможность управления межмодовой связью спиновых волн в магнитных микроструктурах с нарушением трансляционной симметрии.

В четвертой главе с помощью микромагнитного моделирования были исследованы режимы распространения спиновых волн в системе латеральных магнитных микроволноводов с коммутационной периодической-неоднородностью в виде цилиндрических отверстий. На основе разработанной численной модели были выявлены механизмы, обуславливающие характерные режимы распространения спиновых волн при различных значениях частоты. Такие устройства можно использовать для обработки информационного сигнала, работающих на принципах небулевой и нечеткой логики, используя спин-волновые возбуждения в качестве информационного сигнала.

Список используемой литературы

1. Sadovnikov A.V., Davies C.S., Kruglyak V.V., Romanenko D.V., Grishin S.V., Beginin E.N., Sharaevskii Y.P., Nikitov S. A. // *Phys. Rev. B*. 2017.Vol. 96. 060401.
2. Nikitov S.A., Kalyabin D.V., Lisenkov I.V., Slavin A.N., Barabanenkov Y.N., Osokin S.A., Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Morozova M.A., Sharaevsky Y.P., Filimonov Y.A., Khivintsev Y.V., Vysotsky S.L., Sakharov V.K., Pavlov E.S. // *Phys. Usp.* 2015. 185. 1099.
3. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010. 43. 264001.
4. Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Serdobintsev A.A., Mitin D.M., Nikitov S.A. // *Phys. Rev. Lett.* 2018. 120. 257203.
5. Khitun A., Bao M. Wang K.L. // *J. Phys. D*. 2010.43. 264005.
6. Demidov V.E., Urazhdin S., De Loubens G., Klein O., Cros V., Anane A., Demokritov S. O. // *Phys. Rep.* 2017. 673.
7. ITRS. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). 2015. ed. <http://www.itrs2.net/itrs-reports.html> (accessed 1 April 2017).
8. Садовников А.В., Грачев А.А., Одинцов С.А., Мартышкин А.А., Губанов В.А., Шешукова С.Е., Никитов С. А. // *Письма в ЖЭТФ*. 2018. Т.108. Вып. 5. С 332–338.
9. Gurevich A.G., Melkov G.A., *Magnetization Oscillations and Waves*. CRC-Press. London. New York. 1996.
10. Stancil D.D., Prabhakar A., *Spin Waves: Theory and Applications*. Springer, New York. 2009.
11. Vashkovskii A.V., Stal'makhov V.S., Sharaevskii Yu. P., // *Magnetostatic Waves in Microwave Electronics*. Sarat. Gos. Univ. Saratov. 1993.
12. A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, and B. Van Waeyenberge, *AIP Advances* 4, 107133 (2014).