

Приложение А

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

Динамика спиновых волн в магнитных микроструктурах с нарушением трансляционной симметрии.

АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 431 группы
направления 03.03.03 «Радиофизика»

факультета нелинейных процессов

Мартышкина Александра Александровича

Научный руководитель
к.ф.-м.н.

дата, подпись

Садовников А.В.

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

дата, подпись

Короновский. А. А.

Саратов 2017 год

Введение.

В настоящее время подавляющее большинство цифровых микросхем основано на комплементарной структуре металл-оксид-полупроводник, которые обладают рядом недостатков, такие как отсутствие радиационной стойкости, проблемы связанные с термостабильностью, сложный технологический процесс изготовления, низкая плотность упаковки.

В связи с этим представляет большой интерес исследование распространения магнитостатических волн в нерегулярных планарных ферритовых волноводах, поскольку в устройствах спинтроники энергию или информацию переносит ток спинов, а не электрический ток. На основе этого эффекта имеет смысл создания новой компонентной базы микроэлектроники[1].

При создании таких микроструктур возникает потребность в волноводах, которые будут выполнять функцию соединения разных функциональных блоков в одном устройстве [2-5]. Большой интерес представляет исследование распространения магнитостатических волн в нерегулярных планарных ферритовых волноводах. Такая топология волноведущих структур обеспечивает как управление фазовыми характеристиками спиновых волн, так и локализацию энергии волны по мере её распространения вдоль структуры.

Целью данной работы является исследование динамики МСВ в нерегулярных L-образных ЖИГ волноводах микронных размеров. При помощи численного моделирования будут рассмотрено явление влияние анизотропии формы на распространение МСВ.

Схемы исследуемых структур и методы возбуждения спиновых волн.

В настоящей работе рассмотрены L-образные волноводы с закруглением и с перпендикулярным соединением (рис. 1). Для рассмотрения были взяты структуры из железо-иттриевого граната, поскольку этот материал оказался уникальной средой, в которой потери энергии спиновых волн как минимум на порядок меньше, чем в любых других магнитных материалах. Выбрано несколько волноводов толщиной 10 мкм и шириной от 250 до 2000 мкм. Рассматривается распространение магнитостатических волн в пленке. Внешнее магнитное поле H_0 направлено вдоль положительного направления оси x и составляет 600 Э. На концах волновода расположены идеально согласованные слои во избежание паразитных отражений от стенок.

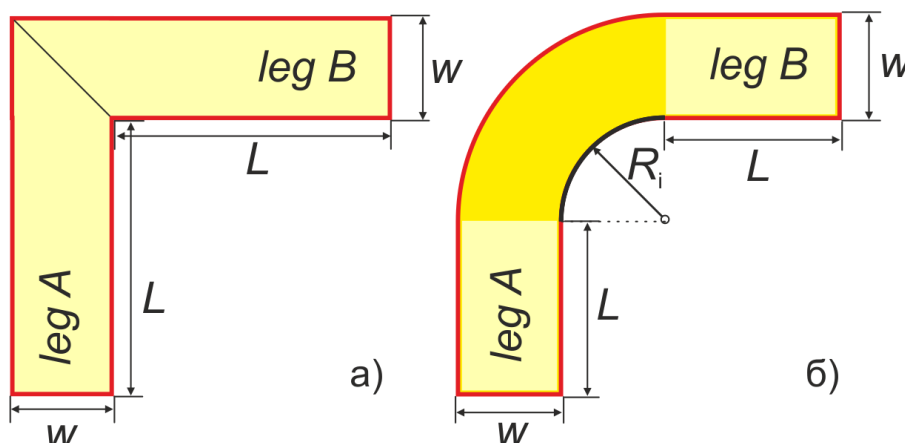


Рисунок 1 – схема L-образного волновода а) с перпендикулярным соединением б) с закруглением.

Одним из методов СВЧ-измерений является метод возбуждения и детектирования с помощью простых микрополосковых антенн СВЧ [6]. На разных краях волновода устанавливаются две микрополосковых антенны: вход и выход. Изменение ориентации поля позволяет возбуждать различные классы МСВ, но необходимо поддержания напряженности поля достаточной для полного насыщения материала. Сигнал на входе одной из антенн создает переменное магнитное поле, причем горизонтальная его составляющая ориентирована вдоль направления и сонаправлена с приложенным полем. Вертикальная составляющая оказывает влияние на прецессию спинов,

которое передается в сторону выходной антенны. Когда спин-волна доходит до выходной антенны обратный процесс возбуждает ток в ней, детектируемый в данном методе. В данной работе, также, рассматривается возможность возбуждения спиновых волн точечным элементом в нерегулярной части волновода.

Распределение внутреннего поля в зависимости от ширины волновода.

Смещение частот возбуждения спиновых волн.

В работе «Theory of dipole-exchange spin wave spectrum for ferromagnetic films with mixed exchange boundary conditions» Калиникосом В.А. и Славиным А.Н. была разработана теория дисперсионных характеристик спиновых волн в ферромагнетиках, как с учётом диполь-дипольного, так и обменного взаимодействия [7]. Аналитически были получены дисперсионные уравнения с использованием классической теории возмущений.

$$\omega^2 = (\omega_H + \omega_M - \omega_M P)(\omega_H + \omega_M P \sin^2 \varphi), \quad (1)$$

$$P = 1 - \frac{1}{kS}(1 - \exp(-kS))$$

Также была рассмотрено изменение спектра спиновой волны за счёт анизотропии поверхности. Действительно, рассчитав внутренне магнитное поле в волноводе с закруглённой частью, можно видеть (рис.2.) отличие распределения полей для левой и правой части волновода. При изменении ориентации внешнего магнитного поля изменяется и внутреннее поле ферромагнетика. Для выбранного направления внешнего касательно намагниченного поля в левом плече волновода возможно возбуждение ПМСВ, для правого плеча – ООМСВ. Области возбуждения ПМСВ и ООМСВ выделены синим и красным прямоугольником соответственно.

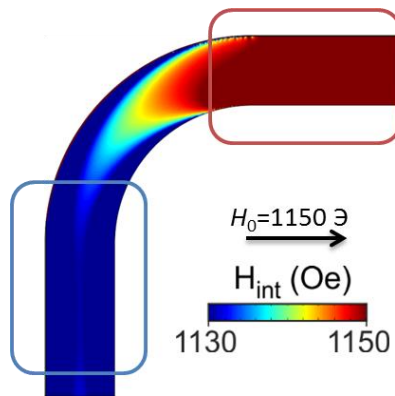


Рисунок 2 – Распределение статического магнитного поля в волноводе.

Построив дисперсионные кривые с помощью уравнения (1) для различных ширинных мод МСВ (рис.4), можно видеть, что спектры возбуждения ПМСВ и ООМСВ имеют область перекрытия.

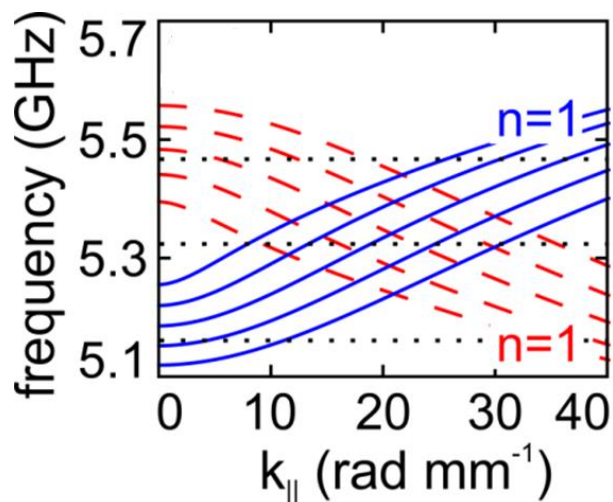


Рисунок 3 – Аналитически вычисленные дисперсионные кривые для различных ширинных мод МСВ. Кривые построены в порядке возрастания номера моды n , в диапазоне от $n=1$ до $n=5$ для обеих конфигураций МСВ.

Расчёт спектра ширинных мод методом конечных разностей в **numax3**.

Программа MuMax 3 позволяет решать временные и пространственные задачи эволюции намагниченности в нано и микро масштабах с использованием методов конечных разностей. Для решения

задач MuMax 3 применяет МКР в пространстве, которое разбивается сеткой. Размеры расчётной области брались, как $s_x = 1024$, $s_y = 1024$, $s_z = 10$. Величина постоянного внешнего магнитного поля $H_0 = 600$ Э. Параметры ЖИГ: намагниченность насыщения $4\pi M_0 = 1750$ Гс толщина плёнки ЖИГ $d = 10$ мкм, ширина обоих волноводов w от 250 до 2000 мкм, параметр затухания $a=1$.

Задача о распространении спиновых.

Для L-образного волноводов с перпендикулярным соединением и с закруглённой областью была решена задача о распространении спиновых волн во временной области. Возбуждение спиновой волны производилось микрополосковым элементом шириной 30 мкм в начале левого плеча волновода. Величина внешнего магнитного поля составляет 1150 Э. В программе MuMax 3 была смоделирована эволюция распространения m_z компоненты намагниченности при разных частотах (рис.4).

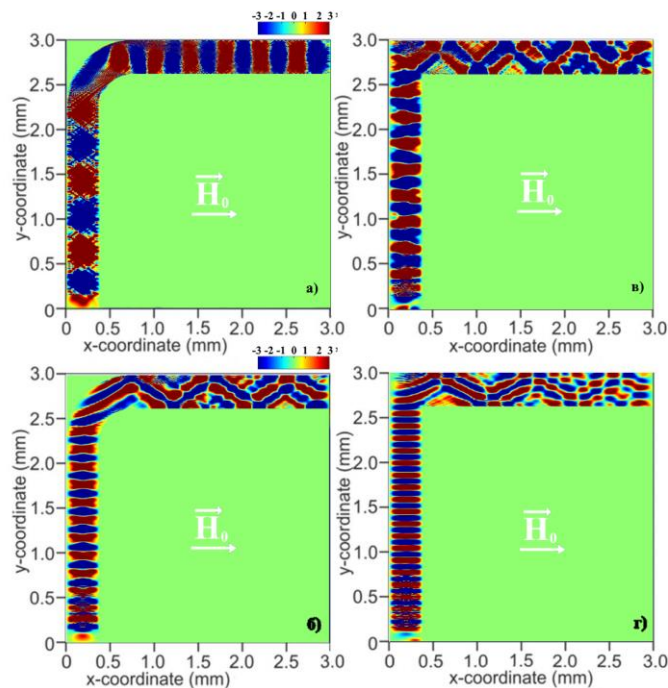


Рисунок 4 – Распределение m_z компоненты намагниченности для волноводов а),б) с закруглённой нерегулярной частью в),г) с перпендикулярным соединением.

Как видно из рис.5 Возбуждающаяся ПМСВ проходя через изгиб волновода, возбуждает ООМСВ, что подтверждает возможность возбуждения объёмно обратных спиновых волн с помощью поверхностных магнитостатических спиновых волн, и наоборот поверхностных с помощью объёмно обратных спиновых волн. При изменении частот возбуждения спиновой волны наблюдается изменение мод ООМСВ, таким образом мы можем управлять модовым составом ООМСВ в правом плече волновода. Экспериментальные данные полученные на установке Мандельштам-Брюллиэновской спектроскопии хорошо коррелируют с данными полученными методом математического моделирования (рис.6).

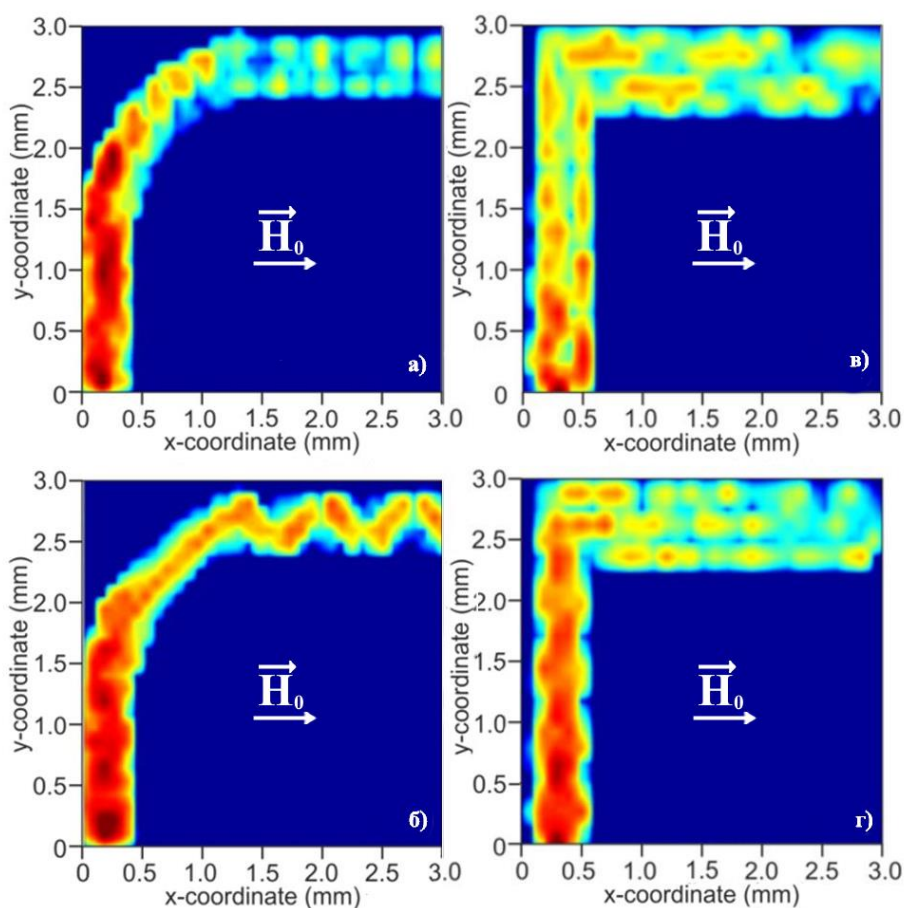


Рисунок 5 – Распределение намагниченности на частоте а) $f = 5.020GHz$,
б) $f = 5.035GHz$, в) $f = 5.020GHz$, , г) $f = 5.035GHz$.

Таким образом, волновод такой структуры можно использовать как трансформатор модового состава ООМСВ.

Построение дисперсионных характеристик.

Для волноводов с закруглённой нерегулярной частью разной ширины были получены дисперсионные характеристики для ПМСВ и ООМСВ. Решалась задача о распространении спиновой волны, возбуждаемой микрополосковым преобразователем, во временной области в программе MuMax 3. Форма сигнала задавалась в виде Фурье-импульса. Была выбрана узкая полоса значения намагниченности в серединах плечей волноводов (рис.6).

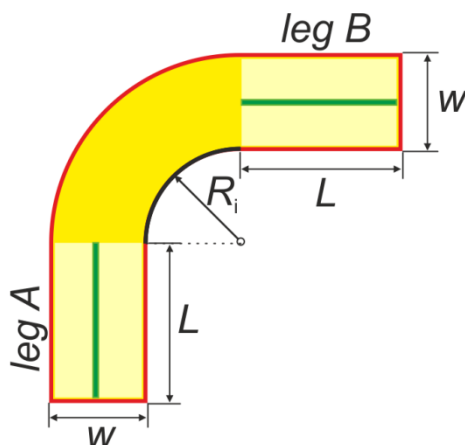


Рисунок 6 – Зелёными линиями показаны области в которых выбраны значения намагниченности для построения дисперсионных зависимостей.

В программном пакете Matlab реализовывалось преобразование Фурье по времени и координате, в результате чего получалась зависимость частоты от волнового числа. Выбирались волноводы шириной 250,500,750 и 2000 мкм. Частота возбуждения спиновой волны $f=5,5\text{GHz}$. Величина внешнего магнитного поля $H_0=1150$ Э.

Как видно из рис.7. частота возбуждения ПМСВ первой и последующих мод сильно зависит от ширины волновода, что хорошо совпадает с аналитически построенными дисперсионными кривыми. При

увеличении ширины волновода, внутреннее поле H_i все больше совпадает с H_{ext} , что говорит о меньшем влиянии анизотропии формы кристалла ЖИГ на внутреннее распределения поля в волноводе. При уменьшении ширины волновода, частота возбуждения ПМСВ уменьшается.

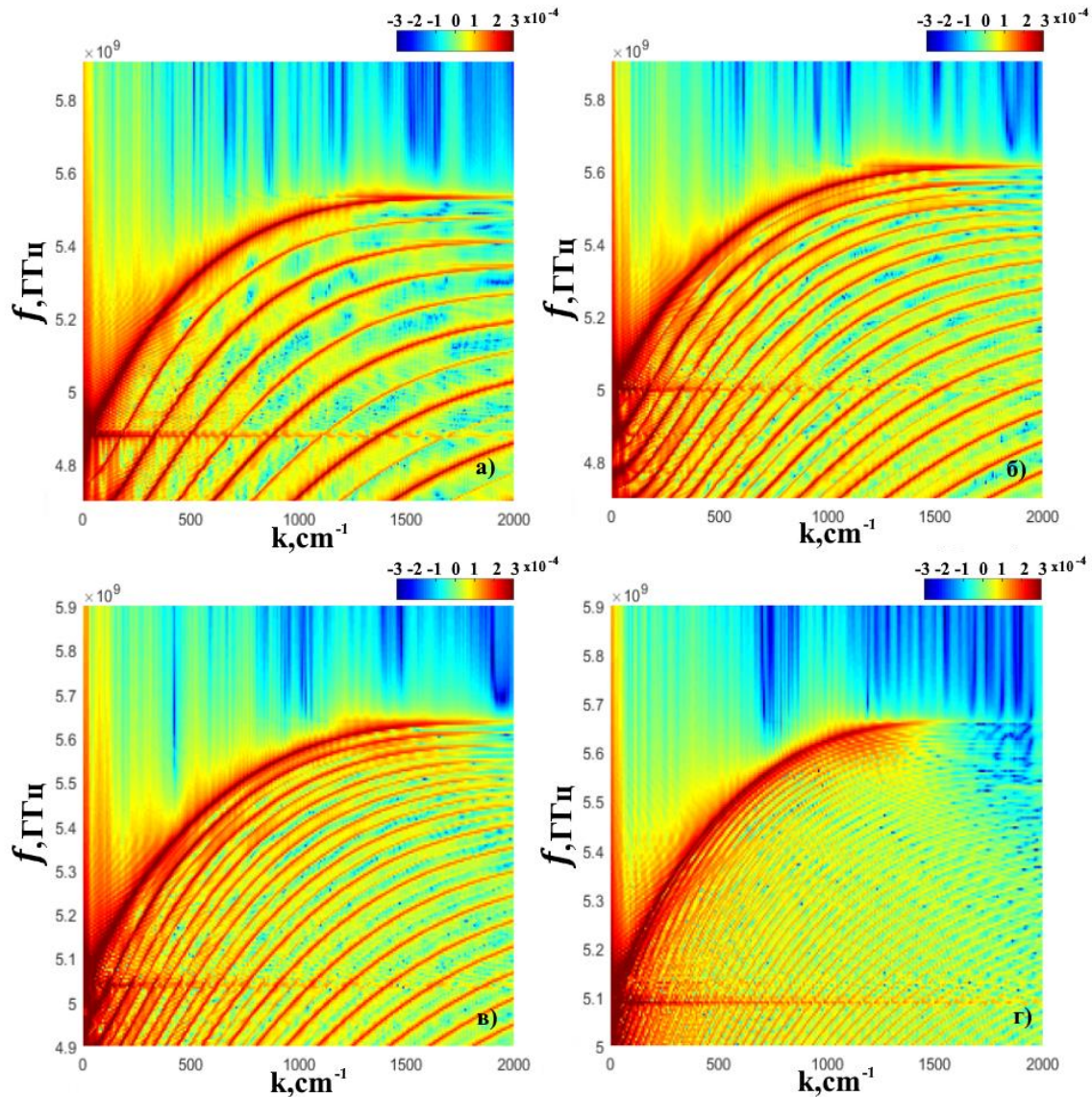


Рисунок 7 – Дисперсионные характеристики ПМСВ, возбуждаемые микрополосковым преобразователем, для ширины волновода а)250 мкм, б)500 мкм, в)750 мкм, г)2000мкм.

Для ООМСВ (рис.8) частота возбуждения первой и последующих мод не зависит от ширины волновода, поскольку внешнее магнитное поле H_{ext} коллинеарно волноводу.

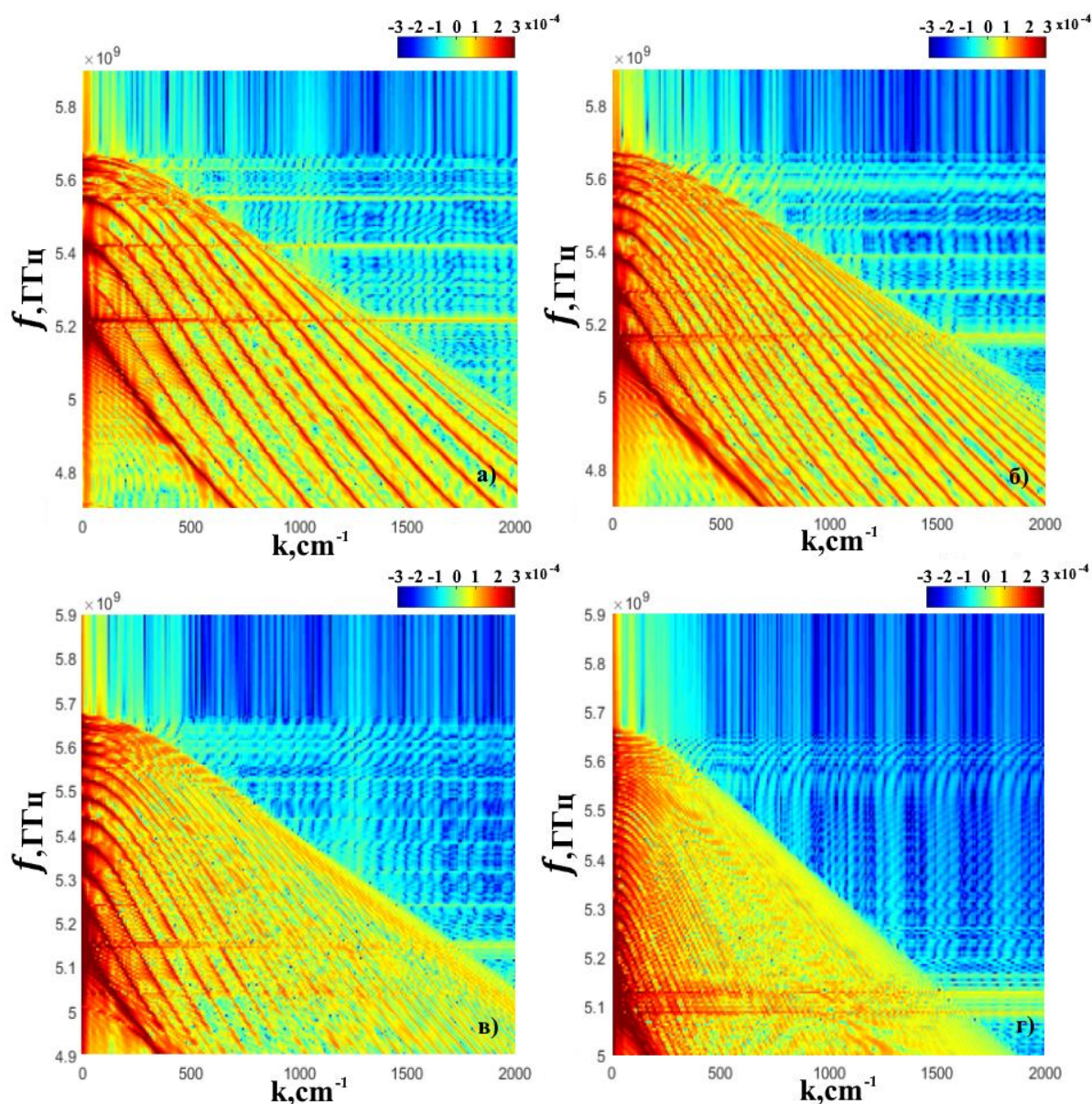


Рисунок 8 – Дисперсионные характеристики ООМСВ, возбуждаемые микрополосковым преобразователем, для ширины волновода а) 250 мкм, б) 500 мкм, в) 750 мкм, г) 2000 мкм.

Полученные с помощью возбуждения точечным элементом дисперсионные характеристики хорошо совпадают с дисперсионными характеристиками полученными с помощью микрополоскового преобразователя дисперсионными характеристиками, что говорит о правомерности такого метода возбуждения спиновых волн. Более того, полученные таким методом дисперсионные характеристики являются более

точными, поскольку при возбуждении спиновой волны с помощью точечного элемента возбуждения спектр волновых чисел больше, при тех же параметрах, чем при возбуждении спиновой волны микрополосковым элементом.

Перекрытие дисперсионных характеристик спиновых.

Смещение частот возбуждения ПМСВ позволяет управлять шириной спектра возбуждения ПМСВ с помощью ООМСВ, что хорошо видно из рис.9

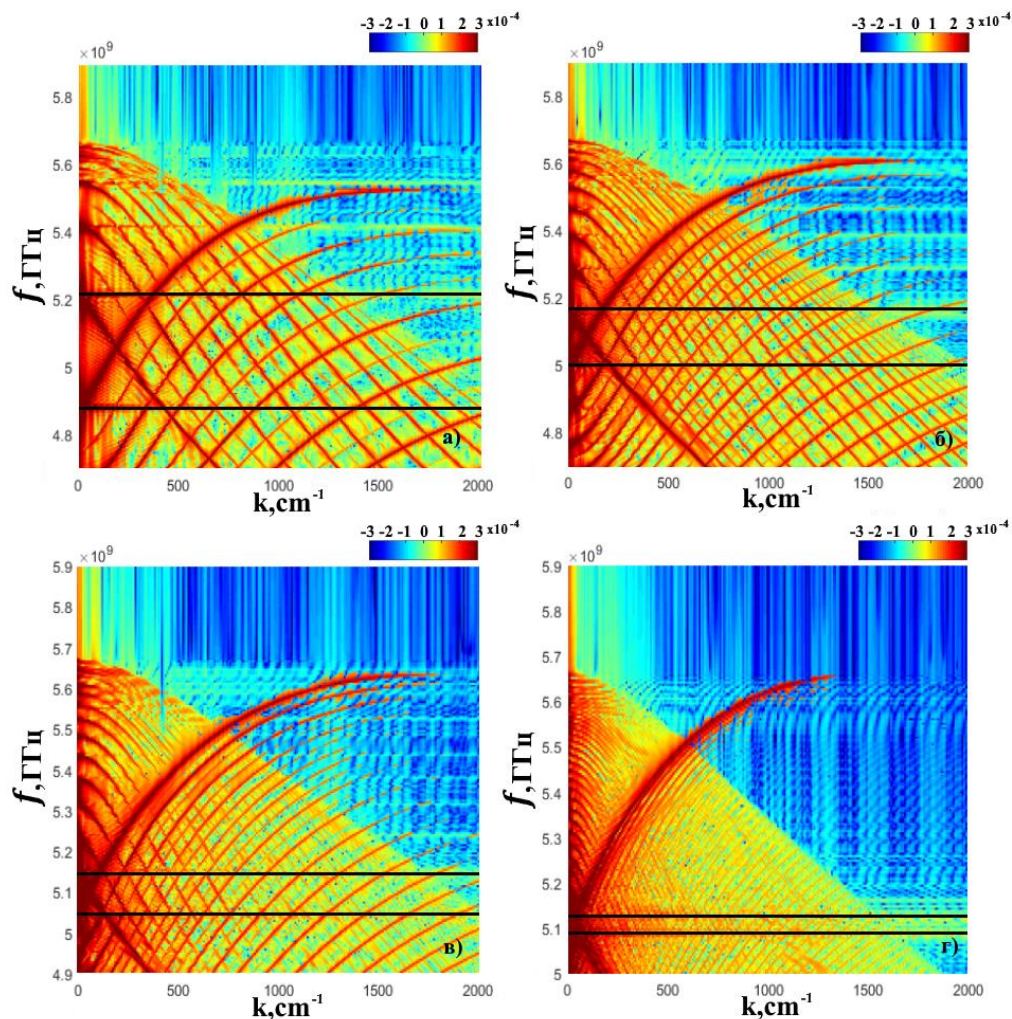


Рисунок 9 – Перекрытие дисперсионных характеристик спиновых волн, возбуждаемые микрополосковым преобразователем, для ширины волновода
а) 250 мкм, б) 500 мкм, в) 750 мкм, г) 2000 мкм.

При увеличении ширины волновода, перекрытие спектров уменьшается и для волновода шириной 2000 мкм можно наблюдать

предельный случай, когда спектр перекрытия ПМСВ и ООМСВ становится минимальным. Первая мода для обоих типов волн возбуждается на одной частоте.

Заключение.

В настоящей работе было проведено численное моделирование динамики распространения волн в L-образных волноводах с закруглением и перпендикулярным соединением.

Была показана возможность применения итерационной методики, основанной на методе конечных разностей во временной области для расчётов электродинамических характеристик L-образных структур.

Подтверждена возможность использования данной структуры в качестве СВ-поворота, что является важным свойством при создании компонентной базы микроэлектроники.

Данная структура может работать в качестве преобразователя мод спиновых волн.

Показана реализация уширения спектра возбуждения полосы частот ООМСВ с помощью ПМСВ, за счёт изменения ширины волновода.

Показана возможность возбуждения спиновой волны разными методами:

- С помощью микрополоскового элемента
- С помощью точечного источника возбуждения

На основе этого справедливо утверждение, что используя различные конфигурации структур плёнок ЖИГ волноводов, возможно создание ответвителя с в的外部 управляющим параметром в виде магнитного поля. Также необходим тщательный подбор ширины волновода и частоты возбуждения спиновой волны, так как их различная конфигурация может влиять на типы возбуждаемых мод.

Список используемых источников.

1. А. В. Вашковский, В. С. Стальмахов, Ю. П. Шараевский. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот, Изд-во Саратовского университета, 1993.
2. K. Vogt, H. Schultheiss, S. J. Hermsdoerfer, P. Pirro, A. A. Serga, and B. Hillebrands // Appl. Phys. Lett. 95, 182508 (2009).
3. V. E. Demidov, S. O. Demokritov, K. Rott, P. Krzysteczko, and G. Reiss //Appl. Phys. Lett. 92, 232503 (2008).
4. V. E. Demidov, J. Jersch, K. Rott, P. Krzysteczko, G. Reiss, and S. O. Demokritov //Phys. Rev. Lett. 102, 177207 (2009).
5. D. R. Birt, B. O’Gorman, M. Tsoi, X. Li, V. E. Demidov, and S. O. Demokritov //Appl. Phys. Lett. 95, 122510 (2009).
6. Xing, X.J., Yu, Y.L., Li, S.W. & Huang, X.H. How do spin waves pass through a bend? //Sci. Rep. 3, 2958; DOI:10.1038/srep02958 (2013).
7. B. A. Kalinikos and A. N. Slavin «Theory of dipole-exchange spin wave spectrum for ferromagnetic films with mixed exchange boundary conditions», //J. Phys. C: Solid State Phys. 19 (1986)