

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

Кафедра Электроники, колебаний и волн

**Методы расчета характеристик спиновых волн в касательно
намагниченных ЖИГ микроволноводах**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 225 группы

Направления 03.04.03 Радиофизика
Факультета нелинейных процессов
Стецюр-Мова Георгия Игоревича

Научный руководитель
к. ф.-м. н.,
доцент кафедры
физики открытых систем

_____ А. В. Садовников
подпись, дата

Зав. кафедрой электроники,
колебаний и волн, член-корр.РАН,
д.ф.-м.н., профессор

_____ Д.И. Трубецков
подпись, дата

Саратов 2017 г.

Введение

Исследование нерегулярных планарных ферритовых волноводов представляет большой интерес в настоящее время, поскольку такая топология волноведущих структур обеспечивает как управление фазовыми характеристиками спиновых волн, так и локализацию энергии волны по мере ее распространения вдоль структуры. Последняя особенность представляет интерес для нелинейных приложений на основе нерегулярных структур, изготовленных из тонких пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ). Такие структуры могут быть использованы как базовые элементы для создания различных устройств функциональной магнитоэлектроники: волноводов, фазовращателей, мультиплексоров, фильтров и ответвителей.

Актуальность фундаментальных и прикладных исследований магнитных явлений и волновых процессов в различных магнитоупорядоченных средах и структурах на основе ферритов обусловлена следующими причинами.

Во-первых, анизотропия ферритовых структур дает возможность возбуждать в них спиновые волны с неколлинеарным характером (когда векторы фазовой и групповой скорости неколлинеарны), характеризующиеся отличными от законов геометрической оптики изотропных сред закономерностями распространения, отражения и преломления.

Во-вторых, наличие в самих ферритовых кристаллах различных типов взаимодействий (таких как дипольное, обменное, магнитоупругое, магнитооптическое) позволяет реализовать в этих кристаллах такие эффекты и явления, которые принципиально невозможно реализовать в изотропных средах.

В-третьих, поскольку в последние годы заметное развитие получила технология изготовления мета-материалов, с помощью которых пытаются искусственно создать среды, имитирующие, например, «магнитную стенку» или отрицательные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей,

то, естественно ожидать, что использование магнитоупорядоченных сред в составе мета- материалов позволит получить искусственные среды и структуры с совершенно новыми, необычными свойствами, которые могут найти применение в твердотельной электронике, радиолокации и при создании новых радиопоглощающих материалов.

В-четвертых, в связи с тем, что недавно рабочие частоты компьютеров, приборов связи и телекоммуникаций достигли СВЧ диапазона, возникают как реальные перспективы использования в указанной технике ряда устройств спинволновой электроники, так и необходимость исследования электромагнитной совместимости отдельных устройств в составе различных приборов (к примеру, любой жесткий диск компьютера упрощенно представляет собой плоский ферритовый слой с доменной структурой (ДС), в котором вполне могут возникать различные спинволновые возбуждения в диапазоне частот 100 – 3000 МГц, то есть именно на рабочих частотах процессора). Из изложенного выше очевидна актуальность исследования различных эффектов, явлений и характеристик волновых процессов в ферритовых пленках и структурах при распространении в них дипольных спиновых волн, называемых обычно магнитоэластическими волнами (МЭВ).

Данная магистерская работа состоит из двух глав. Первая глава является обзорной и состоит из обзора актуальных статей, связанных с темой магистерской работы, пояснения особенностей исследований ферромагнитных структур, а также обзора программных продуктов, которые были использованы в процессе решения поставленных задач. Вторая глава магистерской работы состоит из обзора экспериментальных данных, полученных при решении поставленных в работе задач, их сравнение с теоретическими данными, выявление закономерностей и описания выводов по решенным задачам.

В данной работе будет исследована динамика распространения МЭВ в прямоугольном ЖИГ волноводе микронных размеров. Продемонстрирована

возможность трансформации модового состава МСВ, распространяющейся в волноводе. Будет проведено исследования ферритового волновода в виде касательно намагниченной пленки железо - иттриевого граната (ЖИГ) конечных размеров. С помощью численного решения уравнения движения намагниченности будет проведен расчет собственных мод такой структуры и полей размагничивания.

На защиту, по данной магистерской работе будут выноситься следующие задачи:

- Задача о расчете спектра прохождения в волноведущей структуре
- Задача о расчете дисперсионных характеристик ЖИГ волновода конечной ширины
- Задача о распределении статической намагниченности (микромагнитное моделирование)

Основное содержание работы

Исследуемая Модель.

Прямоугольный волновод на основе плёнки железо-иттриевого граната с параметрами:

Ширина $w = 150-2000$ мкм

Толщина $d = 10$ мкм

Длина $L = 8000$ мкм

Намагниченность плёнки $M_0 = 1750 / 4\pi$ Гс

Внешнее магнитное поле $H_0 = 1300$ Э

затухание $\alpha = 10e-5$

Подложка гадолиний-галлиевый гранат

Образец имеет периодические граничные условия, для предотвращения образования доменных структур и области увеличенной диссипации на границах структуры при $y=0$ и $y=L$, для предотвращения влияния отражённых волн на результаты численного эксперимента.

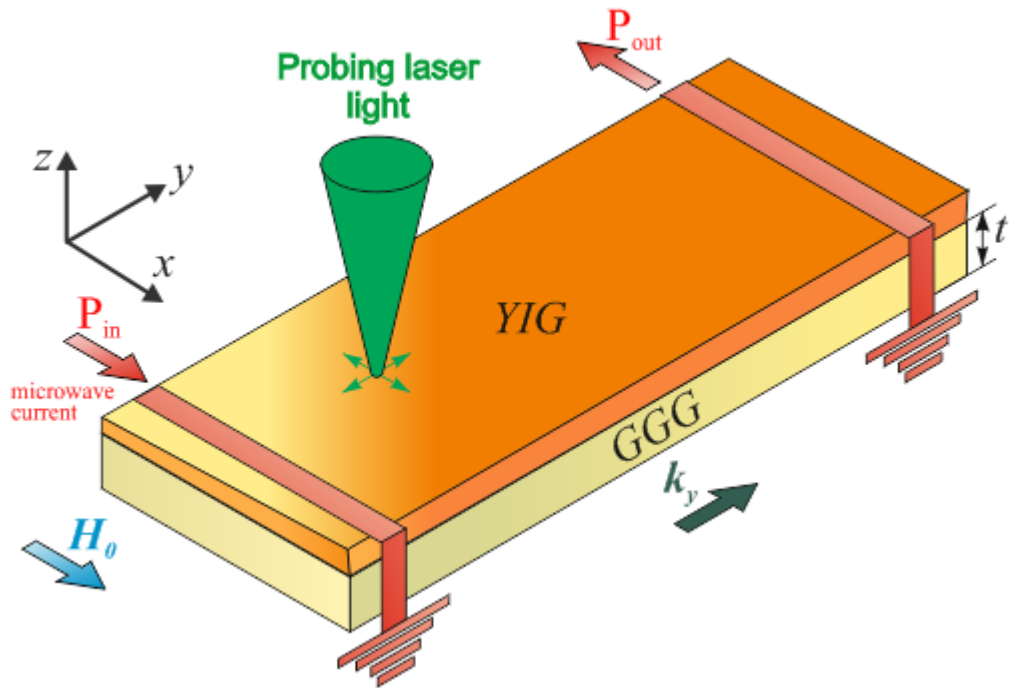


Рисунок 1. Исследуемая модель (волновод на основе железо-иттриевого граната.)

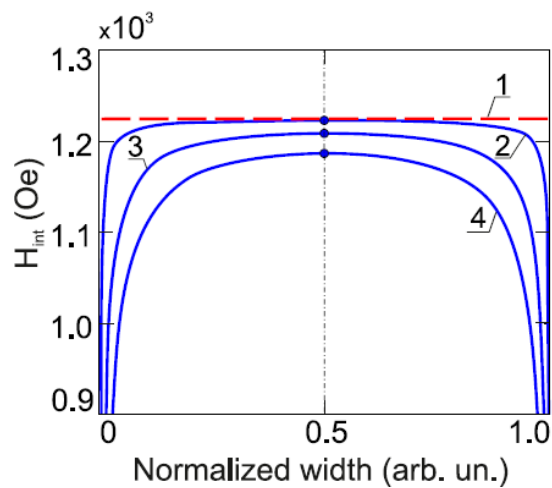


Рисунок 2. Распределение внутреннего поля для ЖИГ волноводов различной ширины. (3000 мкм, 2- ширина волновода 3000 мкм, 3 - ширина волновода 1000 мкм, 4- ширина

волновода 500 мкм). Пунктирной линией 1 показано значение магнитного поля, равное 1225 Э.

Задача о расчете спектра прохождения в волноведущей структуре.

Решение задачи о расчете спектра прохождения имеет два способа решения:

1.Способ – задать различные частоты f , затем найти спектр прохождения для каждой из частот $T = P_{\text{выходящ}}(f) / P_{\text{входящ}}(f)$ и построить график $T(f)$ -сила сигнала от частоты.

2.Способ – Задаём импульс, делаем Фурье-преобразование этого импульса, строим график одной компоненты намагничивания (mz) от f , и затем строим спектр прохождения.

Выбираем 2.способ решения данной задачи.

Имеем следующую волноведущую структуру:

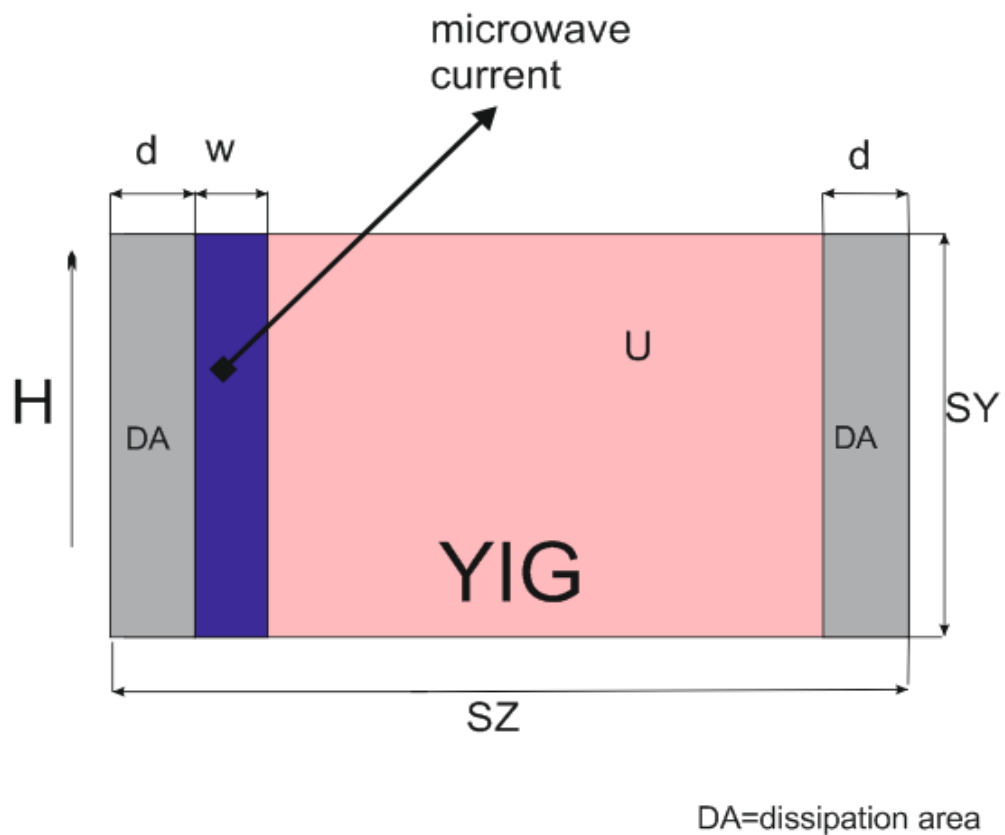


Рисунок 3. Волноведущая структура на основе железо-иттриевого граната.

Для данной задачи возьмём набор волноведущих структур различной ширины. То есть все параметры волноведущих структур сохраняются, различными будут только значения SY.

Возьмём следующий набор параметров:

SY1=150 мкр

SY2=200 мкр;

SY3=250 мкр;

SY4=500 мкр;

SY5=1000 мкр;

Для каждой ширины волновода будем строить спектр прохождения и дисперсионную характеристику.

Для решения данной задачи разобьём нашу волноведущую структуру на следующие зоны:

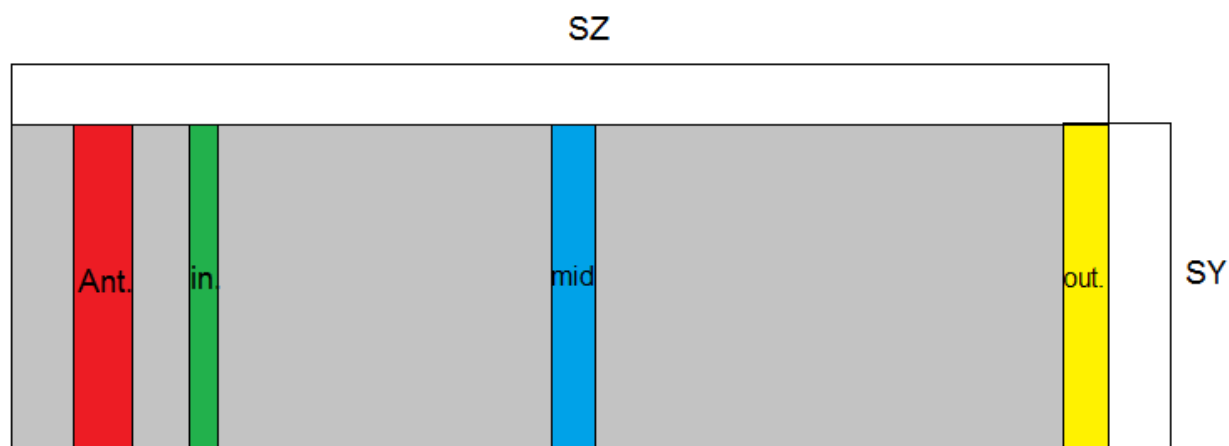


Рисунок 4. Расположение зон волноведущей структуры

Ant. - зона расположения антенны на волноводе.

In. - Зона непосредственно вблизи расположения антенны.

mid. – Зона середины волновода.

out. – Зона края волноведущей структуры.

Для расчета задачи мной были использованы такие программные продукты как MuMax и MatLab.

Расчет дисперсионных характеристик ЖИГ волновода конечной ширины.

Описание методики численного моделирования структуры методом конечных элементов.

Рассмотрим структуру (рисунок 5). Для численного моделирования такой структуры используем метод конечных элементов реализованный в программном продукте Comsol. Суть метода заключается в том, что расчетная область разбивается на конечные элементы, в пределах каждого конечного элемента компоненты поля аппроксимируются с помощью простых полиномиальных функций. Коэффициенты полиномов выражаются через значения компонент полей в конечном числе точек, лежащих на границе и внутри элемента. Дискретизация уравнений в частных производных осуществляется одним из подходящих для каждой конкретной задачи методов – вариационным методом, методом Галеркина и т.д. В нашем случае используется вариационный подход. Далее задача сводится к решению обобщенной проблемы собственных значений для больших разреженных матриц. В результате получаем распределение поля собственной моды и величину k , то есть точку на дисперсионной характеристике. Повторив вычисления для нужного количества точек в заданном диапазоне частот, можно рассчитать всю дисперсионную характеристику и соответствующие распределения полей.

Поскольку волновод является периодической системой, то для моделирования распространения в ней собственных волн достаточно рассмотреть один период структуры.

При моделировании необходимо разбить расчетную область на конечные элементы треугольной формы. В данном случае была выбрана треугольная сетка с минимальным размером элемента $d_{\min}=0.183$ мкм и максимальным

размером элемента $d_{\max}=48.8$ мкм. На рис. 4 приведена схема разбиения расчетной области, при этом видно, что размер треугольного элемента уменьшался на границах и изломах ферритовой структуры.

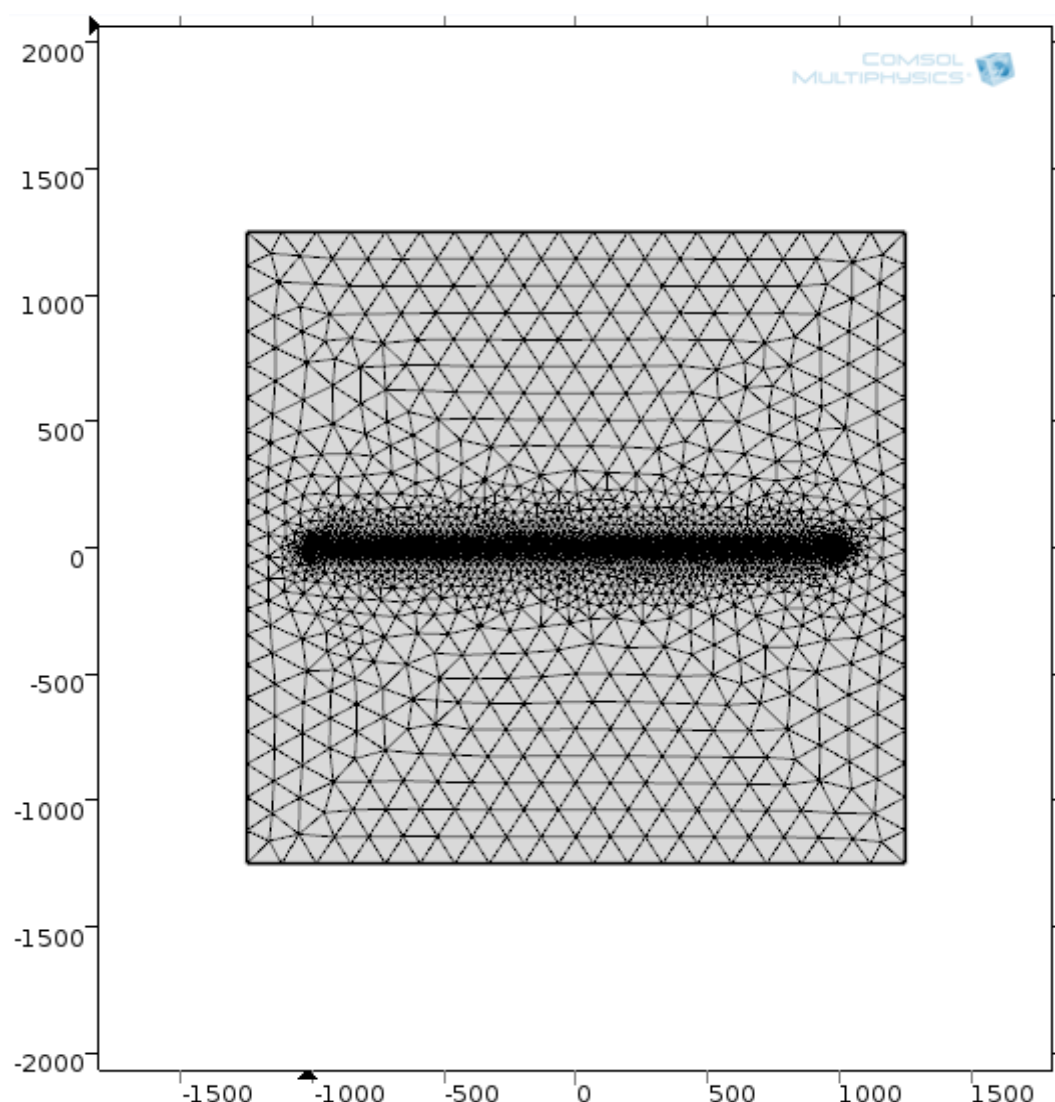


Рисунок 5. Схема разбиения расчетной области на конечные элементы треугольной формы.

Описание тестового расчета.

Поскольку рассматриваемая волноведущая структура является ограниченной по двум направлениям при расчете электродинамических характеристик необходимо учитывать спектр волноводных собственных мод. Поскольку рассматривается распространение ПМСВ, то в задаче рассматриваются лишь ширинные моды, обусловленные квантованием проекции волнового числа на

ось x (в случае рассмотрения объемных волн необходимо также принимать во внимание существование толщинных мод, возникающих из-за квантования проекции волнового числа на ось y).

Проведен расчет дисперсии ПМСВ в рассматриваемой структуре при помощи программы в расчетной системе COMSOL. В результате выполнения программы получают наборы волновых чисел. На следующем этапе отсеиваются волновые числа, имеющие комплексные значения, поскольку в реальной структуре могут существовать и быть измерены колебания только с действительными волновыми числами. Для идентификации принадлежности волновых чисел к определенным модам, рассматриваются распределения полей, например, компоненты E_x . На основе этих распределений получаем 3 волновых числа соответствующие первым трем модам в волноводе. Результаты расчета показаны - характерные картины распределения величин напряженностей электрического $|\vec{E}|$ и магнитного $|\vec{H}|$ полей показаны для первых трех ширинных мод.

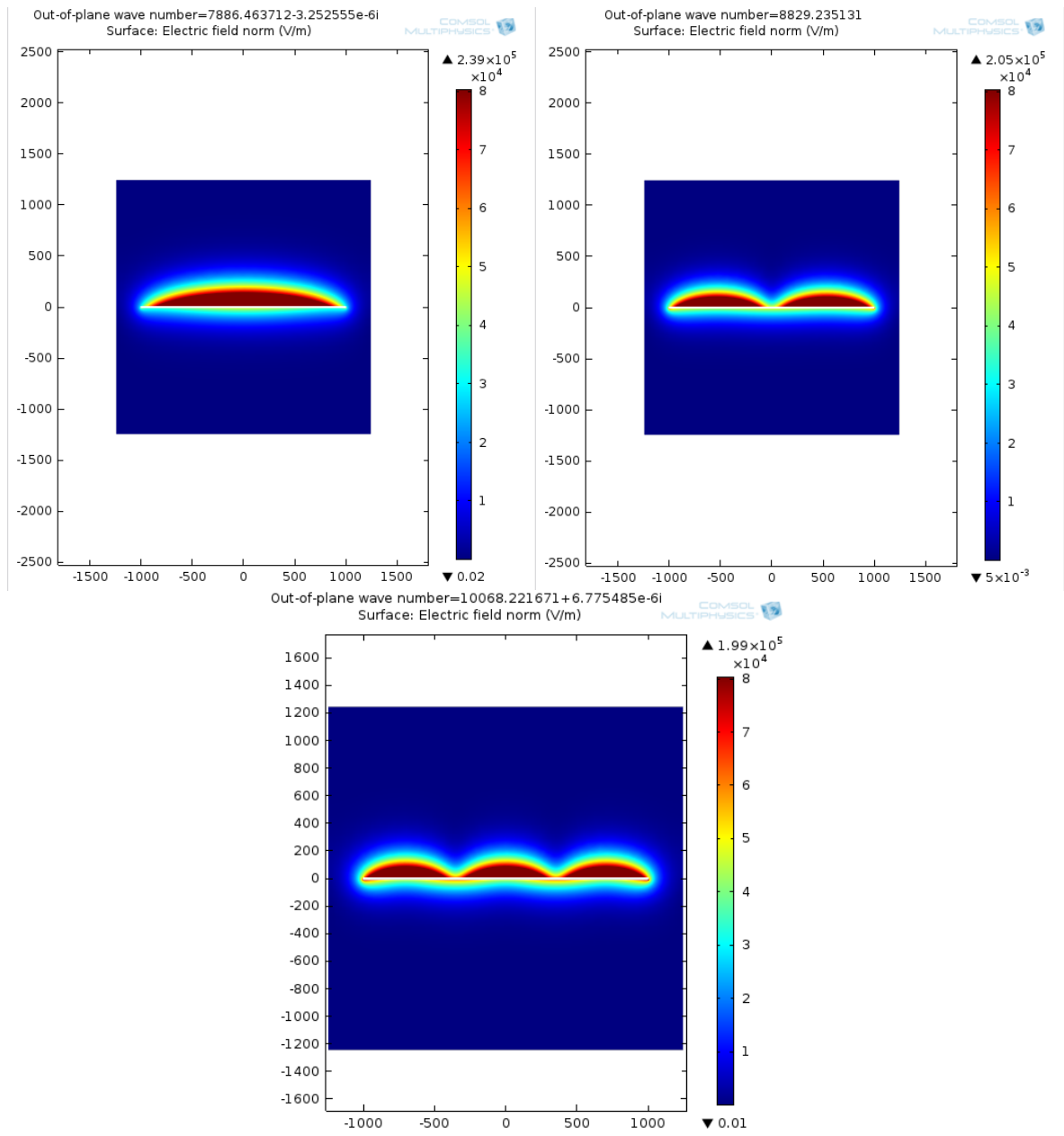


Рисунок 6. Визуальное распределение первой, второй, третьей моды соответственно.

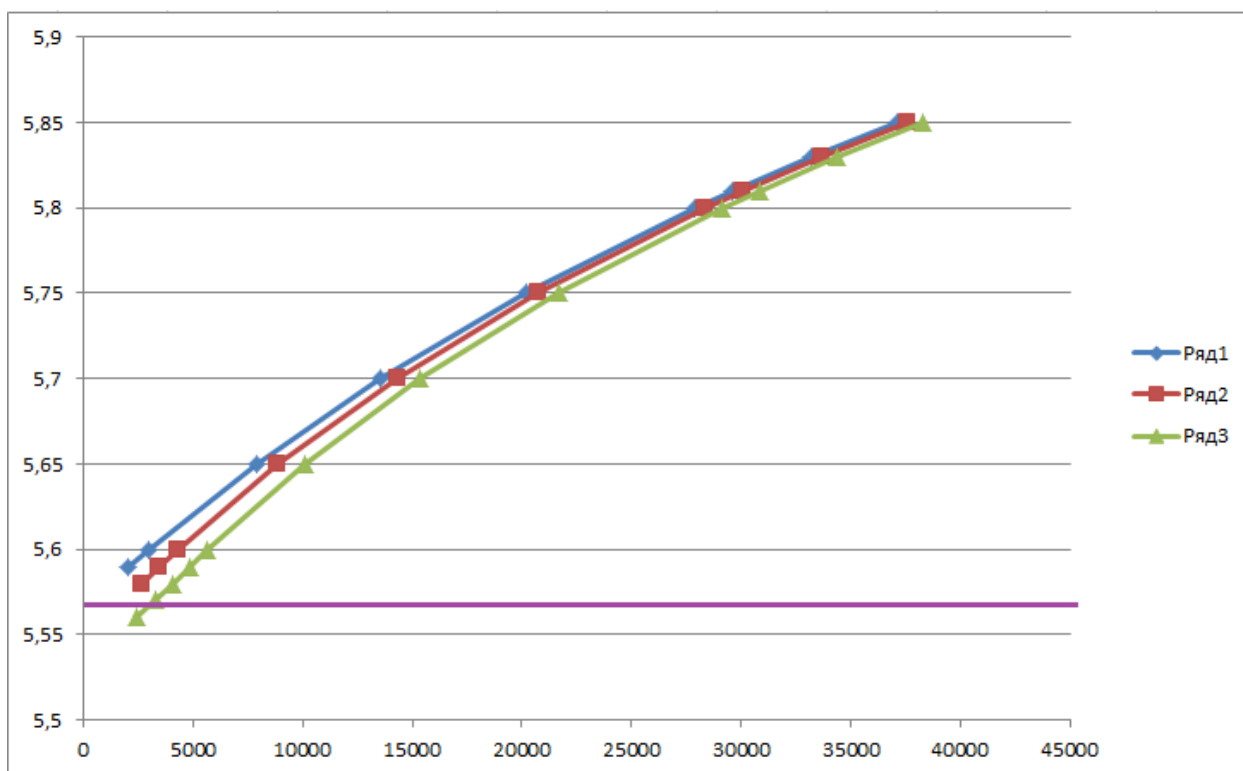


Рисунок 7. График зависимости волнового числа k (по оси абсцисс), от частоты f (по оси ординат).

На рисунке 7 представлена дисперсионная характеристика для первых трех ширинных мод ПМСВ в нашем волноводе.

Решение задачи о распределении статической намагниченности (микромагнитное моделирование).

Рассмотрим структуру, представляющую собой параллелепипед с линейными размерами (ограниченную по ширине пленку ЖИГ, рис. 6.).

Будем решать задачу о распределении векторов намагниченности в рассматриваемой структуре, помещенной во внешнее постоянное магнитное поле. Для решения задачи воспользуемся программой **OOMMF**.

Постановка задачи численного моделирования производится путем задания геометрии, материальных параметров структуры и параметров численной схемы в файле расширения **mif**.

Запустив этот файл в программе получим такое распределение векторов намагниченности :

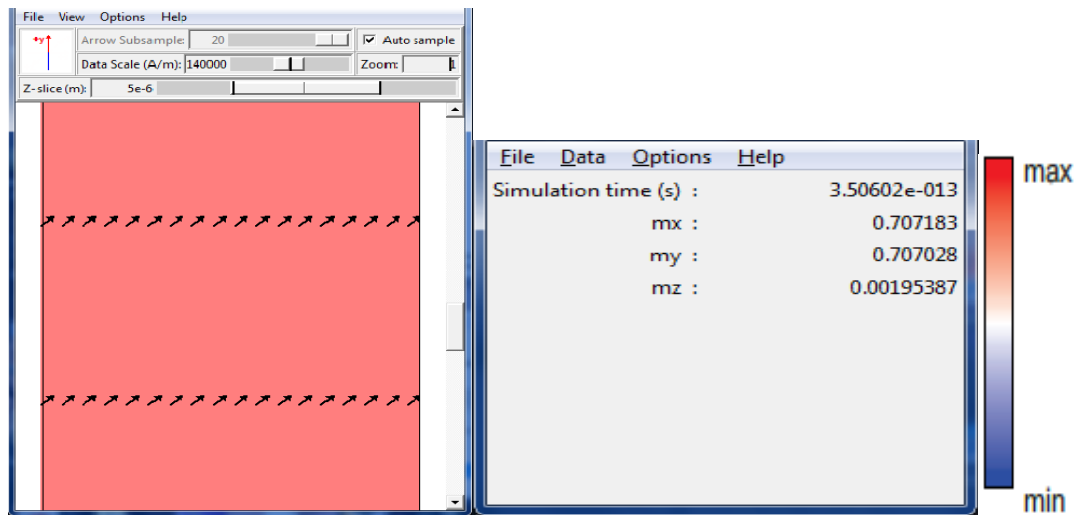


Рисунок 8. Распределение векторов намагниченности в ЖИГ волноводе (рядом указаны: значения времени, x-, y-, z- компоненты намагниченности; цветом указана y- компонента намагниченности, здесь указана цветовая шкала минимум-максимум y-компонент)

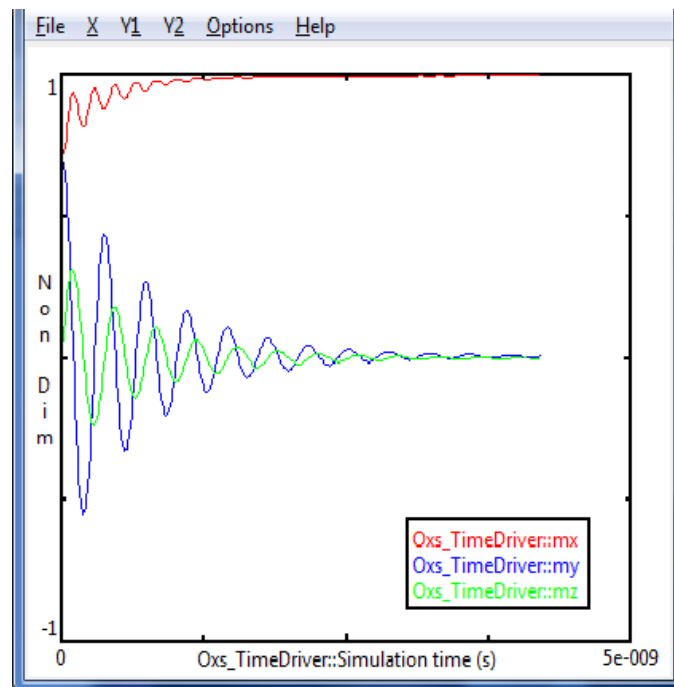


Рисунок 9. Распределение векторов намагниченности в момент времени 4.21нс

В целом, в момент времени 4.21 нс y-компонента намагниченности будет нулевая (белый цвет), но у краев видно, что намагниченность будет направлена по-разному (чередование красного и синего), т.е. она будет

неоднородно распределена. Относительно большое затухание ($setalpha0\ 5e-2$) приводит релаксации вдоль оси x (см. график на рис. 9). На краях видно, что намагниченность направлена вдоль отрицательного направления оси y .

На рис.10 изображен график зависимости полной энергии от времени. По графику видно, что в определенный момент времени энергия достигает минимума и затем остается неизменной, т.е. система достигает равновесия.

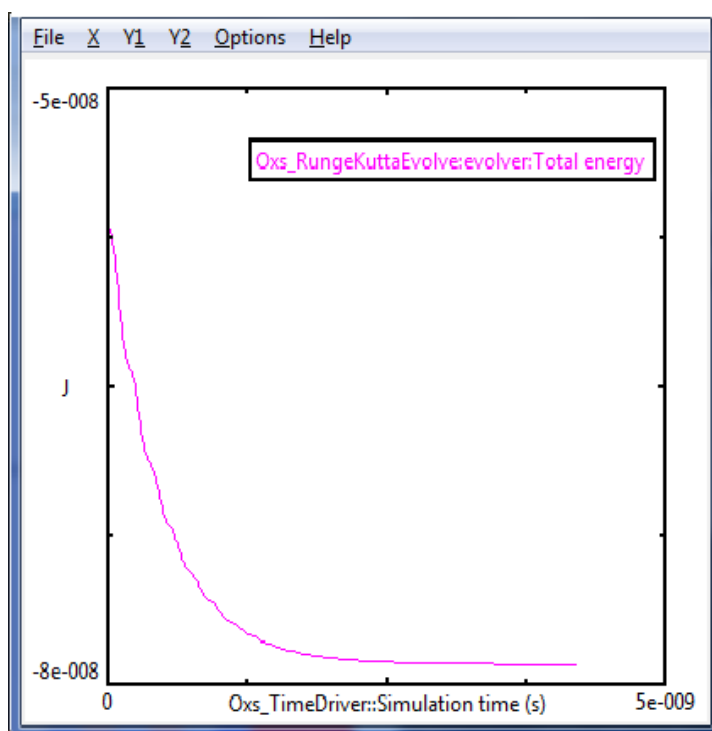


Рисунок 10. График зависимости энергии от времени

Заключение

Таким образом, в данной магистерской работе проведено исследование характеристик магнитоэлектрических волн, распространяющихся в ферромагнитных тонкопленочных волноведущих структурах конечной ширины. С помощью метода конечных элементов проведен расчет дисперсионных характеристик поверхностных магнитоэлектрических волн, распространяющихся в волноводе, созданном на основе пленки железо-иттриевого граната. Методом микромагнитного моделирования во временной области для решения уравнения движения намагниченности проведен расчет поиска состояния с минимальной энергией в структуре, представляющей собой ферромагнитный волновод конечной ширины. Проведен расчет внутреннего магнитного поля для касательно намагниченной волноведущей структуры. Результаты микромагнитного моделирования в дальнейшем могут быть использованы для решения задачи о возбуждении и распространении магнитоэлектрических волн в нерегулярных ферритовых волноводах сложной формы.

Список используемых источников

- 1) А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков « Магнитные колебания и волны », Физматлит, 1994, с. 16-30, 40-47
- 2) А. В. Вашковский, В. С. Стальмахов, Ю. П. Шараевский « Магнитоэлектронные волны в электронике сверхвысоких частот », Изд-во Саратовского университета, 1993, с. 14-24
- 3) Б. А. Калининос « Спиновые волны в ферромагнитных пленках », Соросовский образовательный журнал, №5, 1996, с. 93-100
- 4) Н. М. Харитонов «Стабилизация установки частоты ЖИГ-фильтров в измерительных СВЧ-приборах », Доклады ТУСУРа , №2(24), часть1, декабрь 2011, с. 34-39
- 5) « OOMMF user's guide », October 30, 2002, с.16-20
- 6) S. N. Vajpai «Excitation of magnetostatic surface waves: Effect of finite sample width», Department of Electrical Engineering, State University of New York at Stony Brook, New York 17794
- 7) A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B. Van Waeyenberge « The design and verification of MuMax3 », AIP Publishing, 2014