

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

Кафедра физики открытых систем

**Исследование амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик
планарных магнитных микроструктур**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4041 группы

направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии»

код и наименование направления

института физики

наименование факультета

Байкова Сергея Сергеевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

Ассистент

должность, уч. ст., уч. зв.

личная подпись,
дата

Д.В. Романенко

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

В настоящее время большой интерес представляет исследование волноведущих слоистых структур на основе ферритовых структур, таких как плёнки железо-иттриевого граната (ЖИГ). Ферриты или ферримангнетики – это вещества, обладающие в отсутствие внешнего магнитного поля упорядоченной магнитной структурой. Также они обладают спонтанной «шахматной» упорядоченностью, но из-за различия моментов направленных в разные стороны, имеет место большой результирующий магнитный момент[1]. В подобных структурах имеет место распространение спиновых волн.

Спиновые волны – собственные возбуждения электронной подсистемы спинов в магнитоупорядоченных средах, наблюдаемые в ферро-, ферри- и антиферромагнетиках[2]. Из-за существования в магнитных кристаллах нескольких сил «упругости», а именно, связанных с магнитным (дипольным) взаимодействием и с квантовым обменным взаимодействием, возможно распространение в них двух видов волновых возмущений. Если длина волны значительно превышает размер кристаллической решетки, то в этой структуре могут распространяться медленные волны, называемые магнитостатическими волнами (МСВ). А при длине волны возмущения чуть большей или сравнимой с размерами кристаллической решетки, то характерные черты волн обусловлены, в основном, обменным взаимодействием, и такие волны называются спиновые волны[3,4]. Три различных класса (часто называемых модами) МСВ могут быть возбуждены и распространяться в тонком магнитном волноводе. Это - прямые объёмные магнитостатические спиновые волны (ПОМСВ), обратные объёмные магнитостатические волн (ООМСВ) и поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ), которые были рассмотрены в данной работе.

Пленка железо-иттриевого граната $Y_3Fe_5O_{12}$ (ЖИГ) была выбрана, для этих исследований, так как этот материал оказался уникальной средой, для

распространения спиновых волн, в котором потери энергии этих волн на порядок меньше, чем в любых других магнитных материалах.

Целью данной работы является исследование амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик планарных магнитных микроструктур при различной вариации ширин волноводов.

Работа состоит из 3 глав: методы исследования волновых процессов в магнитных структурах, распространение магнитостатической волны в одиночном ферромагнитном волноводе, численное моделирование в MuMax 3.

Описание работы

В программе MuMax 3 решаются временные и пространственная задачи эволюции намагниченности в нано и микро масштабах с использованием методов конечных разностей. Так как данное программное обеспечение не требует большого использования памяти для высокой производительности, то с его помощью могут быть проведены масштабные расчёты на недорогом оборудовании[8].

Для решения задач MuMax 3 применяет метод конечных разностей в пространстве, которое разбивается на ромбическую сетку. Такие величины как намагниченность и величина поля рассматриваются в центре каждой ячейки. А величины вроде сил обмена рассматриваются на границах меж ячеек. Для того чтобы сохранить в памяти пространственно-зависимые параметры, каждой ячейке приписывается индекс от 0 до 256. Различные индексы соответствуют различным материалам. Фактические параметры материалов хранятся в таблице из 256 элементов, индексированных по индексу ячейки области. Парные параметры, такие как силы обмена, хранятся в треугольной матрице и индексируются по номерам областей двух взаимодействующих ячеек. Это позволяет создать обменную связь между всеми парами материалов. В дополнение к пространственной зависимости, параметры материалов в каждом регионе могут зависеть от времени, учитывая, что существует по одной произвольной функции времени в каждой области. Для описания вынужденных колебаний вектора намагниченности используется уравнение Ландау – Лифшица [3,5,6], имеющее вид:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = \gamma [\mathbf{H}_{eff} \times \mathbf{M}] + \frac{\alpha}{M_0} \left[\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right]$$

где $\mathbf{M}$ – вектор намагниченности;

γ –гиромагнитное отношение;

α – параметр затухания;

H_{eff} – эффективное магнитное поле;

Если длина волны значительно превышает размер кристаллической решетки, то в этой структуре могут распространяться медленные волны, называемые магнитостатическими волнами (МСВ). А при длине волны возмущения чуть большей или сравнимой с размерами кристаллической решетки, то характерные черты волн обусловлены, в основном, обменным взаимодействием, и такие волны называются спиновые волны [3,4]. Три различных класса (часто называемых модами) МСВ могут быть возбуждены и распространяться в тонком магнитном волноводе. Это - прямые объёмные магнитостатические спиновые волны (ПОМСВ), обратные объёмные магнитостатические волн (ООМСВ) и поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ), которые были рассмотрены в данной работе.

MuMax3 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. Это позволяет определить сложные и параметрические формы в программе.

Для обработки данных, полученных с помощью численного моделирования, использовался программный код на базе языка MATLAB.

Язык MATLAB является высокоуровневым интерпретируемым языком программирования, включающим основанные на матрицах структуры данных, широкий спектр функций, интегрированную среду разработки, объектно-ориентированные возможности и интерфейсы к программам, написанным на других языках программирования.

Программы, написанные на MATLAB, бывают двух типов — функции и скрипты. Функции имеют входные и выходные аргументы, а также

собственное рабочее пространство для хранения промежуточных результатов вычислений и переменных. Скрипты же используют общее рабочее пространство. Как скрипты, так и функции сохраняются в виде текстовых файлов и компилируются в машинный код динамически. Существует также возможность сохранять так называемые *pre-parsed* программы — функции и скрипты, обработанные в вид, удобный для машинного исполнения. В общем случае такие программы выполняются быстрее обычных, особенно если функция содержит команды построения графиков.

Основной особенностью языка MATLAB являются его широкие возможности по работе с матрицами.

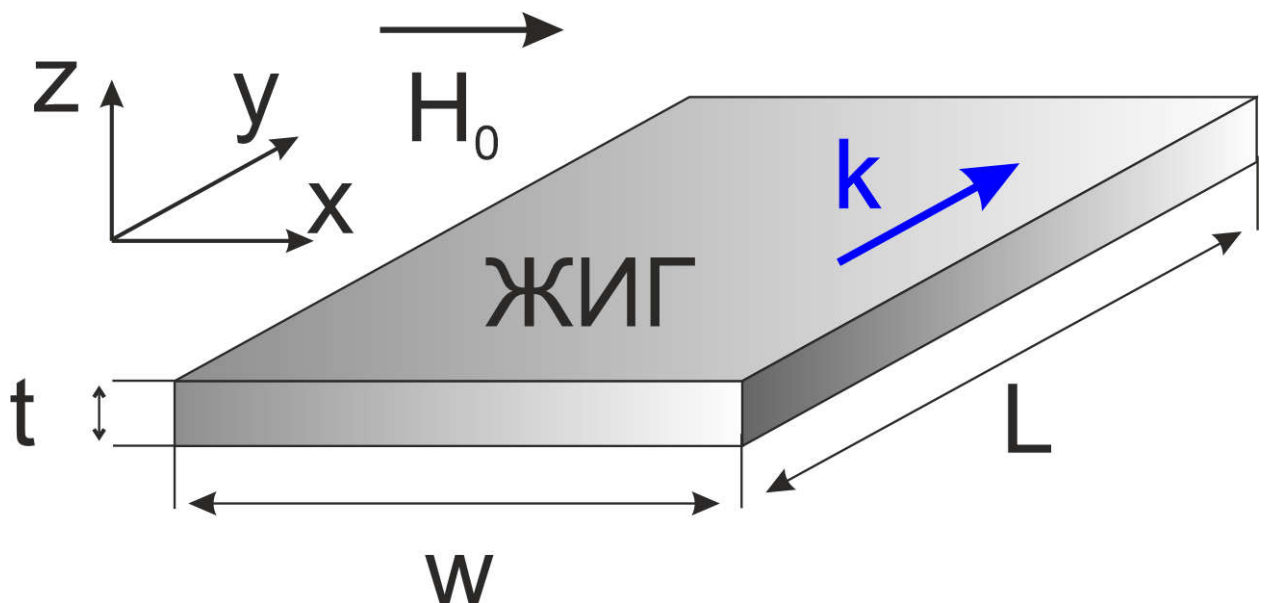


Рис.1 Схематическое изображение исследуемой структуры

При численном моделировании рассматриваемой структуры, состоящей из волновода, использовались следующие параметры:

- **ЖИГ** (железо-иттриевый гранат) - ферромагнитный материал из которого сделан волновод.
- **k** - направление распространения волны
- **L=4000 мк** (длина)
- **w=200 мк** (ширина)
- **t=10 мк** (толщина)

- **α** = 0.09 (параметр затухания)
- **M_{sat}** = 1.39 э (намагниченность насыщения)
- **H_0** = 800 э (магнитное поле)

Эта структура представляет собой ферритовую плёнку, к поверхности которой произвольным образом приложено внешнее магнитное поле.

Магнито-упорядоченными, называются вещества, которые обладают упорядоченной магнитной структурой, в отсутствие внешнего магнитного поля. Для ферромагнетиков характерна спонтанная параллельная ориентация элементарных магнитных моментов, приводящая к большой намагниченности. К таким веществам относятся четыре металла: железо, никель, кобальт, гадолиний, а также их сплавы и ряд окислов. Природа спонтанного намагничивания антиферромагнетиков и ферромагнетиков одинакова, однако в антиферромагнетиках имеет место «шахматная» упорядоченность, когда каждый магнитный момент окружен антипараллельными моментами[9,10]. Разница между этими моментами мала, поэтому суммарный магнитный момент будет также мал. Ферромагнетики (ферриты) обладают спонтанной «шахматной» упорядоченностью, но из-за различия моментов, направленных в разные стороны, имеет место большой результирующий магнитный момент. Неметаллические ферриты нашли широкое применение в технике СВЧ. Так, в СВЧ устройствах на магнитостатических волнах нашел широкое применение неметаллический феррит-иттриевый феррит со структурой граната, $Y_3Fe_5O_{12}$ (ЖИГ).

Далее представлены результаты расчётов полученных в MuMax3 и обработанные с помощью программного пакета Matlab

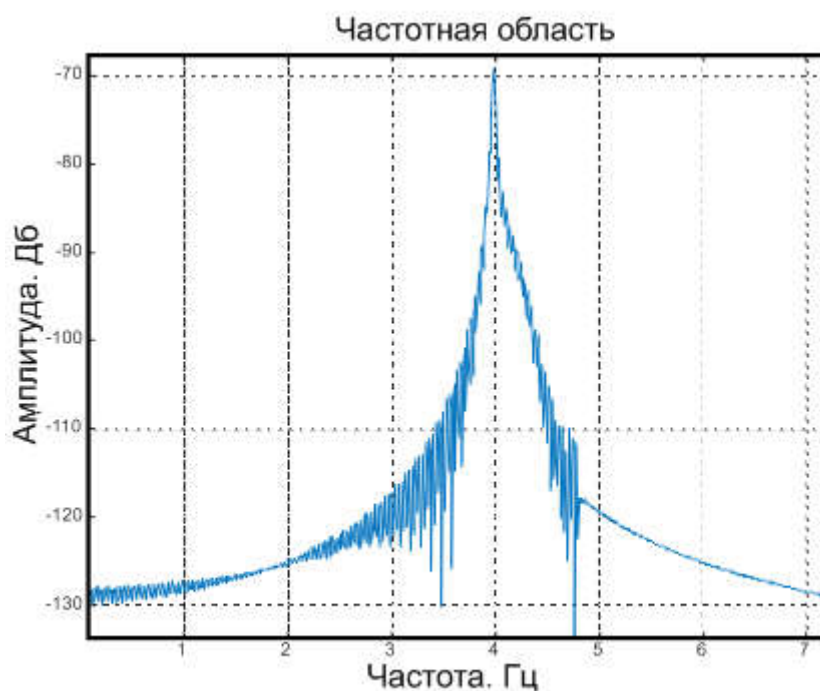


Рис. 2 Амплитудно-частотная характеристика ПМСВ в исследуемой структуре при $w = 2000$ мкм

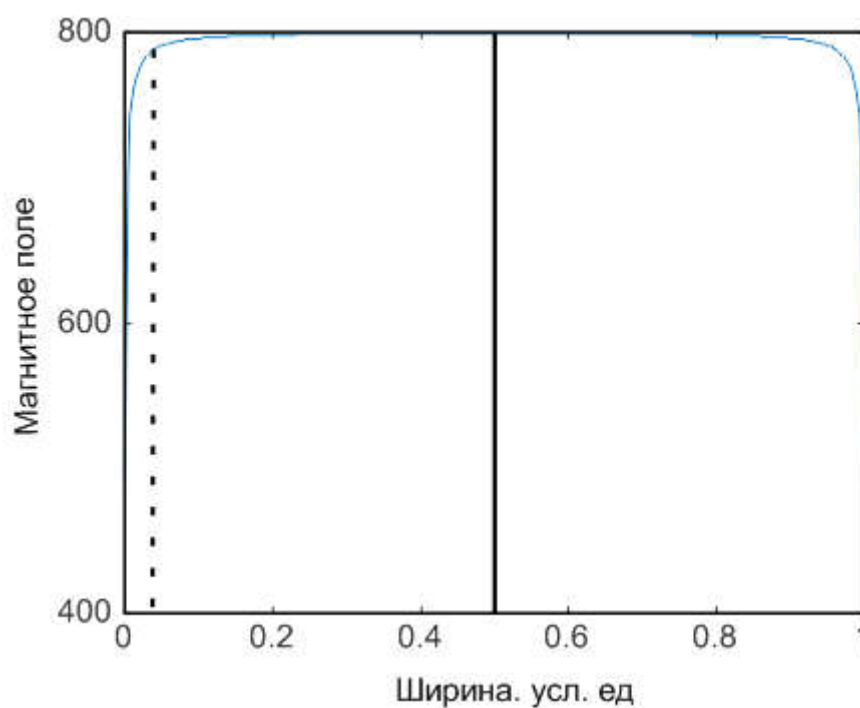


Рис. 3 Распределение внутреннего магнитного поля внутри исследуемой структуры при $w = 2000$ мкм

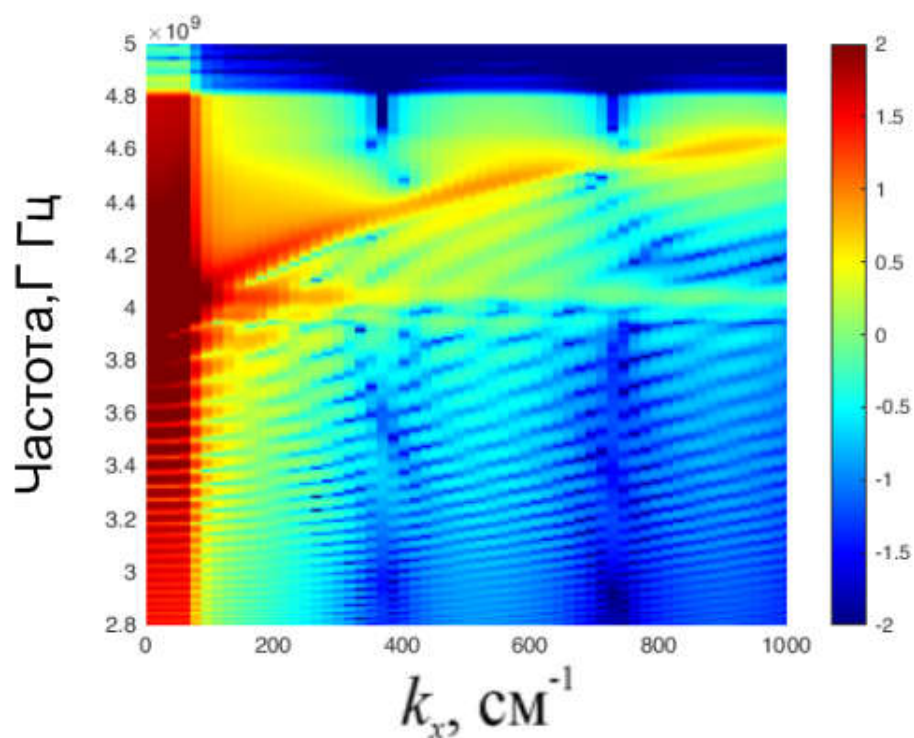


Рис. 4 Дисперсионные характеристики ПМСВ в исследуемой структуре при $w = 2000$ мкм. Представленная на (рис.3) сплошной линией.

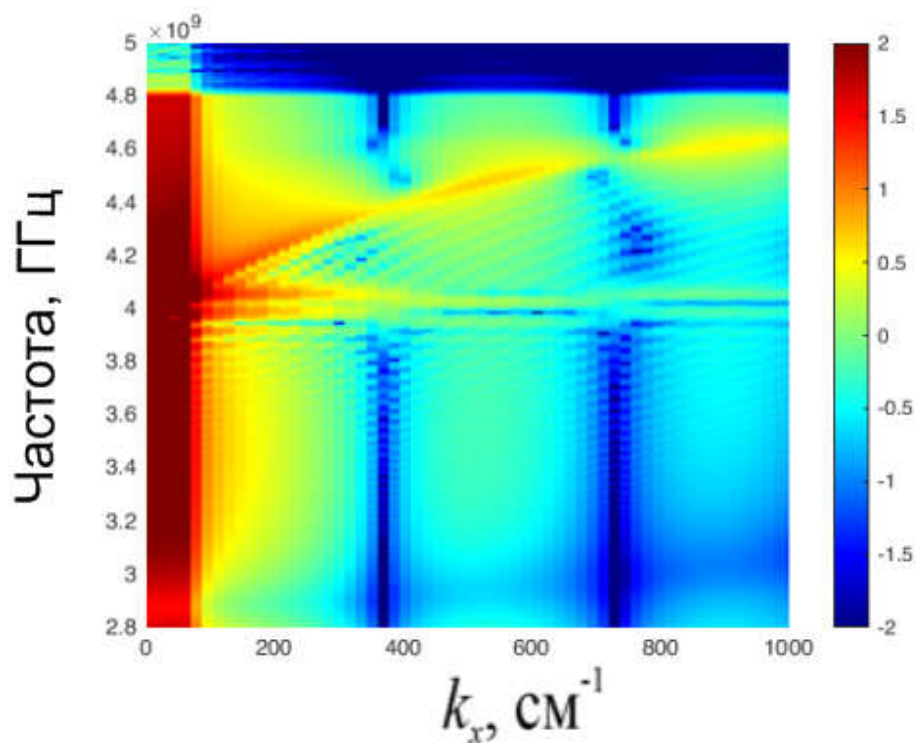


Рис. 5 Дисперсионные характеристики ПМСВ в исследуемой структуре при $w = 2000$ мкм. Представленная на (рис.3) пунктирной линией.

В данной работе были представлены расчёты амплитудно - частотной характеристика ПМСВ для исследуемой структуре на (рис.2), распределение внутреннего магнитного поля (рис.3), дисперсионные характеристики ПМСВ (рис.4-5). Так же были построены при разных ширинах волновода, а именно при значении $W=1000, 500$ и 200 мкм.

Путем исследования железо-иттриевого граната выявили что при уменьшении ширины магнитных волноводов происходит усиление размагничивающих магнитных полей вблизи границы волновода, что приводит к уменьшению эффективного магнитного поля внутри волновода.

Вследствие уменьшения эффективного магнитного поля наблюдается сдвиг амплитудно-частотной характеристики волновода в низкочастотную часть спектра, при этом наблюдается уменьшение амплитуды выходного сигнала из-за уменьшения сечения волновода при сохранении плотности энергии.

Таким образом, можно заключить, что ширина волновода сильно влияет на распределение внутренних полей внутри волноводов и как следствие влияет на ширину и величину спектра ПМСВ. Однако при широких волноводах СВ затухают быстрее и становятся не подходящими для устройств, направленных на миниатюризацию.

Заключение

В настоящей работе было проведено численное моделирование и исследование динамики распространения волн в системе, состоящей из одиночного ЖИГ-волновода при изменении ширины. Построены дисперсионные характеристики, исследовано распределение внутренних полей и дисперсионных характеристик ПМСВ

Было выявлено что при уменьшении ширины магнитных волноводов происходит усиление размагничивающих магнитных полей вблизи границы волновода, что приводит к уменьшению эффективного магнитного поля внутри волновода. Вследствие уменьшения эффективного магнитного поля наблюдается сдвиг амплитудно-частотной характеристики волновода в низкочастотную часть спектра, при этом наблюдается уменьшение амплитуды выходного сигнала из-за уменьшения сечения волновода при сохранении плотности энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев Ю.М., Генделев С.Ш. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. М., 1975
2. Serga A.A., Chumak A.V., Hillebrands B. YIG magnonics //J. Phys. D: Appl.Phys. 2010. V. 43. 264002.
3. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Изд. Сарат. ун-та, 1994.
4. Eshbach J.R., and Damon R.,W., Surface Magnetostatic Modes and Surface Spin Waves 1960 Phys. Rev.118 1208
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука. 1982
6. В.С. Стальмахов, А.А. Игнатъев. Лекции по спиновым волнам. Часть 1. Саратов: издательство СГУ, 1983
7. Садовников А. В., Рожнёв А. Г. Моделирование распространения магнитостатических волн в одномерных магнонных кристаллах // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, №. 1. С. 143–159.
8. Chumak A.V., Neumann T., Serga A.A., Hillebrands B., Kostylev M.P. A current-controlled, dynamic magnonic crystal // J.Phys.D: Appl.Phys. 2009. V. 42. 205005.
9. Моносов Я.А. Ферромагнитный резонанс, под. ред. Вонсовского, М., 1961.
10. John F. Introductory Raman spectroscopy. — Academic press, 2003.
11. O. Karlqvist, Trans. Roy. Inst. Techno. 86, 3 (1954).
12. A.V. Sadovnikov, et.al., Directional multimode coupler for planar magnonics: Side-coupled magnetic stripes, Applied Physics Letters 107, 202405 (2015)