

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра нелинейной физики

**«Многомодовое распространение МСВ в ферритовой пленке  
конечной ширины»**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 411 группы  
направления (специальности) 03.03.01 прикладная математика и физика  
факультет нелинейных процессов СНИГУ им. Н.Г. Чернышевского  
Соловьева Николая Александровича

Научный руководитель  
к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_

Е.Н. Бегинин

Зав. кафедрой нелинейной физики  
к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_

Е.Н. Бегинин

Саратов 2019 г.

**Введение.** Магнитостатические волны в магнитоупорядоченных структурах занимают немаловажное место среди огромного многообразия разного рода волн, таких как электромагнитные волны, волны в намагниченной плазме и плазме твердого тела, акустические волны и волны, которые могут существовать в конденсированных и гиротропных средах. Изучение колебательных и волновых процессов в ферромагнетиках имеет богатую историю и является одним из фундаментальных разделов радиофизики.

В твердых телах могут распространяться волны различных типов — электромагнитные (быстрые), акустические (медленные) и спиновые (очень медленные) волны .

Спиновые волны существуют в диапазоне от единиц до сотен гигагерц и представляют собой распространение возмущений прецессии магнитных моментов атомов в узлах кристаллических решёток в магнитоупорядоченных структурах. Условно их можно разделить на дипольные спиновые и обменные спиновые. При больших значениях волнового числа влияние обменного взаимодействия существенно, и в ферромагнетиках возбуждаются обменные спиновые волны. При малых значениях волнового числа обменное взаимодействие не играет существенной роли в формировании спектра спиновых волн, такие волны называются дипольными спиновыми волнами или магнитостатическими волнами.

Широкое использование магнитостатических волн (МСВ) стало возможным в связи с получением высококачественных магнитных пленок, в частности пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) с толщинами в широком интервале (0.2 - 100 мкм) и с большими размерами в плоскости (до 7 - 8 см), обладающих малыми магнитными и диэлектрическими потерями. Магнитостатические волны в пленках ЖИГ легче всего возбуждаются на

частотах сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона (0.2 - 40 ГГц) и обладают рядом существенных преимуществ перед другими типами волн в твердых телах.

На основе МСВ, распространяющихся в намагниченной ФП, возможно создание линий задержки, электрически перестраиваемых полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров, фильтров с переменной полосой, перестраиваемых генераторов. Указанные устройства могут быть использованы для обработки сигналов, в спутниковом телевидении, фазированных антенных решетках, для СВЧ контроля состояния природной среды и т.п. Использование спинволновых приборов в подобных радиоэлектронных системах весьма перспективно в отношении качественного совершенствования их функциональных возможностей.

Актуальность темы работы определяется общей тенденцией к миниатюризации функциональных элементов обработки информационных сигналов в СВЧ-диапазоне радиоволн, переходом к микронным и субмикронным пространственным масштабам.

Целью работы является исследование особенностей спектра с МСВ в магнитных волноводах различной ширины и управление характеристиками распространения МСВ выбором ориентации внешнего магнитного поля.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, главы 1, главы 2, заключения и списка литературы. В главу 1 входит теоретическая часть и теоретический расчет дисперсионных характеристик. Глава 2 делится на 4 части, такие как: теоретические основы микромагнитного моделирования на базе пакета Muph3; расчетная модель для поперечно ограниченного волновода; статические магнитные поля волновода; амплитудно-частотные характеристики спиновых волн в произвольно намагниченном волноводе; угловые зависимости дисперсионных характеристик магнитостатических волн.

**Глава 1** рассматривает изолированную слоистую структуру [1] толщиной  $d$  и шириной  $w$  лежит в плоскости  $y - z$  и при  $x = 0$  контактирует со свободным пространством. Другая поверхность находится в контакте с диэлектриком толщины  $t$ , на который опирается идеальный проводник. Магнитное поле  $H$  ориентировано в направлении оси  $+\hat{z}$ , а магнитостатические волны распространяются вдоль оси  $+\hat{y}$ .

Магнитная пленка характеризуется тензором проницаемости [2] без учета потерь (1.1).

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_1 & i\mu_2 & 0 \\ -i\mu_2 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

где  $\mu_1 = \frac{\omega_H(\omega_H + \omega_M) - \omega^2}{\omega_H^2 - \omega^2}$ ,  $\mu_2 = \frac{\omega_M \omega}{\omega_H^2 - \omega^2}$ ,  $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$ ,  $\omega_H = \gamma H$ ,  $\omega$  угловая частота волн,  $4\pi M_0$  намагниченность насыщения пленки,  $\gamma$  гиромагнитное отношение. Свободное пространство характеризуется скалярной проницаемостью  $\mu_1 = 1$  и  $\mu_2 = 0$ .

В магнитостатическом приближении ( $\nabla \times \vec{H} = 0$ ) магнитное поле можно записать как градиент скалярного потенциала, а диэлектрические постоянные различных слоев считать несущественными.

В большинстве экспериментальных ситуаций края образца, при  $x = 0$  и  $z = w$ , на рис. 1.1 определяются либо путем нарезки, либо химического травления. Сочетание шероховатости кромки, образующейся при подготовке образца и размагничивании полей, является достаточным для закрепления спинов на кромке образца.

Будем аппроксимировать условие закрепления спинов (условие пиннинга), предположив, что СВЧ-поля равны  $B_x = B_y = 0$  при  $z = 0, w$ .

Различные значения  $k_x$  внутри и снаружи пленки и тот факт, что они отличаются от  $k_y$ , являются главными последствиями того, чтобы  $k_z$  было отличным от нуля. Если предположить, что  $k_z = 0$ , то  $k_x = k_y$ .

Применяя граничные условия, чтобы  $B_x$  обращались в ноль на поверхности металла ( $x = d + t$ ), а  $H_y$ ,  $H_z$  и  $B_x$  были постоянными на поверхностях пленки ( $x = 0$  и  $x = d$ ), получаем дисперсионное соотношение

$$\exp(2Md) = \frac{\mu_1 M - \mu_2 k - N}{\mu_1 M + \mu_2 k + N} \times \frac{\mu_1 M + \mu_2 k - N \tan(Nt)}{\mu_1 M - \mu_2 k + N \tan(Nt)} \quad (1.1)$$

которое может быть записано в значениях частоты и переменных полях  $\omega$  и  $\omega_H$  как

$$\exp(2Md) = \frac{\omega_H M + \omega k + (\omega_H^2 - \omega^2)(M - N)}{\omega_H M - \omega k + (\omega_H^2 - \omega^2)(M + N)} \times \frac{\omega_H M - \omega k + (\omega_H^2 - \omega^2)[M - N \tanh(Nt)]}{\omega_H M - \omega k + (\omega_H^2 - \omega^2)[M - N \tanh(Nt)]} \quad (1.2)$$

В уравнениях (1.2) и (1.3),  $k$  может принимать положительные или отрицательные значения, соответствующие распространению волн в направлениях  $\pm \hat{y}$ , тогда как  $N$  и  $M$  всегда являются положительными вещественными величинами.

**Дисперсионные характеристики МСВ в поперечно ограниченном волноводе.** Для расчета дисперсионных характеристик будет использоваться математический пакет **Mathcad**.

В качестве объектов исследований будут изучаться волноводы различной ширины  $w$  выполненные на основе ЖИГ пленки толщиной  $d=2$  мкм. Внешнее магнитное поле  $H = 400$  Э; намагниченность насыщения пленки  $M_0 = 140$  Гс; гиромагнитное отношение  $\gamma = 2.8$  МГц/Э.

По результатам раздела можно сделать следующие выводы: разработана программа расчета дисперсионных характеристик ПМСВ в поперечно ограниченных ферритовых волноводах; показано, что спектр

ПМСВ представляет собой дискретный набор мод характеризуемых модовым индексом  $n$ ; каждому индексу  $n$  соответствует волновое число «отсечки»  $k_n$ ; проявление свойств дискретного спектра ПМСВ наиболее явно наблюдается при сравнительно малых отношениях  $w/d$ ; для масштабирования волноводов в область микронных и субмикронных размеров при сохранении основных свойств дискретного спектра ПМСВ необходимо выполнение условия  $w/d = const$ . Со всеми полученными графиками с результатами полученной дисперсии можно ознакомиться в выпускной квалификационной работе.

**Глава 2** начинается с теоретической основы микромагнитного моделирования на базе пакета Mumax3 [3]. Она позволяет находить пространственную и временную эволюцию намагниченности в нано – и микроструктурах благодаря использованию метода конечных элементов.

Расчетная область исследования разбивается на ячейки конечных размеров. Каждой ячейке присваивается тип материала и индекс области от 0 до 256. Данные значения обусловлены наличием 256 справочных таблиц, индексированных индексом области.

Происходит рассмотрение возможностей Mumax3 и описанием ее базовых функций и возможностей, таких как построение объектов разных форм и размеров, их размещение и перемещение в исследуемой системе. Дополнительно рассказывается, каким же образом Mumax3 может произвести интересующие нас вычисления, показать итоговые, необходимые нам для дальнейшего использования, результаты.

В нашей работе мы сначала задаем исследуемую фигуру, для нас это будет – микроволновод. Но в Mumax3 предусмотрены и другие базовые фигуры, которые мы можем использовать и создавать с их помощью более сложных, а именно:

2D:

- Circle(D) – Окружность диаметра D
- Ellipse(sizeX, sizeY) – Эллипс с осями (X, Y)
- Rect(sizeX, sizeY) – Прямоугольник со сторонами (X, Y)
- Square(sizeX) – Квадрат(X)

3D:

- Ellipsoid(sizeX, sizeY, sizeZ) – Эллипсоид с осями
- Cylinder(D, h) – Цилиндр с диаметром (D) и высотой (h)
- Cuboid(sizeX, sizeY, sizeZ) – Кубоид со сторонами (X, Y, Z)

Еще имеются такие команды, как перемещение нашего объекта в пространстве, изначально центр объекта совпадает с центром координат. Вращать, складывать и вычитать объекты между собой для создания более сложных структур. Имеется возможность задавать граничные условия.

После создания объекта нам необходимо задать сетку. Это позволит нам разложить исследуемую область на множество дискретных ячеек. Фактически от их размера зависит скорость и точность дальнейших расчетов. После чего надо задать размер самих ячеек.

С остальными возможностями, которые могут нам потребоваться, можно ознакомиться в выпускной квалификационной работе.

**2.2 Расчетная модель для поперечно ограниченного волновода.** В качестве исследуемой модели будем рассматривать волновод в форме прямоугольного параллелепипеда. В качестве элемента возбуждения ПМСВ будет использоваться антенна шириной  $w$ . Будем пользоваться простейшей 3D фигурой, **Cuboid**

Размеры волновода : длина  $L_x = 5000$  мкм; ширина  $L_y = W = 200$  мкм ; толщина  $L_z = d = 2$  мкм ширина; ширина антенны  $w = 10$  мкм.

**2.3 Статические магнитные поля волновода.** Для нахождения равновесного состояния системы необходимо решить статическую задачу. Задача формулируется следующим образом: при заданной величине и ориентации внешнего магнитного поля необходимо найти магнитные поля внутри волновода и определить ориентацию намагниченности по всему волноводу.

Мы будем производить расчеты для различных углов  $H_0$ . Угол будем менять в плоскости  $xu$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом в  $10^\circ$ . После проведения расчетов в Mux3 сохраняются файлы с результатами с использованием данных и которых в последующем в Matlab можно построить распределение эффективного магнитного поля вдоль осей  $x$  и  $y$ .

Выводом по данному разделу является, что распределение внутренних магнитных полей волновода практически однородно при любых направлениях намагничивания; наибольшая степень краевой неоднородности наблюдается при намагничивании волновода перпендикулярно длинной оси; внутреннее магнитное поле практически совпадает по направлению с внешним [4] при любых угла намагничивания.

**2.3 Амплитудно-частотные характеристики спиновых волн в произвольно намагниченном волноводе.** На входной антенне задается переменное динамическое магнитное поле, а в области выходной антенны вычисляется мгновенное значение намагниченности усредненной по области антенны.

Здесь можно сделать следующий вывод, что при возрастании угла от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . динамический диапазон и ширина спектра в районе углов  $40^\circ - 60^\circ$  имеют минимальные значения.

**2.4 Угловые зависимости дисперсионных характеристик магнитостатических волн.** При заданном угле и выбранной частоте будем возбуждать МСВ гармоническим сигналом заданной частоты. Подаем



данный сигнал на входящую антенну, антенна начинает генерировать МСВ волну, которая убегает от антенны. Для получения расчетов этого нам необходимо изменить нашу программу в muph так, чтобы пошло возбуждение гармоническим сигналом, и мы могли зафиксировать мгновенное значение пространственной намагниченности в волноводе (пространственное распределение). После чего данные мгновенной намагниченности будут сохраняться в файл и уже с полученными данными после выполнения преобразования Фурье мы получаем так называемый спектр волновых чисел или изочастотные характеристики.

По результатам рассмотрения краевых случаев для  $0^\circ$  и  $90^\circ$  мы получаем, что дисперсионные характеристики при намагничивании под углом  $0^\circ$  соответствуют волнам с обратной дисперсией (фазовая скорость уменьшается с ростом частоты), а при намагничивании под углом  $90^\circ$  волны имеют прямую дисперсию (фазовая скорость растет с увеличением частоты). Следовательно, при изменении угла намагничивания происходит переход от одного типа дисперсионных характеристик к другому (например, от нормальной дисперсии к обратной).

После рассмотрения краевых случаев получаем, производим двумерное преобразование Фурье для остальных углов. После чего мы получаем изочастотные характеристики  $k_x(k_y)$  при фиксированной частоте.

Общий результат рассмотрения главы 2.4 мы можем сделать следующие выводы: в диапазоне углов от  $0^\circ$  до  $40^\circ$  в волноводе распространяются волны только с обратной дисперсией; в диапазоне от  $70^\circ$  до  $90^\circ$  в волноводе распространяются волны с прямой дисперсией; в диапазоне от  $40^\circ$  до  $70^\circ$  дисперсионная характеристика представлена ветвями с прямой и обратной дисперсией; показана возможность управления характером дисперсии волн в волноводе углом намагничивания.

**Заключение.** В ходе выполнения бакалаврской работы была создана программа расчета дисперсионных характеристик поверхностных

магнитостатических волн в поперечно ограниченном волноводе на основе пленки. Проведенные расчеты показали, что волны в волноводе характеризуются дискретным набором собственных мод. Каждой моде с индексом  $n$  соответствует волновое число отсечки  $k_n$ .

Разработана программа для микромагнитного моделирования распространения волн в поперечно ограниченном волноводе при заданном угле намагничивания. Проведено исследование распределения эффективного статического магнитного поля внутри волновода при различных ориентациях внешнего магнитного поля.

Проведены исследования особенностей трансформации АЧХ МСВ в волноводе.

Используя метод микромагнитного моделирования исследованы особенности трансформации дисперсионных характеристик МСВ в зависимости от направления намагничивания и показано, что существует диапазон углов, когда возможно распространение волн с прямой и обратной дисперсиями.

#### **Список литературы.**

1. O'Keeffe T.W. Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples / T.W.O'Keeffe, R.W.Patterson// –J. Appl. Phys. –1978. –Vol.67. –No9.– pp.4868-4895.
2. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. Москва: Наука, 1994.
3. mumax3 GPU-accelerated micromagnetism. — <http://mumax.github.io/>.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука. 1982