

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

Численное моделирование спектра спиновых волн в ферритовых

название темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

микроволноводах

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 431 группы

направления 03.03.03 «Радиофизика»

код и наименование направления

факультета нелинейных процессов

наименование факультета

Овчаренко Святослава Николаевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

м.н.с. лаборатории метаматериалов

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

А.Ю. Шараевская

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

А.А. Короновский

инициалы, фамилия

Саратов 2017 год

Содержание

Введение.....	3
Основная часть	4
Заключение	14
Список литературы	15

Введение

Как известно, магнитостатические волны – это волны, распространяющиеся в ферромагнетиках и ферритах под действием внешнего магнитного поля.

МСВ имеют ряд преимуществ перед другими типами волн: существуют во всем СВЧ диапазоне (1 – 40 ГГц), возможно управление внешним магнитным полем; их характеристики зависят от внешних условий (металлические экраны, периодические границы). На основе МСВ возможно создание СВЧ устройств с обратной динамической нелинейностью, в частности: линии задержки сигнала, различные фильтры, фазовращатели, МСВ-резонаторы, шумоподавители, фазовые и амплитудные корректоры и пр.

Существует три типа магнитостатических волн:

1. Прямые объемные волны в нормально намагниченных пленках феррита (ПОМСВ);
2. Обратные объемные волны в касательно намагниченных пленках феррита (ООМСВ);
3. Поверхностные магнитостатические волны в касательно намагниченных пленках феррита (ПМСВ).

Первоначально решалась задача нахождения дисперсий для всех типов МСВ при помощи численного моделирования. Объемные волны распространяются в одном частотном диапазоне, поверхностные начинаются с верхней границы объемных волн, как видно на рисунке 1. [6]

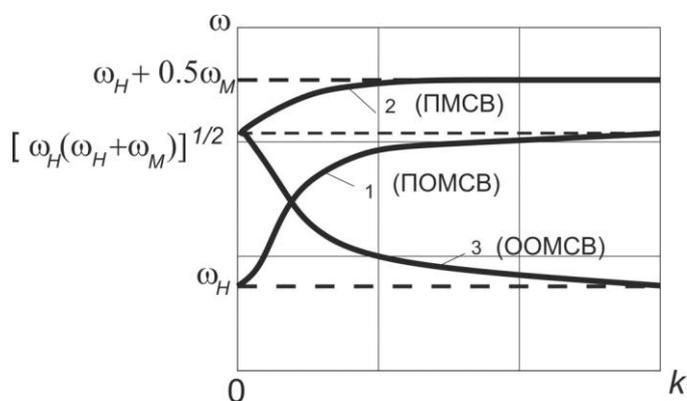


Рисунок 1 – Дисперсионные характеристики различных типов МСВ

Основная часть

Для начала были рассчитаны значения частотных границ всех типов волн. Значение нижней границы объемных волн:

$$\omega_H = 1.9 \text{ ГГц}, \quad (1)$$

где $\omega_H = \gamma H_0$ – частота прецессии вектора намагниченности;

$\gamma = 2,8 \text{ МГц/Э}$ – магнитомеханическое отношение;

H_0 – внешнее магнитное поле.

Значение верхней границы объемных волн (оно же является значением нижней отсечки для поверхностных волн):

$$\sqrt{\omega_H(\omega_H + \omega_M)} = 3.6 \text{ ГГц} \quad (2)$$

где $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$;

M_0 – намагниченность образца.

Значение верхней границы ПМСВ:

$$\omega_H + \frac{\omega_M}{2} = 4.36 \text{ ГГц} \quad (3)$$

При дальнейшей работе будем использовать значения частоты в этих пределах.

Теперь построим модель распространения волн в ферромагнитной среде, используя программный пакет «COMSOL».

Для описания распространения ПОМСВ в данной численной модели, воспользуемся «Weak form» для уравнений Максвелла в магнитоэлектростатическом приближении с учетом 2D модели [1,8]. Введем полученное выражение:

$$\begin{aligned}
\nabla N^* (\vec{\mu} \nabla \varphi) &= \frac{\partial N}{\partial x} (\vec{\mu} \nabla \varphi)_x + \frac{\partial N}{\partial y} (\vec{\mu} \nabla \varphi)_y + \frac{\partial N}{\partial z} (\vec{\mu} \nabla \varphi)_z = \\
&= \frac{\partial N}{\partial x} \mu (\varphi_x - ik\varphi) e^{-ikx} + \frac{\partial N}{\partial y} \varphi_y e^{-ikx} + \frac{\partial N}{\partial z} (-ik\mu_a (\varphi_x - ik\varphi) e^{-ikx}) = \\
&(N_x + ikN)(\varphi_x - ik\varphi)\mu + N_y \varphi_y
\end{aligned} \tag{4}$$

Преобразуем теперь в выражение для COMSOL:

$$\begin{aligned}
(a1 * test(ux) + j * lambda * 1 [m^{-1}] * test(u)) * (a1 * ux - j * lambda * 1 [m^{-1}] * u) * material.mur11 + test(uy) * uy,
\end{aligned} \tag{5}$$

где $a1 * test(ux) = N_x (ux = \frac{\partial u(x)}{\partial x})$;

$lambda * 1 [m^{-1}] = k$;

$test(u) = N$ – размагничивающее поле;

$a1 * ux = \varphi_x$;

$u = \varphi$ – магнитостатический потенциал;

$material.mur11 = \mu$ – компонента тензора магнитной проницаемости ферромагнетика;

$test(uy) * uy = N_y * \varphi_y$.

Для волновой функции ПОМСВ решения разбиваются на симметричную и антисимметричную моды. Рассмотрим симметричную моду. Воспользуемся для этого дисперсионным соотношением, описанным И.В. Зависляком [3]:

$$|k_n|S = \frac{2}{\sqrt{-\mu * d}} (\pi n + arctg \frac{1}{\sqrt{-\mu}}), \tag{6}$$

где d – ширина ферромагнитного слоя.

Далее вводим необходимые параметры. Управляющим является частота ω (ГГц). Сделав расчетную модель, которая представляет собой ферромагнитную среду с распространяющимися в ней ПОМСВ в плоскости (z,y) , находим собственные k для основной толщинной моды.

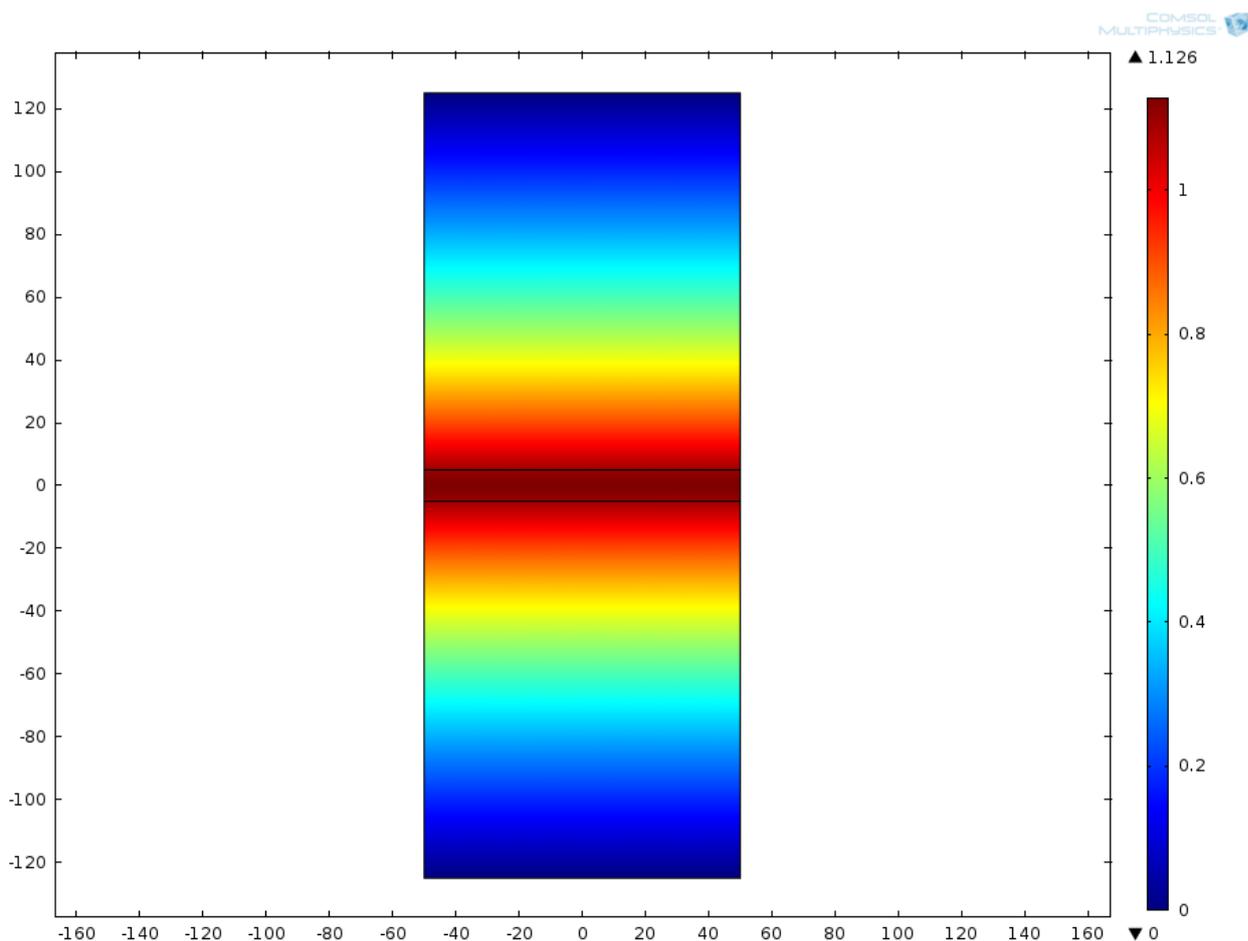


Рисунок 2 – Распределение магнитостатического потенциала для основной моды ПОМСВ при малых значениях k

Здесь было поставлено значение частоты $\omega = 2$ ГГц, ему соответствует значение $k = 101 \text{ см}^{-1}$.

По вертикальной оси отложены значения z -компоненты волновой функции для симметричной моды, по горизонтальной оси соответственно y -компоненты.

Поставим теперь значение $\omega = 2.7$ ГГц. Выбрав собственное значение $k = 1090 \text{ см}^{-1}$, получим структуру, изображенную на рисунке 3.

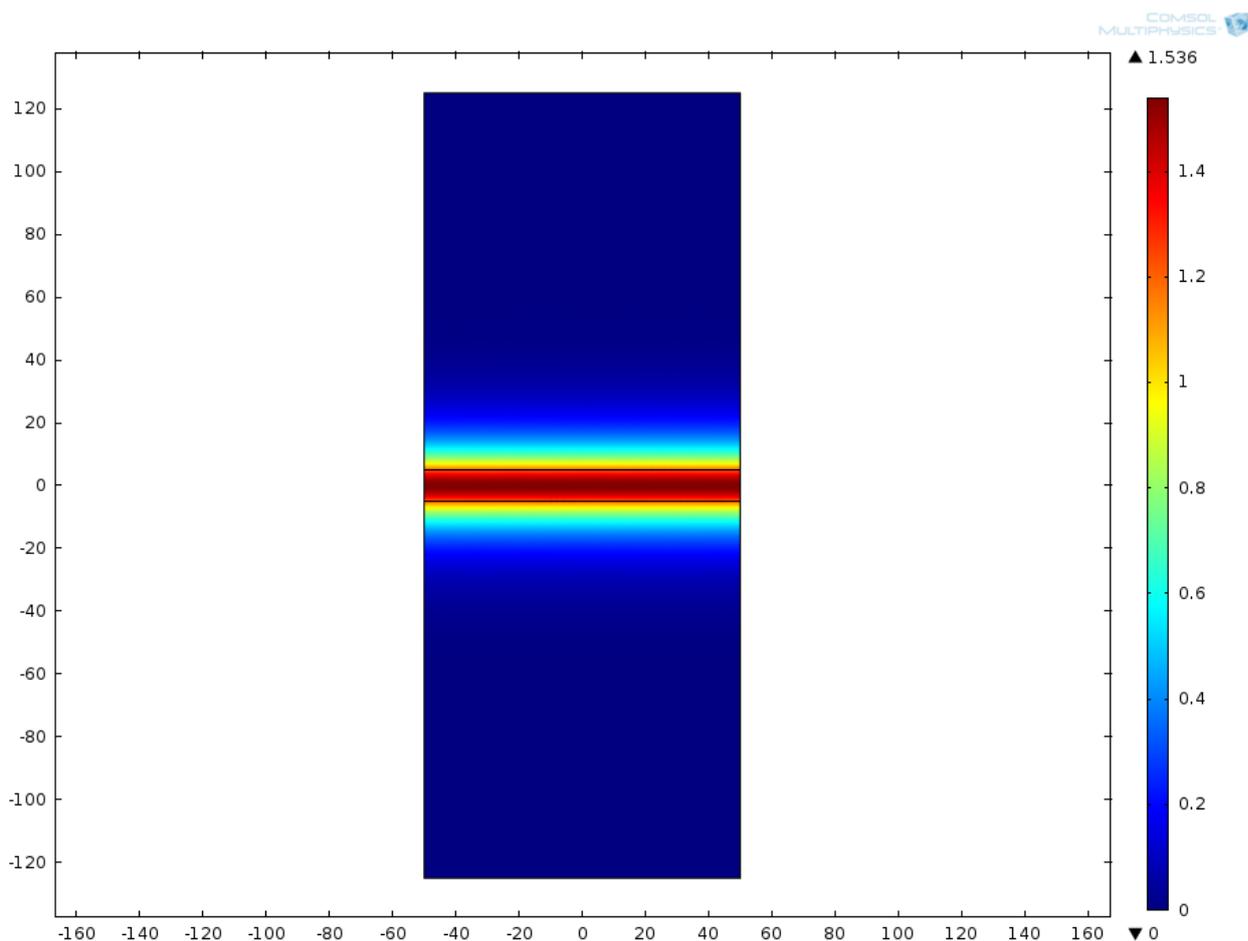


Рисунок 3 – Распределение магнитостатического потенциала для основной моды ПОМСВ при больших значениях k

При малых значениях волнового числа магнитостатический потенциал близок к своему максимуму и это соответствует наибольшему проникновению волны за пределы пленки. При больших волновых числах волна сконцентрирована в пленке и в непосредственной близости к ней, за пределами ее интенсивность мала.

Также были смоделированы остальные типы волн: ПМСВ и ООМСВ. Полученные структуры показаны на рисунках 4 и 5 соответственно.

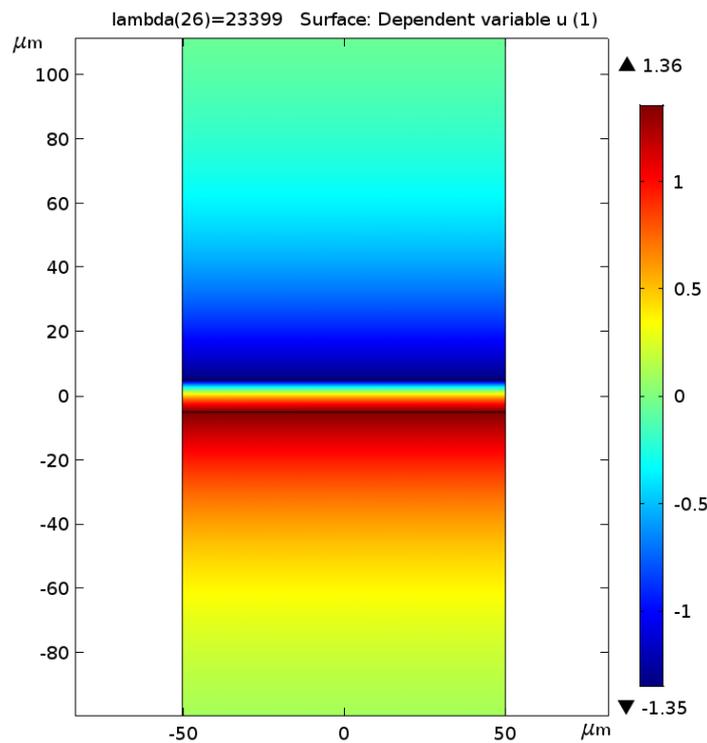


Рисунок 4 – Распределение магнитостатического потенциала для ПМСВ на частоте 4 ГГц

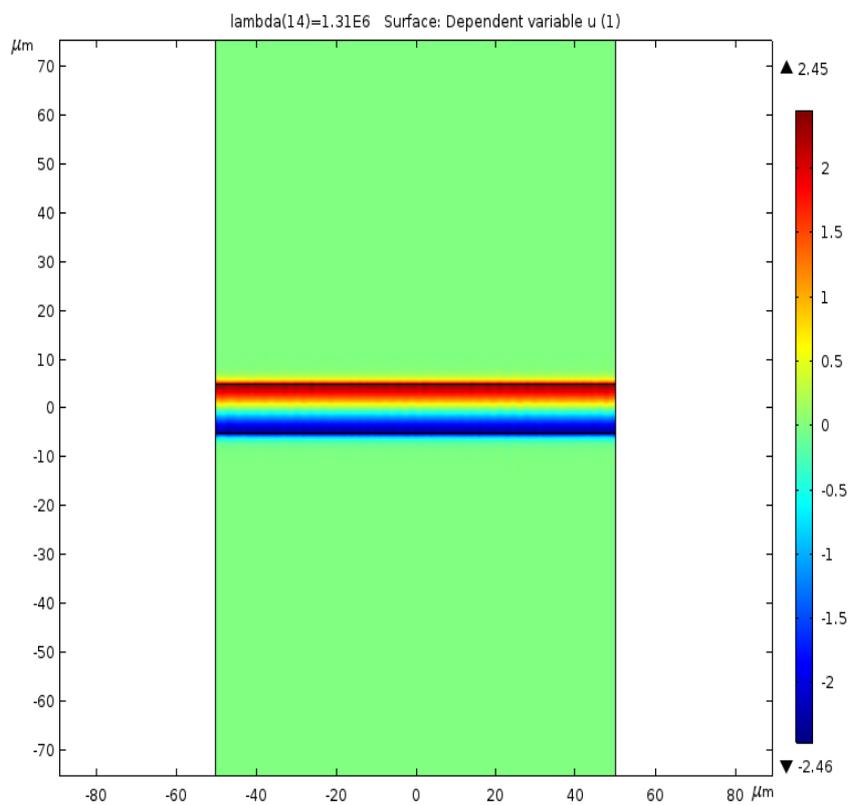


Рисунок 5 – Распределение магнитостатического потенциала для основной моды ООМСВ на частоте 2 ГГц

Затем был построен график в программе «Wolfram Mathematica», используя данные «COMSOL». Для сравнения с теоретическими вычислениями был построен график по дисперсионному соотношению, полученному Б.А. Калиникосом и А.Н. Славиним [4]. Оба графика были отражены на рисунке 6.

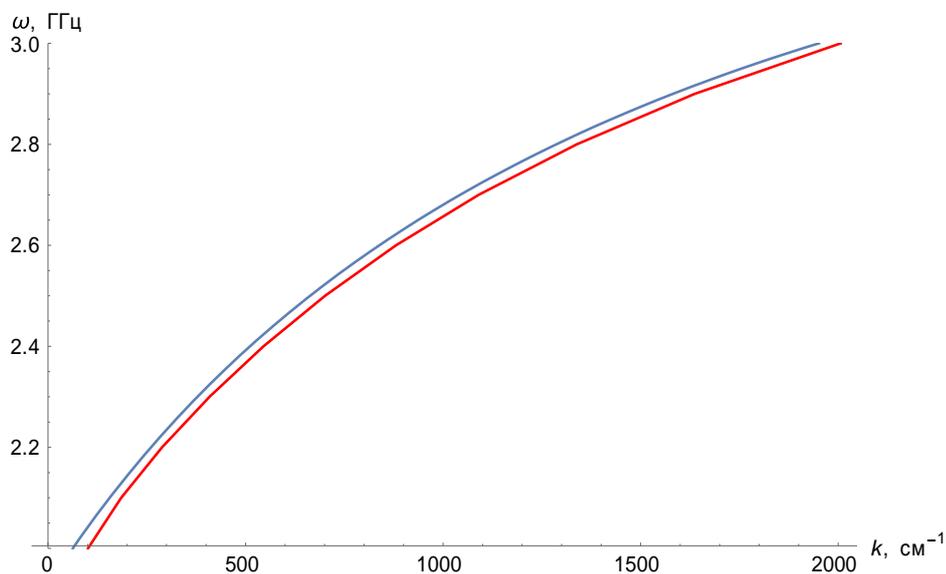


Рисунок 6 – Сравнение результатов теоретического и численного расчетов.

Синяя кривая – численное моделирование, красная – теоретический расчёт

Затем были построены три дисперсионные кривые по данным численного моделирования, изображенные на рисунке 7, чтобы показать соответствие с теоретическими кривыми, показанными на рисунке 1.

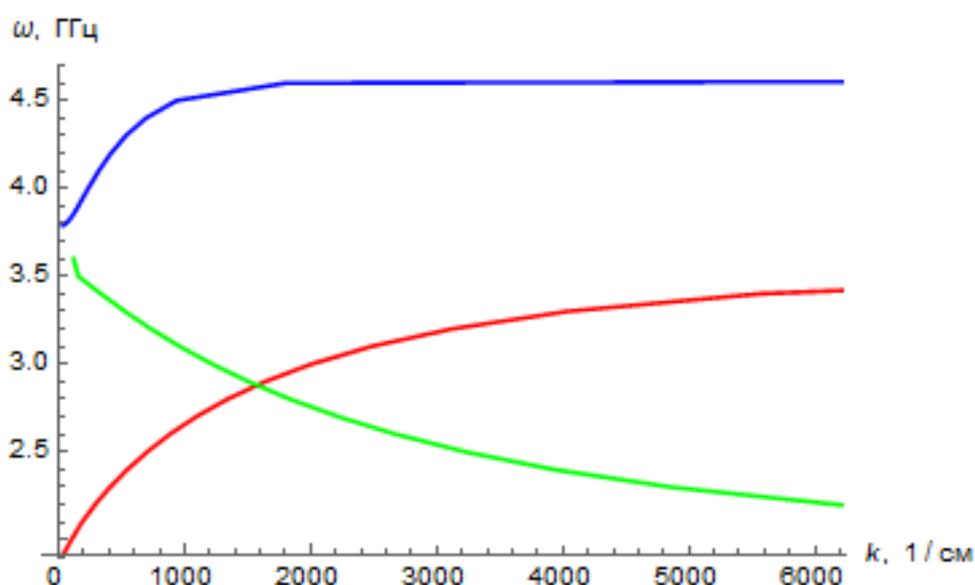


Рисунок 7 – Дисперсия различных типов МСВ

Синяя кривая – ПМСВ, зеленая – ООМСВ, красная – ПОМСВ.

Представленные выше графики показывают, что численная модель соответствует теоретической модели распространения МСВ.

При рассмотрении многослойных структур следует пользоваться методом сшивания на границах касательных компонент магнитного поля и нормальных компонент индукции. Но с увеличением числа слоев уравнения становились все более громоздкими. Поэтому создали прием, облегчающий решение задачи. Он состоит в сшивании отношений компонент, которые обобщили величиной, называемой поверхностной магнитной проницаемостью μ_s . Они находятся для каждого слоя, как показано на рисунке 8. [1]

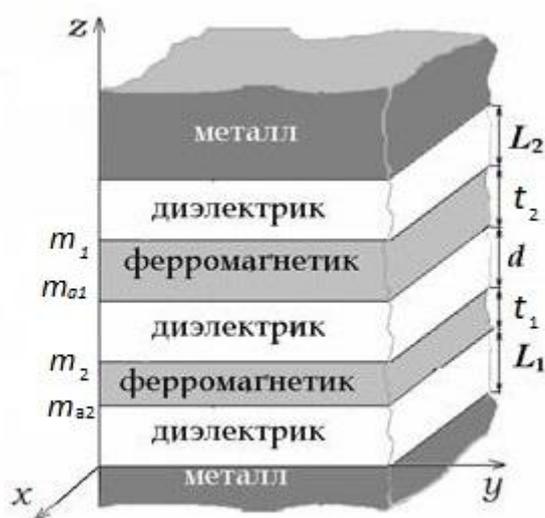


Рисунок 8 – Схема ферритовой структуры, состоящей из 2-х связанных плёнок

Здесь t_1, t_2 – толщины ферритовых слоев 1 и 2;

L_1, L_2 – расстояния до металлических экранов;

d – величина зазора между ферромагнетиками;

$\mu_1, \mu_2, \mu_{a1}, \mu_{a2}$ – поверхностные магнитные проницаемости.

Для получения дисперсионного соотношения надо попарно подставлять проницаемости последовательно друг в друга.

Теория связанных волн также накладывает определенные ограничения на распространение волн в двух связанных ферритовых пленках. Возможно

несколько видов связи, в зависимости от взаимного направления групповых скоростей связанных волн, а также от того, на каких пространственных гармониках (прямых или обратных) осуществляется связь, что можно видеть из таблицы 1.

Таблица 1: Характер связи между волнами в системах

В системе 2 \ В системе 1		Групповая скорость вправо		Групповая скорость влево	
		Прямая гармоника	Обратная гармоника	Прямая гармоника	Обратная гармоника
Групповая скорость влево	Прямая гармоника	Сильная активная связь	Связи нет	Связи нет	Сильная пассивная связь
	Обратная гармоника	Связи нет	Сильная активная связь	Сильная пассивная связь	Связи нет
Групповая скорость вправо	Прямая гармоника	Связи нет	Сильная пассивная связь	Сильная активная связь	Связи нет
	Обратная гармоника	Сильная пассивная связь	Связи нет	Связи нет	Сильная активная связь

Если имеет место сильная активная связь, то энергия одной из волн однонаправленно переходит в энергию другой волны, то есть происходит ее усиление. При сильной пассивной связи усиление отсутствует, возможна лишь периодическая перекачка энергии из одной волны в другую.

С учетом всех условий было получено дисперсионное соотношение для связанных ПМСВ в свободных от металла структурах:

$$\frac{2\mu_1 \operatorname{cth}(kt_1) + \mu_1^2 - \mu_{a1}^2 + 1}{\mu_1^2 + 2\rho\mu_1 - \mu_{a1}^2 - 1} \times \frac{2\mu_2 \operatorname{cth}(kt_2) + \mu_2^2 - \mu_{a2}^2 + 1}{\mu_2^2 + 2\rho\mu_2 - \mu_{a2}^2 - 1} = e^{-2kd} \quad (9)$$

Решая его, был получен график дисперсионной характеристики для симметричной и асимметричной моды, представленный на рисунке 9.

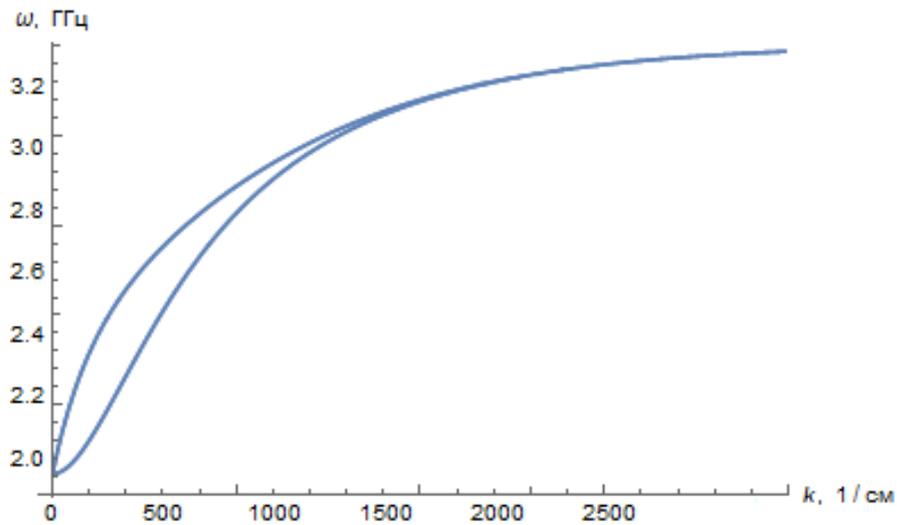


Рисунок 9 – Дисперсионная характеристика ПМСВ для структуры, состоящей из двух связанных ферромагнитных слоев. Верхняя ветвь является быстрой волной, нижняя ветвь – медленной.

Затем была построена модель в «Comsol» для двух связанных пленок, по тем же принципам, что и для одиночной пленки. Полученное распределение потенциала показано на рисунке 10.

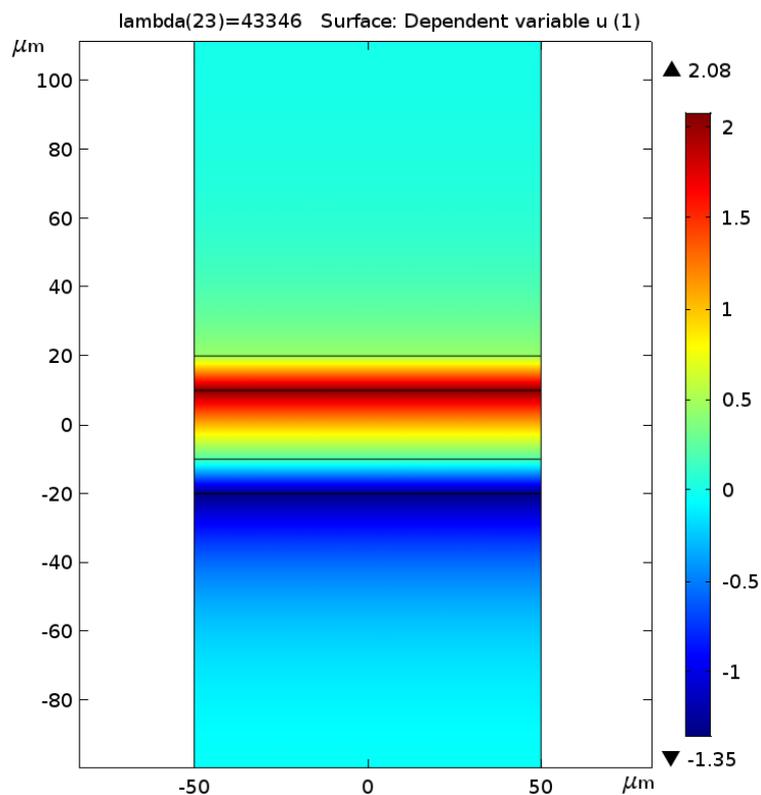


Рисунок 10 – Распределение потенциала ПМСВ для двух связанных пленок на частоте 2.5 ГГц

Вдоль нижней границы верхней пленки распространяется симметричная мода, по поверхности нижней пленки – асимметричная мода. Также из рисунка 10 видно, что между ферромагнитными слоями интенсивность волн не равна нулю, что означает наличие связи между ними.

По полученным данным также была построена дисперсионная характеристика, изображенная на рисунке 11.

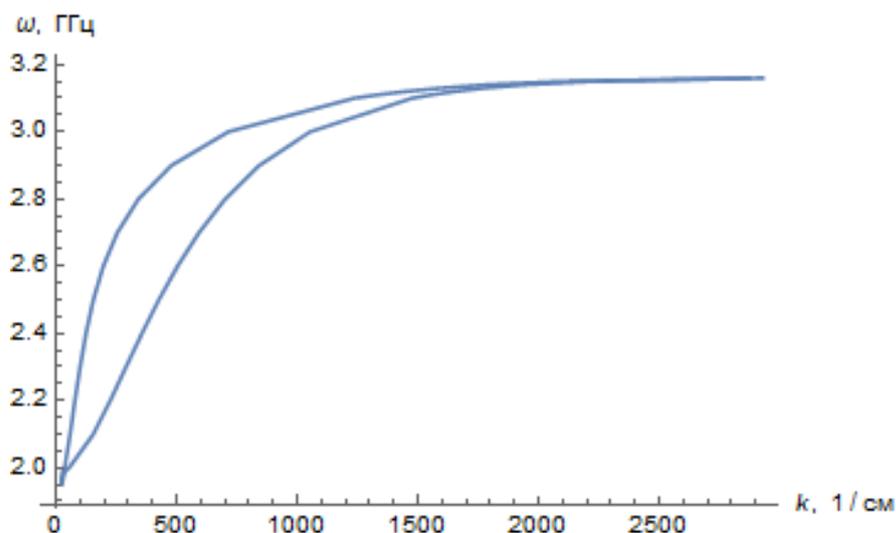


Рисунок 11 – Дисперсия ПМСВ для двух пленок по данным численного моделирования

Во всей полосе пропускания дисперсия обеих волн нормальная, волны возбуждаются одновременно и связаны между собой. Это приводит к интерференции этих волн и периодической перекачке энергии из одной волны в другую, что соответствует сильной пассивной связи между ними.

Заключение

С помощью программного пакета «COMSOL» можно точно смоделировать такой сложный физический процесс, как распространение магнитостатических волн в ферромагнитной среде. Удобный интерфейс программы позволяет легко оперировать сложными параметрами, достигая при этом максимальной точности, относительно теоретического расчёта.

Так, построив модели распространения каждого типа МСВ, удалось рассчитать их дисперсионные характеристики. Затем, построив подобный график по теоретическому соотношению Б.А. Калиникоса и отобразив обе характеристики на одном графике, показано хорошее совпадение между теоретическим расчетом и численным моделированием.

Затем был исследован более сложный процесс: распространение ПМСВ в многослойной ферритовой структуре, состоящей из двух одинаковых ферромагнитных пленок, связанных через диэлектрический зазор. С помощью дисперсионного соотношения, полученного методом сшивания магнитных проницаемостей, была построена дисперсионная характеристика, которая была сопоставлена с графиком, построенным на основе результатов численного моделирования двухпленочной структуры. Характер дисперсии также совпал.

Список литературы

1. «Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот» А.В. Вашковский, В.С. Стальмахов, Ю.П. Шараевский, издательство Саратовского университета, 1993 г.
2. «J. Phys. Chem. Solids» Damon R.W., Eshbach J.R., Vol. 19. P. 308, 1961
3. «Физические основы функциональной микроэлектроники» Зависляк И.В., Тычинский А.В., издательство Киев УМКВО, 1989 г.
4. «Theory of dipole-exchange spin wave spectrum for ferromagnetic films with mixed exchange boundary conditions» В.А. Kalinikos, A.N. Slavin, Printed in Great Britain, 1986
5. «Распределение полей МСВ в касательно намагниченной ферромагнитной пластине» А.Ю. Анненков, С.В. Герус, Журнал технической физики, том 69, вып. 1, 1999 г.
6. «Магнетизм на сверхвысоких частотах» А.Г. Гуревич, Соросовский образовательный журнал, №1, 1999 г.
7. «Магноника – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники» С.А. Никитов, Д.В. Калябин, И.В. Лисенков, А.Н. Славин, Ю.Н. Барабаненков, С.А. Осокин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.А. Морозова, Ю.П. Шараевский, Ю.А. Филимонов, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, В.К. Сахаров, Е.С. Павлов, Успехи физических наук, Том 185, №10, 2015 г.
8. Электронный ресурс:
<https://www.comsol.ru/shared/downloads/IntroductionToCOMSOLMultiphysicsRU.pdf>
9. «Компьютерное моделирование процессов переноса и деформаций в сплошных средах» В.Е. Анкудинов, Д.Д. Афлятунова, М.Д. Кривилев, Г.А. Гордеев, Ижевск: Издательство «Удмуртский университет», 2014 г.