

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

Учёт неоднородного поля в системе латеральных волноводов

название темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 431 группы
направления (специальности) 03.03.03 радиофизика

код и наименование направления (специальности)

факультета нелинейных процессов

наименование факультета, института, колледжа

Купреевой Юлии Валерьевны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

Садовников А.В.
инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

А.А. Короновский
инициалы, фамилия

Саратов 2017 год

Введение

В настоящее время эффективным способом передачи информации и энергии являются волны, так как они не требуют перемещения вещества при передаче сигнала. Большое значение для технических приложений и физических экспериментов имеют волновые процессы в системах с направленным распространением волн. Такими системами являются волноведущие структуры на основе ферритовых структур, такие как железо иттриевый гранат (ЖИГ). Ферриты или ферримагнетики – 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].

Различают три типа магнитостатических волн: прямые объемные волн в нормально намагниченных пластинах (пленках) феррита, обратные объемные волны в касательно намагниченных пластинах и, наконец, поверхностные МСВ также в касательно намагниченных пластинах феррита. Все типы волн широко используются в СВЧ устройствах-линиях задержки сигнала, различных фильтрах, фазовращателях, МСВ-резонаторах, шумоподавителях и пр[3-5].

В данной выпускной квалификационной работе целью являлось исследование распространения магнитостатических волн в волноводе с неоднородным распределением внутреннего магнитного поля, а также в латерально связанных структурах конечной ширины.

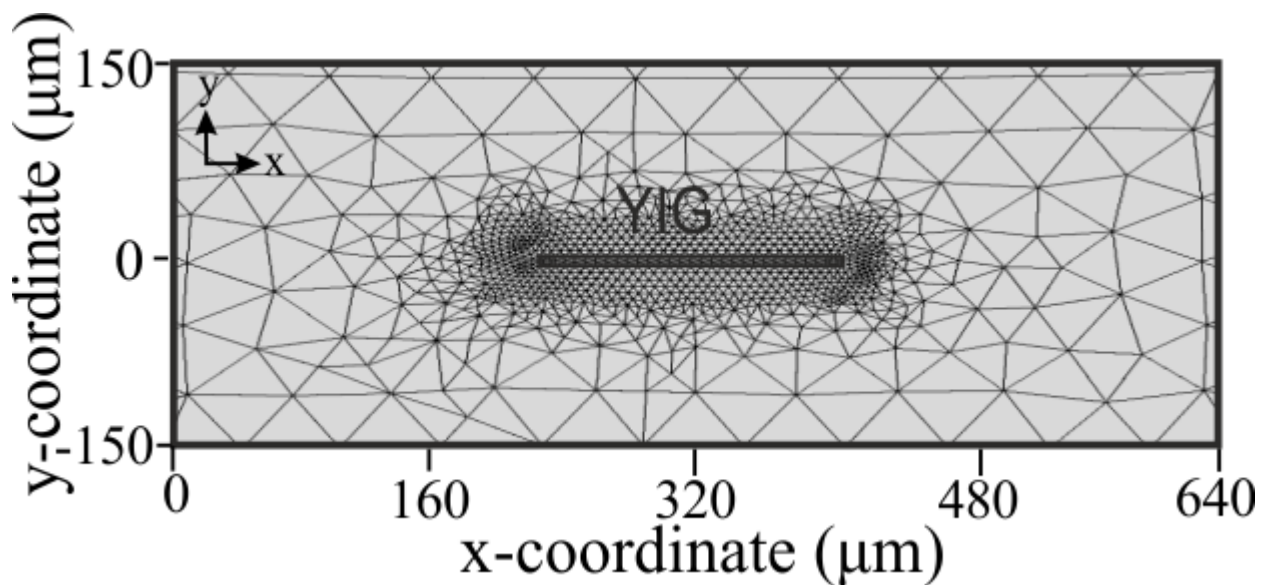


Рис1. Схематическое изображение расчетной области.

Для численного моделирования исследуемой структуры используем метод конечных элементов реализованный в программном продукте COMSOL Multiphysics. При решении уравнения системой COMSOL происходит разбиение расчётной области на конечные элементы, для каждого из которых происходит расчет значений полей. 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. Для построения дисперсионных характеристик для заданной частоты происходит поиск собственных волновых чисел, т.е. волновых чисел, соответствующих колебаниям, который могут распространяться в структуре. Для ускорения нахождения решения, перед расчетом задается начальное приближение волнового числа. После получения всех решений, выбираются только действительные, только они могут в действительности распространяться по волноводам, и могут быть измерены в реальных экспериментах.

На первом шаге численного моделирования необходимо задать геометрию, материальные свойства среды, параметры численной схемы и метод разбиения расчетной области на конечные элементы. На Рис.1 изображена

схема разбиения расчетной области на конечные элементы треугольной формы. Следует отметить, что в данной работе расчетная область разбивалась на конечные элементы таким образом, что размер треугольного элемента уменьшался на границах и изломах ферро-магнитной структуры. Структура представляет собой ферритовую плёнку, к поверхности которой приложено внешнее магнитное поле вдоль положительного направления оси x , так чтобы возбуждались поверхностные магнитостатические волны.

На всех границах расчётной области были установлены металлизированные стенки, в качестве граничных условий. Для данной электродинамической задачи, при рассмотрении ПМСВ вид тензора магнитной проницаемости задавался в виде:

$$\hat{\mu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & -i\mu_a \\ 0 & i\mu_a & \mu \end{bmatrix}$$

где $\mu(\omega) = \frac{\omega_H(\omega_H + \omega_M) - \omega^2}{\omega_H^2 - \omega^2}$, $\mu_a(\omega) = \frac{\omega_M \omega}{\omega_H^2 - \omega^2}$, где $\omega_H = \gamma H_0$, $\omega_M = \gamma 4\pi M_0$, $\gamma = 2.8 \text{ МГц/Э}$ – гиромагнитное отношение для пленки ЖИГ, M_0 – намагниченность насыщения пленки ЖИГ, H_0 – величина внутреннего магнитного поля. При численном моделировании использовались следующие параметр: $H_0 = 600 \text{ Э}$, $M_0 = 139 \text{ Г}$, $d = 10 \text{ мкм}$ – толщина плёнки, $w_1 = 200 \text{ мкм}$ – ширина волновода. Для воздуха значение магнитной и диэлектрической проницаемостей представляют собой числовые значения, поскольку можно считать его однородным и анизотропным.

Сначала рассматривался случай с однородным распределением внутреннего магнитного поля, которое показано на рис. 2

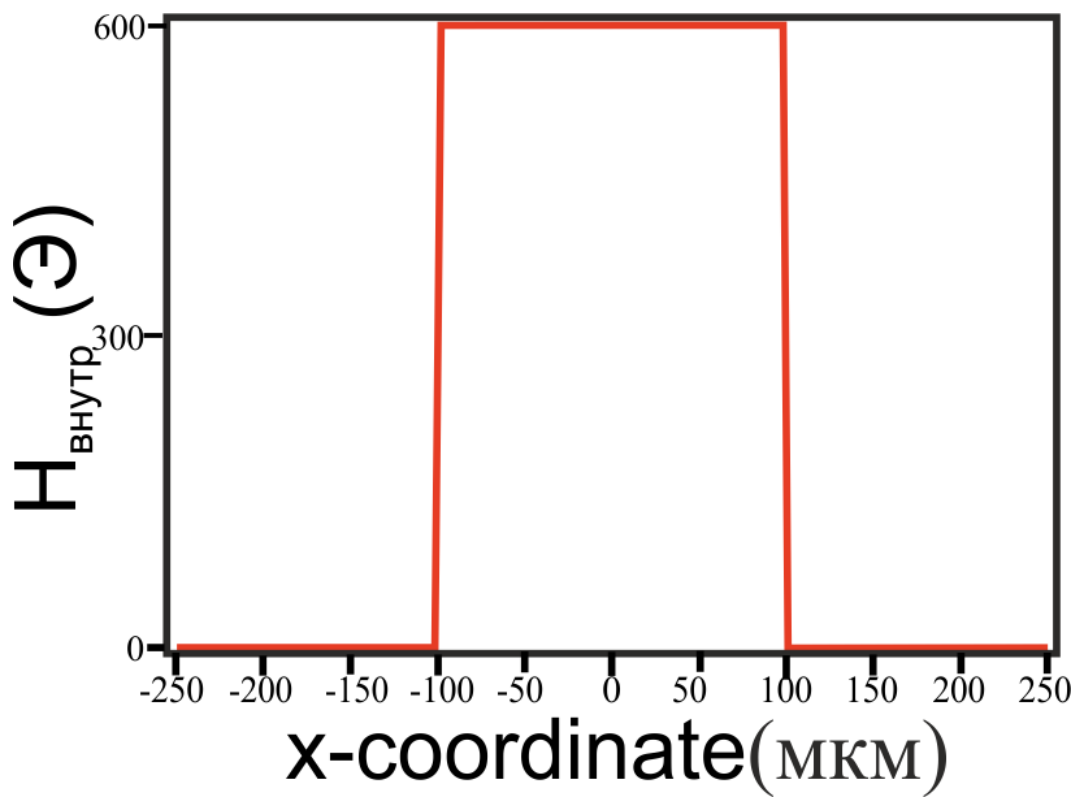


Рис2. Однородное распределение внутреннего магнитного поля. Зависимость внутреннего магнитного поля H от поперечной координаты x .

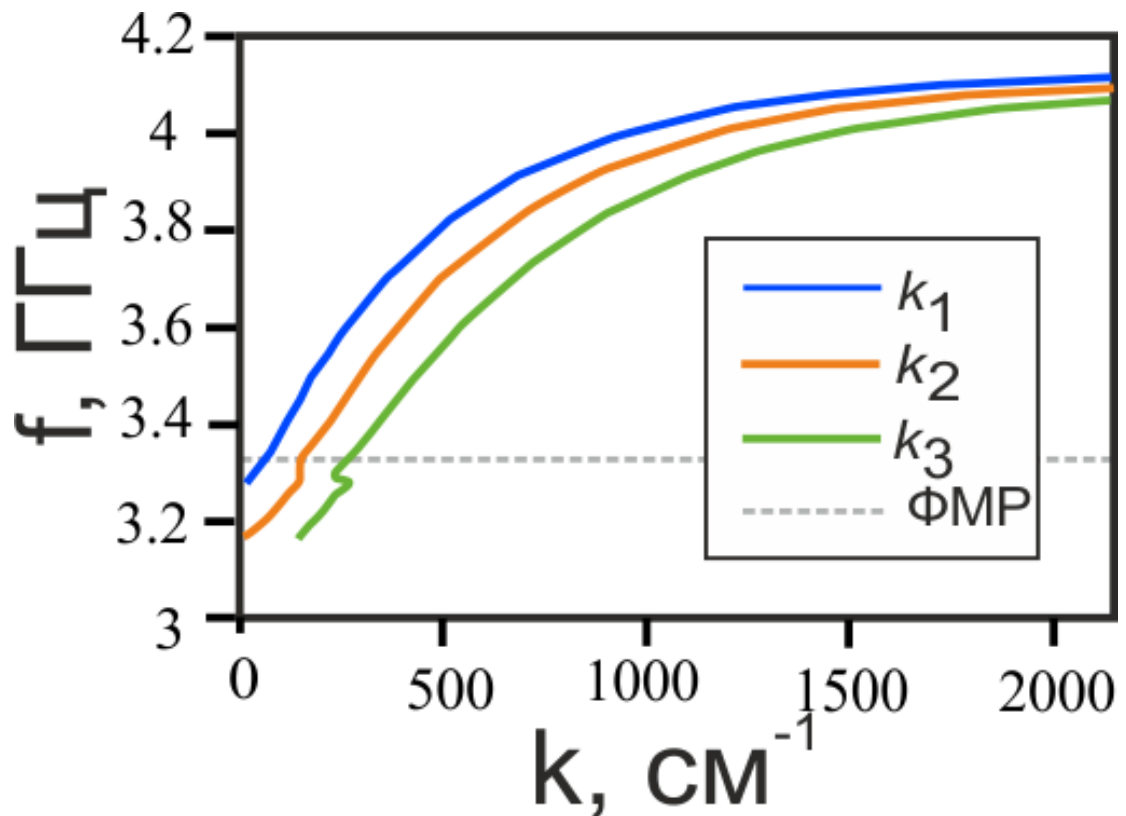


Рис3. Дисперсионная характеристика для однородного магнитного поля в одиночном волноводе.

На рис.3 представлена дисперсионная характеристика для первых трех ширинных мод ПМСВ в исследуемой структуре. Эти кривые представлены на графике. По оси ординат отложены частоты в ГГц в допустимом частотном диапазоне. По оси абсцисс отложены волновые числа в обратных сантиметрах.

Внутреннее поле характеризуется вектором намагниченности \bar{M}_0 , который, в свою очередь, определяется суммарным действием элементарных магнитных моментов, ориентирующихся во внешнем поле. Случай расчёта внутреннего магнитного поля с учётом размагничивающих факторов представляет большой технический интерес, так как практически все современные СВЧ устройства на магнитостатических волнах строятся на основе планарной технологии с использованием тонких пленок магнитных материалов. Основная трудность при расчете магнитных полей в образцах не эллипсоидальной формы связана с тем, что в последних, даже при однородной намагниченности, внутренние магнитные поля неоднородны. В этих случаях размагничивающие факторы становятся функциями координат их расчет может быть проведен только численными методами. Далее воспользуемся программным пакетом COMSOL Multiphysics и внесем в нее формулу для неоднородного распределения поля[6], представленную ниже:

$$H_x(x, y) = -H_0 \frac{1}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{N+x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{N-x}{y} \right)$$

Где H_x -внутреннее магнитное поле, N - тензор размагничивания, \bar{H}_0 - внешнее магнитное поле.

На рис. 4 изображен профиль внутреннего неоднородного магнитного поля, полученное при учёте размагничивающих факторов.

На рис. 5 изображена дисперсионная характеристика для первых трёх мод одиночного волновода, в случае учёта размагничивающих факторов, то есть с учётом неоднородности распределения магнитного поля.

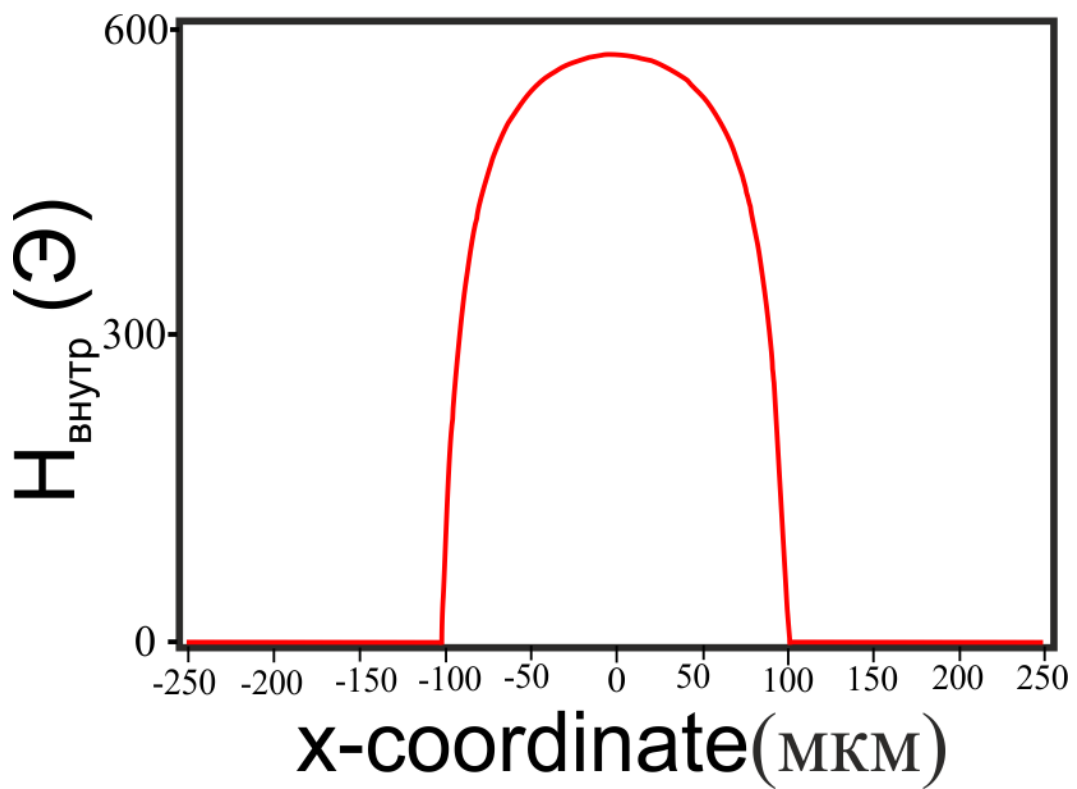


Рис4. Неоднородное распределение внутреннего магнитного поля. Зависимость внутреннего магнитного поля H от поперечной координаты x .

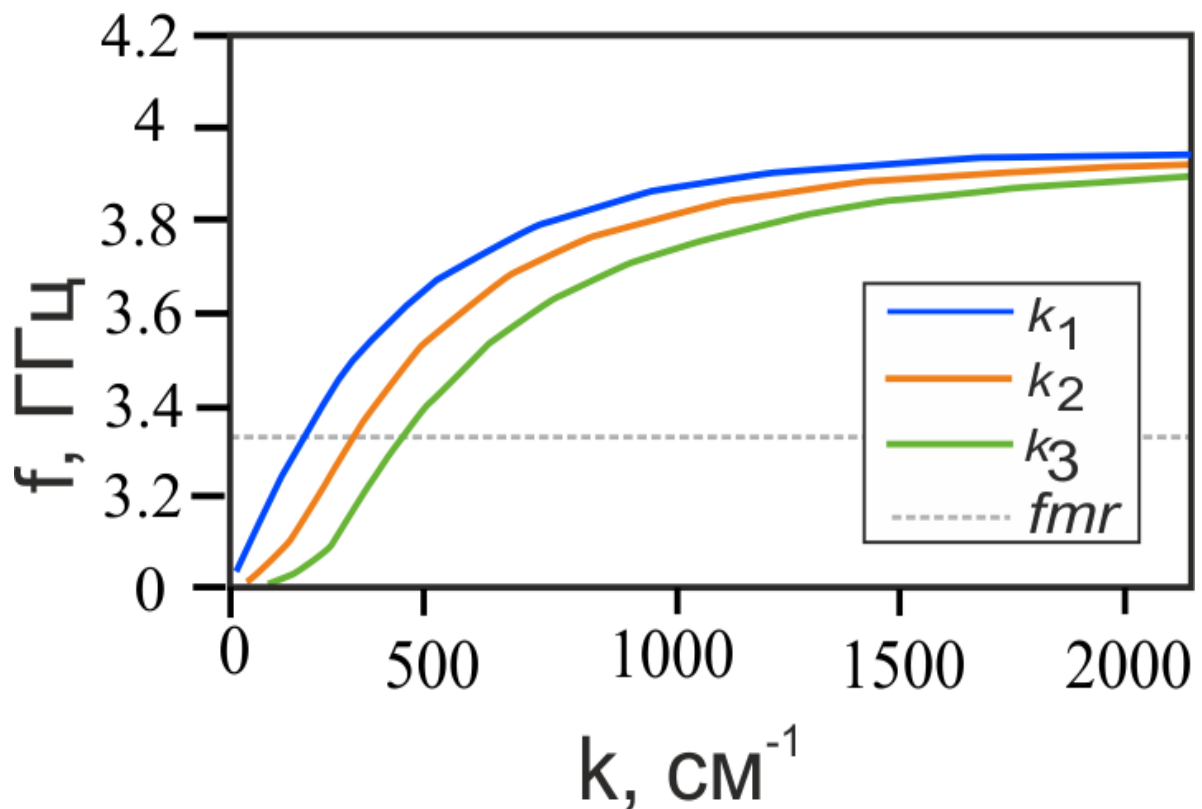
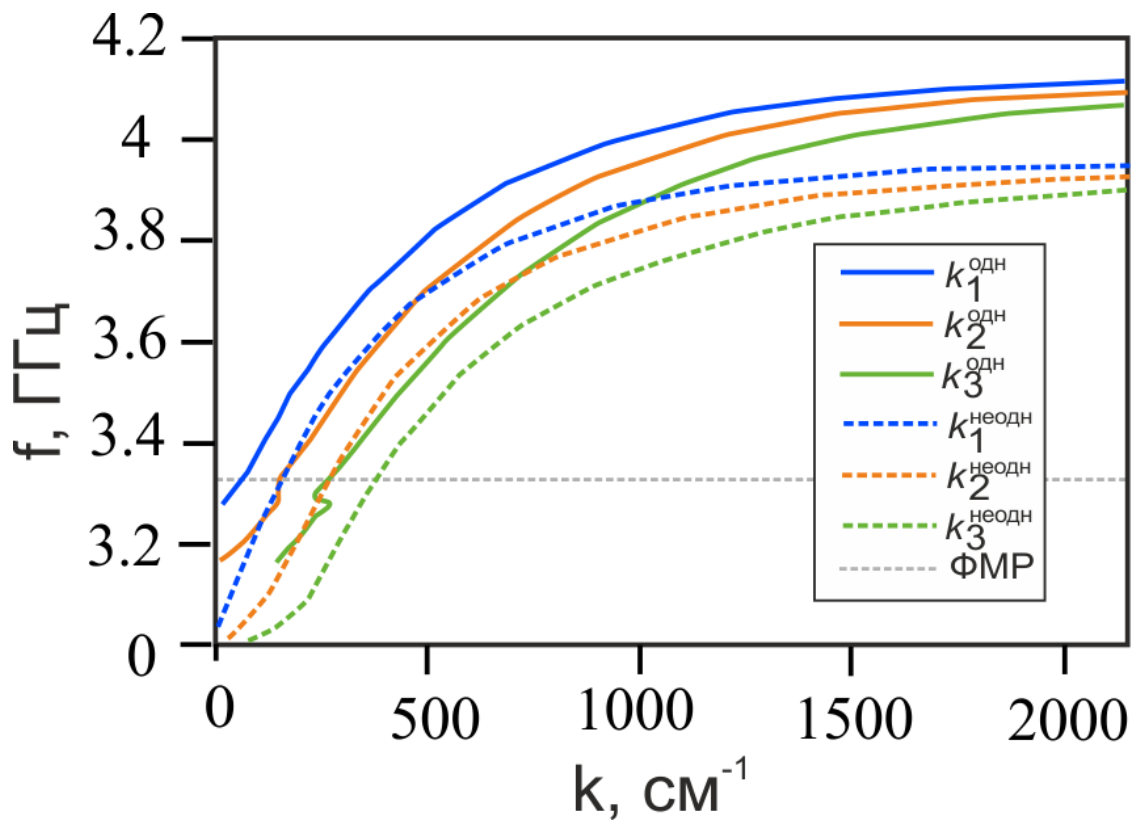


Рис5. Дисперсионная характеристика для однородного магнитного поля в одиночном волноводе.



Рисб. Дисперсионные характеристики для однородного и неоднородного магнитных полей в одиночном волноводе.

На рис. 6 показаны дисперсионные характеристики, полученные при однородном и неоднородном магнитном поле. Спектр первых трёх собственных мод для однородного поля показаны сплошными линиями, а для неоднородного поля штрихованными линиями. Серой штрихованной линией показана величина ферромагнитного резонанса. Видно, что в случае неоднородного распределения внутреннего поля, дисперсионные характеристики смещаются вниз по частоте, это обусловлено тем, что при учёте эффектов размагничивания величина внутреннего магнитного поля становится меньше, и как следствие полоса возбуждения магнитостатической волны смещается вниз по частоте. Таким образом учёт неоднородности внутреннего магнитного поля приводит к смещению полосы возбуждения магнитостатической волны.

Далее рассмотрим случаи однородного и неоднородного внутреннего магнитного поля в случае, когда структура будет состоять из двух плёнок ЖИГ латерально расположенных друг относительно друга. Расчётная область такой структуры представлена на рис. 7

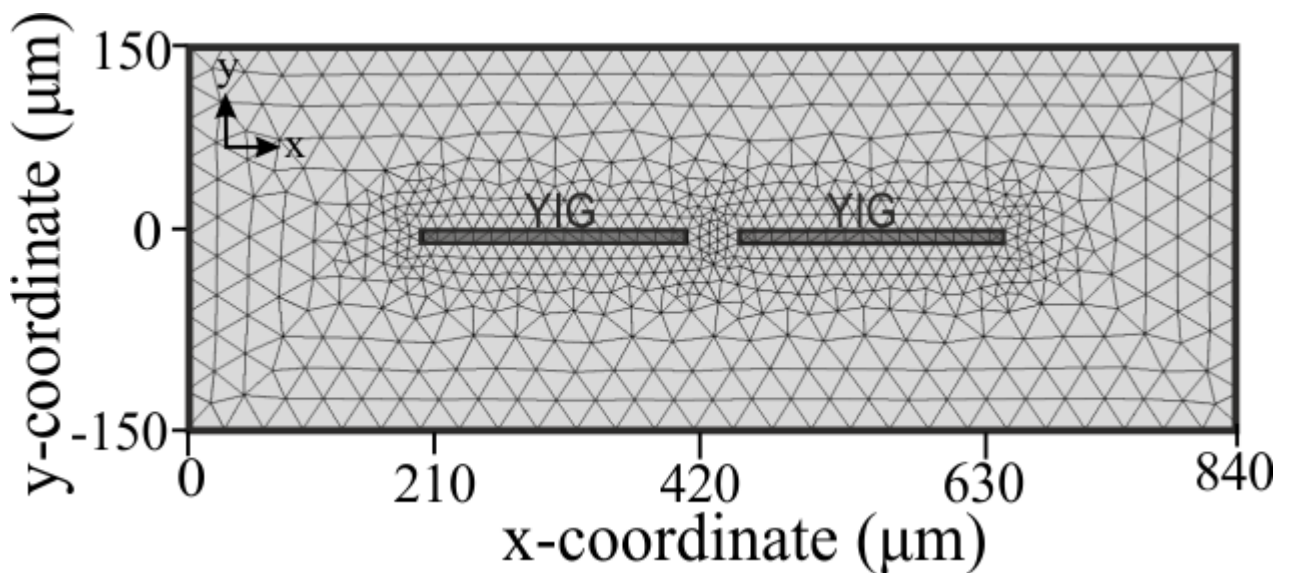


Рис 7. Схематическое изображение расчетной области, для структуры из двух латеральных волноводов.

На рис. 8 (а) и рис. 8 (б) показаны формы распределения однородного и неоднородного поля в структуре из двух латерально связанных волноводов. Видно насколько уменьшается поле при его неоднородном распределении.

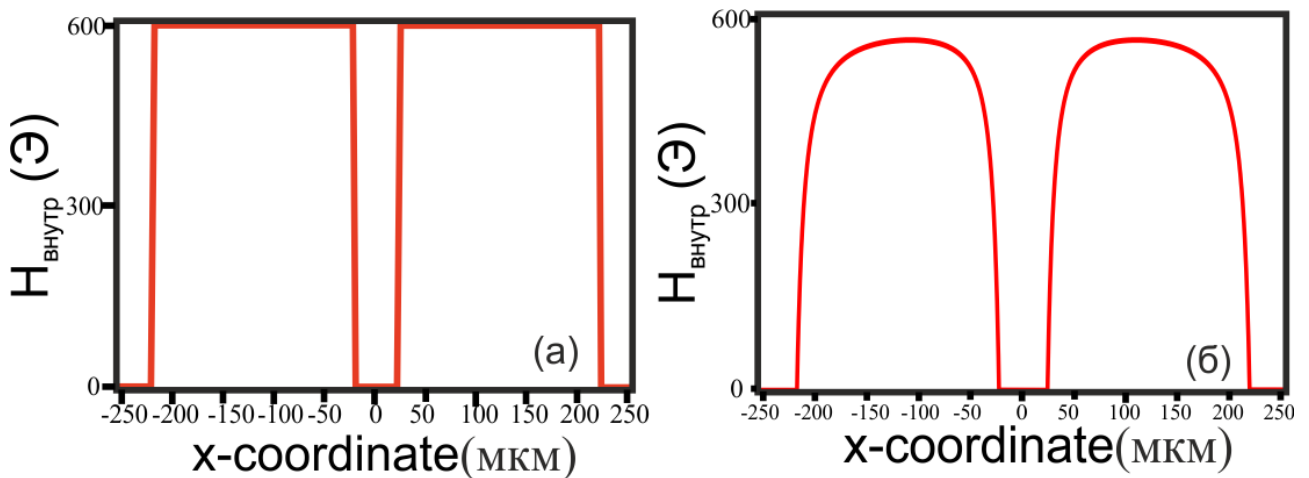


Рис 8. Распределение внутреннего магнитного поля в системе двух латеральных волноводов; (а) однородное (б) неоднородное.

В системе наблюдается расщепление мод на симметричную и антисимметричную, распределения полей для каждой моды выглядит по-разному. А именно для первой симметричной моды на распределении поля отчётливо видны максимумы на каждом из волноводов (рис.9.а). Для антисимметричной моды наблюдается максимум на одном волноводе и

минимум поля на другом(рис.9.б). Примерно такая же картина наблюдается при увеличении волнового числа, а в следствии и при переходе к высшим модам, отличие состоит в количестве максимумов и минимумов поля на поверхности волноводов. Стоит заметить, что распределение поля имеет свойство при больших частотах локализоваться на поверхностях волноводов. Для сравнения, локализации полей приведены на рис. 9. Видно, что при значении частоты в 3.35 ГГц (рис.9.а, б) распределение поля лежит на поверхности и имеет место взаимодействие между полями обоих волноводов. Но на гораздо более высокой частоте в 3.8 ГГц распределения полей на графиках (рис.9 в, г) практически полностью локализируются в волноводах, и взаимодействие между ними будет наблюдаться минимальное.

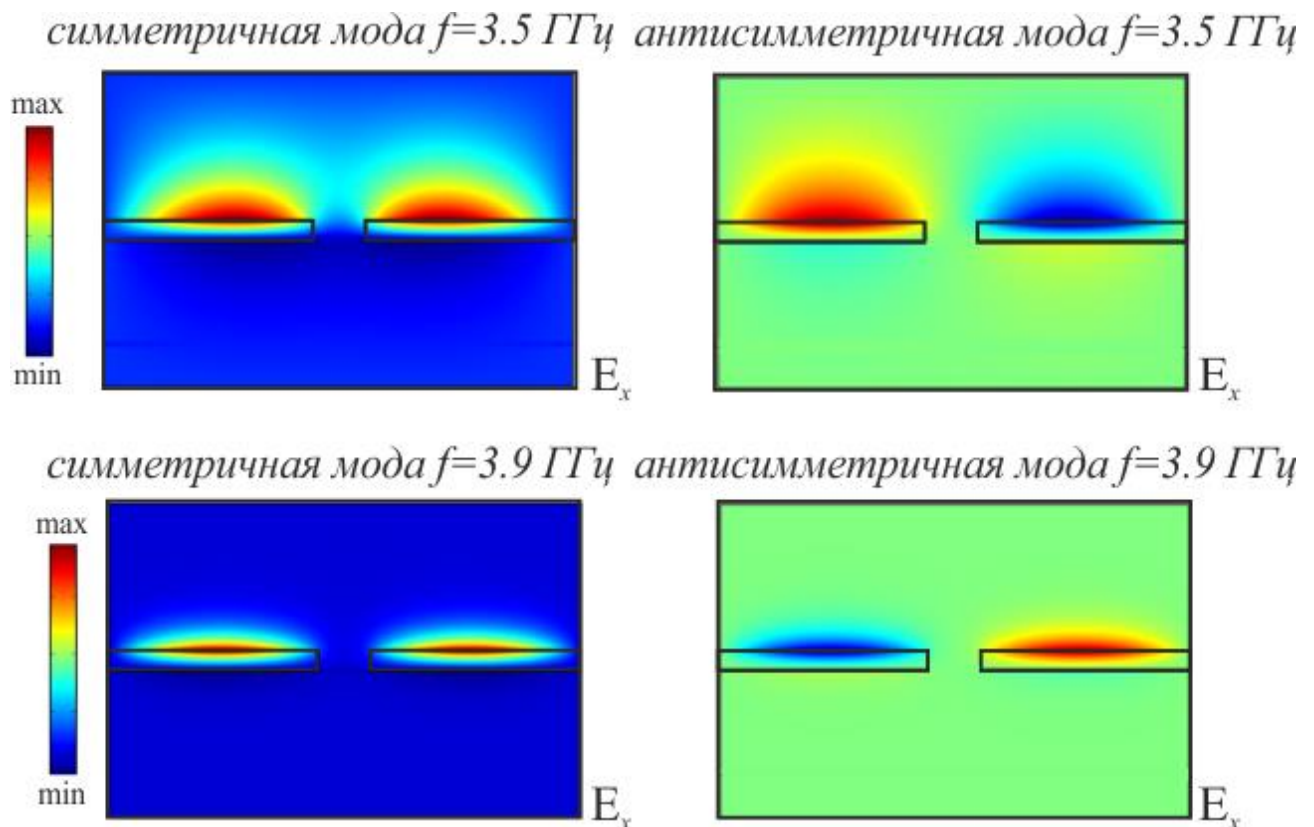


Рис 9. Распределение E_x компоненты электрического поля, полученное в COMSOL Multiphysics для системы из двух латерально связанных ЖИГ волноводов, при разных частотах.

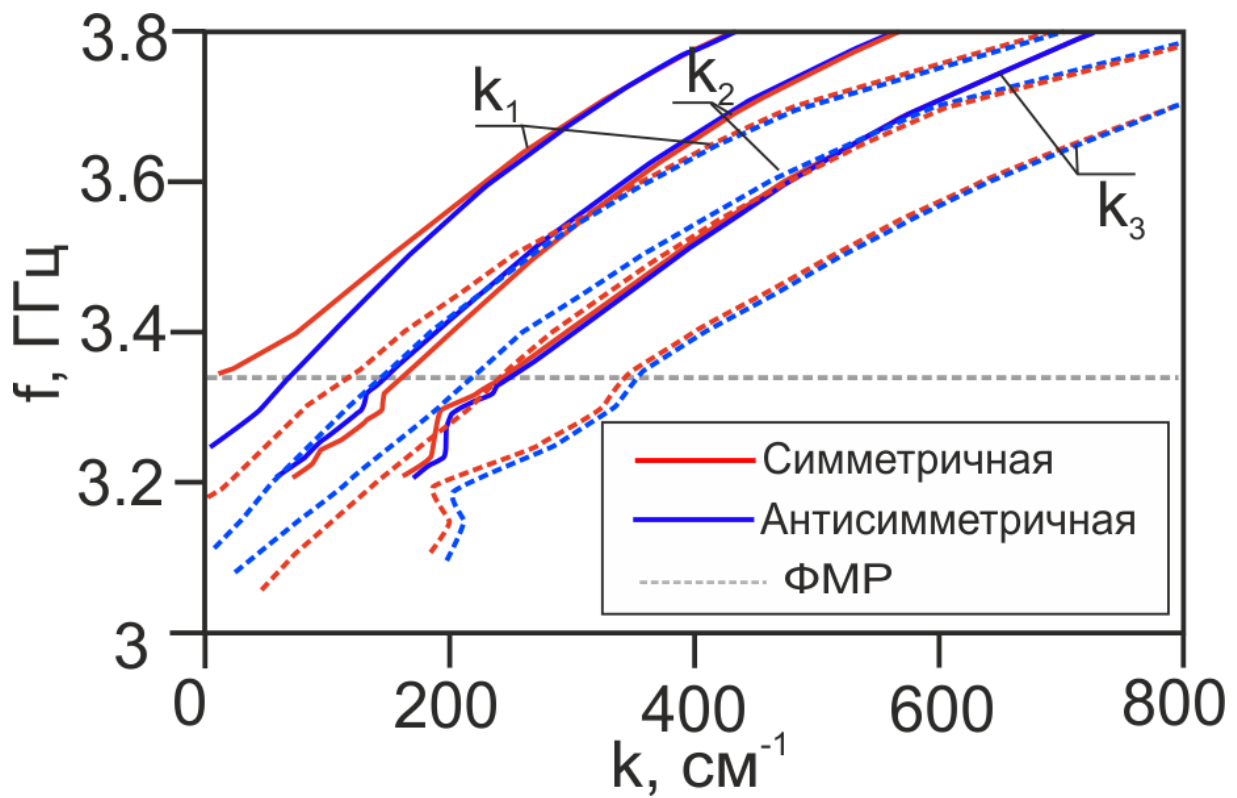


Рис 10. Дисперсионные характеристики для однородного и неоднородного магнитных полей в системе связанных латеральных

На рис. 10 показаны дисперсионные характеристики первых трёх ширинных мод для системы латеральных волноводов при однородном магнитном поле (сплошные линии) и при неоднородном внутреннем магнитном поле (штрихованные линии). Наблюдается такое же смещение полосы возбуждения магнитостатических волн, как и в случае с одиночным волноводом.

Заключение

С помощью численного решения методом конечных элементов системы уравнений Максвелла проведен расчет электродинамических характеристик МСВ, распространяющихся в одиночном волноводе и в системе латеральных волноводов конечной ширины. Решение было выполнено в программной среде физического моделирования COMSOL Multiphysics для однородного и неоднородно распределения внутреннего магнитного поля. Были построены распределения внутреннего поля без учёта неоднородности и с ней. Так же построены дисперсионные характеристики для однородного и неоднородного полей для случая одиночного волновода и системы из двух волноводов. Их сравнение показало, что при учёте неоднородного распределения внутреннего магнитного поля наблюдается эффект смещения полосы возбуждения магнитостатической волны вниз по частоте. Это можно объяснить тем, что при учёте неоднородности внутреннее магнитное поле меняет форму и максимальная величина в центре волновода становится меньше, чем без учёта неоднородности. А так как границы полосы возбуждения поверхностных магнитостатических волн прямо зависят от величины внутреннего магнитного поля, то в связи с уменьшением его величины в центре волновода эти границы смещаются вниз по частоте. Учёт данного эффекта является важным, так как при создании реальных СВЧ устройств, таких как ответвители, делители мощности, необходимо точно знать эффективный диапазон частот для одиночного волновода или системы латеральных микроволноводов.

Список использованной 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. Nikitov S A, et.al., Magnonics: a new research area in spintronics and spin wave electronics, Phys. Usp. 58 (10) (2015).
4. Demidov V.E., et.al., Spin-current nano-oscillator based on nonlocal spin injection, Sci. Rep. 5, 8578 (2015).
5. A. V. Chumak, et.al., Magnon spintronics, Nature Physics 11, 453–461 (2015).
6. O. Karlqvist, Trans. Roy. Inst. Techno. 86, 3 (1954).