

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

Кафедра нелинейной физики

**Особенности дисперсионных характеристик
магнитоэлектронных волн в ферромагнитной плёнке,
нагруженной на «левую» среду**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса магистратуры 215 группы

направления «Прикладные математика и физика»

факультета нелинейных процессов

Майстренко Анастасии Валерьевны

Научный руководитель:

д. ф.-м. н., профессор

кафедры нелинейной физики _____ Ю.П. Шараевский

Зав. кафедрой нелинейной

физики:

д. ф.-м. н., профессор _____ Н.М. Рыскин

Саратов 2016

Введение

На протяжении последних десятилетий сохраняется устойчивый интерес к исследованию магнитостатических спиновых волн (МСВ) в структурах на основе ферромагнитных пленок [1-3]. Это обусловлено, с одной стороны, перспективой практического использования МСВ в различных устройствах твердотельной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники [2,4-6], а с другой - определёнными преимуществами этих волн перед другими типами волн в кристаллических структурах. МСВ легко возбуждаются практически во всём диапазоне сверхвысоких частот (1-60 ГГц), обладают большим замедлением, существует возможность управления дисперсионными характеристиками этих волн с помощью внешних нагрузок и магнитного поля, нелинейные явления наблюдаются при сравнительно небольших уровнях мощности. Магнитостатические волны обладают также сильной дисперсией и легко управляются внешним магнитным полем. Различают три типа магнитостатических волн – прямые объёмные волны в нормально намагниченных пластинах (плёнках) феррита (ПОМСВ), обратные объёмные волны в касательно намагниченных плёнках (ООМСВ) и, наконец, поверхностные МСВ (ПМСВ) также в касательно намагниченных пластинах феррита [2-3].

С помощью линий передачи на МСВ можно реализовать практически все основные операции, используемые для функциональной обработки сигналов: управляемую задержку, фильтрацию, преобразование спектра, ограничение мощности, подавление побочных сигналов и шумов и т.д. [2, 4-6].

При распространении магнитостатических волн в многослойных структурах дисперсия их в сильной степени определяется характером проводимости нагрузок, примыкающих к ферритовому слою [2]. Поэтому представляет интерес рассмотрение характеристик МСВ в композитных

ферромагнитных структурах, в которых ферромагнитная плёнка нагружена на среды с различными свойствами.

Одним из приоритетных направлений в науке в настоящее время является создание искусственных композитных материалов с необычными свойствами, которые не наблюдаются у природных материалов. Они получили название «метаматериалы» и представляют собой искусственно сконструированные структуры, состоящие из отдельных микро- и наноразмерных либо слоёв с различными свойствами, либо объёмных элементов (частиц) [7-10]. Активно в последние годы принимаются так же попытки сконструировать искусственные материалы, которые обладают одновременно отрицательными значениями электрической и магнитной проницаемостями и которые получили название «левые» среды [11-13].

Удивительным свойством «левых» сред является то обстоятельство, что на границе раздела между обычным веществом и «левой» средой наблюдается отрицательное преломление волны и падающий поток энергии оттекает от границы раздела [11,12].

В последнее время активно так же исследуется возможность создания искусственных сред на основе ферромагнитных структур, в которых для волновых процессов наблюдаются эффекты отрицательного показателя преломления (см., например, [14-16]).

В связи с этим определённый интерес так же представляют и задачи, связанные с распространением магнитостатических волн в слоистых ферромагнитных структурах типа ферромагнетик - «левая» среда.

Целью данной магистерской работы является анализ и расчёт дисперсионных характеристик магнитостатических волн для структуры, представляющую собой ферромагнитную плёнку, нагруженную на слой «левой» среды.

Работа состоит из введения, двух глав и заключения. Список используемой литературы включает 18 наименований.

Основная часть

Рассмотрим бесконечно широкую в плоскости (x, z) слоистую структуру, в которой ферритовый слой нагружен на полубесконечные слои «левой» среды через диэлектрик (рис 1).

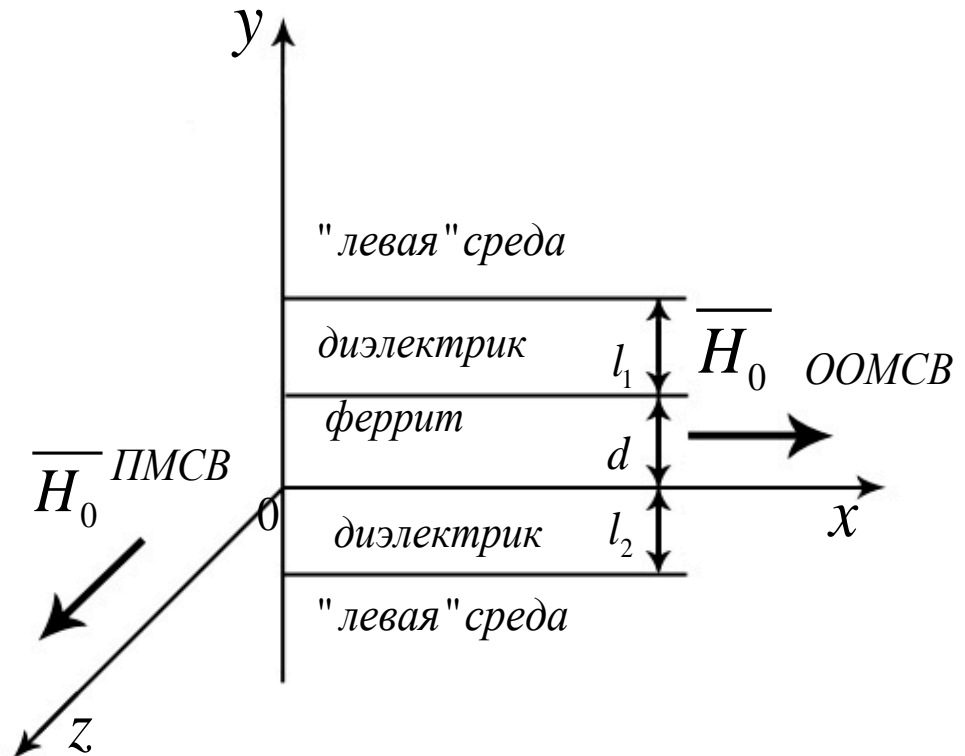


Рис.1 Ферромагнитная плёнка, нагруженная полубесконечными слоями «левой» среды через диэлектрик.

Дисперсию магнитостатических волн, распространяющихся в композитной структуре, представленной на рис. 1, описывает уравнение:

$$(2 - r_1 - r_2)\beta\mu_{22} + [\mu_{11}\mu_{22} - \mu_{12}^2 - \rho\mu_{12}(r_1 - r_2) + (1 - r_1)(1 - r_2)]\text{th}(\beta kt) = 0,$$

(1)

где $r_{1,2} = R_{1,2} \frac{1 - \text{th}(kl_{1,2})}{1 - (1 - R_{1,2})\text{th}(kl_{1,2})}$, $R_{1,2} = 1 \pm \frac{i}{Y_{1,2}}$, $\beta = (\mu_{11}/\mu_{22})^{1/2}$.

Уравнение (1) получено в самом общем виде для любых типов МСВ, распространяющихся в ферромагнитной структуре, нагруженной на слои с произвольным значением проводимости.

Для расчёта дисперсионных характеристик МСВ необходимо ввести поверхностную магнитную проницаемость для границы «левой» среды:

$$Y = +i. \quad (2)$$

Будем считать, что внешнее магнитное поле \bar{H}_0 приложено вдоль оси z , и, следовательно, вдоль оси x распространяется поверхностная магнитостатическая волна. Дисперсионное соотношение для ПМСВ:

$$\frac{(3th(kl) - 1)^2}{(th(kl) + 1)^2} + 2\mu \frac{(3th(kl) - 1)}{(th(kl) + 1)} cth(kd) + \mu^2 - \mu_a^2 = 0, \quad (3)$$

где l – толщина диэлектрических слоёв, d – толщина ферритового слоя, а μ и μ_a – компоненты тензора намагниченности [2].

При $l \rightarrow \infty$ уравнение (3) переходит в уравнение для поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ), распространяющейся в плёнке, нагруженной на полубесконечные слои обычного диэлектрика:

$$1 + 2\mu cth(kd) + \mu^2 - \mu_a^2 = 0 \quad (4)$$

Дисперсионная характеристика, соответствующая данному уравнению (4) представлена на рисунке 2.

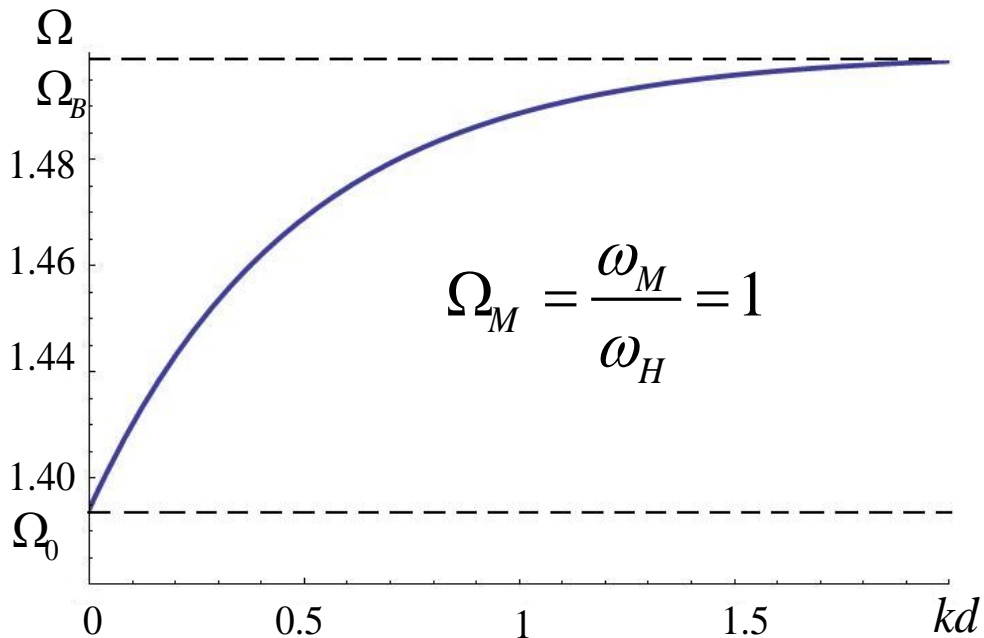


Рис.2. Дисперсионная характеристика, описывающая ПМСВ в свободной пластине феррита

Видно, что поверхностная магнитостатическая волна, распространяющаяся в свободной ферромагнитной плёнке, обладает нормальной дисперсией и дисперсионная характеристика лежит в ограниченной полосе частот (Ω_0, Ω_B) .

Когда $l = 0$ уравнение (9) примет вид:

$$1 - 2\mu \text{cth}(kd) + \mu^2 - \mu_a^2 = 0$$

(5)

Дисперсионная характеристика, соответствующая данному случаю, представлена на рисунке 3.

В случае, когда диэлектрические слои имеют конечную толщину, т.е. $l_1 = l_2 = l$. В этом случае дисперсия волны описывается уравнением (3). Результаты расчёта дисперсионных зависимостей по уравнению (3) представлены на рисунке 3 при различных значениях толщины диэлектрического слоя l .

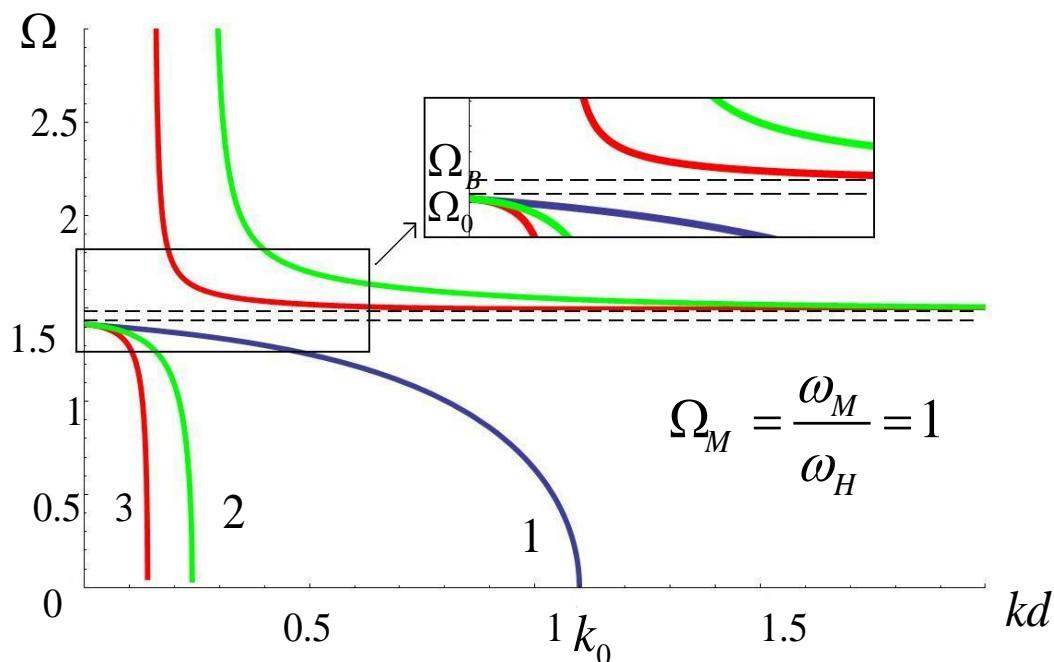


Рис.3. Дисперсионные характеристики при различных значениях толщины диэлектрических слоёв: кривая 1 соответствует случаю $l = 0$, кривая 2 - случаю $l = d$, кривая 3 - случаю $l = 2d$.

Из рисунка 3 следует, что при конечных значениях l дисперсионные характеристики имеют аномальный характер и имеют две области по частотам: одна область соответствует интервалу $\Omega = 0 \div \Omega_0$, а другая $\Omega = \Omega_B \div \infty$. Отметим, что интервал частот $\Omega_0 \leq \Omega \leq \Omega_B$ соответствует значению, в котором распространяется поверхностная МСВ в ферритовой плёнке, нагруженной на обычные диэлектрические слои. Дисперсионные характеристики носят аномальный характер. Верхняя граница частоты при выбранных параметрах соответствует случаю $k = 0$ и эта частота $\Omega_0 = \sqrt{1 + \Omega_M}$ и совпадает с нижней граничной частотой для случая ПМСВ, распространяющейся в свободной ферромагнитной плёнке. ричем из результатов расчётов на рис. 6 видно, что в случае, когда ферритовая плёнка ограничена слоями «левой» среды, существует ограниченный диапазон волновых чисел для распространения волны ($k = 0 \div k_0$), где k_0 соответствует $\omega = 0$.

Таким образом, в рассмотренном случае при $k = 0$ значение $v_\phi = \frac{\Omega \omega_H}{k} \rightarrow \infty$, а при $k = k_0, (\omega = 0)$ $v_\phi \rightarrow 0$. Можно констатировать, что

использование магнитостатического приближения в области $k \ll k_0$ является не совсем корректным.

В случае, когда внешнее магнитное поле приложено вдоль оси x , в том же направлении распространяется обратная объёмная магнитостатическая волна. Из (1) получаем дисперсионное соотношение, описывающее распространение обратных объёмных магнитостатических волн:

$$2 \frac{3th(kl) - 1}{1 + th(kl)} \beta \mu + [\mu + (\frac{3th(kl) - 1}{1 + th(kl)})^2] th(\beta kd) = 0, \quad (6)$$

где d – толщина ферритового слоя, $\beta = \sqrt{\frac{\mu_{11}}{\mu_{22}}} = \sqrt{\frac{1}{\mu}}$.

При $l \rightarrow \infty$ уравнение (6) переходит в уравнение для обратной объёмной магнитостатической волны, распространяющейся в свободной пластине феррита [2]:

$$\frac{2\xi}{\xi^2 - 1} = tg(\frac{kd}{\xi}), \quad (7)$$

где $\xi = \sqrt{-\mu}$.

В случае, когда $l_{1,2} = 0$, т.е. когда ферромагнитная плёнка нагружена на полубесконечные слои «левой среды», уравнение (6) принимает вид:

$$\frac{2\xi}{1 - \xi^2} = tg(\frac{kd}{\xi}) \quad (8)$$

В случае же, когда диэлектрические слои имеют конечную толщину l_1 и l_2 , соотношение (6) принимает вид:

$$tg(\frac{kd}{\xi}) = \frac{(th(kl_1) + th(kl_2))\xi}{th(kl_1)th(kl_2) - \xi^2}$$

(9)

Если же мы толщину одного диэлектрического слоя устремим в бесконечность ($l_2 \rightarrow \infty$), а другой диэлектрический слой будет иметь конечную толщину ($l_1 = Const$), соотношение (6) примет вид:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{kd}{\xi}\right) = \frac{(\operatorname{th}(kl_1) + 1)\xi}{\operatorname{th}(kl_1) - \xi^2} \quad (10)$$

Дисперсионные кривые, соответствующие уравнениям (7)-(10) представлены на рисунках 4-7.

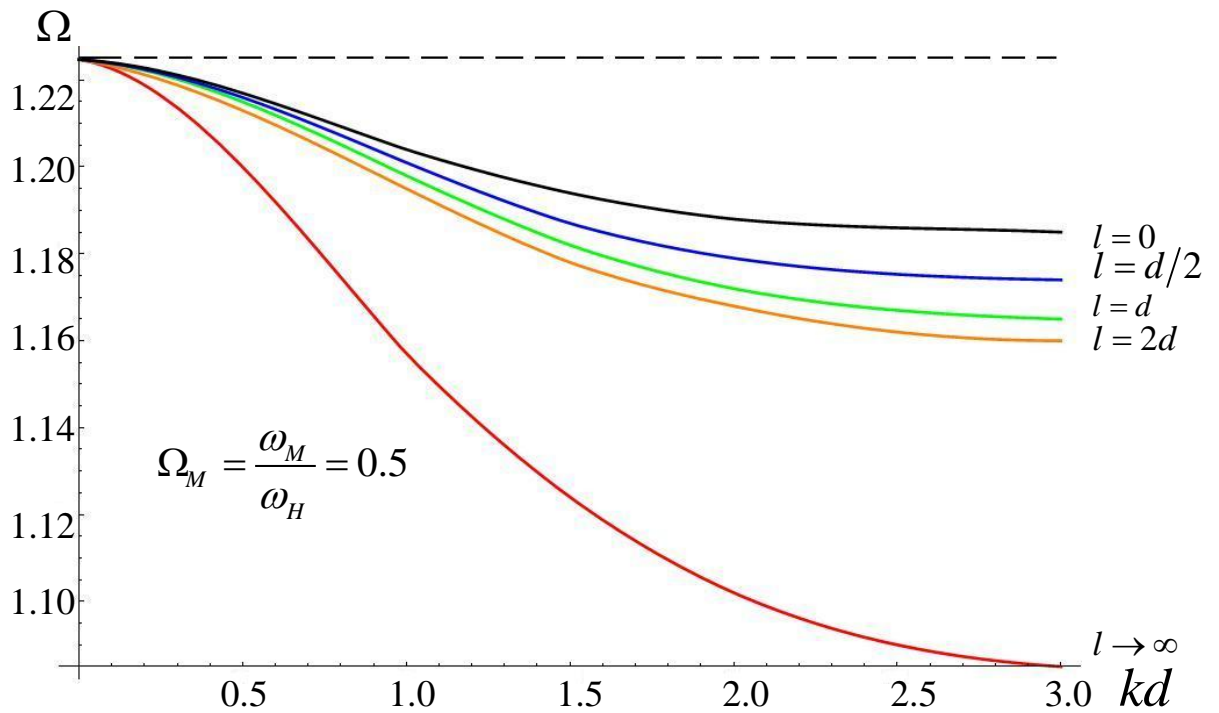


Рис.4 Дисперсионные кривые при различных значениях толщины диэлектрических слоёв: $l = 0; d/2; d; 2d$, в случае, когда ферромагнитная плёнка нагружена с двух сторон на «левую» среду через диэлектрик.

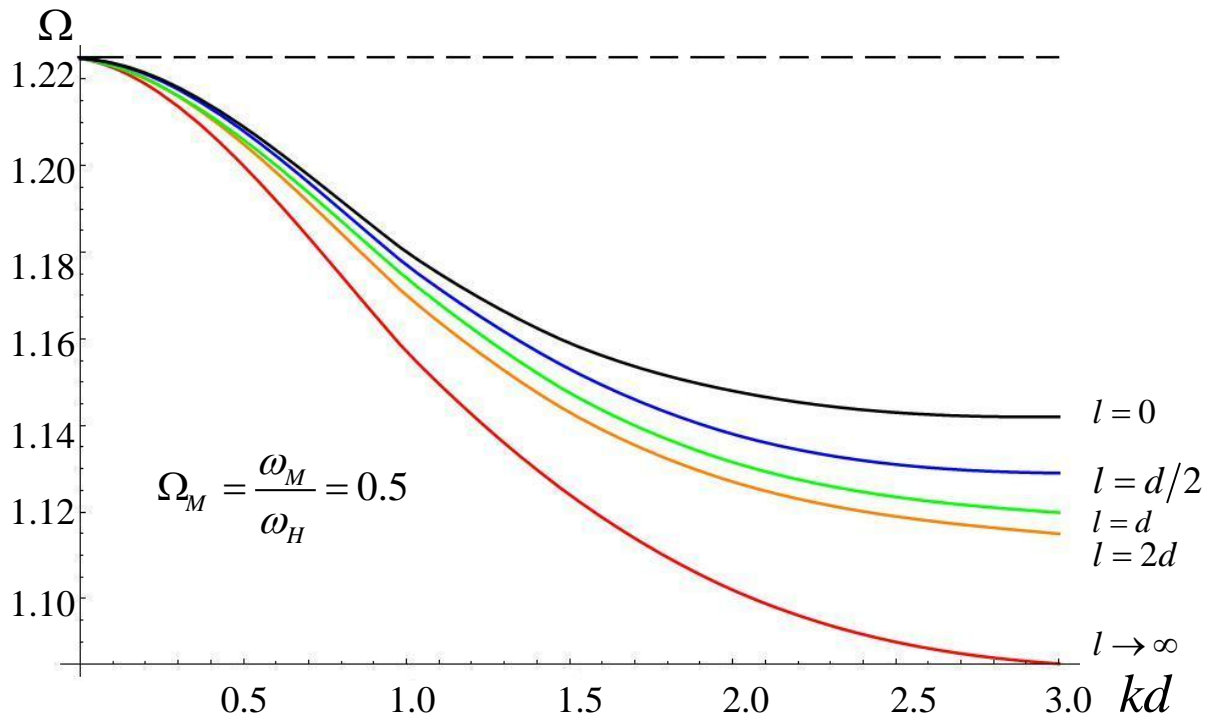


Рис.5 Дисперсионные кривые при различных значениях толщины диэлектрических слоёв: $l = 0; d/2; d; 2d$, в случае, когда ферромагнитная плёнка нагружена с одной стороны на «левую» среду через диэлектрик, а с другой стороны на полубесконечный слой диэлектрика.

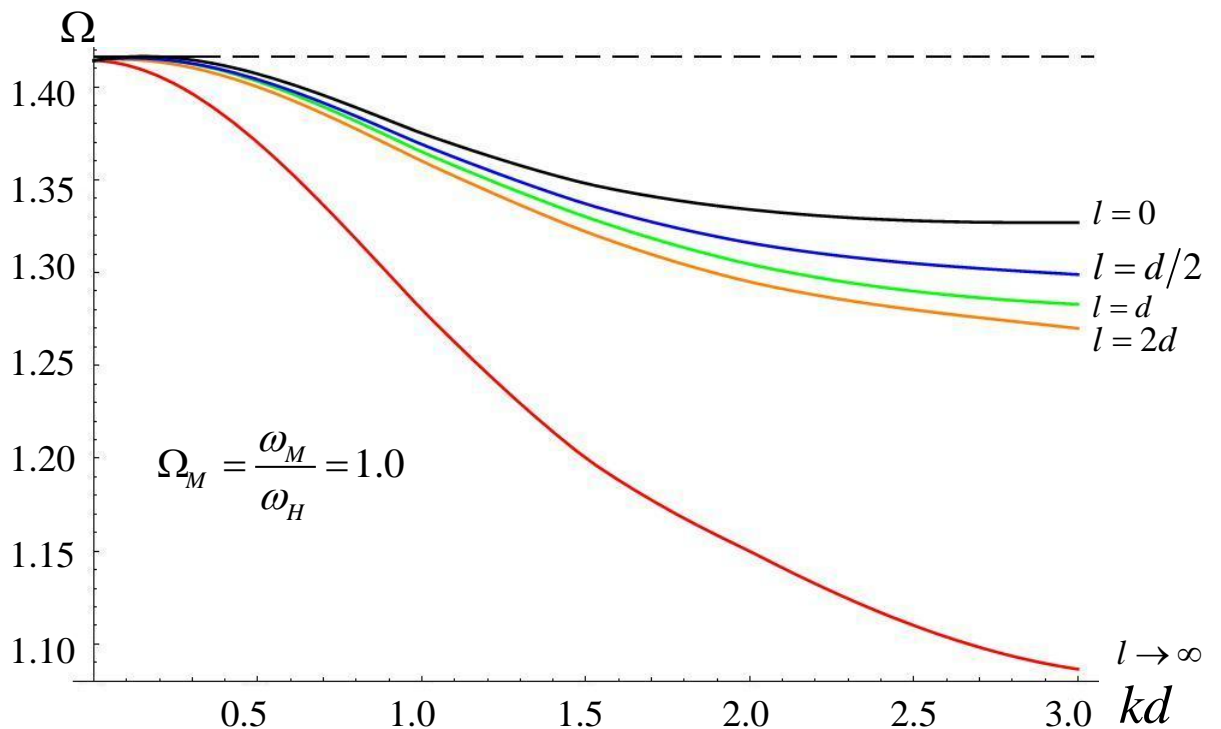


Рис.6 Дисперсионные кривые при различных значениях толщины диэлектрических слоёв: $l = 0; d/2; d; 2d$, в случае, когда ферромагнитная плёнка нагружена с двух сторон на «левую» среду через диэлектрик.

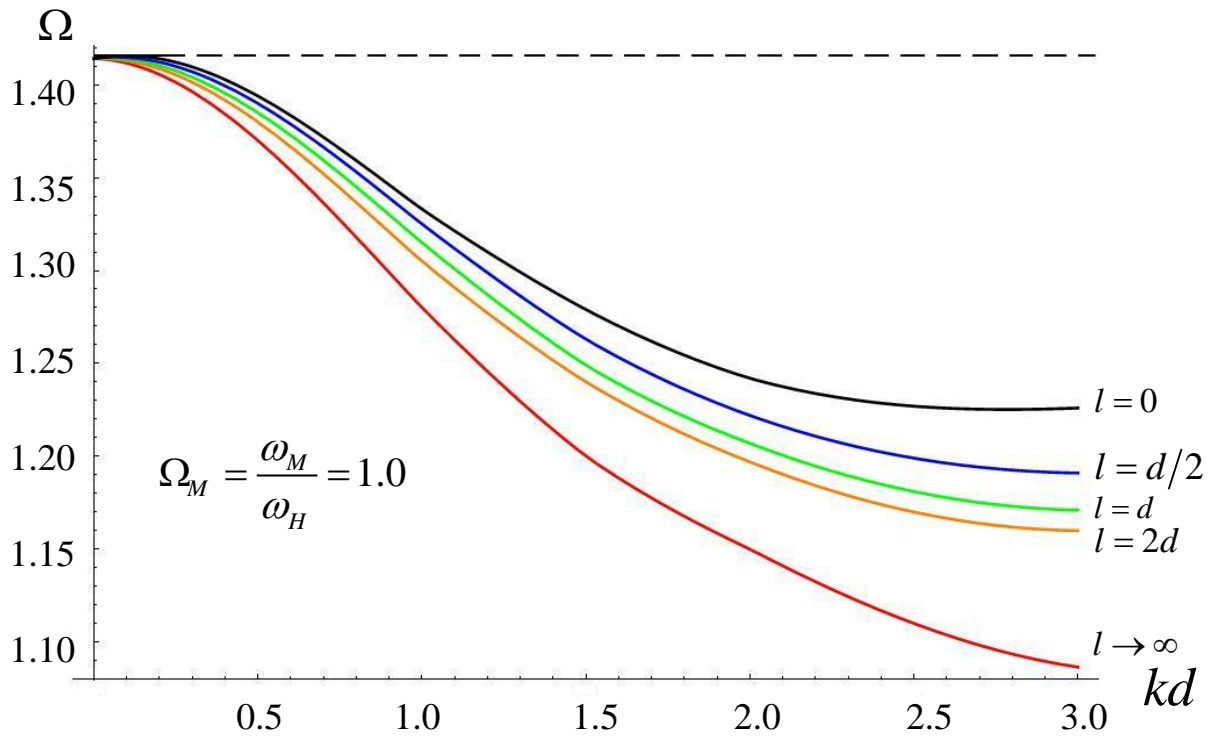


Рис.7 Дисперсионные кривые при различных значениях толщины диэлектрических слоёв: $l = 0; d/2; d; 2d$, в случае, когда ферромагнитная плёнка нагружена с одной стороны на «левую» среду через диэлектрик, а с другой стороны на полубесконечный слой диэлектрика.

Полученные результаты говорят о том, что в присутствии «левой» среды дисперсия обратных объёмных магнитостатических волн имеет аномальный характер, как и в случае ферромагнитной плёнки, нагруженной на «правую» среду. Причём частотный интервал Ω , в котором могут распространяться медленный ООМСВ для нагрузок в виде «левой» среды становится существенно меньше по сравнению со случаем свободной плёнки. Верхняя граничная частота при $k=0$ во всех рассмотренных случаях равна $\Omega_B = \sqrt{1 + \Omega_M}$ и увеличивается с ростом Ω_M .

Нижняя граничная частота при $k \rightarrow \infty$ больше Ω_0 и достигает максимального значения при $l=0$.

Заключение

В данной магистерской работе были получены следующие основные результаты:

1. Рассмотрен общий подход получения дисперсионного уравнения для магнитостатических волн, распространяющихся в слоистой структуре на основе ферромагнитной плёнки, для случая, когда плёнка нагружена на слои с произвольной поверхностной комплексной проводимостью. Конкретно рассмотрены случаи свободной плёнки и плёнки, нагруженной на металл, при получении дисперсионного уравнения для обратной объёмной магнитостатической волны.
2. На основе полной системы уравнений Максвелла получено значение поверхностной магнитной проницаемости для полубесконечного слоя «левой среды».
3. На основе используемого подхода сформулированы дисперсионные соотношения для поверхностной и обратной объёмной магнитостатических волн в ферромагнитной плёнке, нагруженной на «левую» среду через диэлектрические слои.
4. Проведён расчёт дисперсионных характеристик МСВ в сложной композитной ферромагнитной структуре, содержащей полубесконечные слои «левой» среды. Рассмотрены конкретные случаи в зависимости от параметров структуры и проведено сравнение с ранее рассмотренными случаями для ПМСВ и ООМСВ, распространяющихся в ферромагнитной плёнке, нагруженной на диэлектрические слои с $\varepsilon > 0$.

Список использованных источников

1. Adam J.D., Daniel M.R., Emtage P.R., Tilisa S.N. Magnetostatic wave // Thin films for advanced electronics devices. Boston. 1991. P. 1-141.
2. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Изд-во СГУ. 1993. 311 с.
3. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука. Изд. фирма "Физ.-мат. лит.". 1994. 461 с.
4. Исхак В.С. Применение магнитостатических волн: Обзор // ТИИЭР. 1988. Т. 76, № 2. С. 86-104.
5. Баруздин С.А., Егоров Ю.В., Калиникос Б.А. и др. Функциональные устройства обработки сигналов (основы теории и алгоритмы). М.: Радио и связь. 1997. 288 с.
6. Шараевский Ю.П., Гришин С.В., Бегинин Е.Н., Малюгина М.А. Нелинейные линии передачи на магнитостатических волнах и перспективы их применения для генерации и обработки сигналов в диапазоне сверхвысоких частот// Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 9, С. 36-47.
7. Гуляев Ю.В., Лагароков А.Н., Никитов С.А. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы их применения // Вестник Российской академии наук. 2008, т. 78, №5.
8. Smith D. R. Et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. v. 84, № 18.
9. Shelby R. A., Smith D. R. , Schulz S. // Science. 2001. v. 292.
10. Пендри Д., Смит Д. В поисках суперлинзы. // в мире науки. 2006. №11, ноябрь.
11. Шараевский Ю.П. «Левые» среды. Чем они интересны? Изд. Вузов «ПНД», т.20, №1, 2012.

12. Веселаго В.Г. электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ε и μ . // УФН. 1967. Т.92, вып. 3.
13. Блиох К.Ю., Блиох Ю.П. Что такое левые среды и чем они интересны?// УФН. 2004. Т. 174, вып.4.
14. Вашковский А.В., Локк Э.Г. Обратные поверхностные электромагнитные волны в композитных структурах, использующих ферриты // Р и Э. 2003. Т. 48, №2.
15. Вашковский А.В., Локк Э.Г. Возникновение отрицательного коэффициента преломления при распространении поверхностной магнитостатической волны через границу раздела сред феррит-феррит диэлектрик-металл. // УФН. 2004. Т. 174, вып.6.
16. Вашковский А.В., Локк Э.Г. Свойства обратных электромагнитных волн и возникновение отрицательного отражения в ферритовых плёнках. // УФН. 2006. Т. 17, вып. 4.
17. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. Издательство Либроком (УРСС). 2011.
18. Силин Р.А. Электромагнитные волны в искусственных периодических структурах // УФН. 2006. Т. 175, №5, С. 562