

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

**Распространение электромагнитных волн в ограниченном
слое «левой» ферромагнитной среды**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 411 группы
направления 03.03.01 Прикладные математика и физика
Факультета нелинейных процессов

Ляльченко Арсения Алексеевича

Научный руководитель
профессор, д. ф. – м. н.

Ю.П. Шараевский

Заведующий кафедрой
профессор, д. ф. – м. н.

Н.М. Рыскин

Саратов 2016 год

Введение

Одним из приоритетных направлений в науке сегодняшнего дня является создание искусственных материалов с необычными свойствами, которые не наблюдаются у природных материалов. Они получили название метаматериалы.

Метаматериалы – это композитные материалы, свойства которых обусловлены не столько индивидуальными физическими свойствами их компонентов, сколько микроструктурой. Сам термин «метаматериалы» особенно часто применяют по отношению к тем композитам, которые демонстрируют свойства, нехарактерные для объектов, встречающихся в природе. Метаматериалы можно конструировать, создавая крошечные периодические структуры. Дело в том, что электромагнитная волна не «видит» отдельные атомы или молекулы, а «видит» только коллективную взаимосвязь множества частиц. Все это справедливо и для метаматериалов, у которых элементы структуры так же намного меньше длины волны. Поле электромагнитной волны состоит как из электрической, так и из магнитной составляющей. Электроны движутся по круговой траектории под действием магнитного поля, и вперед-назад под действием электрического. Поэтому степень взаимодействия определяется двумя параметрами, а именно диэлектрической и магнитной проницаемостью ϵ и μ соответственно. У большинства материалов ϵ и μ больше нуля. Показатель преломления n , в свою очередь, характеризует оптические свойства веществ. В тоже время, он связан с ϵ и μ соотношением $n = \pm\sqrt{\epsilon * \mu}$. Активно в последние годы предпринимаются также и попытки сконструировать материалы, которые можно рассматривать как «левые» среды. В изотропной среде, свойства которой не зависят от направления, связь между параметрами электромагнитной волны (фазовой скоростью V_{ϕ} , длиной волны λ и частотой ω) определяется следующим соотношением:

$$k^2 = \left(\frac{\omega}{V}\right)^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 * \epsilon \mu \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, C – скорость света в вакууме, а ε и μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, соответственно. Для вакуума $\varepsilon = \mu = 1$, а для всех остальных веществ, встречающихся в природе, $\varepsilon, \mu > 0$. Оптические свойства вещества характеризуются показателем преломления n , который связан с ε, μ простым соотношением:

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu}, \varepsilon < 0, \mu < 0 \rightarrow n > 0 \quad (2)$$

Для всех известных материалов перед квадратным корнем должен стоять знак «+» и поэтому показатель преломления положителен. Если не учитывать потери в среде и считать, что ε и μ – действительные величины, то из соотношений (1) и (2) видно, что одновременная смена знаков ε и μ ($\varepsilon, \mu < 0$) не меняет эти соотношения.

Пространственно-периодическая среда (в данном случае кристаллическая решетка) является примером среды, показателем преломления которой в некотором диапазоне частот может быть отрицательным. К таким средам можно отнести анизотропные диэлектрические и ферромагнитные среды, в которых в некотором интервале могут быть отрицательными значения диэлектрической ε или магнитной μ проницаемостей. Искусственные среды, созданные в конце 90-х годов и вызвавшие резкий всплеск интереса к левым средам, также являются пространственно-периодическими. Эти среды обладают отрицательным показателем преломления для волн СВЧ-диапазона с частотами порядка 10 ГГц. В теоретической работе рассматривается возможность создания периодической структуры, на поверхности которой могли бы существовать низкочастотные слабозатухающие волны, аналогичные плазмонам- коллективным волнам в металлах. Для этого диэлектрическая проницаемость среды должна быть отрицательна. Авторы работы [1] показали, что периодическая решетка из тонких проволочек обладает малым затуханием и отрицательной диэлектрической проницаемостью для электромагнитных волн порядка 1-10 ГГц. Позже была предложена периодическая решетка из кольцевых резонаторов, обладающих в

этом же частотном диапазоне отрицательной магнитной восприимчивостью [2]. Объединение двух решеток в одну и привело к созданию левой среды, обладающей отрицательным показателем преломления.

В связи с этими свойствами «левые» среды можно отнести к искусственно созданным средам, которые обладают качественно новыми свойствами и которые, как уже упоминалось выше, получили название метаматериалы. Благодаря тому, что метаматериалы обладают отрицательным показателем преломления, они идеальны для разведки, так как их невозможно обнаружить средствами радиолокации. Значительно растет интерес к использованию метаматериалов в радиотехнических приложениях и, в частности, в антенной технике. Основные области их применения: изготовление подложек и излучателей в печатных антеннах для достижения широкополосности и уменьшения размеров антенных элементов; компенсация реактивности электрически малых антенн в широкой полосе частот, в том числе превышающей фундаментальный предел Чу; достижение узкой пространственной направленности элементарных излучателей, погруженных в метасреду; изготовление антенн поверхностной волны; уменьшение взаимного влияния между элементами антенных решеток, в том числе в ММО-устройствах; согласование рупорных и других типов антенн.

Особый интерес представляет собой использование ферромагнитных сред в составе метаматериалов., которые позволяют получить искусственные среды и структуры с совершенно новыми, необычными свойствами, которые могут найти применение в магнитоэлектронике, радиолокации и при создании новых радиопоглощающих материалов.

Целью настоящей выпускной работы является изучение распространения электромагнитных волн в ограниченном слое «левой» ферромагнитной среды. Получение дисперсионные уравнения, проведение анализа и расчет дисперсионных характеристик волн при различной толщине слоя.

Основное содержание работы

В первом разделе «Левые среды» были рассмотрены электродинамические соотношения для «правых» и «левых» сред, описание «левой» среды и возможность реализации «левой» среды.

Во втором разделе «Распространение электромагнитных волн в плоском слое левой среды, нагруженной на металл» проведены результаты анализа дисперсионных характеристик при различных значениях толщины слоя, а также зависимости фазовой скорости от частоты для «левой» и «правой» среды. Схема исследуемой модели «левой» среды представлена на рис.1.

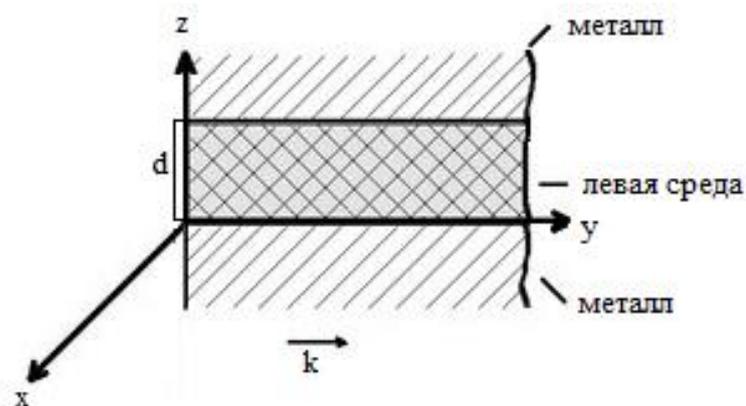


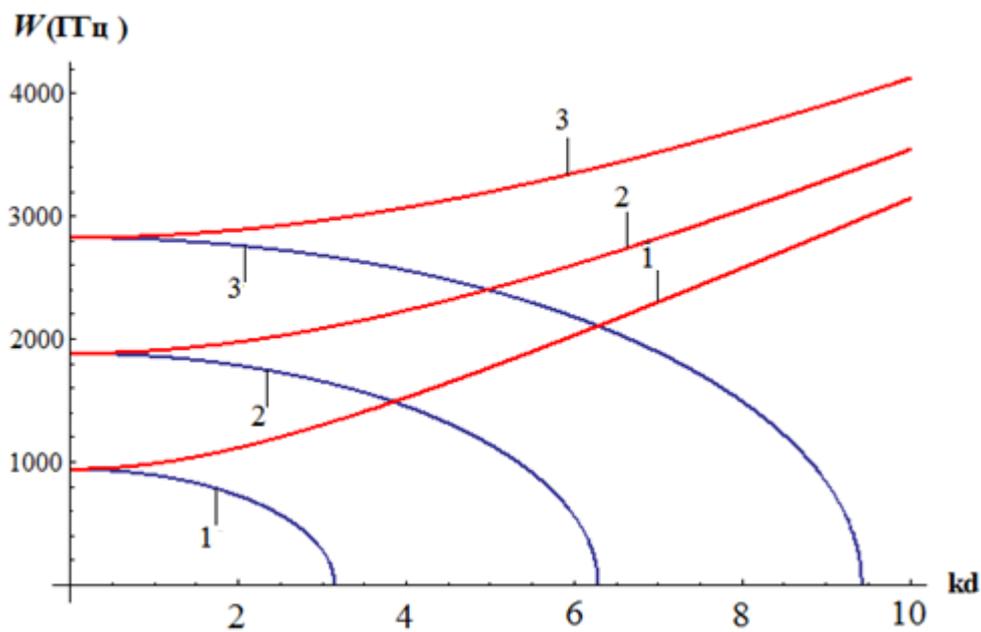
Рис.1. Модель «левой» среды, нагруженной на металл.

Дисперсионное уравнение, описываемое электромагнитные волны в такой металлизированной структуре можно представить в виде (при $\varepsilon = \mu = 1$)

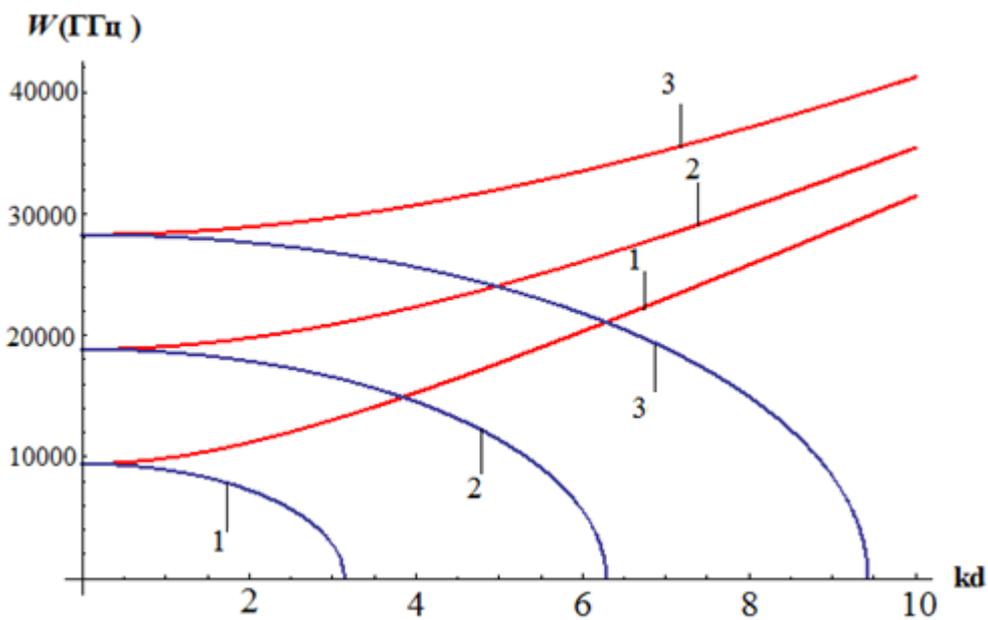
$$\frac{\omega^2}{c^2} = \frac{(n\pi)^2}{d^2} \pm k^2, \quad (3)$$

где d — толщина слоя, k — постоянная распространения волны, ω — частота, c — скорость света; знак «+» в (3) относится к «правой» среде, знак «-» - к «левой».

Результаты расчета по соотношению (3) представлены на рис.2.



а)



б)

Рис. 2. Дисперсионные характеристики $\omega(kd)$ при различных значениях d : а) $d=10^{-3}$ м. б) $d=10^{-4}$ м. Кривые 1, 2, 3 – относятся к случаю $\varepsilon = \mu = 1$; кривые 1', 2', 3' – для случая $\varepsilon = \mu = -1$.

Из результатов расчета, представленного на рис.2 видно, что дисперсионные зависимости для электромагнитных волн для металлизированного слоя «правой»

среды имеют нормальный характер ($\frac{\partial\omega}{\partial k} > 0$), а для «левой» среды имеют аномальный характер ($\frac{\partial\omega}{\partial k} < 0$), т.е. в «левой» среде групповая и фазовая скорости направлены в противоположные стороны. Кроме того, электромагнитные волны в «левой» среде могут распространяться только в ограниченном интервале значений kd .

В третьем разделе «Распространение электромагнитных волн в плоском слое «левой» ферромагнитной среды, нагруженной на металл» были получены дисперсионные характеристики для безграничной «левой» ферромагнитной среды ($\varepsilon < 0$) и дисперсионных характеристики для тонкого слоя «левой» ферромагнитной среды, нагруженной на металл. Схема исследуемой модели представлена на рис.3. Постоянное магнитное поле \bar{H}_0 направлено по нормали к поверхности слоя.

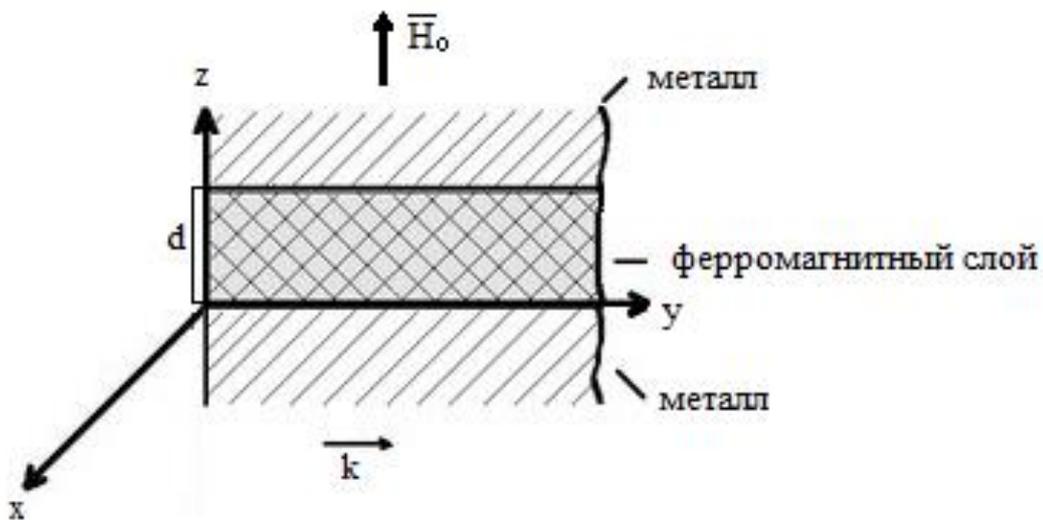


Рис.3. Модель ферромагнитной слоя, нагруженного на металл.

Для анализа использовалось дисперсионное уравнение для электромагнитных волн в ограниченном плоском слое ферромагнитной среды, которое $\varepsilon > 1$ и имеет вид[3]:

$$[k_z^2 - \mu(k_0^2\varepsilon - k^2)][k_z^2 - (k_0^2\varepsilon\mu - k^2)] - k_0^2\varepsilon\mu_a^2(k_0^2\varepsilon - k^2) = 0, \quad (4)$$

где $\mu = \frac{\omega_H(\omega_H + \omega_M) - \omega^2}{\omega_H^2 - \omega^2}$, $\mu_a = \frac{\omega_M \omega}{\omega_H^2 - \omega^2}$ - диагональная μ и недиагональная μ_a компоненты тензора ВЧ магнитной проницаемости ($\omega_H = \gamma H_0$, $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$, M_0 - намагниченность насыщения, γ - гиромагнитное отношение; k_z - поперечная слою постоянная распространения. Как следует из (4) компоненты тензора μ и μ_a в определенном интервале частот принимают отрицательные значения. Если положить в (4) $\varepsilon < 0$, то полученное уравнение в определенном интервале частот будет описывать распространение волн в «левой» среде.

Из (4) для безграничной ферромагнитной среды ($k_z = 0$) получаем следующую систему уравнений:

$$k_1 = \pm \frac{\omega\sqrt{\varepsilon}}{c} = \pm \frac{\omega}{c_1} \quad (5a)$$

$$\frac{k_2^2}{k_1^2} = \pm \frac{1 + 2\Omega_M + \Omega_M^2 - \Omega^2}{1 + \Omega_M - \Omega^2}, \quad (5b)$$

где $\Omega = \frac{\omega}{\omega_H}$, $\Omega_M = \frac{\omega_M}{\omega_H}$.

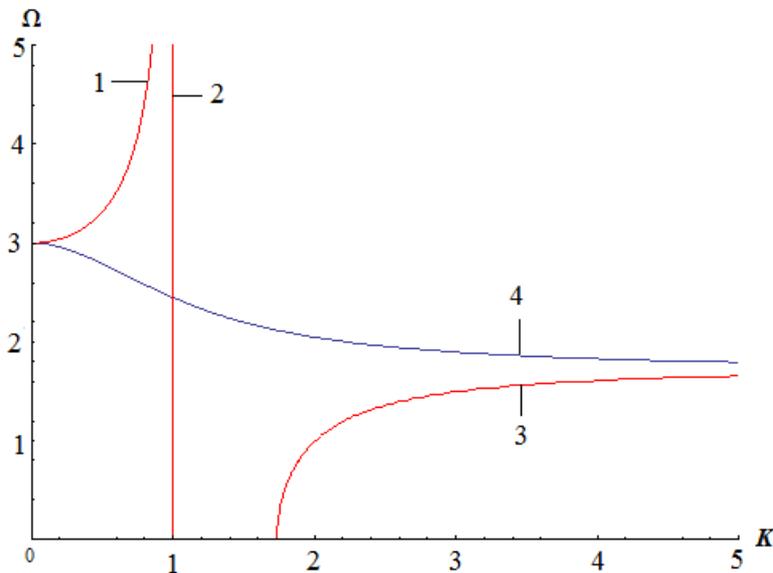


Рис.4. Дисперсионные характеристики для «левой» ($\varepsilon > 0$) и «правой» ($\varepsilon < 0$) безграничной ферромагнитной среды при $\Omega_M = 2$. Кривые 1,2,3 для «правой» среды, кривая 4 - для «левой» среды.

Был построен график зависимости (5а) и (5б) в системе координат, по осям которой отложены безразмерные величины Ω и постоянная распространения. Дисперсионные зависимости для волн в ферромагнитном слое «правой» и «левой» среды приведены на рис.4, где $K = \frac{k}{k_1}$, а $k_1 = \frac{\omega}{c_1} > 0$.

Из уравнения (4) следует биквадратное уравнение, относительно K^2 , которое описывает дисперсионное уравнение для волн в металлизированном ферромагнитном слое.

$$\mu K^4 \pm K^2 \left(\mu_a^2 + \left(\frac{n^2}{D^2} - \mu \right) (1 + \mu) \right) + \frac{n^4}{D^4} - 2\mu \frac{n^2}{D^2} + \mu^2 - \mu_a^2 = 0, \quad (6)$$

где $D = \frac{k_1 d}{\pi}$ – безразмерный параметр толщины, знак «+» относится к «правой» среде ($\varepsilon > 0$), а знак «-» - к левой среде ($\varepsilon < 0$).

На основе соотношения (6) были рассчитаны дисперсионные характеристики волны для «правой» и «левой» ферромагнитных сред при различной толщине металлизированного слоя. Результаты расчета для случая такой пластины представлены на рис.5.

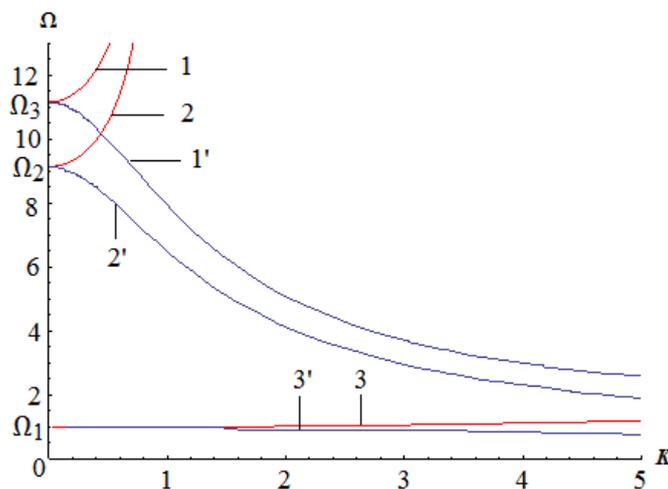


Рис.5 Дисперсионные характеристики для металлизированного слоя «правой» и «левой» среды при значении параметра $D_h = 0.1$. Кривые 1,2,3 для «правой» среды, 1',2',3' для «левой» среды.

Из рис.5 видно, что в металлизированной ферромагнитной пластине при $\varepsilon > 0$ могут распространяться волны двух типов, быстрые и медленные, а в левой среде при $\varepsilon < 0$ распространяются только медленные электромагнитные волны. Кривые 1 и 2 являются быстрыми волнами, а кривые 3, 1', 2', 3' медленными. Отметим, что при больших толщинах пластины ($D_h=5, 10$ и более) граничные частоты $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ практически совпадают с граничными частотами для безграничной среды, и чем тоньше пластина, тем граничные частоты сдвигаются в область больших частот. Медленные волны при любых значениях D_h и при $K \rightarrow \infty$ будут стремиться к верхней границе существования для «правой» среды, и к нижней границе для «левой» среды. При $K \rightarrow 0$ частотные границы зависят от толщины пластины.

Заключение

Приведем основные результаты, полученные в ходе выполнения работы:

1. На основе системы уравнений Максвелла получены волновые уравнения, описывающие распространение электромагнитных волн в плоском слое композитной среды, представляющую собой ферромагнитную среду с отрицательным значением диэлектрической проницаемости. Показано, что в определенном диапазоне частот, в котором диагональные и недиагональные компоненты тензора магнитной проницаемости принимает отрицательные значения, такую среду можно рассматривать как «левую» среду.
2. Получено дисперсионное уравнение для такой композитной ферромагнитной структуры, нагруженной на металл. Показано, что в структуре возможно распространение волн с отрицательной дисперсией в ограниченном диапазоне волновых чисел.
3. Проведено сравнение полученных результатов с особенностями распространения электромагнитных волн в обычном плоском металлизированном слое ферромагнитной среды («правая» среда) и с результатами, полученными для описания дисперсионных характеристик электромагнитных волн в металлизированном слое «левой» среды, где $\varepsilon = \mu = -1$.

Список использованной литературы

1. Pendry J.V. et al. Phys. Rev. Lett. 76 4773 (1996)
2. Pendry J.V. et al. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 47 2075 (1999)
3. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1993.
4. Блюх К.Ю., Блюх Ю.П. Что такое «левые» среды и чем они интересны? // УФН. 2004. Т. 174, № 4. С. 439.
5. Шараевский Ю.П. «Левые среды». Чем они интересны? // Изв. вузов «Прикладная нелинейная динамика». 2012. Т.20. №1. С.32.