

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра электроники, колебаний и волн

Анизотропия групповых скоростей быстрых и медленных электромагнитных волн, распространяющихся в касательно намагниченном ферромагнитном метаматериале

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 421 группы
направления 03.03.03 – радиофизика
факультета нелинейных процессов
Амельченко Марии Денисовны

Научный руководитель

доцент кафедры ЭКиВ, к.ф.-м.н

С.В. Гришин

Заведующий кафедрой

член-корреспондент РАН,
профессор, д.ф.-м.н.

Д.И. Трубецков

Саратов, 2019 год

Введение. Известно, что метаматериалы представляют собой искусственно созданные среды со свойствами, не встречающимися у обычных природных сред [1, 2]. Среди метаматериалов особый класс составляют, так называемые, «левые» среды, у которых диэлектрическая ϵ и магнитная μ проницаемости одновременно имеют отрицательные значения [1-3]. В левой среде вектора напряженности электрического и магнитного полей совместно с волновым вектором составляют левую тройку векторов. Это приводит к распространению в такой среде обратной электромагнитной волны (ЭМВ), вектора фазовой и групповой скоростей которой направлены в противоположные стороны. В микроволновом диапазоне для создания метаматериалов в виде левых сред обычно используют периодические структуры в виде тонких металлических проволочек и разрезных кольцевых резонаторов, период следования которых является намного меньше длины ЭМВ [4]. Периодическая система из тонких металлических проволочек позволяет создать структуру плазмонного типа, эффективная диэлектрическая проницаемость которой ϵ_{eff} может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Периодическая система из разрезных кольцевых резонаторов традиционно используется для создания искусственных магнитных сред с отрицательным значением эффективной магнитной проницаемости. Однако, помимо искусственно созданных магнитных сред, в природе существуют и естественные магнитные среды в виде ферромагнетиков, антиферромагнетиков и ферримагнетиков или ферритов, у которых при наложении внешнего постоянного магнитного поля \vec{H}_0 магнитная проницаемость μ становится отрицательной [5]. Частотная область, в которой $\mu < 0$, приходится на диапазон частот существования правополяризованных медленных ЭМВ, которые, являясь волнами намагниченности, получили название магнитостатических волн (МСВ). В случае продольного намагничивания, когда вектора внешнего постоянного магнитного поля и фазового фронта ЭМВ являются коллинеарными, в ферромагнетике

распространяются медленные обратные объемные ЭМВ [5]. Однако указанные волны существуют в диапазоне частот, в котором $\mu < 0$, а $\epsilon > 0$.

Наличие в ферромагнитных средах анизотропии намагничивания приводит к нарушению коллинеарности между вектором групповой скорости \vec{V}_{gr} и волновым вектором \vec{k} и к появлению эффекта, известного в литературе как *анизотропия групповых скоростей МСВ* [5]. Однако в ферромагнитных метаматериалах анизотропное поведение быстрых и медленных ЭМВ не рассматривалось.

Целью данной бакалаврской работы является расчет дисперсионных характеристик быстрых и медленных ЭМВ, распространяющихся в ферромагнитном метаматериале со свойствами левой среды ($\mu < 0$ и $\epsilon < 0$), а также исследование анизотропии групповых скоростей этих волн и сравнение полученных результатов расчета с результатами, полученными для однородной ферромагнитной среды.

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

Основное содержание работы. На рис. 1 приведено схематическое изображение двумерного ферромагнитного метаматериала. Он представляет собой касательно намагниченный ферромагнитный слой, содержащий периодическую структуру в виде тонких металлических проволочек с периодом следования $p_e = L$. Предполагается, что период структуры является намного меньше длины волны, распространяющейся в ней, т.е. $L \ll \lambda$. В этом случае диэлектрические свойства ферромагнетика в отсутствие потерь описываются с помощью эффективной диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon_{eff} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad \omega_p = \frac{c}{L} \sqrt{\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{L}{a}\right)}}. \quad (1)$$

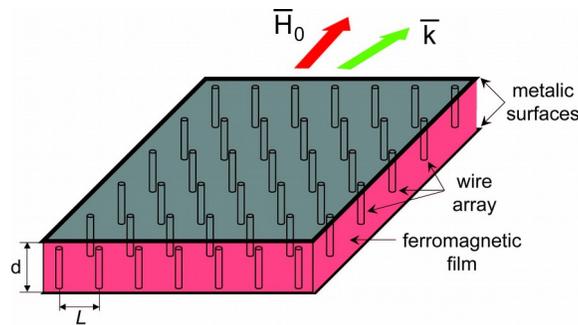
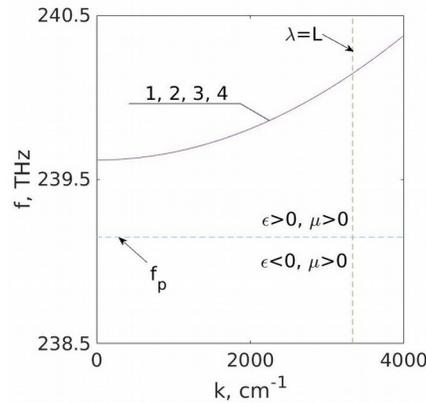


Рис. 1 Схематическое изображение ферромагнитного метаматериала.

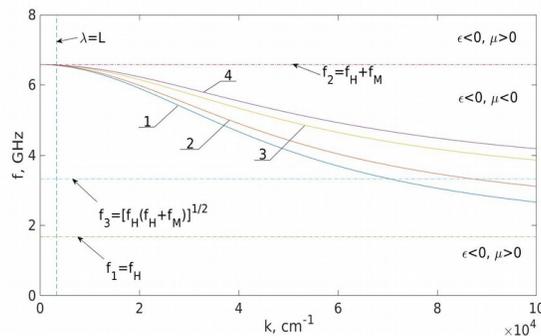
При строгом решении системы уравнений Максвелла для данной структуры, граничащей с обеих сторон с металлом, при условии, что длина распространяющейся в среде волны много меньше периода структуры, и без учета потерь получаем дисперсионное уравнение с учетом эффективной диэлектрической проницаемости:

$$\begin{aligned} & -\mu k_y^4 - \left[\mu(1 + \sin^2 \zeta) + \cos^2 \zeta \right] k^2 - (\mu^2 + \mu - \mu_a^2) k_0^2 \epsilon_{eff} \Big\} k_y^2 = \\ & = (\mu \sin^2 \zeta + \cos^2 \zeta) k^4 - \left[\mu(1 + \cos^2 \zeta) + (\mu^2 - \mu_a^2) \sin^2 \zeta \right] k^2 k_0^2 \epsilon_{eff} + \\ & + (\mu^2 - \mu_a^2) k_0^4 \epsilon_{eff}^2, \end{aligned} \quad (2)$$

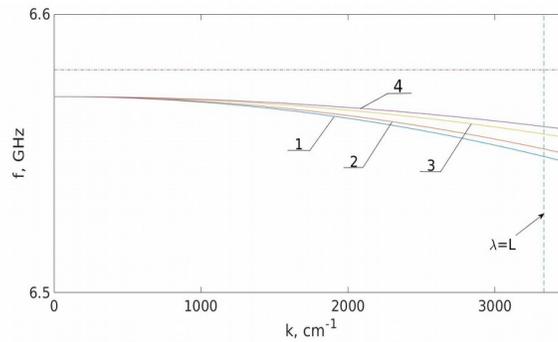
На рис. 2 приведены результаты расчета дисперсионных характеристик двух быстрых (а) и медленной (б, в) волн, полученные на основе решения дисперсионного уравнения (2) при различных значениях угла отклонения волнового вектора. Из результатов расчета следует, что в ферромагнитном метаматериале частота отсечки быстрых волн определяется плазменной частотой ω_p (рис. 2(а)), и их ДХ для различных значений угла ζ совпадают. Более интересная картина наблюдается у медленной волны: её частотный диапазон (рис. 2(б)) занимает практически весь интервал частот $f_1 = f_H < f \leq f_2 = f_H + f_M$, в котором $\epsilon < 0$ и $\mu < 0$. Однако, условие $L \ll \lambda$ сильно ограничивает полосу частот существования медленной ЭМВ до величины ~ 21 МГц. Помимо этого, обратная медленная волна в ферромагнитном метаматериале для $\lambda \gg L$ существуют при всех значениях угла ζ , а в однородном ферромагнетике не распространяется до определённого значения угла ζ .



(а)



(б)

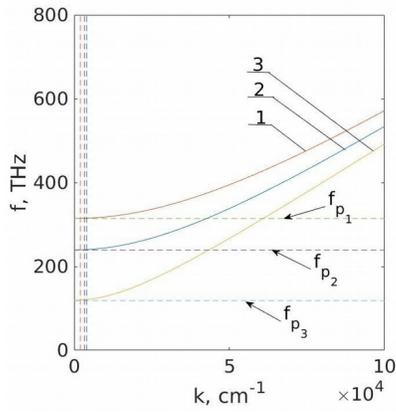


(в)

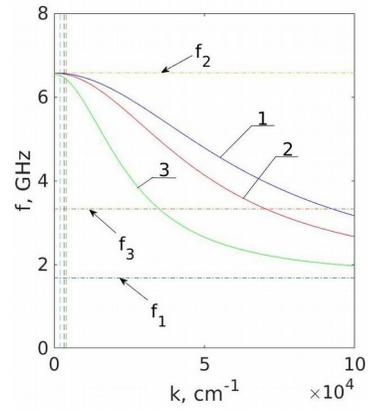
Рис. 2 Дисперсионные характеристики двух быстрых (а) и медленной (б, в) ЭМВ, распространяющихся в касательно намагниченном полосковом ферромагнитном метаматериале под несколькими значениями угла ζ : 1 – 0° , 2 – 30° , 3 – 60° , 4 – 90° . Расчеты выполнены для $4\pi\gamma M_0 = 1780$ Гс, $H_0 = 600$ Э, $n = 1$, $d = 10$ мкм.

Ещё одной особенностью дисперсионных характеристик трех волн, распространяющихся в ферромагнитном метаматериале, является отсутствие у них зависимости от толщины структуры d , но присутствует видимая зависимость от пространственных параметров периодической структуры L и a .

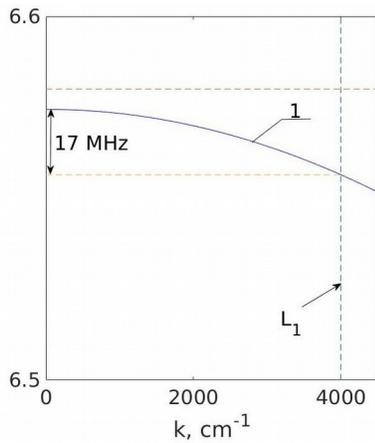
На рис. 3 изображены дисперсионные характеристики быстрых (а) и медленной волн (б, в, г, д) в общем виде и в увеличенном масштабе для объёмной медленной ЭМВ при трех разных значениях L . Из полученных результатов видно, что при увеличении периода структуры из металлических проволочек наблюдается сдвиг частот отсечки быстрых и медленной ЭМВ вниз по частоте. С увеличением значения периода структуры дисперсионная характеристика медленной волны становится более крутой, т. е. увеличивается частотный диапазон её существования в левой среде. Для периода $L_1 = 2,5$ мкм он составляет 17 МГц, $L_2 = 3$ мкм – 21 МГц, $L_3 = 5$ мкм – 29 МГц.



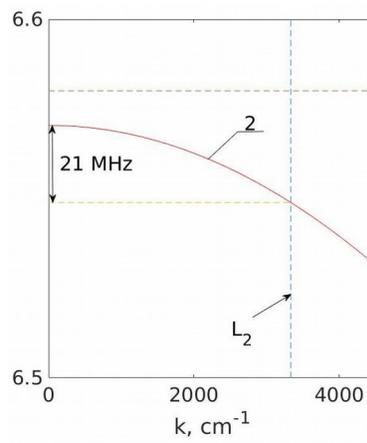
(a)



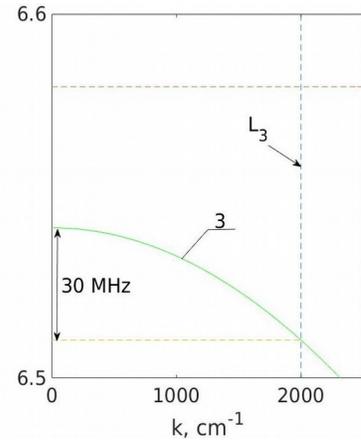
(б)



(в)



(г)



(д)

Рис. 3 Дисперсионные характеристики двух быстрых (а) и медленной (б) волн, распространяющихся в касательно намагниченном полосковом ферромагнитном метаматериале при нескольких значениях периода структуры L : 1 – $L = 2.5$ мкм, 2 – $L = 3$ мкм, 3 – $L = 5$ мкм и увеличенные участки дисперсионной характеристики медленной ЭМВ (в, г, д), соответствующие тем же значениям L .

На рис. 4 изображены дисперсионные характеристики быстрых (а) и медленной волн (б, в, г, д) при трех различных значениях a . Аналогично предыдущему случаю, большим значениям радиуса соответствует меньшие значения частоты отсечки для быстрых волн. Однако для медленной волны наблюдается прямо противоположная картина. Здесь при увеличении значения радиуса увеличивается значение частоты отсечки. Это приводит к уменьшению частотного диапазона существования медленной ЭМВ в левой среде. Так, при

$a_1 = 0.1$ мкм диапазон составляет 63 МГц, при $a_2 = 0.3$ мкм – 43 МГц, и при $a_3 = 1$ мкм – 21 МГц.

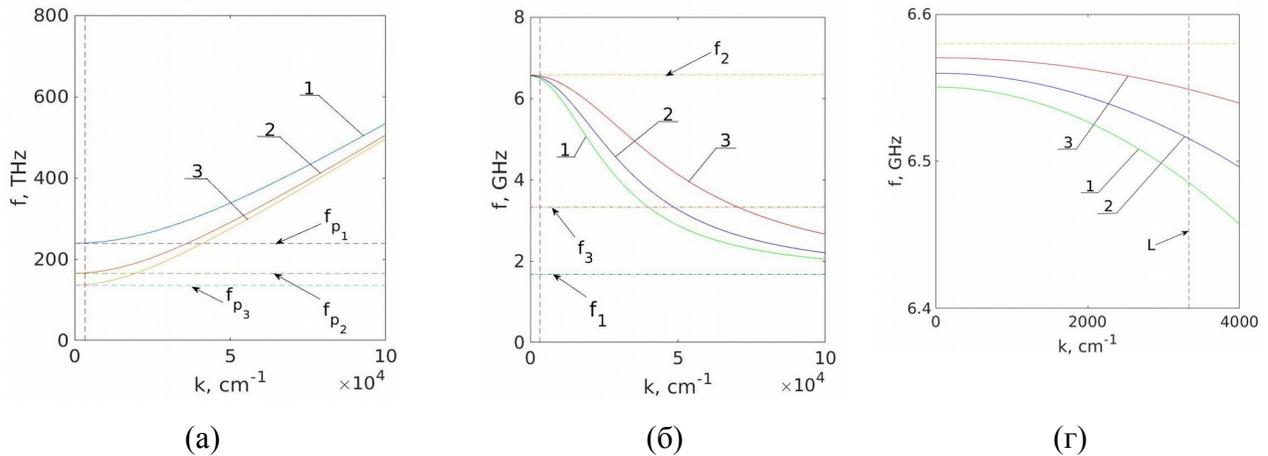


Рис. 4 Дисперсионные характеристики двух быстрых (а) и медленной (б) волн, распространяющихся в касательно намагниченном полосковом ферромагнитном метаматериале при нескольких значениях радиуса проволок структуры a : 1 – $a = 0.1$ мкм, 2 – $a = 0.3$ мкм, 3 – $a = 1$ мкм и увеличенный участок дисперсионной характеристики медленной ЭМВ (в), соответствующий тем же значениям a .

На рис. 5 представлены изочастотные линии медленной волны, распространяющейся в однородном ферромагнитном волноводе (а) и в тонкоплёночном ферромагнитном метаматериале (б) при фиксированных значениях пространственных параметров, т. к. с изменением их значений картина не меняется. У быстрых волн, распространяющихся в леворуком ферромагнитном метаматериале, эффект анизотропии групповых скоростей не наблюдается.

Можно увидеть, что в однородном ферромагнетике изочастотные линии объёмных медленных волн представляют собой разомкнутые линии (гиперболы), а в леворуком ферромагнитном метаматериала – эллипсы. Даже при малом значении толщины структуры анизотропия групповых скоростей велика: оси эллипсов отличаются друг от друга почти в 1.5 раза.

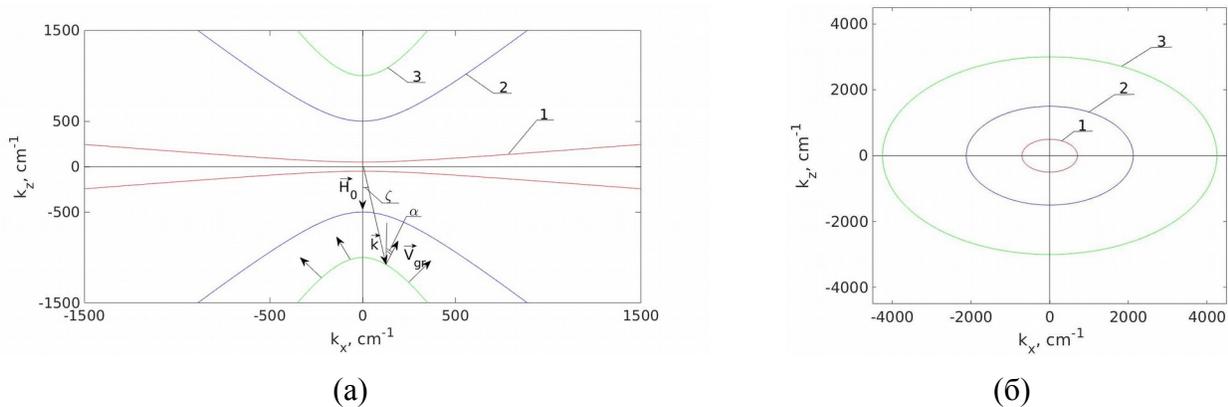


Рис. 5 Изочастотные линии медленной ЭМВ, распространяющейся в однородном ферромагнитном волноводе (а) при фиксированных значениях k : 1 – 50 см^{-1} ($f = 3.29 \text{ ГГц}$), 2 – 500 см^{-1} ($f = 2.27 \text{ ГГц}$), 3 – 1000 см^{-1} ($f = 1.89 \text{ ГГц}$) и в ферромагнитном метаматериале (б) при фиксированных значениях k : 1 – 500 см^{-1} ($f = 6.570 \text{ ГГц}$), 2 – 1500 см^{-1} ($f = 6.566 \text{ ГГц}$), 3 – 3000 см^{-1} ($f = 6.553 \text{ ГГц}$)

Вектор групповой скорости медленной ЭМВ, распространяющейся в ферромагнитном метаматериале, отклоняется в положительном относительно волнового вектора направлении (рис. 6), так же как и векторы групповых скоростей быстрых волн, распространяющихся в феррите. Из представленных результатов видно, что при малых отклонениях волнового вектора вектор групповой скорости отстает почти наполовину, но по ходу приближения к оси OX он «догоняет» вектор \vec{k} и в конце их углы отклонения практически совпадают.

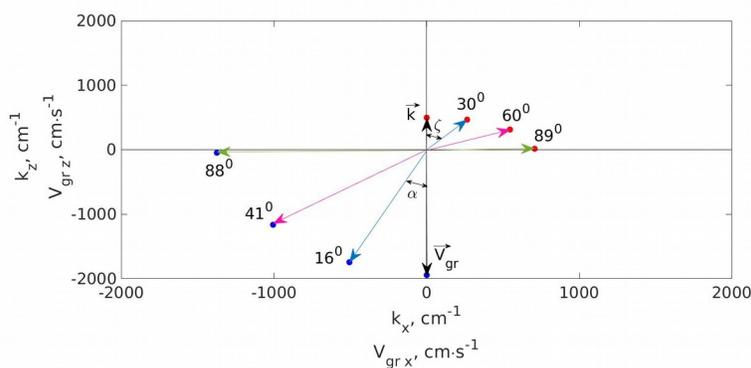


Рис. 6 Векторные диаграммы групповых и фазовых скоростей медленной волны, распространяющейся в касательно намагниченном ферромагнитном метаматериале с толщиной $d = 10 \text{ мкм}$, $k = 500 \text{ см}^{-1}$ ($f = 6.57 \text{ ГГц}$).

Заключение. В ходе выполнения бакалаврской работы были получены следующие основные результаты:

1. На основе решения полной системы уравнения Максвелла для ферромагнитной среды с частотной зависимостью диэлектрической проницаемости плазмонного типа в отсутствие потерь и граничными условиями в виде идеально проводящих металлических экранов получено дисперсионное уравнение для металлизированного с обеих сторон ферромагнитного слоя, содержащего периодическую систему из тонких металлических проволочек.
2. Показано, что для такого ферромагнитного метаматериала при определенных значениях плазменной частоты существует область частот, в которой диэлектрическая и магнитная проницаемости среды являются отрицательными величинами. Установлено, что в указанной области частот распространяется медленная обратная объемная электромагнитная волна, у которой групповая и фазовая скорости направлены в противоположные стороны.
3. На основе полученного дисперсионного уравнения проанализированы зависимости дисперсионных характеристик медленной обратной объемной электромагнитной волны, распространяющейся в тонкопленочном ферромагнитном метаматериале, от параметров периодической структуры (периода L и диаметра проволочек). Показано, что увеличение периода структуры приводит к расширению частотного диапазона существования обратной волны для $\lambda \gg L$, а увеличение диаметра проволочек, наоборот, приводит к сужению этого интервала частот.
4. На основе полученного дисперсионного уравнения проанализирован также эффект анизотропии групповых скоростей быстрых и медленной ЭМВ,

распространяющихся в ферромагнитном метаматериале. Показано, что у быстрых волн, распространяющихся в ферромагнитном метаматериале, данный эффект отсутствует в отличие от быстрых ЭМВ, распространяющихся в однородной ферромагнитной пленке. Для медленных ЭМВ эффект анизотропии групповых скоростей наблюдается в обоих случаях. Однако в «левой» среде изочастотные линии медленной ЭМВ представляют собой эллипсы, а не гиперболы (как в случае однородной ферромагнитной пленки), что обуславливает отличие между зависимостями угла поворота групповой скорости от угла поворота волнового вектора медленной ЭМВ.

Результаты, полученные в бакалаврской работе, были доложены на двух конференциях:

1. Студенческая конференция факультета нелинейных процессов - 2019. Саратов, 17-19 апреля 2019 (доклад отмечен дипломом).
2. XVII Всероссийская школа-семинара «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова. Москва, 26-31 мая 2019.

Список литературы

1. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // УФН. 1967. Т. 92. Вып. 3. С. 517–526.
2. Smith D.R. et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity// Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84, No 18. P. 4184-4187.
3. Tong X.C. Functional metamaterials and metadevices. Springer Series in Materials Science. 2018. Vol. 262. 277 p.
4. Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор)// ЖТФ. 2013. Т. 83, вып.1. С. 3-28.
5. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: СГУ. 1993. 311 с.