

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

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Электродинамические характеристики обратной электромагнитной
волны в дважды отрицательной среде на основе нормально
намагниченного ферромагнитного полупроводника**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 4031 группы

направления

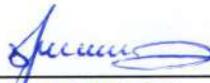
03.03.03 «Радиофизика»

института физики

Глыбовской Валерии Дмитриевны

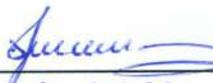
Научный руководитель

доцент кафедры ЭКиВ, к.ф.-м.н.


01.06.23. Гришин С.В.

Зав. кафедрой электроники, колебаний и волн

к.ф.-м.н., доцент


01.06.23. Гришин С.В.

Саратов 2023 г.

Введение

На сегодняшний день магнитные полупроводниковые материалы представляют значительный интерес для современной электроники и спинтроники, так как позволяют манипулировать переменной намагниченностью с помощью замагниченной электронной плазмы.

Хорошо известно, что магнитные полупроводники, находящиеся во внешнем постоянном магнитном поле H_0 , являются бигиротропными средами, у которых диэлектрическая и магнитная проницаемости описываются эрмитовыми тензорами второго ранга. В замагниченной электронной плазме смена знака у диэлектрической проницаемости наблюдается на циклотронной и плазменной частотах электронов, одна из которых (плазменная частота) может находиться в терагерцовом диапазоне. В намагниченных ферромагнетиках магнитная проницаемость меняет свой знак на частотах ферромагнитного резонанса и антирезонанса, находящихся в микроволновом диапазоне. Таким образом, совмещая электрические свойства электронной плазмы с магнитными свойствами ферромагнетика можно создать дважды отрицательные среды в виде ферромагнитного полупроводника (ФМПП) для микроволнового диапазона частот.

Актуальность работы состоит в создании управляемых магнитным полем дважды отрицательных сред для микроволнового диапазона частот на основе замагниченного ферромагнетика со свободными носителями заряда в виде электронной плазмы. Данный подход позволяет реализовать управление дисперсионными характеристиками обратных волн за счет изменения как концентрации свободных носителей заряда, намагниченности, так и напряженности внешнего постоянного магнитного поля.

Цель работы: Получить дисперсионные уравнения (ДУ) для нормально намагниченного безграничного и ограниченного по толщине ферромагнитного полупроводника. На основе полученных дисперсионных уравнений рассчитать дисперсионные характеристики (ДХ) обратных электромагнитных волн для разных значений параметров среды:

электрических и магнитных потерь, концентрации электронов в плазме, намагниченности насыщения и толщины слоя ферромагнитного полупроводника.

В рамках данной работы были поставлены и выполнены следующие **задачи:**

- получение дисперсионных уравнений для нормально намагниченного безграничного и ограниченного по толщине ферромагнитного полупроводника;
- на основе полученных дисперсионных уравнений расчет дисперсионных характеристик обратных электромагнитных волн для разных значений параметров среды: электрических и магнитных потерь, концентрации электронов в плазме, намагниченности насыщения и толщины слоя ферромагнитного полупроводника.

Работа состоит из следующих основных разделов:

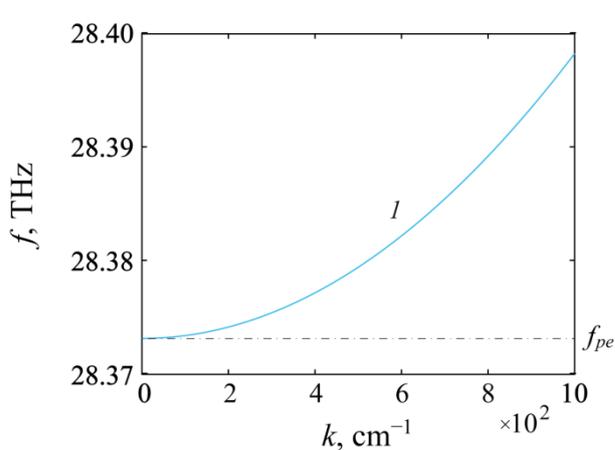
1. Электродинамическая модель нормально намагниченной бигиротропной среды.
2. Электродинамическая модель нормально намагниченного металлизированного с обеих сторон бигиротропного слоя.

Основное содержание работы

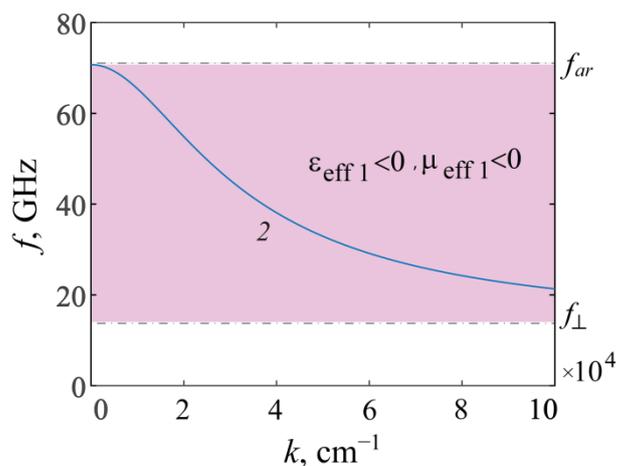
В первом разделе был приведен вывод дисперсионного уравнения для нормально намагниченной безграничной бигиротропной среды. Для нахождения ДУ, позволяющего рассчитывать ДХ медленных (фазовая скорость этих волн больше скорости света в среде) и быстрых электромагнитных волн (ЭМВ), существующих в нормально намагниченном плазменном слое, решалась полная система уравнений Максвелла. Рассматривалась безграничная по ширине плазменная среда, в которой распространение ЭМВ происходило вдоль направления внешнего постоянного магнитного поля \vec{H}_0 . Уравнения Максвелла дополнялись

материальными соотношениями, описывающими взаимосвязь между напряженностями электрических и магнитных полей с электрической и магнитной индукциями. Решения системы уравнений Максвелла искались в форме обобщённых однородных плоских волн. Из граничных условий в виде идеально проводящих металлических экранов, расположенных на поверхности плазменного слоя, следовало, что поперечное волновое число разделяется на ТЕ- и ТМ-ЭМВ. У ТЕ-волн продольная компонента магнитного поля не равна нулю, где одна из двух поперечных компонент поля является электрической, а другая - магнитной. Было установлено, что для тонких слоев ФМ ПП функция поперечного волнового числа может быть найдена в квазистатическом приближении и иметь вид $k_z = n\pi/d$ (где $n = 0, 1, 2 \dots$ - номер толщинной моды ЭМВ), который справедлив только для квази-ТМ-волн. У ТМ-волн продольная компонента электрического поля не равна нулю, а одна из двух поперечных компонент поля является магнитной, а другая - электрической.

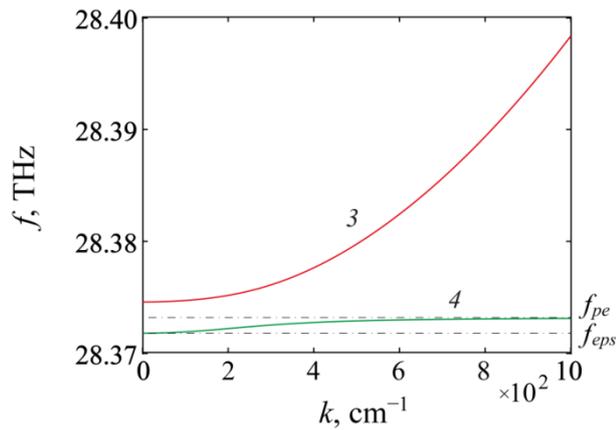
На Рис. 1 приведены результаты расчета ДХ быстрых и медленных ТЕ- и ТМ-ЭМВ, полученные на основе решения дисперсионных уравнений для безграничной среды. Из представленных результатов расчета следует, что в нормально замагниченной безграничной бигиротропной среде с параметрами ФМ ПП существуют две ТЕ-ЭМВ: высокочастотная быстрая (см. Рис.1 а-і,



(a-i)



(a-ii)



(b)

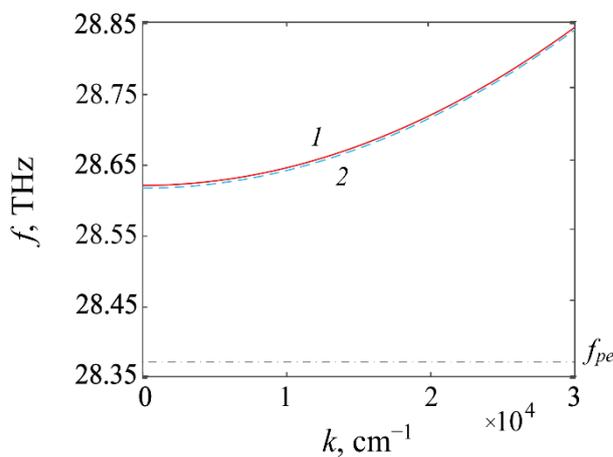
Рис.1 (а) Дисперсионные характеристики ТЕ-ЭМВ (а-i) высокочастотной быстрой прямой (кривая 1) и (а-ii) низкочастотной медленной обратной (кривая 2). **(b)** Дисперсионные характеристики ТМ-ЭМВ высокочастотных быстрой (кривая 3) и медленной (кривая 4). Расчеты для (а) и (b) выполнены для монооксида европия при $N = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $H_0 = 10^3$ Э, $4\pi M_0 = 24300$ Гс и $\epsilon_r = 16$.

кривая 1) и низкочастотная медленная (см. Рис.1 а-ii, кривая 2) объемные ТЕ-ЭМВ, а также две высокочастотные быстрая и медленная ТМ-ЭМВ (см. Рис.1-b, кривые 3 и 4). Частоты отсечки двух быстрых ТЕ- и ТМ-ЭМВ (кривые 1 и 3) всегда находятся выше плазменной частоты, а сами волны характеризуются положительной нормальной дисперсией. Высокочастотная медленная ТМ-ЭМВ (кривая 4) характеризуется положительной нормальной дисперсией и существует в относительно узкой полосе частот, порядка $\Delta f = f_{pe} - f_{eps} \approx 1320$ МГц. В области частот $f_{\perp} < f < f_{ar}$, в которой эффективные материальные параметры среды являются дважды отрицательными, существует одна медленная обратная объемная ТЕ-ЭМВ (кривая 2), характерные частоты которой лежат в микроволновом диапазоне. Частота отсечки обратной ТЕ-ЭМВ определяется частотой ФМ антирезонанса, а ее предельная частота равна частоте ФМ резонанса при нормальном намагничивании.

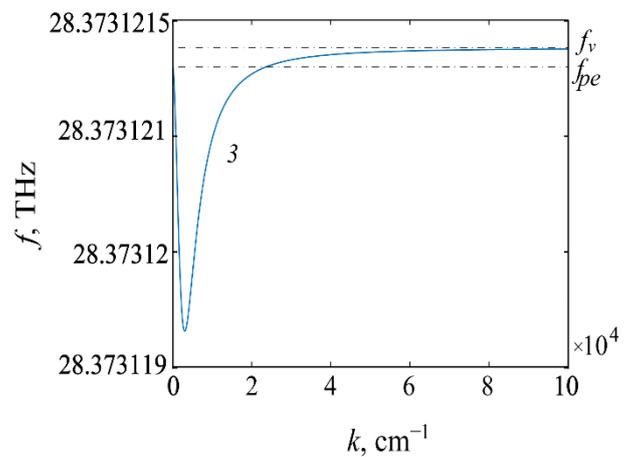
Во втором разделе был приведен вывод дисперсионного уравнения для нормально намагниченного металлизированного с обеих сторон слоя ФМ ПП. Рассматривалась ограниченная по толщине бигиротропная среда.

Решения системы уравнений Максвелла искались в форме обобщённых неоднородных плоских волн. Для расчёта ДУ были введены ограничения вдоль оси OZ , где направление вектора внешнего постоянного магнитного поля \mathbf{H}_0 совпадает с осью OZ .

На основе решения системы уравнений Максвелла с граничными условиями было установлено, что в нормально намагниченном металлизированном с обеих сторон бигиротропном слое с параметрами ФМ ПП существуют пять ЭМВ: две высокочастотные быстрые, две высокочастотные медленные и одна низкочастотная магнитозвуковая ЭМВ (см. Рис.2). Установлено, что высокочастотная медленная ЭМВ существует в узком диапазоне частот вблизи плазменной частоты ФМ ПП и представляет, фактически, вырожденные колебания на плазменной частоте. В области частот $f_{\perp} < f < f_{ar}$, в которой эффективные материальные параметры среды являются дважды отрицательными, существует одна медленная обратная объемная (кривая 4), характерные частоты которой лежат в микроволновом диапазоне. Частота отсечки обратной ЭМВ определяется частотой ФМ антирезонанса, а ее предельная частота равна частоте ФМ резонанса при нормальном намагничивании. Магнитозвуковая волна находится в мегагерцовом диапазоне частот, у нее нет отсечки, а ее предельная частота находится в килогерцовом диапазоне частот.



(a)



(b)

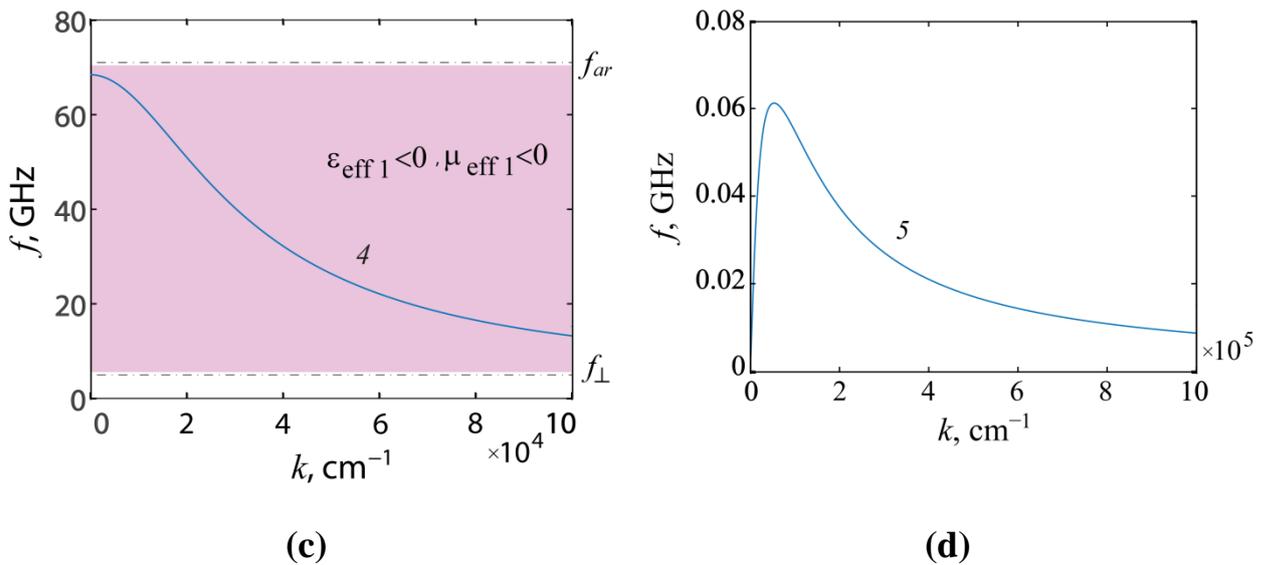
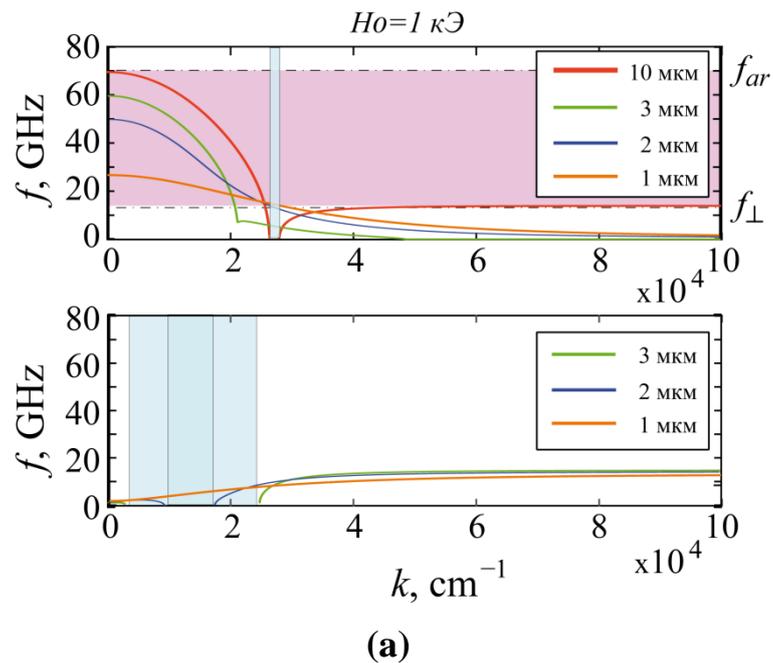
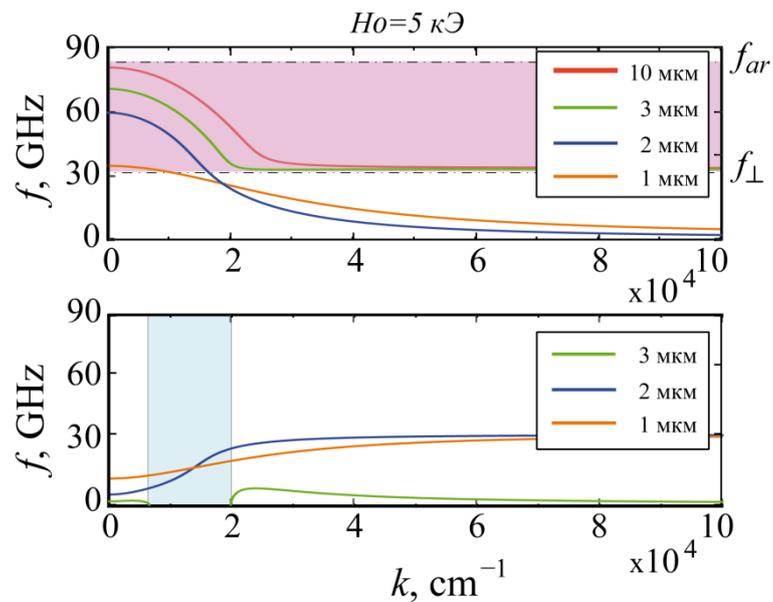


Рис.2 (а) Дисперсионные характеристики ТЕ-ЭМВ высокочастотных быстрых (кривая 1,2) волн.(б) Дисперсионная характеристика ТМ-ЭМВ высокочастотной медленной (кривая 3) волны. (с) Дисперсионная характеристика ТЕ-ЭМВ высокочастотной медленной (кривая 4) волны. (d) Дисперсионная характеристика ТЕ-ЭМВ низкочастотной магнитоакустической (кривая 5) волны. Расчеты для (а) и (б) выполнены для монооксида европия при $d=10$ мкм, $N = 10^{19}$ см $^{-3}$, $H_0=10^3$ Э, $4\pi M_0=24300$ Гс и $\epsilon_r=16$.

Также были приведены результаты расчета ДХ двух медленных ЭМВ, полученные на основе решения дисперсионного уравнения с учетом электрических и магнитных потерь (см. Рис.3). Было показано, что в относительно малых магнитных полях (~ 1 кЭ) в спектре обратной ЭМВ





(b)

Рис.3 Дисперсионные характеристики (верхние панели) высокочастотной медленной волны и низкочастотной магнитозвуковой волны (нижние панели), рассчитанные для разных значений толщины слоя и двух значениях напряженности магнитного поля H_0 : 1 кЭ (а) и 5 кЭ (b) с учётом потерь ($\nu_e = 10^{12}$ рад/с и $\alpha = 4 \cdot 10^{-2}$). Розовой заливкой отмечены частотные области, в которых эффективные параметры материала дважды отрицательны. Голубой заливкой отмечены области с волновыми числами, соответствующие полосам не пропускания. Расчеты для (а) и (b) выполнены для монооксида европия при $N = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $H_0 = 10^3$ Э, $4\pi M_0 = 24300$ Гс и $\epsilon_r = 16$.

наблюдается полоса не пропускания, которая исчезает в пленках ФМ ПП толщиной ~ 1 мкм. В относительно больших магнитных полях (~ 5 кЭ) уменьшение толщины слоя ФМ ПП до 1 мкм приводит к сдвигу ДХ обратной ЭМВ в более низкочастотный диапазон. Было проанализировано также, что наличие потерь в пленке ФМ ПП толщиной 10 мкм приводит к отсутствию у данной волны действительных решений. Уменьшение толщины слоя приводит к появлению у магнитозвуковой волны действительных решений, а при толщинах $d = 1-2$ мкм полоса не пропускания полностью исчезает.

Заключение

В результате, в работе на основе разработанной электродинамической модели были получены дисперсионные уравнения для нормально намагниченной безграничной и ограниченной в одном направлении (по

толщине) бигиротропной среды с параметрами ФМ ПП. Была продемонстрирована возможность создания дважды отрицательной или «левой» среды, у которой эффективные диэлектрическая (ϵ) и магнитная (μ) проницаемости являются одновременно отрицательными величинами. В такой среде существует обратная ЭМВ в гигагерцовом диапазоне частот, свойствами которой можно управлять за счет изменения концентрации свободных носителей заряда, намагниченности и напряженности внешнего постоянного магнитного поля.

Установлено, что в нормально намагниченной безграничной бигиротропной среде существуют ТЕ- и ТМ-ЭМВ, а обратной волной является ТЕ-ЭМВ, которая отсутствует в нормально намагниченной ФМ или ПП среде. При наличии в ФМ ПП магнитных и электрических потерь на дисперсионной характеристике обратной ЭМВ наблюдается полоса непропускания и участок с нормальной дисперсией, которыми можно управлять, изменяя напряженность магнитного поля и частоту столкновений электронов в плазме. При высоком значении напряженности внешнего магнитного поля и низком значении частоты столкновений электронов ДХ полоса непропускания и участок с нормальной дисперсией полностью исчезают.

Было проанализировано влияние толщины слоя ФМ ПП на ДХ обратной ЭМВ. Установлено, что уменьшение толщины слоя до значений ~ 1 мкм приводит к тому, что при низких напряженностях магнитного поля полоса непропускания и участок с нормальной дисперсией полностью исчезают, а сама ДХ обратной ЭМВ сдвигается вниз по частоте. Данный эффект наблюдается и при высоких значениях напряженности магнитного поля.