

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

**Модель распространения электромагнитных волн в ферромагнитной среде  
при различных направлениях магнитного поля.**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ**

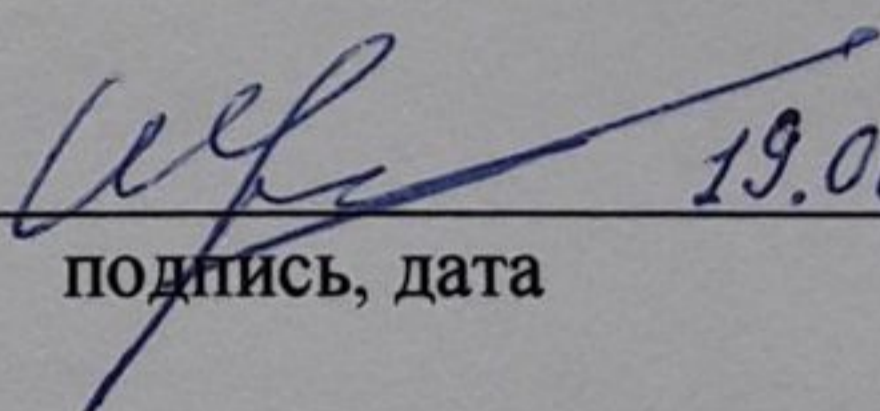
студентки \_\_\_\_\_ 4 \_\_\_\_\_ курса \_\_\_\_\_ 411 \_\_\_\_\_ группы

направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»  
Факультета Нелинейных Процессов  
Шевченко Елизаветы Дмитриевны

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор кафедры  
нелинейной физики

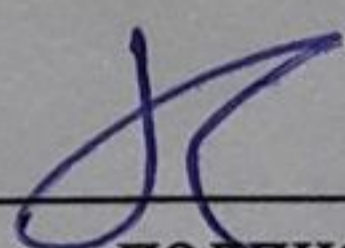
Ю. П. Шараевский

  
\_\_\_\_\_ 19.06.2018г.  
подпись, дата

Зав. кафедрой нелинейной физики

Доцент, к.ф.-м.н.

Е. Н. Бегинин

  
\_\_\_\_\_   
подпись, дата

Саратов 2018 г.

## <sup>γ</sup> Введение

Интенсивные исследования в последние годы в области магнитных материалов, в особенности микро- и наноманитных структур, позволили получить интересные и важные результаты, которые легли в основу такого научного направления как магноника [1-2]. Магноника – это область электроники, изучающая физические свойства магнитных микро- и наноструктур, свойства распространяющихся спиновых волн в таких структурах и возможность применения магнитных структур для построения новой элементной базы приборов для обработки и передачи информации.

Изучение волновых процессов в магнитоупорядоченных средах имеет богатую историю и является одним из фундаментальных разделов радиофизики и магнитоэлектроники (см., например, [3-5]). Одним из основных направлений магнитоэлектроники в настоящее время является исследование волн в тонких ферромагнитных пленках, которые обладают рядом существенных преимуществ перед другими типами волн в кристаллических структурах (см., например, [6-9]). В частности медленные волны, распространяющиеся в таких структурах, характеризуются большим замедлением, существует возможность управления дисперсионными характеристиками этих волн с помощью постоянного магнитного поля и внешних нагрузок. В связи с этим большое внимание до настоящего времени уделялось, в основном, исследованию медленных волн в ферромагнитных пленках в магнитостатическом приближении, которые получили название магнитостатические волны (МСВ) [8-9]. Одной из важных задач в этой области является исследование характеристик волновых процессов в таких структурах при изменении направления постоянного магнитного поля.

**Целью данной работы** является построение модели для исследования особенностей дисперсионных характеристик быстрых и медленных электромагнитных волн в касательно намагниченном ферромагнитном слое

на основе полной системы уравнений Максвелла для гиротропных магнитных сред при различных направлениях постоянного магнитного поля.

Работа состоит из трёх основных разделов, введения и заключения. Список использованных источников включает в себя 10 наименований.

В **первом** разделе приведены основные уравнения и соотношения, используемые для построения модели.

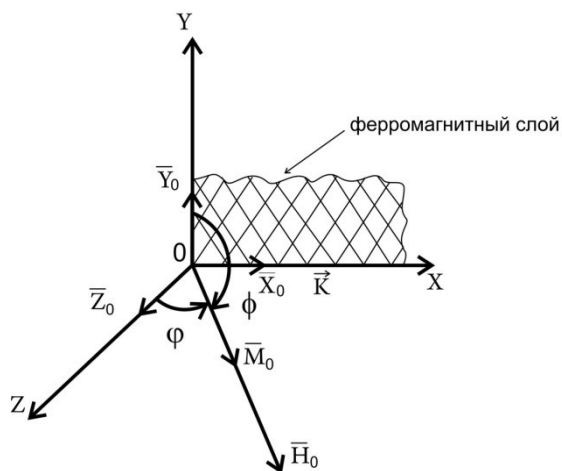
**Второй** раздел посвящён выводу волновых уравнений и расчету дисперсионных характеристик быстрых и медленных волн в безграничной ферромагнитной среде при различных направлениях постоянного магнитного поля.

В **третьем** разделе получены волновые уравнения для случая ограниченного ферромагнитного слоя ( ферромагнитной пленки) и приведён расчёт дисперсионных характеристик волн при изменении направления постоянного магнитного поля.

В **заключении** приводятся выводы и основные результаты работы.

### **Основное содержание работы.**

**1. Уравнения и основные соотношения, описывающие распространение волны в ферромагнитной среде. Схема структуры.**



В данной работе сначала рассматривается структура, представляющая собой безграничный в направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ферромагнетик. (Рис. 1).

Рис.1 Схема структуры.

В такой структуре будем предполагать, что вдоль направления оси  $x$  распространяется волна, где  $k$  – волновой вектор. Предполагается, что ферромагнетик намагничен до насыщения внешним постоянным магнитным полем произвольного, но заданного направления, где  $\phi$  – угол между осью  $z$  и направлением  $\vec{H}_0$ ,  $\vec{M}_0$  – намагниченность.

Для решения поставленной задачи используется полная система уравнений Максвелла, описывающая , а магнитная проницаемость описывается тензором  $\hat{\mu}$  [3-5].

В работе рассматривается случай, когда  $\Phi=0$  и вектора  $\vec{k}$  и  $\vec{H}_0$  лежат в одной плоскости  $(x, z)$  и предполагаем, что структура бесконечна в направлениях  $z$  и  $y$ .

Далее приведены результаты расчетов дисперсионных характеристик волн для двух частных случаев ( $\phi=0$  и  $\phi=\pi/2$ ).

### **1. Магнитное поле направлено по нормали к направлению распространения волны ( $\phi=0$ ).**

Результаты расчёта дисперсионных кривых по соотношениям для случая  $\phi=0$  представлены на (Рис.2).

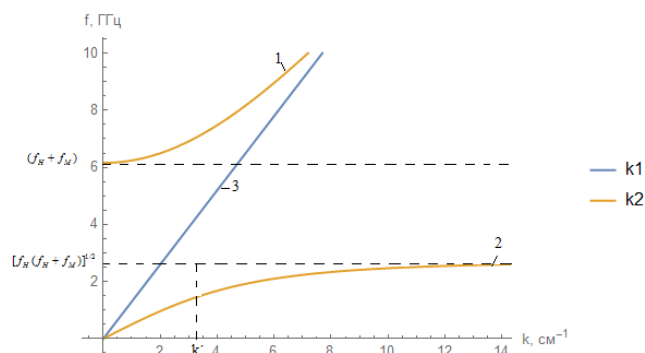


Рис. 2. Дисперсионные зависимости волн для случая  $\varphi=0$ . ( $\bar{H}_0=440$  Э.,

$\bar{M}_0=140$  Гаус,  $\gamma=2,8 \cdot 10^{-3}$  ГГц/Э, , ).

Из рис. 2 видно, что в ферромагнитной среде возможно распространение двух видов волн: 1) быстрая волна, которая может существовать во всём диапазоне частот (кривая 3); 2) волна, дисперсионная зависимость для которой имеет две ветви: одна из них соответствует быстрой электромагнитной волне с фазовой скоростью больше  $c_1$  (кривая 1), а другая – медленной с фазовой скоростью меньше  $c_1$  (кривая 2).

Видно, что в области частот последняя является сильно замедленной волной ( $k \gg k_1$ ) и эта область по  $k$  ( $k > k'$ ) соответствует медленным магнитостатическим волнам (МСВ).

## 2. Магнитное поле направлено вдоль направления распространения волны ( $\varphi = \pi/2$ ).

Результаты расчёта дисперсионных кривых для случая  $\varphi = \pi/2$  представлены на Рис.3.

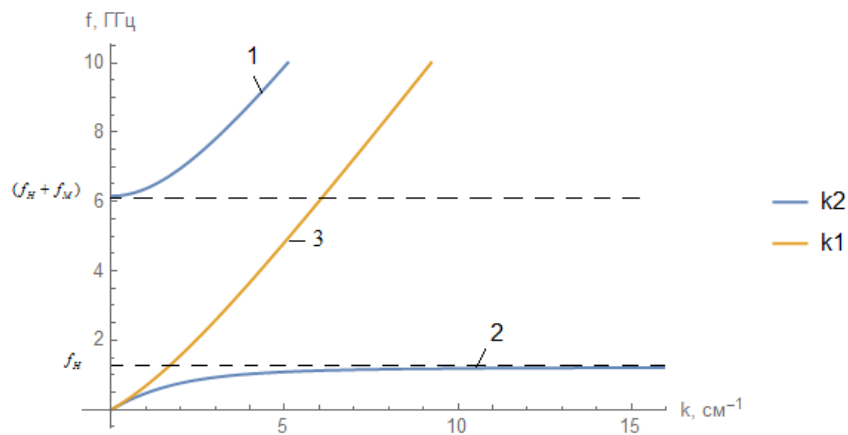
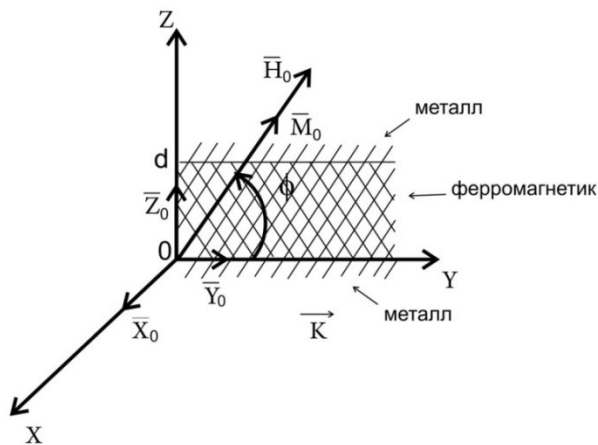


Рис. 3. Дисперсионные кривые для случая  $\varphi=\pi/2$ . ( $\bar{H}_0=440$  Э.,  $\bar{M}_0=140$  Гаус,  $\gamma=2,8 \cdot 10^{-3}$  ГГц/Э).

Как видно из рис. 3, в случае при  $\varphi=\pi/2$  ( $\bar{H}_0 \uparrow \uparrow \bar{k}$ ) эта дисперсионная зависимость содержит две ветви: одна ветвь дисперсионной кривой отвечает быстрой волне ( $V\varphi > C$ ) при  $\bar{k} = 0 \rightarrow f = f_H + f_M$ ; другая ветвь на рис.3 описывает медленную волну ( $V\varphi < C$ ) и при  $k \rightarrow \infty - f \rightarrow f_H$ .

### 3. Спектр волн в ограниченном слое ферромагнетика.



идеальным металлом.

В данном разделе приведён анализ особенностей волновых процессов в ограниченном слое ферромагнетика.

Схема ферромагнитной структуры для этого случая показана на рис. 4, где  $d$ - толщина ферромагнитного слоя. Структура бесконечна в направлении осей  $y$  и  $x$ , а при  $z=0$  и  $z=d$  ограничена

Рис. 4. Схема ферромагнитной структуры.

Ниже приведены результаты расчетов дисперсионных характеристик волн для двух частных случаев ( $\varphi=0$  и  $\varphi=\pi/2$ ).

**1 Магнитное поле направлено перпендикулярно к направлению распространения волны и к границе слоя ( $\varphi=0, \Phi= \pi/2$ ).**

Для этого случая дисперсионное уравнение имеет вид:

$$(1)$$

где  $kz=n\pi/d$ .

Результаты расчёта дисперсионных кривых по соотношениям (1):

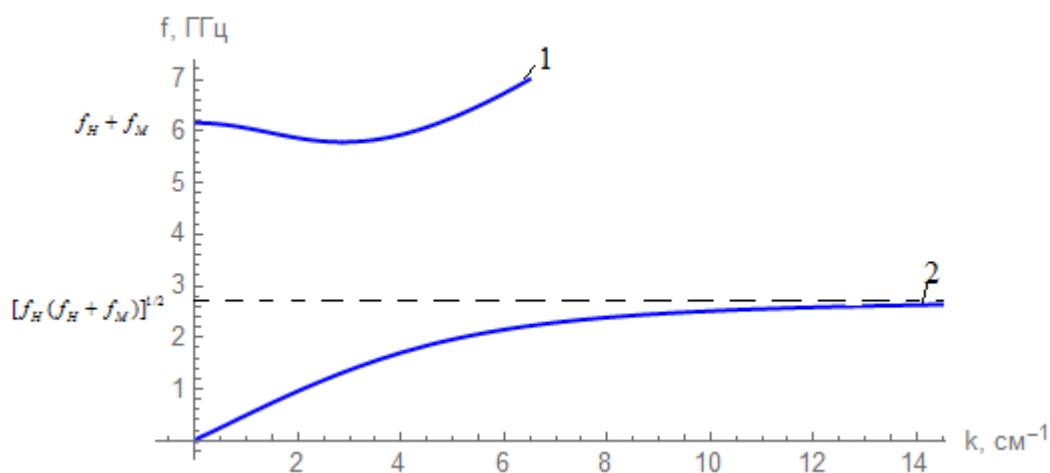


Рис. 5. Дисперсионные зависимости в металлизированном слое для быстрой и медленной волн в случае, когда  $\varphi=0, \Phi=\pi/2$ . ( $\bar{H}_0=440$  Э,  $\bar{M}_0=140$  Гс).

В рассматриваемом случае как и в безграничной слее возможно распространение как быстрой электромагнитной волны (кривая 1), так и медленной электромагнитной волны (кривая 2).

Рассмотрены медленные электромагнитные волны в магнитостатическом приближении, когда  $k \gg k_0\sqrt{\epsilon}$ .

Полученное из (24) дисперсионное уравнение имеет вид:

(2)

На основе дисперсионного уравнения (30) были построены дисперсионные зависимости при различных значениях  $n$ :

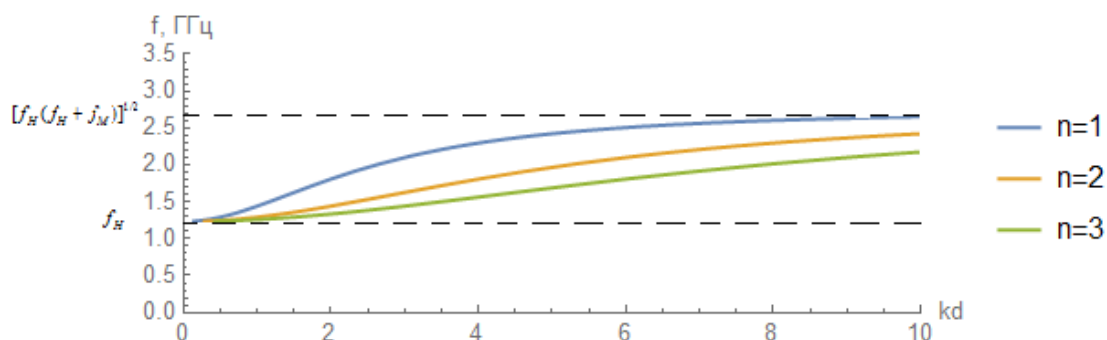


Рис. 6. Дисперсионные характеристики при различных значениях  $n$ . ( $\bar{H}_0=440$  Э,  $\bar{M}_0=140$  Гс).

Как видно из рис. 6, дисперсионные кривые для разных мод будут распространяться в одном диапазоне частот, верхние и нижние частотные границы у них одинаковые.

## 2. Магнитное поле направлено вдоль направления распространения волны ( $\varphi=0, \Phi=0$ ).

В случае магнитостатического приближения, дисперсионное уравнение будет иметь вид:

(3)

Для  $kz = n\pi/d$ , уравнение (3) записывается в виде:

(4)

Результаты расчета дисперсионных кривых по соотношению (4) приведены на рис. 7



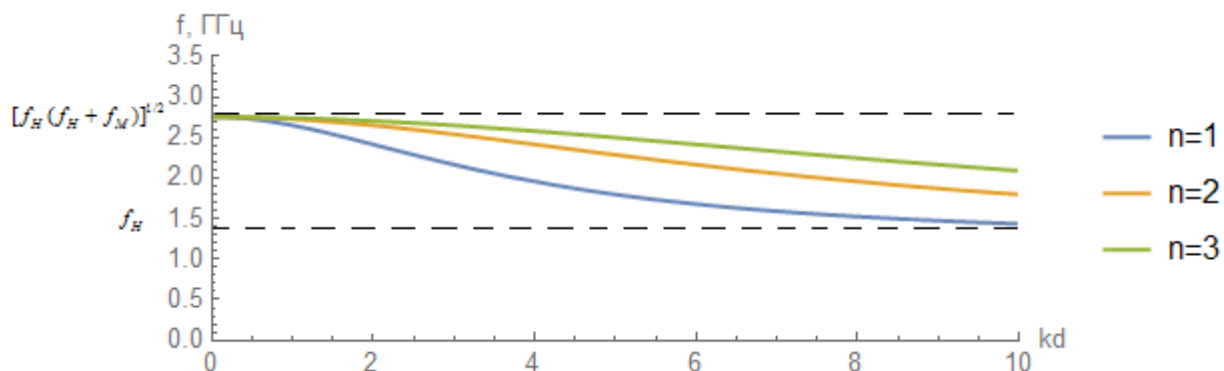


Рис. 7 Дисперсионные характеристики при различных значениях  $n$ .

Как видно из рис. 7, дисперсионные характеристики всех мод имеют аномальный характер, в этом случае групповые и фазовые скорости направлены в разные стороны. Такие волны в литературе [3] получили название обратные объёмные магнитоэлектрические волны (ОМОВ).

### **Заключение.**

На основе системы уравнений Максвелла рассмотрена задача о распространении электромагнитных волн в ферромагнитной среде при различных направлениях постоянного магнитного поля. Подробно проанализированы дисперсионные характеристики электромагнитных волн в такой гиротропной среде, когда постоянное магнитное поле направлено по нормали и параллельно направлению распространения волн.

Выявлены основные особенности распространения как быстрых, так и медленных электромагнитных волн в такой структуре.

Получены волновые уравнения, описывающие как быстрые, так и медленные волны в ферромагнитном слое, границы которого ограничены идеальным металлом. На основе этих уравнений рассмотрены случаи, когда постоянное магнитное поле направлено по нормали к границе слоя и когда направлено параллельно волновому вектору.

В магнитоэлектрическом приближении рассчитаны дисперсионные характеристики для медленных волн в слоистой ферромагнитной структуре при указанных выше направлениях магнитного поля.

Приведено сравнение полученных результатов с известными результатами для магнитостатических волн.

### **Список используемых источников**

1. Никитов С. А., Шараевский Ю. П., Филимонов Ю. А. и др. Магноника – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники // Успехи физических наук. 2015. Т.185., №10. С.1-30.
2. V. Kruglyak, S. O. Demokritov and D. Grunder. “Magnonics”. J. Phys. D. Appl. Phys. 43.264001(2010).
3. Вашковский А. В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю. П. «Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот». Издательство Саратовского университета. 1993.
4. Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: наука. 1973. 407 с.
5. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. магнитные колебания и волны. М.: Физматлит. 1994. 464 с.
6. Гришин С. В. Шараевский Ю. П. медленные электромагнитные волны в касательно намагниченных ферромагнитных плёнках// ЖТФ. 2001. Т. 71, №4. С. 95-98.
7. Morgenthaler F. R. Nonreciprocal magnetostatic surface waves with independently controllable propagation and decay constants// J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41, No 3. P. 1014-1015.
8. Шехтман Ф. И. Экспериментальные устройства обработки информации на магнитостатических волнах // Радиоэлектроника за рубежом. 1983. №2. С.5-15.
9. Исхак В.С. Применение магнитостатических волн: Обзор. // ТИИЭР. 1988. Т. Н., №2. С.1830-1834.
10. Vajpai S. N., Weinert R. W. and Adam J. D. Variable magnetostatic wave delay lines // J. Appl. Phys. 1985. V.58, №2. P. 990-996.

