

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра Электроники, колебаний и волн

**Исследование электродинамических характеристик феррит-  
сегнетоэлектрических структур**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 2 курса 225 группы

направления 03.04.03 "Радиофизика"

Факультета нелинейных процессов

Россошанского Ивана Дмитриевича

Научный руководитель  
к. ф.-м. н., доцент кафедры  
физики открытых систем

А. В. Садовников

Зав. кафедрой Электроники, колебаний и волн  
чл.-кор. РАН, профессор, д.ф.-м.н.

Д. И. Трубецков

Саратов 2016 г.

## Введение

В настоящее время интенсивно разрабатываются миниатюрные устройства СВЧ диапазона на основе планарных слоистых структур типа феррит – сегнетоэлектрик [1-3], которые можно рассматривать как мультиферроидные структуры [3]. Исследование таких композитных структур представляет большой интерес ввиду того, что свойствами распространяющихся в них волновых процессов возможно управлять в заданном диапазоне длин. Активно исследуют устройства как на основе пленок ферритов и относительно толстых сегнетоэлектрических слоев [4,5,6], так и на основе тонкопленочных феррит- сегнетоэлектрических структур [6]. Рассматривается возможность использования феррит- сегнетоэлектрических структур для создания перестраиваемых электрическим и магнитным полем фазовращателей [7], фильтров, линий задержки и резонаторов [4], базовых логических элементов [3] в СВЧ- диапазоне длин радиоволн.

Можно выделить два основных типа таких устройств – резонансные (фильтры) и волноведущие (линии задержки, фазовращатели, ответвители мощности). В последних, управление характеристиками распространяющихся волн осуществляется путем изменения эффективной диэлектрической и магнитной проницаемости слоистой структуры при помощи вариации внешних электрического и магнитного полей, соответственно. Это приводит к изменению дисперсионных характеристик волн, распространяющихся в структуре. Наиболее сильно влияние управляющих полей проявляется в области частот, где наблюдается эффективная связь волн в парциальных системах (волн в сегнетоэлектрическом и ферритовом слоях) [8]. Распространяющиеся в этом диапазоне частот электромагнитные волны являются гибридными. Для структур, неограниченных в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны, свойства гибридных волн изучены в ряде работ (см., например, [9,10]).

Однако аналитическое решение электродинамической задачи для поперечно ограниченных структур с частичным заполнением гиротропными средами является невозможным, так как в данном случае система уравнений Максвелла не распадается на решения в виде ТЕ и ТМ – волн [11]. В настоящее время активно развиваются технологии изготовления микроразмерных планарных структур на основе ферритов [12], что требует детального электродинамического анализа модового состава волновых процессов в таких структурах, так как влияние старших поперечных мод на режимы работы разрабатываемых устройств при уменьшении их размеров возрастает. Возникает необходимость использования численных методов моделирования для изучения электродинамических характеристик исследуемых структур [13, 14, 15], в частности, для расчета дисперсионных характеристик поперечных мод распространяющихся волн. Рассмотрению и применению численного моделирования при исследовании мультиферроидных структур посвящена первая глава данной работы.

Металлические экраны в слоистых мультиферроидных структурах используются для создания электрического поля с целью управления свойствами сегнетоэлектрика [9]. Наличие электродов и ограниченность структур в поперечном сечении может существенно влиять на характеристики работы устройств, в частности из-за возможного многомодового характера распространения волн и их гибридизации. Поэтому изучение эффектов гибридизации электромагнитных волн в поперечно-ограниченных металлизированных микроразмерных структурах и структурах сложной геометрии типа феррит-сегнетоэлектрик с учетом многомодового характера распространения волн является актуальной задачей. Данной задаче посвящена вторая глава данной работы.

Одной из областей исследований в микроэлектронике сверхвысоких частот (СВЧ) является исследование периодических структур на основе ферритов – магнитные кристаллы (см., напр. обзор [16]), получившие название

по аналогии с фотонными кристаллами в оптике. Одним из способов изготовления одномерных магнанных кристаллов является создание периодической модуляции толщины ферритового слоя. При этом за счет брэгговского резонанса в спектре волн, распространяющихся в таких структурах, образуются запрещенные зоны (области частот со значительным ослаблением сигнала). Интерес к таким структурам вызван ввиду возможности улучшения характеристик и расширения функциональности вышеуказанных устройств СВЧ. К настоящему времени проведен ряд исследований периодических слоистых мультиферроидных структур, в которых пространственной периодичностью обладают либо ферритовый, либо сегнетоэлектрический слой [17, 18]. В третьей главе данной работы исследуется структура феррит-сегнетоэлектрик, оба слоя которой обладают пространственной периодичностью. При этом выбор структуры обусловлен возможностью управления шириной запрещенной зоны путем электрического управления.

Таким образом, целями выполнения данной работы является электродинамическое исследование влияния расстояния до металла в мультиферроидной структуре на характеристики распространяющейся в ней волн и исследование управления шириной запрещенной зоны в слоистой периодической структуре феррит-сегнетоэлектрик с модуляцией толщины обоих слоев.

### **Основное содержание работы**

В первой главе работы рассмотрена методика расчета электродинамических характеристик структур при помощи МКЭ. Расчет проводился в частотной области. В результате адаптации и применения методики расчета при помощи МКЭ удалось рассчитать дисперсионные характеристики поперечных мод планарных ферритового волновода и

планарной мультиферроидной структуры, а также получить распределения поперечной составляющей электрического поля для волн в таких структурах.

В главе введено понятие парциальных систем ферритового и диэлектрического слоев мультиферроидной структуры. Сделаны выводы о наличии области эффективного взаимодействия парциальных волн по частотам и по волновым числам. А также об асимптотическом поведении гибридных волн как волн парциальных систем с удалением от области эффективного взаимодействия парциальных систем. Полученные результаты согласуются с известными теоретическими и экспериментальными работами, что подтвердило корректность поставленной задачи и МКЭ.

Во второй главе работы в результате численного моделирования методом конечных элементов получены электродинамические характеристики гибридных волн в слоистой структуре «металл-диэлектрик-феррит-диэлектрик-сегнетоэлектрик-диэлектрик-металл», ограниченной в поперечном направлении. Построены дисперсионные характеристики парциальных волн диэлектрического волновода при двух предельных случаях расстояния между сегнетоэлектрическим слоем и идеальным металлическим экраном (слой металлизирован, металл не влияет на результаты расчета), а также дисперсионные кривые волн ферритового волновода. Дисперсионные кривые гибридных волн мультиферроидной структуры также построены для двух значений расстояния до металлического экрана. Были получены распределения поперечной компоненты электрического поля для гибридных волн в структуре при разных частотах, свидетельствующие о наличии зависимости локализации максимума электромагнитных полей в одном из слоев структуры. Рассчитаны такие электродинамические характеристики, как мнимая часть продольного волнового числа и межмодовое расстояние для первой и третьей мод. Данные величины были рассчитаны в зависимости от частоты и расстояния до идеального металлического экрана со стороны СЭ слоя. Эти результаты могут

быть использованы при экспериментальных исследованиях методом мандельштам бриллюэновского рассеяния света.

В третьей главе приведены результаты расчета МКЭ и оценки структуры вида ферритовый слой с модуляцией толщины- периодический сегнетоэлектрик. Проведены оценки управления шириной запрещенной зоны с использованием существующих моделей. Представлены результаты расчета дисперсионных характеристик волн в такой структуре при разных значениях проницаемости сегнетоэлектрического слоя в сравнении с проведенными оценками. Получена характеристика изменения частотной ширины первой брэгговской запрещенной зоны для безграничной в направлении распространения волны структуре.

Ставилась задача оценить пригодность имеющегося в наличии экспериментального макета для проведения эксперимента по наблюдению изменения частотной ширины не пропуска в спектре магнетонного кристалла при нагрузке периодическим сегнетоэлектриком. В результате проведенных оценок был сделан вывод о непригодности данного макета. При этом с учетом имеющихся работ и проведенных расчетов вынесены следующие предложения: необходимо увеличить магнитного поле с соответствующим ростом рабочей частоты и области взаимодействия парциальных систем при гибридизации. Также возможно увеличение пространственного периода  $\lambda$  структуры, что приведет к уменьшению значения  $k_{br}$ , то есть приближением его к значениям волновых чисел волн парциальной системы сегнетоэлектрика. Такими методами можно добиться сопоставления области резкого перегиба дисперсионной кривой гибридной волны вблизи  $k_{br}$ , что значительно увеличит эффективность управления шириной запрещенной зоны. При этом в реальных экспериментах величина рабочих частот ограничена эффективностью линий возбуждения, а размер периода структуры величиной затухания волн в ней.

## **Заключение**

Таким образом, в работе приведены результаты расчета двух видов феррит- сегнетоэлектрических структур, представляющих научный и практический интерес. Полученные электродинамические характеристики для распространяющихся в таких структурах волн могут быть использованы при планировании экспериментального исследования и при разработке новых устройств магнитоэлектроники.

Значимость полученных результатов, высока ввиду тенденции разработки миниатюрных СВЧ- устройств сложной формы в поперечном и продольном направлениях и дальнейшем уменьшении их характерных размеров, когда многомодовый режим волнового распространения начинает определять режимы работы таких устройств. Использование изученных характеристик слоистых структур может найти применение в расширении функциональности СВЧ устройств, построенных на основе направляющих систем типа феррит - сегнетоэлектрик.

## **Список используемых источников**

1. Ozgur U., Alivov Y., Morkoc H. Microwave ferrites, part 2: passive components and electrical tuning. // J. Mater. Sci. : Mater. Electron. V. 20. № 10. P. 911. 2009.
2. Ustinov A. B., Kalinikos B. A. and Srinivasan G. Nonlinear multiferroic phase shifters for microwave frequencies. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. p. 052911
3. Sadovnikov A. V., Davies C. S., Grishin S. V., Kruglyak V. V., Romanenko D. V., Sharaevskii Yu. P. and Nikitov S.A.. Magnonic beam splitter: The building block of parallel magnonic circuitry. // Appl. Phys. Lett. Vol. 106. No. 19. p.192406. 2015.
4. Ustinov A. B., Tiberkevich V. S., Srinivasan G., et al. Electric field tunable ferrite-ferroelectric hybrid wave microwave resonators: Experiment and theory. // J. Appl. Phys. V. 100. №9. P. 093905. 2006.
5. Nan C., Bichurin M.I., Dong S., et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. // J. Appl. Phys. V. 103. №3. P.031101. 2008.

6. Ustinov A.B., Srinivasan G., Kalinikos B.A. High-Q active ring microwave resonators based on ferrite-ferroelectric layered structures. // J. Appl. Phys. V. 92. №19. P. 193512. 2008.
7. Устинов А.Б., Колков П.И., Никитин А.А. и др. Феррит-сегнетоэлектрические фазовращатели с совместным электрическим и магнитным управлением. // ЖТФ. Т.81. №6. С. 75. 2011.
8. Анфиногенов В.Б., Вербицкая Т.Н., Зильберман П.Е. и др. Распространение магнитостатических волн в феррит- сегнетоэлектрической структуре // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. № 8. С. 454
9. Демидов В.Е., Калиникос Б.А. Спектр дипольно-обменных спиновых волн в касательно намагниченных слоистых структурах металл–сегнетоэлектрик–ферромагнетик-сегнетоэлектрик–металл. // Письма в ЖТФ. Т.26. №7. С. 8. 2000.
10. Демидов В. Е, Калиникос Б. А., Эденхофер П. Дисперсионные характеристики поверхностных электромагнитно-спиновых волн в слоистых структурах феррит–сегнетоэлектрик–диэлектрик–металл // ЖТФ. 2002. Т. 72, вып. 3. С. 61 – 68
11. А. Г. Гуревич. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука. 591с. 1973.
12. Krawczyk M., Grundler D. Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure. // J. Phys.: Condensed Matter. V. 26. № 12. P. 123202 2014.
13. Vasil`ev I.V., Kovalev S.I. Electrodynamical Theory of Finite. Magnetostatic Waiveguides. // IEEE Trans.1994. V. MTT-42. № 7. P.1238.
14. Садовников А.В., Рожнёв А.Г. Моделирование распространения магнитостатических волн в одномерных маггонных кристаллах. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20. № 1. С. 143.
15. Sadovnikov A.V., Bublikov K.V. Electrodynamical properties and modes of finite-width planar ferrite waveguide // Journal of Physics: Conference Series 2014. Vol. 572, №1
16. Serga A.A., Chumak A.V. and Hillebrands B. YIG magnonics // J. Phys.D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. P. 264002



17. Устинов А. Б., Калиникос Б. А. Мультиферроидные периодические структуры на основе магнонных кристаллов для электронно перестраиваемых сверхвысокочастотных устройств. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 13. С. 58-65.
18. Дроздовский А. В, Никитин А. А., Устинов А. Б., Калиникос Б. А. Теоретическое исследование сверхвысокочастотных свойств феррит-сегнетоэлектрического магнонного кристалла // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. В. 7. С. 87-90.