

На правах рукописи

Григорьева Наталия Юрьевна

ДИПОЛЬНО-ОБМЕННЫЕ СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ
СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК

Специальность: 01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В.И.Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –
доктор физико-математических наук, профессор Калиникос Борис Антонович

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор Фетисов Юрий Константинович,
доктор физико-математических наук, с.н.с. Локк Эдвин Гарривич

Ведущая организация – ОАО "НИИ "Феррит-Домен"

Защита диссертации состоится “13” мая 2009 г. в _____ часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “3” апреля 2009 г.

Ученый секретарь Совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
к.т.н, доцент

Смирнов Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сверхвысокочастотные свойства многослойных, а также планарных периодических структур, изготовленных на основе тонких ферромагнитных пленок, активно исследовались в 70-е годы прошлого столетия [1-9]. В последние 10-15 лет интерес к исследованию таких структур снова возрос в связи с существенным прогрессом технологии получения тонких ферромагнитных пленок и пленочных структур с заданными параметрами. Возникло новое направление спин-волновой электроники, связанное с получением и исследованием строго периодических структур на основе магнитных материалов – метаматериалов или магнитных кристаллов [10-13]. Размерные эффекты, невзаимность дисперсионных свойств, сильная поверхностная и объемная анизотропия пленочных материалов – все это способствует формированию уникальных характеристик распространения спиновых волн в тонкопленочных ферромагнитных периодических структурах.

Одним из перспективных направлений сверхвысокочастотной микроэлектроники и наноэлектроники является создание магнитных материалов с заранее заданными дисперсионными свойствами. Очевидно, что многослойные структуры с периодическим и непериодическим чередованием магнитных и немагнитных слоев, а также планарные периодические структуры являются функционально более гибкими и обладают большими возможностями управления дисперсионными характеристиками, чем однородные ферромагнитные пленки. Таким образом, область применения многослойных и планарных периодических магнитных структур гораздо шире, чем у одиночных ферромагнитных пленок. В частности, периодические структуры применяются в СВЧ электронике, в магнитных (магниторезистивных) головках, а также в устройствах записи, обработки и хранения информации.

Экспериментальные исследования дисперсионных и нелинейных свойств токопленочных магнитных периодических структур, выполненные в последние годы, выявили ряд интересных особенностей, которые требуют всестороннего теоретического анализа. Такой анализ невозможен без построения строгой теории дипольно-обменного спектра спиновых волн, которая, с одной стороны, учитывает все основные особенности волновых явлений в токопленочных магнетиках, а, с другой стороны, пригодна для разработки достаточно простой методики расчета дисперсион-

ных характеристик спиновых волн в зависимости от конкретных параметров рассматриваемой структуры.

Из-за большого разнообразия исследуемых структур и различных теоретических подходов на момент начала работы над диссертацией не существовало единой теории, удобной как для физической интерпретации, так и для адекватного расчета дипольно-обменного спектра многослойных структур типа феррит-диэлектрик с произвольными магнитными и геометрическими параметрами. К таким параметрам относятся толщина магнитных слоев, величина намагниченности насыщения, тип поверхностной и объемной анизотропии, величина и направление внешнего магнитного поля, величина межслойных промежутков и др. В то же время, например, физически было понятно, что в слоистых структурах, построенных на основе тонких ферромагнитных пленок, объемная и поверхностная анизотропия могут играть ведущую роль в формировании спектра собственных возбуждений.

Заметим также, что в настоящее время изучение волновых процессов в планарных периодических магнитных структурах становится особенно актуальным в связи с исследованиями нелинейных процессов в магнитных кристаллах и магнитных сверхрешетках. В последние несколько лет был опубликован ряд экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию дисперсионных и нелинейных характеристик магнитных планарных периодических наноструктур. Анализ такого рода структур невозможен без последовательного теоретического описания зависимости спектров спиновых волн свободных и экранированных ферромагнитных пленок от величины и типа поверхностной анизотропии при симметричном и асимметричном закреплении спинов. Такого теоретического описания к моменту начала работы над диссертацией не существовало.

Целью диссертационного исследования является построение теории дипольно-обменных спиновых волн в многослойных и планарных периодических структурах на основе тонких ферромагнитных пленок с учетом объемной и поверхностной анизотропии.

В соответствии с поставленной целью основными задачами диссертационного исследования являются:

1. Построение теории дипольно-обменных спиновых волн, распространяющихся в многослойных феррит-диэлектрических структурах, намагниченных под

произвольным углом к поверхности, учитывающей объемную и поверхностную анизотропию исходных ферромагнитных пленок.

2. Анализ влияния степени закрепления поверхностных спинов на форму спектра спиновых волн в многослойных структурах на основе тонких ферромагнитных пленок.

3. Анализ влияния степени закрепления поверхностных спинов (поверхностной анизотропии) и геометрических параметров структуры на дисперсионные характеристики дипольно-обменных спиновых волн в многослойных феррит-диэлектрических структурах с периодическим чередованием магнитных и немагнитных слоев.

4. Анализ влияния типа поверхностной анизотропии и величины параметра закрепления поверхностных спинов на дисперсионные характеристики дипольно-обменных спиновых волн в свободных и экранированных с одной стороны ферромагнитных пленках с симметричным и асимметричным закреплением поверхностных спинов.

5. Построение теории планарных периодических структур на основе одиночных тонких ферромагнитных пленок с учетом объемной и поверхностной анизотропии.

6. Исследование зависимости ширины запрещенных зон в спектре спиновых волн планарной периодической структуры, состоящей из ферромагнитной пленки с периодической решеткой металлизации вблизи ее поверхности, от параметра закрепления поверхностных спинов и геометрических параметров структуры.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Построена теория дипольно-обменных спиновых волн в многослойной феррит-диэлектрической структуре, одновременно учитывающая межслойное и внутрислойное диполь-дипольное и обменное взаимодействия в спин-системе, а также объемную и поверхностную анизотропию во всех магнитных слоях структуры. На примере двухслойной структуры проведен анализ зависимости межмодового внутрислойного и межслойного взаимодействия от толщины ферромагнитных пленок и немагнитных промежутков, а также от степени закрепления спинов на поверхности ферромагнитных пленок.

2. В аналитической форме решена задача о спектре дипольно-обменных спиновых волн в многослойной периодической феррит-диэлектрической структуре с частично закрепленными поверхностными спинами и проведен анализ зависимости

дисперсионных характеристик структуры от толщины ферромагнитных пленок и немагнитных промежутков, а также от степени закрепления спинов на поверхности ферромагнитных пленок.

3. Проведен детальный анализ влияния величины и типа поверхностной анизотропии на спектр спиновых волн и степень гибридизации спин-волновых мод в перпендикулярно и касательно намагниченных свободной и экранированной с одной стороны ферромагнитной пленке с симметрично и асимметрично закрепленными поверхностными спинами. В частности, показано, что при наличии поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» на одной или обеих поверхностях пленки в структуре возникают одна или две поверхностные моды независимо от направления внешнего подмагничивания. Обнаружено, что эти поверхностные моды могут находиться в условиях фазового синхронизма как друг с другом, так и с объемными модами структуры, образуя дипольные «щели» в спектре спиновых волн.

4. Построена теория расчета дисперсионных характеристик дипольно-обменных спиновых волн в планарных периодических структурах и проведен анализ зависимости ширины и положения запрещенных зон в спектре спиновых волн от геометрических параметров структуры и степени закрепления поверхностных спинов. Теоретические расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными для планарной периодической структуры, состоящей из ферромагнитной пленки с периодической решеткой металлизации вблизи ее поверхности.

Новые научные результаты, полученные в ходе выполнения работы, позволили сформулировать **научные положения, выносимые на защиту**:

1. Форма спектра спиновых волн и дипольная гибридизация спин-волновых мод многослойной феррит-диэлектрической структуры определяется взаимной ориентацией осей магнитной кристаллографической анизотропии различных слоев структуры.

2. В многослойных периодических структурах, состоящих из чередующихся ферромагнитных и диэлектрических слоев, спектр сверхвысокочастотных спиновых волн в значительной степени определяется межслойным диполь-дипольным взаимодействием. Однако, спин-волновые моды различных ферромагнитных пленок структуры, дипольно не взаимодействуют друг с другом, если толщина немагнитных промежутков больше, чем длина спиновой волны в анализируемой части спектра спиновых волн.

3. В слоистых структурах на основе ферромагнитных пленок с поверхностной анизотропией типа «легкая плоскость» в спектре дипольно-обменных спиновых волн всегда существуют поверхностные моды независимо от направления постоянного намагничивания. Поверхностные спин-волновые моды в точках фазового синхронизма резонансно взаимодействуют как друг с другом, так и с объемными модами структуры.

4. В спектре планарной периодической структуры, образованной ферромагнитной пленкой с периодической металлизацией на ее поверхности, различие в ширине первой запрещенной зоны для случаев закрепленных и свободных поверхностных спинов достигает 40%, а смещение центра первой запрещенной зоны (на частотах шестисантиметрового диапазона длин волн) происходит в диапазоне нескольких десятков мегагерц.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что в процессе ее выполнения:

1. Заложена теоретическая база для разработки нового класса устройств сверхвысокочастотного диапазона, основанных на многослойных и планарных периодических магнитных пленочных структурах.

2. Получены соотношения и разработана обобщенная блок-схема алгоритма расчета дисперсионных характеристик многослойных феррит-диэлектрических структур, пригодная для формализации процесса численного решения дисперсионного уравнения в рамках теории спин-волновых мод; эти соотношения и алгоритм могут быть использованы для проектирования перестраиваемых СВЧ устройств на основе многослойных магнитных волноведущих структур.

3. Показано, что, несмотря на сильное межслойное диполь-дипольное взаимодействие, в многослойных периодических феррит-диэлектрических структурах, магнитные пленки структуры можно считать независимыми, если расстояние между ними больше, чем длина волны в анализируемой части спектра спиновых волн.

4. Проведен анализ влияния металлического экрана, находящегося вблизи ферромагнитной пленки, имеющей поверхностную анизотропию типа «легкая плоскость», на спектр дипольно-обменных спиновых волн. Показано, что это влияние различно для поверхностных и объемных мод. В частности обнаружено, что с увеличением толщины пленок объемные моды практически перестают "чувствовать" металлический экран, в то время как для поверхностных мод влияние экрана

усиливается. При асимметричном закреплении поверхностных спинов межмодовое взаимодействие оказывается сильнее, если ближайшая к экрану поверхность ферромагнитной пленки имеет более свободные поверхностные спины, чем на противоположной стороне пленки.

5. Проведен анализ дисперсионных характеристик спиновых волн, распространяющихся в планарных периодических структурах, и выявлены оптимальные параметры структур с точки зрения их применения для фильтрации СВЧ сигналов.

6. Разработана методика расчета спектров спиновых волн в планарных периодических структурах на основе тонких ферромагнитных пленок, основанная на совместном применении аналитического аппарата спин-волновых мод и формализма матриц передачи. Предложенная методика адекватно отражает экспериментально наблюдаемые эффекты и может быть использована для проведения оценочных инженерных расчетов при создании линейных и нелинейных спин-волновых приборов нового поколения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций и семинаров различного уровня: на московских Международных симпозиумах по магнетизму (MISM) (Москва, 2005 и 2008), на Международной конференции ИНТЕРМАГ (IEEE International Magnetism Conference) (Испания, Мадрид, 2008), на втором международном конгрессе по передовым электромагнитным материалам в оптике и СВЧ (METAMATERIALS'2008) (Испания, Памплона, 2008).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах, среди которых две публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Кроме того, по результатам диссертационной работы опубликованы две научные монографии. Часть результатов опубликована в материалах четырех международных научно-технических конференций. Список печатных работ автора по теме диссертации приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами и заключения. Основная часть работы изложена на 132 страницах машинописного текста, включает 63 рисунка, 3 приложения и содержит список литературы из 122 наименований, среди которых 46 работы отечественных авторов и 76 работ иностранных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, даны сведения о структуре и содержании работы, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «Теория дипольно-обменных спиновых волн в многослойных феррит-диэлектрических структурах» посвящена построению теории нормальных спиновых волн в однородно намагниченной под произвольным углом к поверхности пленок многослойной феррит-диэлектрической структуре при одновременном учете межслойного и внутрислойного диполь-дипольного и обменного взаимодействия, а также при наличии в ферромагнитных пленках объемной и поверхностной анизотропии произвольного типа.

Первый параграф данной главы посвящен обзору современного состояния теории спиновых волн в магнитных многослойных структурах. Обзор имевшейся литературы показал, что несмотря на огромное количество опубликованных работ разнообразие рассматриваемых структур и математических моделей для их описания не позволяло построить общую картину формирования спектра спиновых волн в слоистых структурах. На момент начала работы над диссертацией не существовало последовательной теории, учитывающей одновременно обменное и диполь-дипольное взаимодействие, а также поля объемной и поверхностной анизотропии в многослойной спин-системе. Все имеющиеся теории описывали только некоторые частные случаи и использовали те или иные приближения. Кроме того, обзор показывает актуальность рассматриваемой задачи, поскольку в настоящее время физические процессы, определяющие свойства многослойных структур, находятся в стадии интенсивного исследования. Более того, анализ современного состояния исследований в области волновых процессов в многослойных и периодических структурах на основе магнитных пленок показывает, что формируется новое направление нанoeлектроники – магнитные метаматериалы. В заключение обзора литературы сформулированы цели первой части диссертационной работы.

В последующих параграфах подробно описывается метод совместного интегрирования уравнения движения намагниченности и уравнений Максвелла, осно-

ванный на представлении дипольного поля внутри и вне пленок с помощью тензорных функций Грина системы уравнений электродинамики и разложении переменной намагниченности по собственным функциям линейного дифференциального оператора со смешанными обменными граничными условиями. Производится анализ различных типов межслойного взаимодействия. Выводятся точные и приближенные дисперсионные соотношения, в явном виде описывающие закон дисперсии спиновых волн в многослойных феррит-диэлектрических структурах с учетом обменного и диполь-дипольного взаимодействия, а также полей объемной и поверхностной анизотропии. (Под феррит-диэлектрических структурой в данном случае понимается многослойная структура, состоящая из чередующихся ферромагнитных и диэлектрических слоев.)

В последнем параграфе главы на примере рассмотрения перпендикулярно намагниченной двухслойной структуры исследуются зависимости формы спектра и степени гибридизации спин-волновых мод от степени закрепления поверхностных спинов и геометрических параметров структуры.

Глава 2 «Спектр дипольно-обменных спиновых волн в периодических многослойных структурах на основе тонких ферромагнитных пленок» посвящена рассмотрению практически важного случая многослойной феррит-диэлектрической структуры – периодической многослойной структуры. В данной главе впервые в аналитической форме (в диагональном приближении теории возмущений) получены выражения, описывающие спектр спиновых волн в многослойной периодической феррит-диэлектрической структуре с частичным закреплением поверхностных спинов. Теоретически доказано, что в периодической многослойной структуре межслойное диполь-дипольное взаимодействие приводит к формированию зон разрешенных состояний в спектре спиновых волн за счет «расщепления» исходно вырожденных дисперсионных кривых.

В первых двух параграфах дается классификация магнитных периодических многослойных структур и подробно рассматриваются особенности распространения спиновых волн в таких структурах. Формулируются цели данной главы. В последующих параграфах выводятся точное и приближенное дисперсионные соотношения для дипольно-обменных спиновых волн, распространяющихся в периодической многослойной структуре в плоскости пленок, и анализируется влияние раз-

личных параметров на дисперсионные характеристики спиновых волн, в частности, на форму спектра и ширину зон разрешенных состояний. Особое внимание уделяется определению «критерия независимости» отдельных пленок структуры. Показывается, что дипольно взаимодействующие ферромагнитные пленки в многослойной периодической структуре можно считать независимыми, если расстояние между ними больше, чем длина волны в анализируемой части спектра спиновых волн.

Глава 3 «Исследование влияния поверхностной анизотропии на дисперсионные характеристики дипольно-обменных спиновых волн в тонких ферромагнитных пленках» посвящена изучению влияния типа поверхностной анизотропии и величины параметра закрепления поверхностных спинов на спектр спиновых волн в свободных и экранированных тонких ферромагнитных пленках.

В первых двух параграфах рассматриваются различные виды обменных граничных условий, определяются типы поверхностной анизотропии, дается обзор экспериментальных работ по исследованию влияния величины параметра закрепления поверхностных спинов на спектр спиновых волн в тонких ферромагнитных пленках, а также формулируются цели данной главы.

В третьем параграфе детально исследуется характеристическое уравнение для смешанных обменных граничных условий Радо-Уиртмена, определяющее допустимые значения поперечных волновых чисел для спин-волновых мод и строится диаграмма комплексных решений данного уравнения. В четвертом параграфе исследуется влияние типа поверхностной анизотропии и величины параметров закрепления поверхностных спинов на форму спин-волновых мод при симметричном и асимметричном закреплении поверхностных спинов.

В последнем параграфе рассматриваются особенности спектров спиновых волн в свободных и экранированных с одной стороны перпендикулярно и касательно намагниченных ферромагнитных пленках, имеющих различные параметры закрепления поверхностных спинов. Приводятся спектры спиновых волн, рассчитанные в первом порядке теории возмущений, для двух типов поверхностной анизотропии: типа «легкая ось» и типа «легкая плоскость» для двух направлений внешнего магнитного поля (Рис. 1). Анализируется влияние симметричного и асимметричного закрепления поверхностных спинов и типа поверхностной анизотропии на границах ферромагнитной пленки на дипольную гибридизацию спектра спиновых

волн. Отмечается возможность управления дисперсионными характеристиками спиновых волн в ферромагнитных пленках с помощью контролируемого изменения параметра закрепления поверхностных спинов.

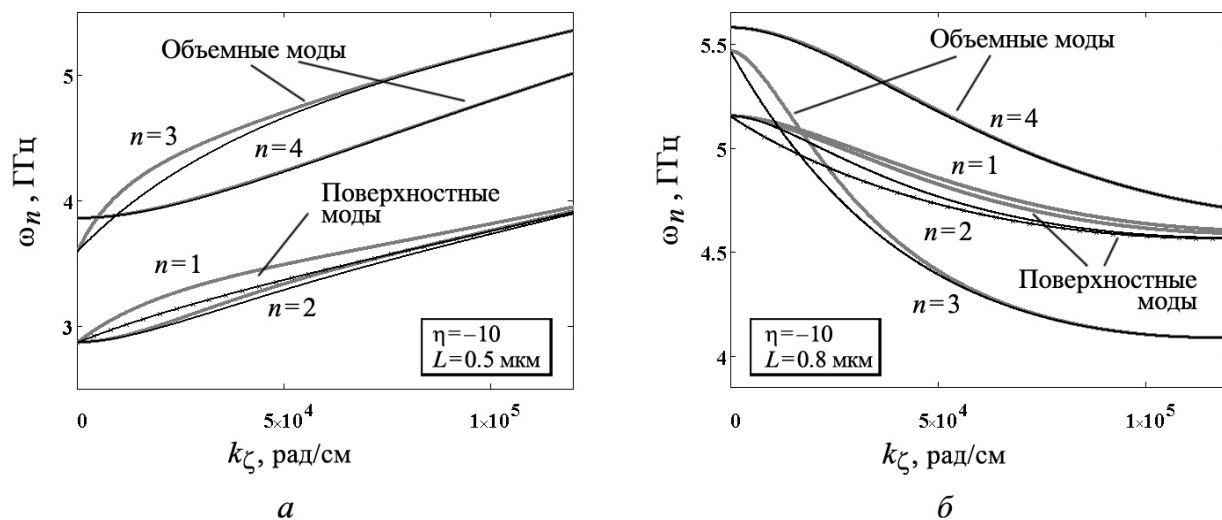


Рис. 1. Спектры спиновых волн: *a* – в перпендикулярно намагниченной, *б* – в касательно намагниченной (вдоль направления распространения спиновой волны) свободной и экранированной ферромагнитной пленке при сильной поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость». Тонкие линии на графике отвечают спектрам экранированной пленки, жирные линии – спектру свободной пленки. Параметры расчета: $M_0 = 140$ кА/м, $H_0 = 100$ кА/м, $\eta_1 = \eta_2 = \eta$, $b = 0.1$ мкм

Глава 4 «Дисперсионные характеристики спиновых волн в планарных периодических структурах на основе ферромагнитных пленок» посвящена построению теории планарных периодических структур на основе тонких ферромагнитных пленок с произвольными параметрами.

В первом параграфе дается обзор современного состояния исследований в области планарных периодических структур на основе ферромагнитных пленок.

В следующих трех параграфах развивается теория спиновых волн в магнитных планарных периодических структурах, на основе совместного применения аналитического аппарата спин-волновых мод и формализма матриц передачи. Отмечаются особенности применения аппарата матриц передачи в случае магнитных структур с взаимным характером дисперсионных зависимостей.

В последующих параграфах исследуются дисперсионные характеристики спиновых волн, распространяющихся в касательно намагниченной периодической

структуре, образованной ферромагнитной пленкой с решеткой металлизации, расположенной вблизи ее поверхности. В частности, рассчитываются зависимости ширины и положения запрещенных зон в спектре спиновых волн в зависимости от параметра закрепления поверхностных спинов, от периода и коэффициента заполнения решетки металлизации, а также от расстояния между поверхностью ферромагнитной пленки и решеткой металлизации. В последнем параграфе главы производится сравнение расчетных дисперсионных характеристик с результатами экспериментальных исследований (Рис. 2).

В Заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

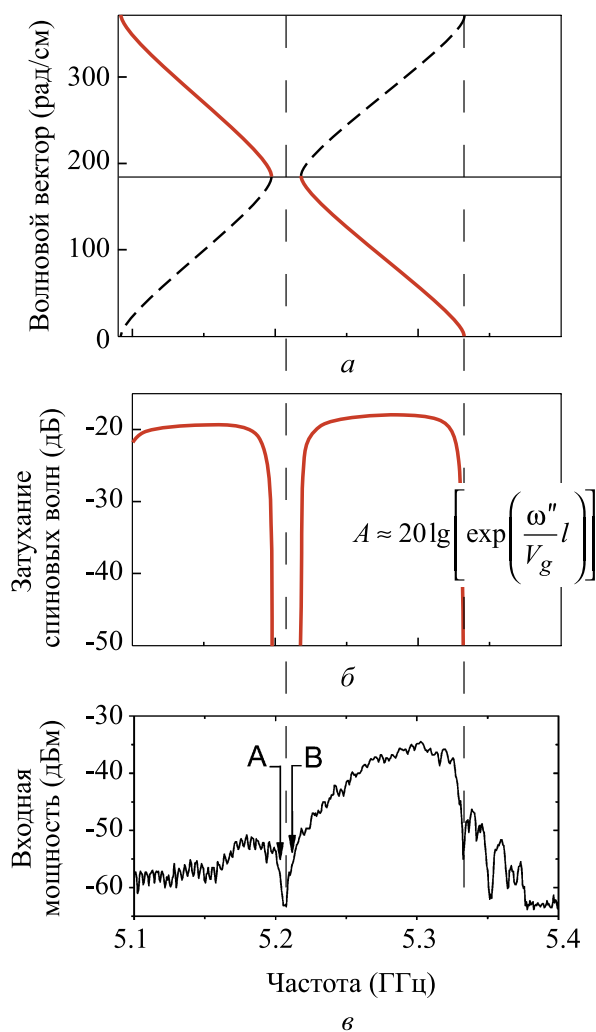


Рис. 2. *a* – теоретическая дисперсионная зависимость планарной периодической структуры, *б* – теоретическая зависимость потерь на распространение спиновых волн от их частоты, *в* – экспериментальная частотная зависимость коэффициента передачи спиновых волн в планарной периодической структуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Построена теория дипольно-обменных спиновых волн, распространяющихся в плоскопараллельных многослойных магнитных структурах, состоящих из произвольного числа чередующихся ферромагнитных и диэлектрических слоев, намаг-

ниченных под произвольным углом к поверхности. Построенная теория позволяет учесть как диполь-дипольное и обменное взаимодействия в спин-системе ферромагнетика, так и влияние кристаллографической и поверхностной анизотропии на дисперсионные характеристики структуры в целом. Показано, что наличие магнитной кристаллографической анизотропии ферромагнитных слоев приводит к зависимости спектра спиновых волн многослойной феррит-диэлектрической структуры от взаимной ориентации кристаллографических осей в различных слоях структуры.

2. Проведен анализ процессов формирования дипольно-обменного спектра спиновых волн, распространяющихся в плоскости пленок многослойной периодической феррит-диэлектрической структуры. Исследована зависимость дисперсионных характеристик спиновых волн от геометрических параметров многослойной структуры и от величины закрепления поверхностных спинов в ферромагнитных слоях системы. Показано, что дипольно взаимодействующие ферромагнитные пленки в многослойных периодических структурах, состоящих из чередующихся ферромагнитных и диэлектрических слоев, можно считать независимыми в том случае, когда расстояние между ними больше, чем длина спиновой волны в анализируемой части спектра.

3. Впервые проведено исследование зависимости формы спектра спиновых волн и степени гибридизации спин-волновых мод от типа поверхностной анизотропии и величины параметра закрепления поверхностных спинов для свободной и экранированной с одной стороны ферромагнитной пленки при симметричном и асимметричном закреплении поверхностных спинов. В частности, установлено, что наличие поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» на одной или обеих поверхностях ферромагнитной пленки приводит к возникновению в структуре одной или двух поверхностных мод независимо от направления внешнего подмагничивания. Показано, что эти поверхностные спин-волновые моды могут находиться в условиях фазового синхронизма и резонансно взаимодействовать как друг с другом, так и с объемными модами структуры, образуя дипольные «щели» в спектре спиновых волн. Обнаружено, что наличие металлического экрана вблизи поверхности ферромагнитной пленки может, как увеличивать, так и подавлять межмодовое взаимодействие внутри ферромагнитной пленки. При асимметричном закреплении поверхностных спинов межмодовое взаимодействие оказывается сильнее, если

ближайшая к экрану поверхность пленки имеет более свободные поверхностные спины, чем на противоположной стороне.

4. Построена теория дипольно-обменных спиновых волн в планарных периодических структурах на основе тонких ферромагнитных пленок с произвольными параметрами. Предложенная теория строго описывает зонную структуру спектра спиновых волн в планарных периодических структурах различной природы и геометрии. На основе полученных соотношений проведен анализ зависимости ширины и положения запрещенных зон в спектре спиновых волн от геометрических параметров структуры и степени закрепления поверхностных спинов. В планарной периодической структуре, образованной ферромагнитной пленкой и размещенной вблизи нее решеткой металлизации, ширина и положение первой запрещенной зоны существенно зависит от параметров закрепления спинов на поверхностях магнитной пленки. При этом различие в ширине запрещенной зоны для структур на основе ферромагнитных пленок с закрепленными и свободными поверхностными спинами достигает 40 %, а смещение центра запрещенной зоны происходит в интервале величиной в нескольких десятков мегагерц. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность выбранной модели и показали, что для инженерных расчетов достаточно использовать приближенные аналитические выражения для спектра спиновых волн, полученные в рамках теории возмущений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vayhinger, K., Kronmuller, H. Propagating spin waves in ferromagnetic multilayers. (Спиновые волны, распространяющиеся в ферромагнитных многослойных структурах) [Текст] / K. Vayhinger, H. Kronmuller // J. Magn. Magn. Mat. – 1986. – V. 62. – P. 159–168.
2. Калиникос, Б.А., Колодин, П.А. Спектр дипольно-обменных спиновых волн в перпендикулярно намагниченной слоистой феррит-диэлектрической структуре. [Текст] / Б.А. Калиникос, П.А. Колодин // Изв. ВУЗов СССР. Радиофизика. – 1989. – Т. 32, № 10. – С. 1290–1298.
3. Hillebrands, B. Spin-wave calculations for multilayered structures. (Расчет спиновых волн для многослойных структур) [Текст] / B. Hillebrands // Phys. Rev B. – 1990. – V. 41, № 1. – P. 530–540.

4. Camley, R.E., Stamps, R.L. Magnetic multilayers: spin configurations, excitations and giant magnetoresistance. (Магнитные многослойные структуры: конфигурация спинов, возбуждений и гигантское магнитное сопротивление) [Текст] / R.E. Camley, R.L. Stamps // *J.Phys.:Cond. Mat.* – 1993. – Vol. 5. – P. 3727-3786.
5. Barnas, J. Spin waves in superlattices. I General dispersion equations for exchange magnetostatic and retarded modes (Спиновые волны в сверхрешетках. I Общее дисперсионное соотношение для обменных магнитостатических и запаздывающих мод) [Текст] / J. Barnas // *J. Phys. C: Solid state Phys.* – 1988. – Vol. 21. – P. 1021-1036.
6. Owens, J.M. Magnetostatic wave propagation through periodic metallic gratings. (Распространение магнитостатических волн в периодической металлической решетке) [Текст] / J.M. Owens, C.V. Smith, S.N. Lee, et al. // *IEEE Trans. Magn.* – 1978. – Vol. MAG-14, №5. – P. 820-825.
7. Seshadri, S.R. Magnetic wave interactions in a periodically corrugated YIG film. (Взаимодействие магнитных волн в периодически гофрированной пленке ЖИГ) [Текст] / S.R. Seshadri // *IEEE Trans. MTT.* – 1979. – Vol. MTT-27, №2. – P. 199-204.
8. Гуляев, Ю.В. Распространение магнитостатических волн в нормально намагниченной пластине феррита с периодически неровными поверхностями [Текст] / Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, В.П. Плесский // *ФТТ.* – 1980. – Т.22, №. 9. – С.2831-2832.
9. Вороненко, А.В. Дифракция поверхностных магнитостатических волн на магнитных решетках в режиме Брэгга [Текст] / А.В. Вороненко, С.В. Герус, В.Д. Харитонов // *Изв. вузов. Физика.* – 1988. – Т. 31, № 11. – С. 76-85.
10. Kolodin, P.A., Hillebrands, B. Spin-wave propagation across periodically corrugated thin metallic ferromagnetic films. (Распространение спиновых волн в периодически гофрированной тонкой металлической ферромагнитной пленке) [Текст] / P.A. Kolodin, B. Hillebrands // *J. Magn. Magn. Mat.* – 1996. – Vol. 161. – P. 199-202.
11. Nikitov, S. A. Spin waves in periodic magnetic structures – magnonic crystals (Спиновые волны в периодических магнитных структурах – магнонных кристаллах) [Текст] / S.A. Nikitov, Ph. Tailhades, C.S. Tsai // *JMMM.* – 2001. – Vol. 236. – P. 320–330.
12. Локк, Э. Г. Распространение поверхностных магнитостатических волн в композитной структуре феррит-решетка металлических полосок [Текст] / Э. Г. Локк // *Радиотехника и электроника.* – 2005. – Т. 50, N 1. – С.74-81.

13. Вашковский А. В., Локк Э. Г. Поверхностная магнитостатическая волна в структуре феррит – решетка металлических полосок [Текст] / Сб. трудов XIX Международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники (НМММ)», Москва, 28 июня – 2 июля, 2004 г / М.: изд. физ. факультета МГУ, 2004, С. 237-239.

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

ПУБЛИКАЦИИ В ИЗДАНИЯХ, РЕКОМЕНДОВАННЫХ ВАК РОССИИ:

1. Григорьева, Н. Ю. Наблюдение солитонов огибающей спиновых волн в периодических магнитных пленочных структурах [Текст] / Н.Ю. Григорьева, А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2008. – Т. 88. – Вып. 1. – С. 34-39.
2. Григорьева, Н. Ю. К вопросу об излучении в нестационарной и неоднородной полубесконечной среде [Текст] / Н.Ю. Григорьева, К.А. Барсуков // Журнал Технической Физики. – 1996. – Т. 66. – Вып. 7. – С. 134-140.

ДРУГИЕ ПУБЛИКАЦИИ И МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИЙ:

3. Spin waves in multilayered and patterned magnetic structures (Спиновые волны в многослойных и текстурированных магнитных структурах) [Текст]: монография / Grigorieva N.Yu. [и др.] // Theory and Phenomena of Artificial Materials: Handbook of Artificial Materials, Vol. I., ed. by F. Capolino. – Oxford, UK: Taylor and Francis Group, LLC. CRC Press, 2009. – Chapter 34. – P. 34-1– 34-65. (ISBN: 9781420054255).
4. Григорьева, Н. Ю. Теория спиновых волн в пленочных ферромагнитных многослойных структурах. [Текст]: монография / Н.Ю. Григорьева, Б.А. Калиникос. – СПб.: Изд-во «Технолит», 2008. – 179 с. (ISBN: 5-7629-0929-8).
5. Grigorieva, N. Yu. Observation of bright and dark spin wave envelope solitons in periodic magnetic film structures (Наблюдение светлых и темных солитонов огибающей спиновых волн в периодических структурах на основе магнитных

- пленок) [Текст]: материалы международ. науч. конференции / N.Yu. Grigorieva, A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos // Proc. of INTERMAG Europe 2008. – Madrid, Spain, 4-8 May, 2008. – P. BG-07.
6. Grigorieva, N.Yu. Investigation of dipole-exchange spectrum of volume spin waves in tangentially magnetized ferromagnetic film with periodic metallic grating (Исследование дипольно-обменного спектра объемных спиновых волн в касательно намагниченной ферромагнитной пленке с периодической решеткой металлизации) [Текст]: материалы международ. науч. конференции / N.Yu. Grigorieva // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM). – Moscow, June 20-25, 2008. – P. 107.
 7. Grigorieva, N. Yu. Dispersion characteristics of the dipole-exchange spin waves in planar magnetic periodic structures (Дисперсионные характеристики дипольно-обменных спиновых волн в планарных магнитных периодических структурах) [Текст]: материалы международ. науч. конференции / N.Yu. Grigorieva, B.A. Kalinikos // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM). – Moscow, June 20-25, 2008. – P. 507.
 8. Grigorieva, N. Yu. Dispersion characteristics of the planar 1D magnonic crystals (Дисперсионные характеристики планарных одномерных магнетонных кристаллов) [Текст]: материалы международ. науч. конференции / N.Yu. Grigorieva, B.A. Kalinikos // 2nd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS'2008). – Pamplona, Spain, September 21-26, 2008. – P. 160-162.
 9. Grigorieva, N. Yu. Collective modes in magnetic multi-layered one-dimensional periodic structures (Коллективные моды в магнитных многослойных одномерных периодических структурах) [Текст]: материалы международ. науч. конференции / N.Yu. Grigorieva, M.P. Kostylev, A.A. Stashkevich, B. Hillebrands // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM). – Moscow, June 25-30, 2005. – 28PO-10-16.

Соискатель



Григорьева Н.Ю.