

На правах рукописи

Дроздовский Андрей Викторович

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ МАГНОННЫХ
КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК

Специальность: 01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В.И.Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ), на кафедре физической электроники и технологии

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Герус Сергей Валерианович, старший научный сотрудник лаборатории по исследованию СВЧ свойств ферромагнетиков Фрязинского отделения Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
кандидат физико-математических наук, доцент Гришин Сергей Валерьевич, доцент кафедры электроники, колебаний и волн Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского.

Ведущая организация – Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится “ 27 ” декабря 2011 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 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 “ 25 ” ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.08

Смирнов Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Спиновые волны (СВ), распространяющиеся в ферромагнитных пленках и слоистых структурах на их основе, уже многие годы успешно используются для построения различных приборов аналоговой обработки сигналов в диапазоне сверхвысоких частот.

Спиновые волны обладают рядом особенностей, таких как малые групповая и фазовая скорости, широкий диапазон рабочих частот (до 100 ГГц), разнообразие дисперсионных характеристик, сильно анизотропный характер распространения, вызванный полем подмагничивания, невзаимность дисперсионных характеристик, относительно малые потери на распространение спиновых волн, легкость возбуждения и приема, большое разнообразие нелинейных эффектов.

Интерес к спиновым волнам в тонкопленочных средах носит как фундаментальный, так и прикладной характер [1-3]. С фундаментальной точки зрения этот интерес обуславливается тем, что ферромагнитные пленки являются удобной средой для изучения линейных и нелинейных волновых явлений. С прикладной точки зрения интерес к спиновым волнам обусловлен тем, что особенности процессов возбуждения, распространения и детектирования СВ можно использовать при создании таких устройств, как фильтры, резонаторы, линии задержки, генераторы СВЧ колебаний, вентили, циркуляторы, шумоподавители, ограничители мощности, конвольверы, генераторы сигналов, умножители частоты, генераторы хаотических СВЧ сигналов и др. Наибольшее применение как в фундаментальных, так и прикладных исследованиях благодаря рекордно низким СВЧ магнитным потерям получили пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ).

Одним из направлений создания магнитных материалов с заранее заданными дисперсионными свойствами является формирование магнитных периодических структур. Сравнительно недавно такие периодические структуры получили так же название “магнетонных кристаллов” (МК) по аналогии с фотонными кристаллами [4]. (В данной работе термины “магнетонный кристалл” и “периодическая магнитная структура” будут использоваться как синонимы.)

Характерной чертой магнетонных кристаллов вследствие их пространственной периодичности является наличие запрещенных зон в спектре спиновых волн. Обладая свойствами, сходными со свойствами фотонных кристаллов, магнетонные кристаллы имеют ряд отличий. Благодаря этим отличиям они представляют интерес с точки зрения изучения линейных и нелинейных колебаний и волн, а так же применения в технике СВЧ. Во-первых, длина спиновых волн, распространяющихся в магнетонном кристалле, варьируется от нескольких сантиметров до нескольких сотен микрон. Во-вторых, закон дисперсии волн и, как следствие, передаточная характеристика магнетонных кристаллов зависят от внешнего магнитного поля и могут управляться этим полем. В-третьих, фазовая и групповая скорости спиновых волн также зависят от размеров образца и приложенного внешнего поля и могут изменяться в широких пределах. В-четвертых, благодаря относительно небольшим размерам магнетонные кристаллы могут быть использованы при создании интегральных устройств.

Таким образом, интерес к магнным кристаллам обусловлен тем, что, с одной стороны, они являются удобной модельной средой для изучения как линейных, так и нелинейных волновых эффектов, а с другой стороны – возможностью создания на их основе СВЧ функциональных приборов нового поколения.

Следует подчеркнуть, что, несмотря на разнообразие существующих подходов к описанию *линейных свойств* магнных кристаллов дисперсионные характеристики спиновых волн в магнных кристаллах до настоящего момента подробно изучались только теоретически и для случая *бесконечных* (неограниченных в направлении распространения волны) периодических магнитных структур. Исследование дисперсионных характеристик магнных кристаллов *конечной длины*, описанные в литературе, носят крайне фрагментарный характер. В то же время пространственная ограниченность магнного кристалла сильно влияет не только на его линейные, но и на нелинейные свойства [5]. В связи с этим встает вопрос о изучении спектра спиновых волн в реальных магнных кристаллах конечной длины с учетом магнитной диссипации.

Помимо исследования линейных свойств магнных кристаллов внимание исследователей обращалось и к исследованию их *нелинейных свойств*, в частности, к исследованию *солитонных*, параметрических *трехволновых* и *четырёхволновых* процессов. Однако количество работ, посвященных исследованию нелинейных свойств МК, относительно невелико. Среди них можно отметить работы, посвященные исследованию “целевых” солитонов в МК.

Несмотря на значительный интерес к названной области исследований ряд важных вопросов к моменту начала работы над диссертацией оставался не изученным. Сюда относятся задачи исследования дисперсионных характеристик магнных кристаллов конечной длины, учитывающие магнитную диссипацию, а так же задачи распространения нелинейных спиновых волн в магнных кристаллах в условиях *четырёхмагнного* взаимодействия спиновых волн.

Целью диссертационной работы являлось исследование дисперсионных и нелинейных свойств магнных кристаллов конечной длины, полученных путем периодической «модуляции» поверхности пленки ЖИГ.

В соответствии с поставленной целью основными задачами диссертационного исследования являются:

1. Анализ влияния длины одномерного магнного кристалла на спектр спиновых волн в магнном кристалле.
2. Анализ влияния магнитной диссипации на спектр спиновых волн в магнном кристалле.
3. Исследование процессов четырёхмагнного распада спиновых волн в пространственно ограниченных однородных пленках ЖИГ.
4. Исследование влияния процессов четырёхмагнного распада спиновых волн на СВЧ передаточную характеристику одномерного магнного кристалла.
5. Исследование процессов собственной модуляционной неустойчивости спиновых волн в магнных кристаллах.

6. Исследование процессов возбуждения, формирования и распространения “щелевых” солитонов огибающей спиновых волн в магнетонных кристаллах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые проведен детальный анализ влияния длины магнитной периодической структуры и параметра магнитной диссипации на спектр спиновых волн.
2. Впервые экспериментально продемонстрировано, что в однородных пленках ЖИГ в случае, когда трехмагнетонные процессы распада спиновых волн запрещены законами сохранения частоты и волнового вектора, эффект нелинейного сдвига частоты спин-волновых колебаний является беспороговым, а эффект нелинейного затухания спиновых волн является пороговым, причем его появление ведет к ограничению величины нелинейного сдвига частоты СВ.
3. Продемонстрировано, что увеличение мощности входного СВЧ сигнала ведет к возникновению в магнетонных кристаллах двух нелинейных процессов – нелинейному сдвигу волнового числа и нелинейному затуханию СВ. Это приводит к тому, что в случае его касательного намагничивания передаточная характеристика магнетонного кристалла сдвигается вниз по частоте, вносимые потери становятся больше, а запрещенные зоны “замазываются”.
4. Впервые экспериментально наблюдалось возникновение собственной модуляционной неустойчивости спиновых волн в магнетонных кристаллах. Указанное явление существовало только в узких частотных областях, расположенных вблизи запрещенных зон одномерного магнетонного кристалла.
5. Впервые экспериментально наблюдалось возбуждение “щелевых” солитонов огибающей спиновых волн в магнетонных кристаллах как путем импульсного, так и монохроматического возбуждения.

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

1. Дисперсионные характеристики спиновых волн вблизи частот брэгговских резонансов в магнетонных кристаллах конечных размеров определяются длиной магнетонного кристалла и величиной параметра магнитной диссипации.
2. Частотное положение, ширина и относительная глубина полос заграждения спектра спиновых волн магнетонного кристалла конечной длины определяется амплитудой и диссипацией возбуждаемых спиновых волн.
3. В зонах сильной дисперсии магнетонных кристаллов на частотах, расположенных вблизи брэгговских резонансов, возможно возбуждение собственной модуляционной неустойчивости спиновых волн.
4. Наличие зон сильной дисперсии спиновых волн на частотах, расположенных вблизи брэгговских резонансов, позволяет возбуждать “щелевые” солитоны огибающей спиновых волн как методами импульсного, так и монохроматического возбуждения.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в следующем.

1. Экспериментально подтверждено, что способ описания СВЧ параметров магнетонных кристаллов при помощи аппарата волновых матриц передачи пригоден для инженерных расчетов СВЧ характеристик передачи магнетонных кристаллов и приборов на их основе.
2. Проведен анализ влияния размеров магнетонного кристалла и параметра магнитной диссипации на спектр одномерных магнетонных кристаллов, полученных путем химического травления поверхности пленки ЖИГ. Это дает новую информацию, необходимую при исследовании и прикладном использовании линейных и нелинейных спин-волновых явлений в магнетонных кристаллах.
3. Показано, что эффект нелинейного сдвига частоты в том случае, когда процессы трехмагнетонного распада спиновых волн невозможны, является беспороговым, а эффект нелинейного затухания является пороговым, причем его появление ведет к ограничению величины нелинейного сдвига частоты резонатора. Эти результаты дают новую информацию, необходимую для создания устройств обработки сигнала на основе пленочных ферромагнетиков.
4. Предложен способ аналоговой обработки СВЧ сигнала, основанный на явлении нелинейного сдвига частоты спиновых волн в магнетонном кристалле. Этот способ положен в основу многофункционального устройства, которое может выполнять несколько функций, а именно, может работать как “усилитель” отношения сигнал/шум, как ограничитель мощности и как подавитель сильных СВЧ сигналов.
5. Создан пакет программ, позволяющий рассчитывать эволюцию амплитуды и фазы интенсивных спиновых волн с учетом их нелинейного затухания. Этот пакет позволяет рассчитывать рабочие характеристики спин-волновых СВЧ приборов, принцип действия которых, основан на использовании спиновых волн, бегущих в магнетонных кристаллах.

Достоверность результатов подтверждается хорошим согласованием результатов численных расчетов и экспериментальных данных.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на ряде конференций и семинаров различного уровня, в частности, на Международной конференции по магнитным материалам “ICFM”, (Украина, Крым, 2008 и 2011); на “Семинаре по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада” (СПб, Институт им. Йоффе, 2007 и 2011); на Международной научно-технической конференции “INTERMATIC-2007” (Москва, МИРЭА, 2007); на Всероссийской конференции и научной школе для молодых ученых “Новые материалы и нанотехнологии в технике СВЧ” (СПб, СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2010); на Международном конгрессе по передовым электромагнитным материалам в оптике и СВЧ “METAMATERIALS’2011” (Испания, Барселона, 2011); на Международной конференции по эффектам, наблюдаемым в ферромагнитных средах “Spin waves” (СПб, Институт им. Йоффе, 2011); на Международной конференции по

эффектам, наблюдаемым в ферромагнитных средах “Magnonics” (Бразилия, Ресифи, 2011).

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, из них 3 статьи в научных журналах, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 1 статья в другом издании и 17 материалов докладов на международных, всероссийских, региональных и местных научно-технических конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 87 наименований. Основная часть работы изложена на 114 страницах машинописного текста. Работа содержит 32 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «Спиновые волны в ферромагнитных пленках и магнетонных кристаллах на их основе (обзор)» посвящена обзору литературы по теме диссертации. В первом параграфе данной главы кратко рассмотрены два основных метода решения граничной задачи на собственные моды спиновых волн в ферромагнитной пленке: метод магнитостатического потенциала и метод тензорных функций Грина. Приведены приближенные дисперсионные уравнения, удобные для теоретического анализа и для расчетов на ЭВМ. Приведены формулы для расчета затухания *линейных* спиновых колебаний и волн в пленках феррита.

Во втором параграфе кратко описаны трехволновые и четырехволновые параметрические процессы взаимодействия спиновых волн, которые лежат в основе нелинейных явлений, таких как нелинейное затухание, нелинейный сдвиг частоты и волнового числа, собственная и наведенная модуляционная неустойчивость, солитоны огибающей спиновых волн.

В третьем параграфе главы дан обзор, посвященный истории исследования магнитных периодических структур. Показаны основные направления исследования и перспективы применения магнетонных кристаллов. Обоснован выбор целей и задач диссертационной работы. Обзор показывает, что все существующие работы, посвященные исследованию свойств магнетонных кристаллов, можно разделить на две основные группы. К первой из них можно отнести работы, посвященные исследованию *линейного* спектра спиновых волн в магнетонных кристаллах бесконечной длины. Для таких структур теория предсказывает, что спектр их собственных состояний $f(k)$ характеризуется наличием разрешенных зон, соответствующих частотам, на которых возможно распространение спиновых волн, а также запрещенных зон, на частотах которых распространение спиновых волн невозможно. Последние обусловлены брегговским резонансом.

Ко второй группе статей можно отнести работы, посвященные исследованию *нелинейных свойств* магнонных кристаллов. Число работ этой группы не велико. В частности, было продемонстрировано, что увеличение мощности СВЧ сигнала в условиях трехмагнонного распада спиновых волн ведет к “замазыванию” полосы заграждения на передаточной характеристике магнонного кристалла. Другая часть работ посвящена возможности возбуждения так называемых “щелевых” солитонов огибающей спиновых волн в магнонных кристаллах. Такие солитоны были предсказаны теоретически для МК [6] и обнаружены экспериментально методом двухчастотного возбуждения [7].

Обзор литературы показал, что исследования дисперсионных характеристик магнонных кристаллов конечной длины, а так же исследования передаточных характеристик таких кристаллов в условиях четырехмагнонного распада спиновых волн не проводилось. Не были исследованы так же возможность возникновения собственной модуляционной неустойчивости спиновых волн в магнонных кристаллах и возможность возбуждения “щелевых” солитонов огибающей спиновых волн методами импульсного и монохроматического возбуждения.

В заключение обзора литературы сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

Глава 2 «Распространение линейных спиновых волн в одномерных магнонных кристаллах конечной длины» посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию коэффициента передачи и закона дисперсии магнонного кристалла конечной длины с учетом магнитных потерь. В первом параграфе главы проводится теоретическое исследование спектра и затухания спиновых волн, распространяющихся в магнонных кристаллах конечной длины. В качестве объекта исследования были выбраны структуры, представлявшие собой монокристаллические волноводы из ЖИГ, содержащие неоднородности в виде периодической системы канавок. Для создания теоретической модели использовался аппарат волновых матриц передачи. Использование данного аппарата позволяет учесть роль конечных размеров и затухания при формировании спектра магнитной периодической волноведущей структуры. Конкретные параметры исследуемых структур были выбраны из тех соображений, что бы на участке дисперсионной характеристики, определяемой диполь-дипольным механизмом распространения спиновых волн, доступной в экспериментах, располагалось несколько полос заграждения, обусловленных брэгговским отражением спиновых волн.

Далее при помощи теоретической модели изучаются свойства магнонных кристаллов конечной длины. Показано, что переотраженные периодической структурой волны вносят существенный вклад в формирование фазочастотной и, как следствие, дисперсионной характеристики магнонного кристалла. Затухание спиновой волны внутри запрещенных зон остается конечным. Вместо запрещенных зон имеют место полосы конечного заграждения. На дисперсионной характеристике полосы заграждения конечного магнонного кристалла проявляются как участки “перегиба” зависимости f от k . При этом крутизна дисперсионной характеристики $\Delta f/\Delta k$ внутри полосы заграждения увеличивается при увеличении длины МК.

Далее в работе проводится анализ влияния СВЧ магнитных потерь, определяемых конечной шириной линии ферромагнитного резонанса материала ферромагнетика, на дисперсионную и передаточную характеристики магнетонного кристалла. Расчет дисперсионных и передаточных характеристик проводился для структур, имевших разное число периодов. При расчете различным бралось значение полуширины линии ферромагнитного резонанса ΔH . Из сопоставления полученных зависимостей был сделан вывод, что рост вносимого затухания ведет к росту потерь при передаче сигнала на частотах полос пропускания магнетонного кристалла. При этом на абсолютную глубину полосы заграждения увеличение декремента затухания влияет слабо.

Установлено, что при увеличении значения параметра затухания на дисперсионной характеристике МК происходит “стирание” “перегибов” $f(k)$, соответствующих запрещенным зонам, т. е. происходит уменьшение “перегибов” на дисперсионной кривой, соответствующих полосам заграждения. Таким образом, при увеличении параметра затухания СВ уменьшается относительная глубина полос заграждения, а дисперсионная характеристика внутри полос заграждения изменяет свою крутизну. Сделан вывод о том, что одну и ту же дисперсионную характеристику МК можно получить путем подбора его геометрических размеров или параметра диссипации магнитного материала.

Во втором параграфе данной главы проводится сравнение расчетных передаточных и дисперсионных характеристик с результатами экспериментальных исследований. Для получения экспериментальных данных путем травления пленок железо-иттриевого граната были изготовлены структуры с параметрами, аналогичными использовавшимся ранее в расчете. В первом пункте этого параграфа приводится технология изготовления магнитной периодической структуры. Описываются макет измерительного устройства, экспериментальная установка и методика измерения передаточных и амплитудно-частотных характеристик магнетонного кристалла. Макет представлял собой стандартную конструкцию типа “линия задержки”, имевшую короткозамкнутые входную и выходную микрополосковые антенны длиной 2 мм и шириной 50 мкм. Размеры антенн позволяли возбуждать и принимать в пленке феррита только безобменные спиновые волны. Экспериментальный макет был помещен между полюсами электромагнита в однородном постоянном магнитном поле напряженностью 1205 Э. Исследовавшаяся структура имела период 400 мкм, ширину и глубину канавок 50 мкм и 2 мкм соответственно, толщина толстой области – 12 мкм. Расстояние между микрополосковыми антеннами, использовавшимися для возбуждения и приема спиновых волн, составляло 7.2 мм, таким образом, на пути распространения спиновой волны помещалось 18 периодов структуры. Результаты экспериментального исследования показали хорошее соответствие данным, полученным теоретическим путем (см. рис. 1).

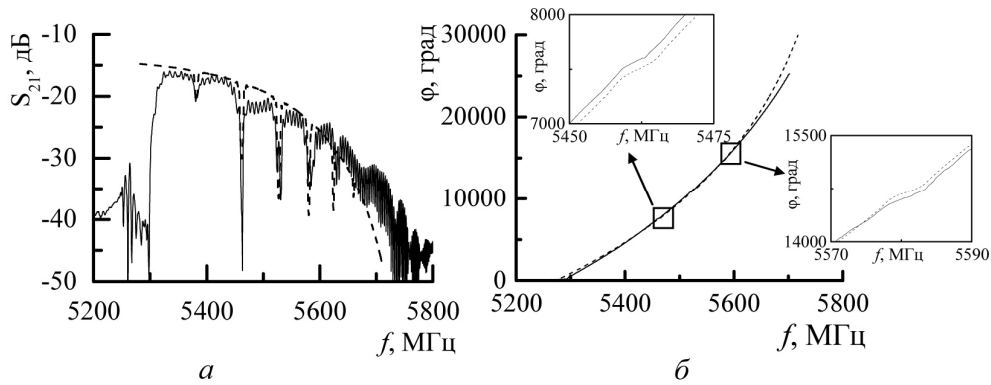


Рис. 1. Экспериментальная (сплошная линия) и теоретическая (штриховая линия) амплитудно-частотные *a*, и фазо-частотные *б* характеристики передачи

Таким образом результаты, приведенные в данной главе подтверждают, что способ описания СВЧ параметров магнетонных кристаллов при помощи аппарата волновых матриц передачи пригоден для инженерных расчетов СВЧ характеристик передачи магнетонных кристаллов и приборов на их основе. Демонстрируют, что дисперсионные характеристики спиновых волн вблизи частот брэгговских резонансов в магнетонных кристаллах конечных размеров определяется длиной магнетонного кристалла и величиной параметра магнитной диссипации.

Глава 3 «Особенности нелинейных спиновых колебаний в касательно намагниченных ограниченных ферромагнитных пленках» посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию нелинейного сдвига частоты спиновых волн в условиях нелинейного затухания колебаний и волн в пространственно ограниченных ферромагнитных пленках. Задачей данного исследования являлось выяснение особенностей влияния нелинейного затухания на нелинейный сдвиг частоты спин-волновых колебаний. В качестве объекта исследования нелинейных свойств ограниченных ферромагнитных пленок был выбран пленочный резонатор.

В первом параграфе третьей главы приводятся параметры измерительного макета и исследовавшегося резонатора. Экспериментально исследовавшийся резонатор представлял собой пленку железо-иттриевого граната толщиной 7.5 мкм с размерами в плоскости 1.5x0.5 мм. Пленка была эпитаксиально выращена на подложке из гадолиний-галлиевого граната толщиной 0.5 мм. Ее намагниченность насыщения M_0 была равна 1760 Гс, а ширина линии однородного ферромагнитного резонанса $2\Delta H$ составляла около 2 Э на частоте 5 ГГц. Исследование нелинейных свойств резонатора заключалось в измерении его спектров поглощения при различных уровнях подаваемой СВЧ мощности. В ходе экспериментов измерялись частотные зависимости коэффициента отражения резонатора.

Во втором параграфе приводятся результаты исследования нелинейных свойств резонатора. Было обнаружено, что увеличение мощности входного сигнала приводит к уменьшению резонансной частоты резонатора, к увеличению ширины резонансной кривой (т.е. к уменьшению добротности резонатора) и к увеличению коэффициента отражения на резонансной частоте. По полученным

зависимостям из анализа схемы включения резонатора в короткозамкнутую линию передачи рассчитывалась собственная добротность резонатора и частота релаксации. Было обнаружено, что эффект нелинейного сдвига частоты является беспороговым, а эффект нелинейного затухания является пороговым.

В третьем параграфе данной главы предложена теоретическая модель, отображающая взаимосвязь между частотным положением, формой кривой поглощения резонатора и величиной амплитуды спиновой волны. Произведено сопоставление экспериментальных и теоретически полученных кривых. В качестве подгоночного параметра была использована аппроксимирующая функция частоты релаксации, полученной экспериментально. Полученные теоретически и экспериментально результаты находятся в хорошем соответствии (см. рис. 2).

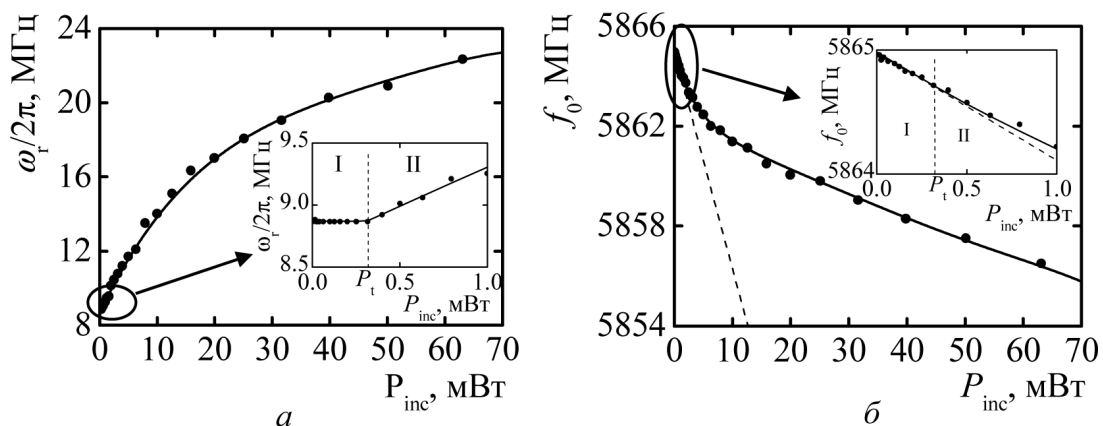


Рис. 2. Зависимости частоты релаксации (а) и резонансной частоты (б) от падающей мощности (линии – результаты расчета, значки – эксперимент). На вставках показаны те же зависимости в увеличенном масштабе

Таким образом, в данной главе исследован нелинейный отклик касательно намагниченного пленочного ферромагнитного резонатора в условиях, когда нелинейные эффекты в резонаторе обусловлены четырехволновыми параметрическими процессами. Обнаружено, что эффект нелинейного сдвига частоты спиновых колебаний является беспороговым, а эффект нелинейного затухания является пороговым, причем его появление ведет к ограничению величины нелинейного сдвига частоты резонатора.

Глава 4 «Распространение нелинейных спиновых волн в одномерных магнетонных кристаллах конечной длины» посвящена исследованию влияния явлений нелинейного фазового набега и затухания СВ, возникающих при распространении интенсивных сверхвысокочастотных спиновых волн в магнетонных кристаллах на их передаточные характеристики.

В первом параграфе четвертой главы приводятся параметры экспериментально исследовавшихся структур магнетонных кристаллов и методик экспериментального исследования. Отобранные образцы экспериментально исследовавшихся МК обладали сильно отличающимися друг от друга характеристиками. Это позволило выявить общие закономерности, возникающие в МК при распространении в них интенсивных СВ.

Во втором параграфе приводятся результаты экспериментального исследования образцов магнетонных кристаллов в виде серии амплитудно-частотных зависимостей, записанных при последовательном увеличении мощности возбуждаемого векторным анализатором цепей СВЧ сигнала. Из приведенных зависимостей видно, что при увеличении мощности входного СВЧ сигнала одновременно наблюдалось несколько эффектов. Так, передаточная характеристика МК по мере увеличения входной мощности смещалась вниз по частоте. Кроме того, для исследованных образцов МК при увеличении мощности наблюдалось уменьшение коэффициента передачи вне зон заграждения, обусловленное нелинейным затуханием спиновых волн. При подаче мощности входного сигнала выше определенного уровня начиналось “замазывание” запрещенных зон: коэффициент передачи внутри зоны увеличивался, а сама зона заграждения уширялась с изменением формы.

В третьем параграфе для описания наблюдаемых эффектов предложена теоретическая модель. Модель основана на предположении, что распространяющаяся в МК спиновая волна модулирует постоянную составляющую вектора намагниченности. При этом затухание СВ (как линейное, так и не линейное) будет приводить к различной модуляции постоянной составляющей вектора намагниченности в различных периодах МК. Поскольку и закон дисперсии и фазовый набег спиновых волн зависят от величины постоянной составляющей вектора намагниченности, то спиновые волны будут приобретать на различных периодах магнитной структуры различные фазовые набег. В результате волноведущие свойства магнетонного кристалла становятся не одинаковыми для различных периодов. Это приводит к тому, что при возрастании амплитуды спиновой волны резонансные частоты, на которых должны наблюдаться полосы заграждения, будут различаться у различных периодов структуры.

Далее в главе проведены численные расчеты эволюции амплитуды СВ в магнетонном кристалле и передаточной характеристики МК. Численный расчет проводился на основе матриц передачи, в которых дополнительно учитывались механизмы нелинейного затухания и нелинейного фазового набег СВ. Теоретическое исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе исследовалось влияние затухания спиновых волн на передаточную характеристику исследуемой структуры. Расчет производился для идеального случая, когда декремент нелинейного затухания СВ полагался равным нулю. Различным бралось значение ширины линии ферромагнитного резонанса и, соответственно, декремента *линейного* затухания спиновых волн в магнетонном кристалле. Поскольку нелинейные эффекты при малых значениях амплитуды СВ практически не заметны, то при расчете в данной части работы нормированная амплитуда СВ была выбрана равной $|U|=0.1$. Теоретическое исследование показало, что по мере увеличения *линейного* декремента затухания СВ происходит несколько эффектов – увеличиваются потери вне полосы заграждения, сама полоса заграждения уширяется, а ее частотный минимум смещается вверх по частоте. Это объясняется следующим образом. По мере увеличения вносимых потерь растет как затухание амплитуды СВ на каждом участке периодической структуры, так и раз-

брос между соседними периодами по величине нелинейной добавки к фазовому набегу. Это приводит к увеличению разности между частотами брэгговских резонансов для первых периодов. Поэтому при росте потерь частота минимума полосы заграждения увеличивается, а ее относительная глубина уменьшается (т. е. зона заграждения “замазывается”).

На втором этапе теоретического исследования изучалось влияние нелинейных потерь, возникающих в ферромагнетике, на распределение амплитуды СВ и на передаточную характеристику магنونного кристалла. Исследование показало, что, как и в случае линейного затухания СВ, рост вносимых структурой нелинейных потерь приводит к уменьшению коэффициента передачи МК, к сдвигу полосы заграждения вверх по частоте и к уменьшению относительной глубины полосы заграждения.

На третьем этапе исследования изучалось влияние начальной амплитуды спиновой волны на распределение амплитуды падающей спиновой волны и передаточную характеристику магنونного кристалла. Расчет производился для тех же параметров магنونного кристалла, что и ранее, но для значений декрементов линейного и нелинейного затухания $\Delta H_0 = 0.5$ Э и $\nu = 5 \cdot 10^9$ Гц (При этом ширина линии ферромагнитного резонанса полагалась равной $\Delta H(|U|) = \Delta H_0 + \frac{\nu}{2\pi|\gamma|}|U|^2$). Из

результатов исследования видно, что по мере увеличения амплитуды входной СВ “включается” механизм нелинейного затухания, что приводит к более резкому падению амплитуды СВ на нескольких первых периодах структуры. Далее механизм нелинейного затухания ограничивает амплитуды СВ, сводя их примерно к одному и тому же значению. Таким образом на некотором расстоянии от начала структуры (примерно на расстоянии 8-ми периодов) разброс резонансных частот отдельных периодов становится незначительным (менее 0.5 МГц) и такую структуру можно считать периодической с точки зрения ее волноведущих свойств. В то же время резонансные частоты первых периодов будут сильно различаться и смещаться по частоте вниз. Поскольку результирующие резонансные частоты всего МК определяются частотным положением всех резонансов отдельных периодов, то частотный минимум полосы заграждения будет так же смещаться вниз по частоте. Одновременно с этим вследствие возникновения нелинейного затухания СВ будут увеличиваться потери, вносимые МК в СВЧ тракт. В результате проведенных теоретических исследований был сделан вывод, что наличие явлений линейной и нелинейной диссипации спиновых волн приводит к тому, что с увеличением амплитуды спиновой волны в одномерном магنونном кристалле перестает выполняться условие брэгговского резонанса, что вызывает частотное расширение и уменьшение относительной глубины полос заграждения.

В последнем пункте третьего параграфа проведено количественное сопоставление экспериментальных и теоретических частотных коэффициентов передачи одного из образцов магنونных кристаллов. При сопоставлении использовались два подгоночных параметра. В качестве первого подгоночного параметра использовался коэффициент $B = \sqrt{P_{\text{ex}}} / |U|$, определявший пропорциональность

между подаваемой на макет мощностью и амплитудой спиновой волны. Данный коэффициент определялся из анализа нелинейного сдвига частоты АЧХ макета, который был измерен при малых уровнях мощности в отсутствие нелинейного затухания. Определенное таким образом значение составляло $63.24 \sqrt{Bm}$. Вторым подгоночным параметром являлось значение декремента нелинейного затухания спиновых волн. Значение нелинейного декремента затухания было найдено из анализа падения коэффициента передачи МК в полосе пропускания при увеличении мощности входного сигнала. Это значение оказалось равным $4.48 \cdot 10^9$ Гц.

Рассчитанные таким способом частотные коэффициенты передачи МК показали хорошее совпадение с экспериментальными зависимостями, а именно, падение коэффициента передачи на полосах заграждения, частотное положение всех запрещенных зон магнетонного кристалла и их относительные глубины при различных значениях входной мощности.

В четвертом параграфе на основе проведенных исследований предложено многофункциональное устройство, использующее нелинейные свойства магнетонных кристаллов. Устройство может выполнять несколько функций, а именно, может работать как усилитель отношения сигнал/шум, как ограничитель мощности и как подавитель сильных СВЧ сигналов. Принцип действия устройства основан на нелинейном сдвиге частоты СВ в магнетонном кристалле при увеличении мощности входного сигнала. Для описания принципа действия многофункционального устройства подробно рассмотрены результаты нелинейных исследований одного из образцов МК. При увеличении мощности входного сигнала происходит сдвиг частоты полосы заграждения. При этом при увеличении входной мощности с 0.5 до 100 мВт величина сдвига превышает полуширину полосы заграждения магнетонного кристалла. При таком поведении АЧХ, путем выбора несущей частоты сигнала, можно реализовывать различные функции обработки СВЧ сигнала. Например, если несущая частота входного сигнала при низком уровне сигнала находится на левом краю полосы заграждения, то при увеличении мощности она окажется внутри полосы заграждения. Передаточная характеристика, измеренная на такой частоте, будет соответствовать передаточной характеристике подавителя сильных сигналов. Если при низком уровне мощности несущая частота находится в центре полосы заграждения, то при высоком – вне ее. Передаточная характеристика для данного случая соответствует передаточной характеристике шумоподавителей.

Глава 5 «Наблюдение солитонных явлений спиновых волн в магнетонных кристаллах» посвящена изучению возможностей возникновения собственной модуляционной неустойчивости и возбуждения “целевых” солитонов в магнетонных кристаллах. Глава содержит два параграфа. В первом параграфе приведены результаты экспериментов, в результате которых впервые наблюдалось формирование светлых солитонов огибающей при импульсном возбуждении и распространение пакетов сверхвысокочастотных спиновых волн в магнетонном кристалле. Экспериментальный макет был аналогичен, описанному в главе 2. Исходные спин-волновые пакеты возбуждались короткими СВЧ импульсами, подаваемыми

на входную антенну спиновых волн. Подаваемый на измерительный макет сигнал был промодулирован прямоугольными импульсами длительностью 110 нс с частотой повторения 2200 Гц. Такой период повторения сигнала позволял избежать разогрева исследуемого образца.

При измерениях систематически изменялись несущая частота, длительность и амплитуда входных импульсов. Образование солитонов было зафиксировано в трех первых полосах заграждения. Необходимо отметить, что оно всегда имело место на частотах, соответствующих правым (то есть высокочастотным) склонам полос заграждения, где групповая скорость СВ быстро возрастает с ростом частоты. Иными словами, образование светлых солитонов наблюдалось в зонах сильной положительной дисперсии. Этот факт находится в соответствии с теоретическими представлениями, согласно которым светлые солитоны могут формироваться на тех несущих волнах, которые имеют нелинейные и дисперсионные коэффициенты разных знаков (критерий Лайтхилла). При выбранной постоянной несущей частоте формирование светлых солитонов отчетливо проявлялось в нелинейном сжатии наблюдаемого импульса. В спектральных интервалах, расположенных между полосами заграждения, в диапазоне мощностей до 500 мВт, которые обеспечивала экспериментальная установка, образования солитонов не наблюдалось.

Второй параграф главы посвящен экспериментальному исследованию собственной модуляционной неустойчивости монохроматических сверхвысокочастотных спиновых волн, возбуждавшихся в магнетонном кристалле. Магнетонный кристалл имел толщину 10.3 мкм, ширину 2 мм и длину 35 мм. Канавки были протравлены по всей ширине МК перпендикулярно его оси. Вытравленные канавки имели глубину около 3.3 мкм, ширину 50 мкм и период 400 мкм. Намагниченность насыщения пленки ЖИГ составляла 1765 Гс. Полуширина кривой ферромагнитного резонанса пленки ЖИГ ΔH , измеренная на частоте 4500 МГц, была равна 0.55 Э. Расстояние между возбуждающей и приемной микрополосковыми антеннами составляло 5.2 мм. Таким образом между входной и выходной антеннами СВ располагалось 13 периодов структуры. Экспериментальный макет был помещен между полюсами постоянного магнита в однородном магнитном поле напряженностью 930 Э. Поле было направлено в плоскости магнетонного кристалла вдоль антенн спиновых волн. Такая взаимная конфигурация поля и направления распространения волн соответствовала случаю возбуждения в МК обратных объемных СВ. Эксперимент заключался в подаче на входную антенну монохроматического СВЧ сигнала при систематическом изменении его мощности и несущей частоты и в измерении выходного спин-волнового сигнала.

Было обнаружено, что неустойчивость спиновых волн в магнетонном кристалле возникала пороговым образом при входной мощности 17.5 дБм на частоте, соответствующей правому склону полосы заграждения. При таких параметрах в спектре выходного сигнала появлялись дополнительные гармоники малой амплитуды. По мере увеличения мощности входного СВЧ сигнала амплитуда дополнительных гармоник росла, а спектр выходного сигнала обогащался.

При увеличении мощности входного сигнала частотная полоса, внутри которой наблюдалась собственная модуляционная неустойчивость, уширялась. Так, например, для входной мощности 17.5 дБм ширина частотной полосы, в которой наблюдалась модуляционная неустойчивость, составляла 2 МГц; для мощности 17.7 дБм она была равна 6 МГц, а для мощности 18 дБм достигала значения 15 МГц. При этом на частотной характеристике наблюдались три участка, которые характеризовались своими особенностями нелинейного режима.

Так, при превышении входной мощностью уровня в 18.1 дБм на левом и правом склонах полосы заграждения наблюдалась модуляционная неустойчивость, имевшая стационарный характер с четко выраженными частотными гармониками и устойчивой огибающей выходного сигнала. Вблизи центра полосы заграждения, наблюдаемый выходной сигнал становился шумоподобным. При значениях входной мощности менее 18.1 дБм и более 20.7 дБм шумоподобный сигнал не регистрировался. При превышении входной мощностью уровня в 22 дБм генерация дополнительных гармоник исчезала. Иными словами, наблюдалась бифуркация, природа которой требует дополнительного изучения.

При некоторых значениях мощности и частоты отстройки входного сигнала временные формы выходных импульсов соответствовали профилям солитонов огибающей. Обращает на себя внимание то, что в спектре развитой модуляционной неустойчивости дополнительные спектральные гармоники, образовавшиеся вследствие неустойчивости спиновых волн, имели значение по величине примерно на 30 дБ меньше, чем уровень входного сигнала. Такой характер спектральной характеристики сигнала приводил к тому, что периодическая последовательность светлых солитонов огибающей имела пьедестал. Так, например, при входной мощности 19.3 дБм на левом краю полосы заграждения на осциллограмме наблюдалась последовательность светлых солитонов на пьедестале длительностью 180 нс и периодом следования 1.68 мкс. На правом краю полосы заграждения при входной мощности 21 дБм наблюдалось формирование темных солитонов огибающей длительностью 560 нс и периодом следования 1.75 мкс.

Следует отметить, что собственная модуляционная неустойчивость наблюдалась вблизи трех первых полос заграждения магнетонного кристалла. Вне полос заграждения, то есть там, где значение дисперсионного коэффициента было мало, собственная модуляционная неустойчивость не наблюдалась во всем диапазоне мощностей экспериментальной установки.

В заключение главы приведены результаты численных оценок, сделанные на основе нелинейного уравнения Шредингера. Они подтверждают результаты измерений и свидетельствуют в пользу солитонной природы формирования узких выходных спин-волновых импульсов при возбуждении на входе магнетонного кристалла интенсивных бегущих спиновых волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гуревич А. Г., Магнитные колебания и волны. – учеб. для вузов [текст] / А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков. – М.: Физматлит, 1994. – 464 с.
- [2] 2. Stancil D. D. Spin Waves: Theory and applications [текст] / NY.: Springer, 2009. – 355 с.

- [3] Adam J. D. Analog signal processing with microwave magnetics [текст] // Proc.IEEE, -1988. V. 76, № N.2, -P. 159-170
- [4] Nikitov S. A., Tailhades Ph, Tsai C.S., Spin waves in periodic structures – magnonic crystals [Текст] / S.A. Nikitov, Ph. Tailhades, C. S.Tsai // J. Of Magnetism and magnetic materials. – 2001. – V. 236, – P. 320-330.
- [5] Ustinov A. B., Formation of gap solitons in ferromagnetic films with a periodic metal grating [текст] / A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos, V. E. Demidov, S. O. Demokritov // Phys. Rev. B, -2010. V. 81, -P. 180406
- [6] Chen Niu-Nui, Spin-wave envelope solitons in periodically modulated magnetic films [текст] / Niu-Nui Chen, A. N. Slavin, M. G. Cottam // IEEE Trans. Magn., -1992. V. 28, -P. 3306
- [7] Устинов А. Б., Наблюдение солитонов огибающей спиновых волн в периодических магнитных пленочных структурах [текст] / А. Б. Устинов, Н. Ю. Григорьева, Б. А. Калиникос // Письма в ЖЭТФ, -2008. Т. 88, Вып. 1, -С. 34-39

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

ПУБЛИКАЦИИ В ИЗДАНИЯХ, РЕКОМЕНДОВАННЫХ ВАК РОССИИ:

- [1] Дроздовский А. В., Образование солитонов огибающей при распространении спин-волновых пакетов в тонкопленочных магнетонных кристаллах [текст] / А. В. Дроздовский, М. А. Черкасский, А. Б. Устинов и др. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, -2010. Т. 91, №1, -С. 60-65
- [2] Ustinov A. B., Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing (Многофункциональные нелинейные устройства для обработки СВЧ сигнала на основе магнетонных кристаллов) [текст] / А. В. Ustinov, А. V. Drozdovskii, В. А. Kalinikos // Applied physics letters, -2010. V.96, -P. 142513
- [3] Дроздовский А. В., Нелинейный отклик пленочного ферромагнитного резонатора в условиях нелинейного затухания колебаний намагниченности [текст] / А. В. Дроздовский, А. Б. Устинов // Письма в Письма в Журнал технической физики, -2010. Т. 36, Вып. 18, -С. 10-18

ДРУГИЕ ПУБЛИКАЦИИ И МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНЫХ И ВСЕРОССИЙСКИХ КОНФЕРЕНЦИЙ:

- [4] Drozdovskii A. V., Nonlinear spin waves in ferromagnetic films: applications for microwave signal processing (Нелинейные спиновые волны в ферромагнитных пленках: возможности применения для обработки СВЧ сигнала) [текст] / А. V. Drozdovskii, А. V. Kondrashov, А. В. Ustinov, В. Kalinikos // Proceedings of the IEEE Russia, North west section, -2011. V.1, -P. 79-83
- [5] Ustinov A. B., Dual-Tunable Planar Ferrite-Ferroelectric Hybrid Wave Phase Shifters (Планарные феррит-сегнетоэлектрические фазовращатели с двойной электронной перестройкой) [текст] / А. В. Ustinov, G. Srinivasan, А. V. Drozdovsky // Proc. of International Conference “Functional Materials” (ICFM), -2008. P. 87
- [6] Дроздовский А. В., Исследование нелинейного отклика пленочного ферромагнитного резонатора [текст] / Материалы международной научно-технической конференции "INTERMATIC-2007", -2007. -С. 93
- [7] Шишмакова Г. А., Нелинейный сдвиг амплитудно-частотной характеристики спин-волновой линии задержки на основе одномерного магнетонного кристалла [текст] / Г. А. Шишмакова, А. В. Дроздовский, А. Б. Устинов // Материалы Всероссийской конференции и научной школы для молодых ученых “Новые материалы и нанотехнологии в технике СВЧ”, - 2010 г. -С. 108-110
- [8] Зарецкий В. Б., Характеристики передачи магнетонных кристаллов с учетом магнитной диссипации [текст] / В. Б. Зарецкий, А. В. Дроздовский // Материалы Всероссийской конференции и научной школы для молодых ученых “Новые материалы и нанотехнологии в технике СВЧ”, - 2010 г. -С. 111-113

- [9] Дроздовский А. В., Исследование нелинейного сдвига частоты касательно намагниченных сверхвысокочастотных резонаторов на основе пленок железо-иттриевого граната [текст] / А. В. Дроздовский, А. Б. Устинов // Материалы Всероссийской конференции и научной школы для молодых ученых "Новые материалы и нанотехнологии в технике СВЧ", - 2010. - С. 120-122
- [10] Drozdovskii A., Pulsed excitation of surface spin-wave envelope solitons in magnonic crystal (Импульсное возбуждение солитонов огибающей спиновых волн в магнетонном кристалле) [текст] / A. Drozdovskii, A. Ustinov, B. Kalinikos, Proc. of Spin waves 2011, -2011. -P. 87
- [11] Drozdovskii A., Generation of Dark and Bright Spin Wave Envelope Soliton Trains Through Self-Modulation Instability in Magnonic Crystals (Генерация светлых и темных последовательностей солитонов огибающей спиновых волн через собственную модуляционную неустойчивость в магнетонном кристалле) [текст] / A. Drozdovskii, A. Ustinov, B. Kalinikos // Proc. of 2-nd International Workshop on Magnonics: From Fundamentals to Applications, -2011. -P. 40
- [12] Drozdovskii A.V., Nonlinear Microwave Devices Based on Magnonic Crystals (Нелинейные СВЧ устройства на основе магнетонных кристаллов) [текст] / A. V. Drozdovskii, A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos // Proc. of International conference "METAMATERIALS'2011", -2011. -P. 748-750
- [13] Drozdovskii A.V., Spin Wave Self-Modulation Instability in Magnonic Crystals (Собственная модуляционная неустойчивость спиновых волн в магнетонных кристаллах) [текст] / A. V. Drozdovskii, A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos // Proc. of International Conference "Functional Materials", - 2011, -P. 288
- [14] Дроздовский А. В., Нелинейное затухание волн намагниченности в пленках железо-иттриевого граната [текст] / материалы "Итогового семинара по физике и астрономии по результатам конкурса грантов 2007 года молодых ученых Санкт-Петербурга", -2007. -С. 4-5
- [15] Дроздовский А. В., Распространение интенсивных спиновых волн в одномерном магнетонном кристалле [текст] / А.В. Дроздовский, А.Б. Устинов // Материалы "конференции по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада", -2011, -С. 9-10
- [16] Дроздовский А. В., Экспериментальное и теоретическое исследование процессов формирования светлых солитонов огибающей спиновых волн в тонкопленочных магнетонных кристаллах [текст] / А.В. Дроздовский, М.А. Черкасский // Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых с 63-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава университета СПбГЭТУ, -2010. -С. 27- 31
- [17] Шишмакова Г. А., Исследование линии задержки на основе магнетонных кристаллов при повышенных уровнях СВЧ мощности [текст] / Г.А. Шишмакова, А.В. Дроздовский, А.Б. Устинов // Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых с 64-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава университета СПбГЭТУ, -2011. -С. 30- 34
- [18] Дроздовский А. В., Влияние мощности возбуждающего СВЧ сигнала на форму резонансной кривой пленочного ферромагнитного резонатора [текст] / А.В. Дроздовский А.Б. Устинов // Материалы научно-технического семинара "Инновационные разработки в СВЧ технике и электронике", -2008. -С. 14-15
- [19] Дроздовский А. В., Возбуждение солитонов огибающей поверхностных спиновых волн в магнетонных кристаллах короткими СВЧ импульсами [текст] / А.В. Дроздовский, Н.Г. Ковшиков // Материалы научно-технического семинара "Инновационные разработки в СВЧ технике и электронике", - 2010. -С. 64-65
- [20] Черкасский М. А., Теоретическое исследование формирования светлых солитонов огибающей спиновых волн в магнетонных кристаллах [текст] / М.А. Черкасский, А.В. Дроздовский // Материалы научно-технического семинара "Инновационные разработки в СВЧ технике и электронике", -2011. -С. 35-36
- [21] Дроздовский А.В., Тонкопленочные одномерные магнетонные кристаллы для обработки СВЧ сигналов [текст] / Материалы научно-технического семинара "Инновационные разработки в СВЧ технике и электронике", 2011. -С. 37-38