

На правах рукописи

ШЕШУКОВА Светлана Евгеньевна

**НЕЛИНЕЙНЫЕ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ
В СЛОИСТЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУРАХ
И МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛАХ**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2012

Работа выполнена в Саратовском государственном университете
им. Н.Г. Чернышевского

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Шараевский Юрий Павлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Филимонов Юрий Александрович, директор Саратовского филиала
Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

кандидат физико-математических наук, доцент
Устинов Алексей Борисович, доцент кафедры физической электро-
ники и технологии Санкт-Петербургского государственного электро-
технического университета

Ведущая организация:

ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону

Защита состоится «28» сентября 2012 г. в 18:00 на заседании диссертацион-
ного совета Д 212.243.01 при Саратовском государственном университете
им. Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке
им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета (Саратов,
ул. Университетская, 42)

Автореферат разослан « » августа 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аникин Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Одним из перспективных направлений развития современной радиофизики является исследование радиоволн в композитных магнитных структурах для создания нового поколения функциональных устройств в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) [1,2]. В таких структурах возможно распространение медленных магнитостатических волн (МСВ), которые обладают существенными преимуществами перед другими типами волн в кристаллических структурах [3]. МСВ легко возбуждаются практически во всём диапазоне сверхвысоких частот (1-60 ГГц), обладают большим замедлением, существует возможность управления дисперсионными характеристиками этих волн с помощью внешних нагрузок и магнитного поля, нелинейные явления наблюдаются при сравнительно небольших уровнях мощности. С помощью линий передачи на МСВ можно реализовать практически все основные операции, используемые для функциональной обработки сигналов: управляемую задержку, фильтрацию, преобразование спектра, ограничение мощности, подавление побочных сигналов и шумов и т.д. [4].

В последние годы активно исследуются СВЧ свойства многослойных, а также периодических структур, изготовленных на основе ферромагнитных пленок [1,2,5-8]. Интерес к этим структурам обусловлен, прежде всего, существенным прогрессом в технологии выращивания пленочных магнитных материалов с заданными параметрами, развитием новых подходов в создании композитных материалов, а также кристаллов, подобных фотонным (ФК) [9], на основе магнитных материалов – магнетонных кристаллов (МК) [5-8].

По аналогии с ФК, в котором периодически чередуются области с различными значениями диэлектрической проницаемости, магнетонный кристалл состоит из материалов с различной магнитной проницаемостью, либо с периодически изменяющимися геометрическими параметрами. МК имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с ФК: управление свойствами магнетонных кристаллов внешним магнитным полем, в частности, магнетонной запрещенной зоной; возможно создание кристаллов в диапазоне СВЧ размерами порядка нескольких миллиметров; использование планарной технологии и др.

На основе периодических ферромагнитных структур можно создавать высокочастотные резонаторы, полосно-пропускающие и режекторные пере-страиваемые фильтры, нелинейные невзаимные устройства, антенны на вытекающих волнах и другие устройства функциональной электроники [4].

В последние два десятилетия началось интенсивное изучение нелинейных волновых процессов в тонких ферромагнитных пленках, в том числе и солитонов огибающей, связанных с распространением магнитостатических спиновых волн [10,11].

К настоящему времени выполнен достаточно большой объем как теоретических, так и экспериментальных исследований, в основном, относящихся к линейным свойствам МК [5-8,12]. Что же касается исследования нелиней-

ных процессов в таких структурах, то можно указать лишь отдельные работы в этом направлении. Особый интерес представляют исследования нового типа солитонов, получивших название щелевых солитонов, которые могут распространяться в запрещенной зоне с групповой скоростью, намного меньше, чем скорость распространения солитона в однородной нелинейной среде [9]. Исследование таких солитонов представляет интерес как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения их практического применения в телекоммуникационных системах, системах обработки, хранения и передачи информации.

Также интенсивно проводятся исследования, направленные на изучение особенностей формирования в нелинейных системах с усилением и потерями локализованных в пространстве или во времени структур, получивших в литературе название диссипативных солитонов или автосолитонов [13]. В СВЧ диапазоне автосолитоны могут формироваться в активных кольцевых резонаторах на основе нелинейных линий передачи с ферромагнитными пленками [14]. В автогенераторных схемах для генерации монохроматических сигналов в качестве частото задающих элементов также используются МК [15, 16]. Частота генерации сигнала в таких схемах определяется центральной частотой запрещенной зоны МК. Представляет интерес также использование МК в качестве нелинейных элементов в активных кольцевых резонаторах.

В настоящее время в качестве особого класса волноведущих систем рассматриваются также слоистые ферромагнитные структуры, в которых магнитные плёнки разделены диэлектрическими промежутками [17-21]. В таких структурах по сравнению с одиночными ферромагнитными пленками существенно меняются динамические свойства нелинейной системы и реализуются новые типы спин-волновых возбуждений. Теоретическому и экспериментальному исследованию линейных свойств различных типов МСВ в связанных системах, состоящих, в частности, из двух ферромагнитных плёнок, посвящено большое число работ. Одним из основных результатов всех этих работ является продемонстрированная возможность управления дисперсионными характеристиками МСВ за счёт изменения связи между плёнками. Что же касается исследования нелинейных эффектов в таких структурах, то можно констатировать, что к настоящему времени имеются лишь отдельные работы, в которых рассматриваются эти эффекты [19,21,22].

Таким образом, исследование нелинейных процессов в слоистых ферромагнитных структурах и магнитных кристаллах является актуальной и важной задачей современной радиофизики и нелинейной динамики.

Цель диссертационной работы состоит в исследовании нелинейных и нестационарных процессов в новом классе планарных волноведущих структур на основе ферромагнитных пленок с периодическими неоднородностями – магнитных кристаллов и ферромагнитных слоистых структур. В прикладном плане проведение указанных исследований позволит разработать физико-технологические принципы создания устройств с широкими функцио-

нальными возможностями для генерации сигналов и обработки информации в диапазоне сверхвысоких частот.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **основные задачи**:

1. Построение модели в виде системы нелинейных уравнений Шредингера (СНУШ) с когерентной и некогерентной связью для исследования нелинейных и нестационарных процессов при распространении магнитостатических волн в слоистой структуре, состоящей из двух ферромагнитных пленок, разделенных диэлектрическим слоем. Проведение на основе этой модели численного исследования эффектов самовоздействия, связанных с распространением импульсов МСВ в таких структурах (нелинейные биения, неустойчивость быстрого солитона, эффекты захвата и сопровождения).
2. Исследование влияния связи на модуляционную неустойчивость магнитостатических волн, распространяющихся в двухслойной ферромагнитной структуре, в одноволновом приближении, когда в структуре возбуждается только одна из мод (быстрая или медленная).
3. Исследование на основе СНУШ с некогерентной связью, описывающих поведение амплитуд огибающих прямой и встречной магнитостатических волн, эффектов самовоздействия и механизмов формирования брэгговских солитонов в запрещенной зоне одномерной периодической структуры на основе ферромагнитной пленки.
4. Экспериментальное исследование особенностей прохождения прямоугольных СВЧ-импульсов в окрестности запрещенной зоны одномерного магнетонного кристалла в условиях трехмагнетонных процессов распада. Проведение сравнения экспериментальных результатов с теоретическими, полученными при численном исследовании модели связанных НУШ.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Подход, основанный на модели системы нелинейных уравнений Шредингера с когерентной и некогерентной связью, позволяет с единых позиций исследовать эффекты самовоздействия магнитостатических волн в двухслойных ферромагнитных структурах и в одномерных магнетонных кристаллах.
2. Для структуры, состоящей из двух ферромагнитных пленок, при учете когерентной связи в модели в виде СНУШ, описывающей поведение быстрой и медленной волн в системе, существуют интервалы значений дисперсионных коэффициентов и групповых скоростей, при которых наблюдаются эффекты неустойчивости быстрого солитона и нелинейные биения между быстрой и медленной волнами. В случае некогерентной связи наблюдаются эффекты захвата и сопровождения импульсов на быстрой или медленной волне, если уровень входной мощности одной из волн превышает пороговый уровень. В режиме сопровождения более интенсивный импульс создает волновод, в котором распространяется импульс с меньшей амплитудой.
3. Основным механизмом формирования брэгговских солитонов в запрещенной зоне магнетонного кристалла, описываемых в рамках модели СНУШ, является взаимный захват импульсов на прямой и встречной волнах, движу-

щихся с общей скоростью, и наличие перекачки мощности между волнами, которая определяется мощностью входного сигнала и величиной коэффициента связи.

4. Для одномерного магнетонного кристалла в условиях трехмагнетонного процесса распада поверхностной магнитоэлектронической волны при прохождении СВЧ-импульсов с частотой несущей, совпадающей с центром запрещенной зоны, формируется последовательность импульсов, свойства которых подобны брегговским солитонам. Указанный эффект обнаружен в рамках экспериментального исследования.

Научная новизна. Все результаты, включенные в диссертационную работу, являются новыми и получены впервые, в частности:

1. Построена модель в виде системы нелинейных уравнений Шредингера с когерентной и некогерентной связью для исследования эффектов самовоздействия при распространении магнитоэлектронических волн в слоистой структуре, состоящей из двух ферромагнитных пленок, и в одномерном магнетонном кристалле.

2. Показано, что для структуры из двух ферромагнитных пленок при одновременном возбуждении двух нормальных мод (быстрой и медленной) наличие когерентной связи приводит к биениям между быстрой и медленной волнами, причем длина биений уменьшается как при увеличении разницы групповых скоростей и коэффициентов дисперсии быстрой и медленной волн, так и при увеличении параметра кросс-модуляции (при изменении величины связи между пленками). Впервые показано также, что в такой структуре в узком интервале значений дисперсий и групповых скоростей быстрой и медленной волн может наблюдаться эффект неустойчивости быстрого солитона. Этот эффект заключается в том, что при значениях входной мощности выше порогового значения большая часть энергии сосредотачивается в импульсе на медленной волне.

3. Впервые показано, что некогерентная связь между волнами в модели, состоящей из двух ферромагнитных пленок, приводит к эффектам захвата и сопровождения. Эффект захвата заключается в том, что при малой мощности входного сигнала импульсы соответствующих компонент движутся с различными скоростями, а при большой мощности входного сигнала импульсы взаимно захватываются и движутся с одной скоростью (при равных интенсивностях взаимодействующих импульсов). Отмечены особенности модели СНУШ, которая используется для описания указанных эффектов в рассматриваемой ферромагнитной структуре, от модели СНУШ, используемой в оптических задачах для рассмотрения аналогичных нелинейных эффектов.

4. Впервые для описания эффектов самовоздействия в одномерной периодической ферромагнитной структуре (1D магнетонный кристалл) использована модель в виде системы связанных нелинейных уравнений Шредингера для амплитуд огибающей прямой и встречной волн. Рассчитан коэффициент связи между прямой и встречной волнами с учетом того, что толщина пленки

в направлении распространения волны в периодической структуре описывается ступенчатой функцией.

5. На основе численного решения полученной системы показана возможность формирования в запрещенной зоне бесконечного МК щелевых солитонов с различными свойствами, в частности, солитонов с нулевой скоростью и солитонов, локализованных на ограниченной длине структуры. Показано, что основным механизмом формирования таких солитонов является взаимный захват импульсов на прямой и встречной волнах, которые движутся с общей скоростью, которая определяется величиной коэффициента связи между волнами.

6. Впервые на основе экспериментального исследования показана возможность генерации солитоноподобных импульсов в запрещенной зоне одномерного магнетонного кристалла при распространении поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) на частотах ниже 4 ГГц, при которых возможны трехмагнетонные процессы распада. Проведено сравнение характеристик импульсов, рассчитанных на основе экспериментальных данных, с результатами расчета брэгговских солитонов по модели связанных НУШ.

7. Впервые экспериментально показано, что использование МК в качестве нелинейного элемента с насыщающимся поглощением в активном кольцевом резонаторе приводит к генерации последовательности хаотических автосолитонов. Квазипериодическая последовательность автосолитонов наблюдалась в условиях трехмагнетонных процессов распада ПМСВ за счет пассивной синхронизации частот автомодуляции спиновых волн в полосе частот первой запрещенной зоны.

Научная и практическая значимость. Результаты, полученные в работе, представляют значительный научный интерес, т.к. расширяют фундаментальные представления о нелинейных и нестационарных процессах в новом классе волноведущих систем на основе слоистых ферромагнитных структур и магнетонных кристаллов. В частности, для слоистой ферромагнитной структуры показана возможность существования таких эффектов самовоздействия как неустойчивость быстрого солитона и эффекты захвата и сопровождения, которые ранее были описаны только при рассмотрении оптических задач. Для одномерного магнетонного кристалла определены области параметров, соответствующие образованию в запрещенной зоне стационарных состояний в виде солитонов огибающей, локализованных на ограниченной длине структуры (брэгговских солитонов). Для такой структуры экспериментально в условиях трехмагнетонного распада магнитостатической волны в запрещенной зоне показана возможность генерации последовательности импульсов, свойства которых подобны брэгговским солитонам. Полученные результаты могут быть использованы для формирования в планарных слоистых ферромагнитных структурах и в магнетонных кристаллах устойчивых локализованных состояний в виде солитонов огибающей, брэгговских солитонов, хаотических автосолитонов и др. В прикладном плане полученные результаты открывают возможности для создания новых устройств спинволновой электроники в

диапазоне сверхвысоких частот, обладающих уникальными нелинейными характеристиками, для обработки и генерации информационных сигналов.

Личный вклад соискателя. Все результаты, приведенные в диссертационной работе, получены лично автором. Автор также совместно с научным руководителем принимал участие в выборе направлений исследования и постановке основных задач, анализе и интерпретации полученных результатов. Разработка оригинальных программ для численного решения системы нелинейных уравнений Шредингера проводилась совместно с Морозовой М.А., экспериментальные исследования выполнялись совместно с Бегининым Е.Н. и Гришиным С.В.

Достоверность диссертации обеспечивается использованием физически обоснованных теоретических моделей, широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя аналитических и численных методов, воспроизводимостью результатов моделирования, а также сравнением теоретических результатов с полученными в работе экспериментальными данными. Все экспериментальные исследования проводились с применением современной радиоизмерительной аппаратуры и приборов.

Апробация и публикации. Результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались на следующих школах, семинарах и конференциях: XVIII и XX международные конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010) (Украина, Севастополь, 2008, 2010 гг.); школы-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (Саратов, 2008–2011 гг.); XIV и XV международные зимние школы-семинары по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 2009, 2012 гг.); IV–VI конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2009–2011 гг.); XV всероссийская школа «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2010 г.); IX международная школа «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, 2010 г.); XII всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» (Москва, 2009 г.); XII всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах – 2010» (Москва, 2010 г.); INTERMAG 2011, Asia International Magnetism Conference (Taiwan, Taipei, 2011); International Symposium «Spin Waves 2011» (Санкт-Петербург, 2011 г.); The European Conference Physics of Magnetism (PM'11) (Poznan, Poland, 2011); Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ магистров, аспирантов и молодых ученых в области стратегического партнерства вузов и предприятий радиоэлектронного комплекса (Санкт-Петербург, 2011 г.); 3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics META'12 (France, Paris, 2012); международная конференция «Дни дифракции» (Санкт-Петербург, 2012 г.).

Результаты диссертации были использованы при выполнении НИР, поддержанных АВЦП Министерства образования и науки Российской Федерации «Развитие научного потенциала высшей школы» (проекты №№ 2.1.1/2695, 2.1.1/235), проектами РФФИ (гранты №№ 07-02-00639-а, 11-02-

00057-а), грантом правительства РФ (ГК № 11.G.34.31.0030) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (ГК №№ 14.740.11.0612, 14.740.11.1078).

По результатам диссертации опубликовано 38 работ, включая 7 статей в российских и международных журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций, 7 статей в сборниках трудов российских и международных конференций и 24 тезиса докладов. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 129 страниц текста, включая иллюстрации. Список литературы на 9 страницах включает 121 наименование.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны её цели, научная новизна, практическая значимость и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассматриваются нелинейные эффекты самовоздействия в слоистой структуре, состоящей из двух ферромагнитных пленок толщиной D , разделенных диэлектрическим промежутком d (Рис.1). Структура бесконечна в плоскости xu .

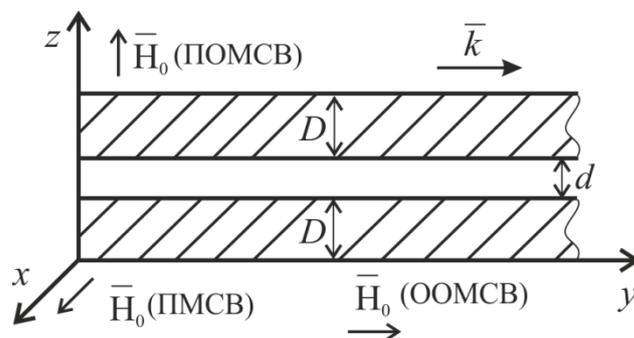


Рис. 1. Схема исследуемой ферромагнитной структуры в магнитном поле H_0 .

В п. 1.1 проводится краткий анализ состояния исследований нелинейных явлений на магнитостатических волнах в слоистых ферромагнитных структурах.

В п. 1.2 обосновывается вывод системы нелинейных уравнений Шредингера, описывающей распространение огибающих быстрой φ_σ и медленной φ_m волн в двухслойной структуре и имеющий вид:

$$\begin{cases} j \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_\sigma \frac{\partial}{\partial y} \right) \varphi_\sigma + A_\sigma \frac{\partial^2 \varphi_\sigma}{\partial y^2} - B_\sigma (|\varphi_\sigma|^2 + \sigma_\sigma |\varphi_m|^2) \varphi_\sigma - B_\sigma^m \varphi_m^2 \varphi_\sigma^* = 0 \\ j \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_m \frac{\partial}{\partial y} \right) \varphi_m + A_m \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial y^2} - B_m (\sigma_m |\varphi_\sigma|^2 + |\varphi_m|^2) \varphi_m - B_m^\sigma \varphi_\sigma^2 \varphi_m^* = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где $V_{\sigma,m}(K)$ – групповые скорости быстрой и медленной волны, $A_{\sigma,m}(K)$ – коэффициенты дисперсии, $B_{\sigma,m}(K)$, $B_\sigma^m(K)$, $B_m^\sigma(K)$ – коэффициенты нелинейности, которые характеризуют фазовую автомодуляцию, $\sigma_{\sigma,m}(K)$ – коэффициенты кросс-фазовой модуляции, K – коэффициент связи между волнами в плёнках. Система (1) представляет собой систему когерентных НУШ, в которой

учитываются фазовые соотношения между волнами. Если $B_{\sigma}^m = B_m^{\sigma} = 0$, то система (1) описывает взаимодействие волн с некогерентной связью.

В случае возбуждения одной моды (одноволновое приближение) система (1) вырождается в одиночное НУШ для быстрой или медленной волны, соответственно. В одноволновом приближении (п. 1.3) были численно рассчитаны пороги возникновения автомодуляции, частоты автомодуляции, пороги перехода к хаотической динамике для различных значений коэффициента связи $K = e^{-kd}$ при возбуждении быстрой и медленной волн.

При возбуждении в структуре одновременно двух нормальных мод для численного анализа нелинейных эффектов используется система (1). На основе численного решения СНУШ с некогерентной связью (п.1.4), в которой связь зависит только от локальных интенсивностей и не чувствительна к фазе, показано, что при возбуждении структуры импульсным сигналом при определенных значениях дисперсионных коэффициентов и групповых скоростей наблюдаются эффект захвата (рис.2 б) и сопровождения (рис.2 в).

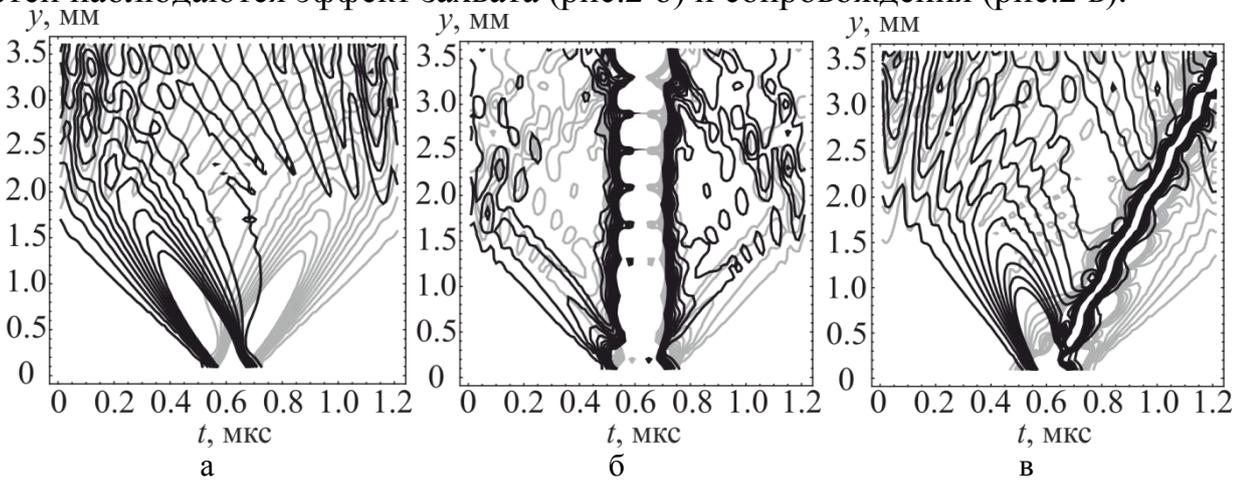


Рис.2. Линии равного уровня $|\varphi_{\sigma}|^2$ (серые кривые) и $|\varphi_m|^2$ (черные кривые) для амплитуд входного сигнала $\varphi_{\sigma} = \varphi_m = 0.03$ (а), $\varphi_{\sigma} = \varphi_m = 0.06$ (б), $\varphi_{\sigma} = 0.06$, $\varphi_m = 0.03$ (в).

Эффект захвата заключается в том, что при малой мощности входного сигнала импульсы соответствующих компонент движутся с различными скоростями (рис.2 а), а при большой мощности импульсы взаимно захватываются и движутся с одной скоростью (при равных интенсивностях взаимодействующих импульсов) (рис.2 б). В режиме сопровождения более интенсивный импульс создает волновод, в котором распространяется импульс с меньшей амплитудой (рис.2 в).

Как показано в п. 1.5, наличие когерентной связи приводит к биениям между быстрой и медленной волнами, причем длина биений уменьшается как при увеличении разницы групповых скоростей и дисперсии быстрой и медленной волн, так и при увеличении параметра кросс-модуляции (при изменении величины связи между пленками). Наблюдается также эффект неустойчивости быстрого солитона, заключающийся в том, что при значениях входной мощности выше порогового значения большая часть энергии сосредотачивается в импульсе на медленной волне (рис. 3). Этот эффект наблюда-

ется в узком интервале значений коэффициентов дисперсии и групповых скоростей быстрой и медленной волн, причем ширина интервала увеличивается с ростом амплитуды входного сигнала.

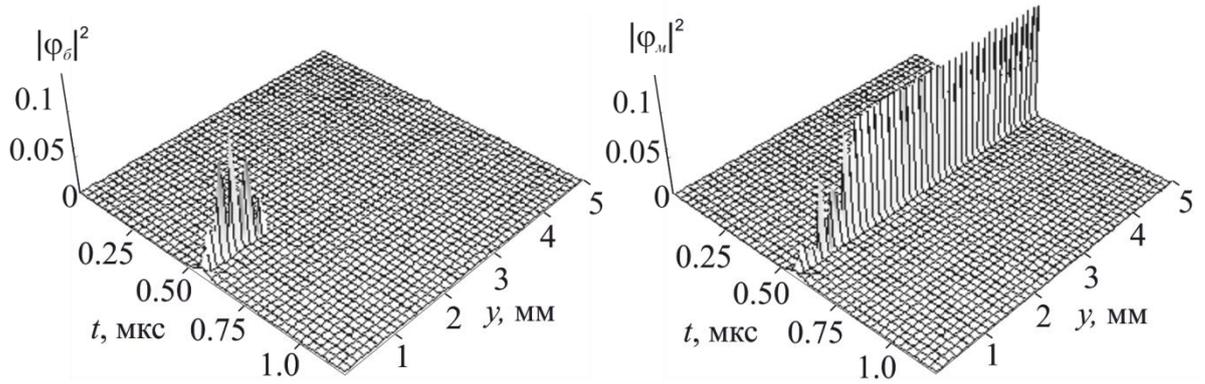


Рис.3. Распространение импульса МСВ на быстрой и медленной волне для амплитуд входного сигнала $\varphi_{0б} = \varphi_{0м} = 0.08$.

Вторая глава посвящена изучению механизмов формирования солитонов в одномерной периодической ферромагнитной структуре – магнотонном кристалле, схема которого представлена на рис. 4.

В п. 2.1 приводится краткое описание методов создания периодических и квазипериодических ферромагнитных структур (скрайбирование, травление и др.).

В п. 2.2 приведены результаты расчета дисперсионных кривых для различных типов магнитостатических волн, распространяющихся в бесконечном одномерном МК. Подробно исследуется зависимость ширины первой запрещенной зоны от геометрических параметров структуры.

В п. 2.3 используя подход, основанный на методе связанных волн, при котором распределение магнитостатического потенциала вблизи запрещенной зоны представляется в виде суммы прямой и встречной волн, получена система нелинейных уравнений Шредингера в виде:

$$\begin{cases} i \left(\frac{\partial \varphi_f}{\partial t} + V_g \frac{\partial \varphi_f}{\partial y} \right) - \beta \frac{\partial^2 \varphi_f}{\partial y^2} + \eta \varphi_f + \chi \varphi_b + \gamma \left(|\varphi_f|^2 + \sigma |\varphi_b|^2 \right) \varphi_f = 0 \\ i \left(\frac{\partial \varphi_b}{\partial t} - V_g \frac{\partial \varphi_b}{\partial y} \right) - \beta \frac{\partial^2 \varphi_b}{\partial y^2} + \eta \varphi_b + \chi \varphi_f + \gamma \left(|\varphi_b|^2 + \sigma |\varphi_f|^2 \right) \varphi_b = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где V_g – групповая скорость, β – коэффициент дисперсии; χ – коэффициент связи; γ – коэффициент нелинейности (характеризует фазовую автомодуляцию), σ – коэффициент кросс-фазовой модуляции, $\eta = \omega_0 - \omega_B$ – отстройка частоты несущей ω_0 от брэгговской частоты ω_B . Уравнения (2) представля-

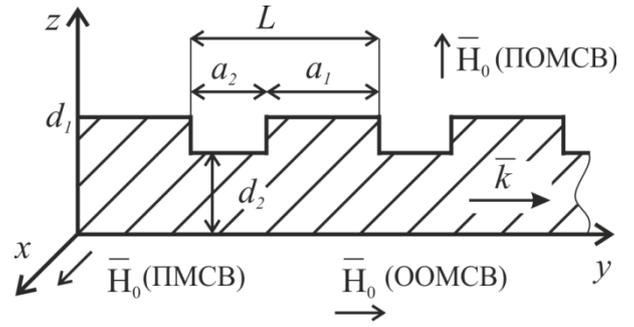


Рис.4. Схема одномерного МК: $\Delta d = d_1 - d_2$ – глубина канавки, $a_2 = L - a_1$ – ее ширина. L – период структуры.

ют собой систему с некогерентной связью. В отличие от системы НУШ (1), используемой в главе 1, в уравнениях (2) групповые скорости прямой и встречной волн имеют разные знаки, коэффициент кросс-фазовой модуляции $\sigma = 2$ и принципиальным является учет линейной связи между волнами (через коэффициент связи χ).

Получено выражение для коэффициента связи между прямой и встречной волнами χ для периодической структуры, в которой толщина пленки в направлении распространения волны описывается ступенчатой функцией. Рассчитаны зависимости коэффициента связи от геометрических параметров структуры при распространении в ней различных типов МСВ и показано, что χ линейно увеличивается при увеличении глубины канавки и имеет максимум при $a_2 = L/2$.

В п. 2.4 на основе построенной модели приведены результаты численного исследования механизмов формирования солитонов, подобных брэгговским, при возбуждении в бесконечной периодической структуре прямых объемных МСВ. Система (2) решалась SSFM методом. Рассматривалось 2 способа возбуждения: когда в качестве начальных условий задавался импульс только на прямой волне и когда амплитуды обоих волн отличны от нуля. В первом случае при определенном значении χ ($\chi = 2.5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$) имеет место полная перекачка мощности между волнами с периодом T (рис. 5). При этом на прямой волне сначала формируется импульс, движущийся в положительном направлении оси y (рис.5 а) и мощность перекачивается в импульс на встречной волне (рис.5 б), движущийся в ту же сторону. Через промежуток времени $T/2$ мощности импульсов на прямой и встречной волнах становятся равными и импульсы останавливаются. Видно, что импульсы с течением времени остаются локализованными на некоторой длине структуры. В этом случае комбинация импульсов на прямой и встречной волнах образует единую структуру, которая движется с общей скоростью (брэгговский солитон) [9]. Для обоих случаев возбуждения были построены области параметров (χ, V_g) , соответствующие образованию солитонов данного типа. На рис. 6 серым цветом отмечена область параметров (χ, V_g) , где возможно формирование брэгговских солитонов в случае возбуждения импульса и на прямой, и на встречной волне. Как показывают результаты расчета, с увеличением значения χ период T уменьшается и область, в которой локализованы импульсы, сжимается. В результате формируется один солитон на прямой волне и один солитон на встречной волне, которые «стоят» на месте (см. вставку к рис. 6).

Основным механизмом формирования солитонов с нулевой скоростью и солитонов, локализованных на ограниченной длине структуры, является взаимный захват импульсов на прямой и встречной волнах, которые движутся с общей скоростью, и наличие перекачки мощности между прямой и встречной волнами, которая определяется мощностью входного сигнала и величиной коэффициента связи между волнами.

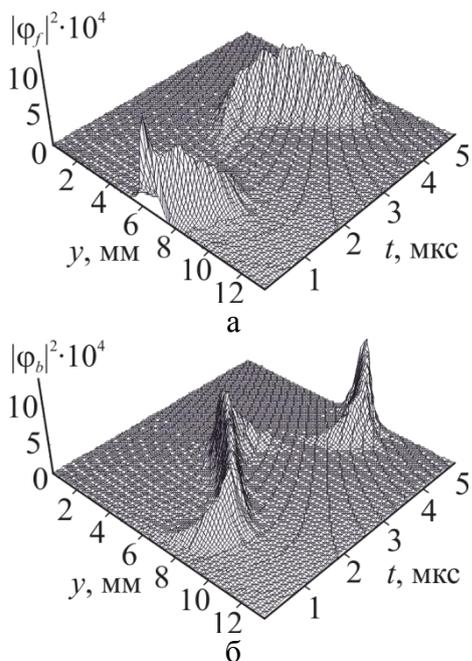


Рис. 5. Пространственно-временная эволюция огибающих φ_f и φ_b при $\varphi_{0f} = 0.04, \varphi_{0b} = 0$

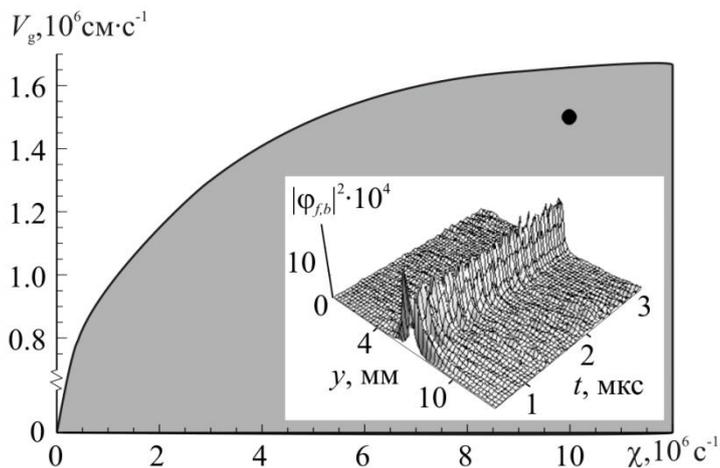


Рис. 6. Область параметров (χ, V_g) , соответствующая образованию солитонов ($\varphi_{0f} = \varphi_{0b} = 0.04$).

На вставке пространственно-временная эволюция φ_f и φ_b (для параметров, соответствующих точке в серой области рисунка).

Третья глава посвящена экспериментальному и численному исследованию прохождения и генерации импульсных СВЧ-сигналов в системах на основе магнетонного кристалла в условиях трехмагнетонных процессов распада. В п. 3.1 приведены результаты измерения линейных характеристик ПМСВ в макете линии задержки (ЛЗ) с одномерным МК: амплитудно- и фазо-частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ), группового времени задержки, дисперсии групповой скорости. Для измерений использовался макет ЛЗ с микрополосковыми антеннами шириной 30 мкм, расположенными на расстоянии 4 мм. МК перекрывал область между антеннами, при этом между антеннами укладывалось 40 периодов структуры.

Макет помещался в однородное магнитное поле величиной $H_0 = 400$ Э, касательное к поверхности пленки железо - иттриевого граната и параллельное антеннам. В линейном режиме в полосе возбуждения ПМСВ наблюдаются две запрещенные зоны. На основе экспериментальных данных по измерению линейных характеристик получена дисперсионная зависимость и определены дисперсионные коэффициенты. Были проведены исследования зависимости коэффициента ослабления от величины входной мощности $P_{вх}$ СВЧ-сигнала. По мере увеличения входной мощности наблюдается дополнительное ослабление магнитостатической волны, связанное с трехмагнетонными процессами распада ПМСВ и возбуждением спиновых волн на половинных частотах. При этом на центральной частоте первой запрещенной зоны ($f = 2.86$ ГГц) ослабление меняется следующим образом: вначале наблюдается увеличение уровня ослабления (-30 дБмВт $< P_{вх} < -11$ дБмВт), а затем его уменьшение (-11 дБмВт $< P_{вх} < -5$ дБмВт) и выход на постоянный уровень.

Для проверки возможности существования солитонов на частотах меньше 3 ГГц была собрана экспериментальная установка, содержащая 4-х канальный осциллограф реального времени Agilent DSO81004B, генератор СВЧ-сигналов Anritsu MG3692C и линию задержки (ЛЗ) с МК, размещенную во внешнем магнитном поле (п. 3.2). На один из каналов осциллографа подавался сигнал с выхода ЛЗ, на другой – часть ответвленного СВЧ-сигнала, снятого со входа ЛЗ. На вход линии задержки подавались прямоугольные СВЧ-импульсы мощностью $P_{вх}$, длительностью $T_{имп}=260$ нс, периодом следования $\tau_s = 4$ мкс, который выбирался из условия $\tau_s \gg T_{имп}$ для исключения влияния разогрева МК под действием мощных СВЧ-импульсов на измеряемые величины. В результате экспериментальных исследований показано, что при прохождении прямоугольных СВЧ-импульсов с частотой несущей, совпадающей с центральной частотой запрещенной зоны, и мощностью больше пороговой, в выходном сигнале наблюдается последовательность импульсов, причем их число, пиковая амплитуда и длительность (ΔT_s) зависят от входной мощности. На рис. 7 представлены временные реализации выходного сигнала при различных уровнях входной мощности. Видно, что при малых значениях $P_{вх}$ импульс практически полностью отражается, как от линейной брэгговской решетки, и в выходном сигнале наблюдается два импульса, образуемые фронтом и срезом входного сигнала. При увеличении входной мощности между этими импульсами формируется еще один дополнительный импульс. Причем этот импульс обладает свойствами солитона, а именно: его пиковая мощность линейно зависит от $1/\Delta T_s^2$, а скорость движения увеличивается с ростом амплитуды. Как видно из рис. 7 такой солитоноподобный импульс с ростом входной мощности появляется ближе к фронту выходного сигнала.

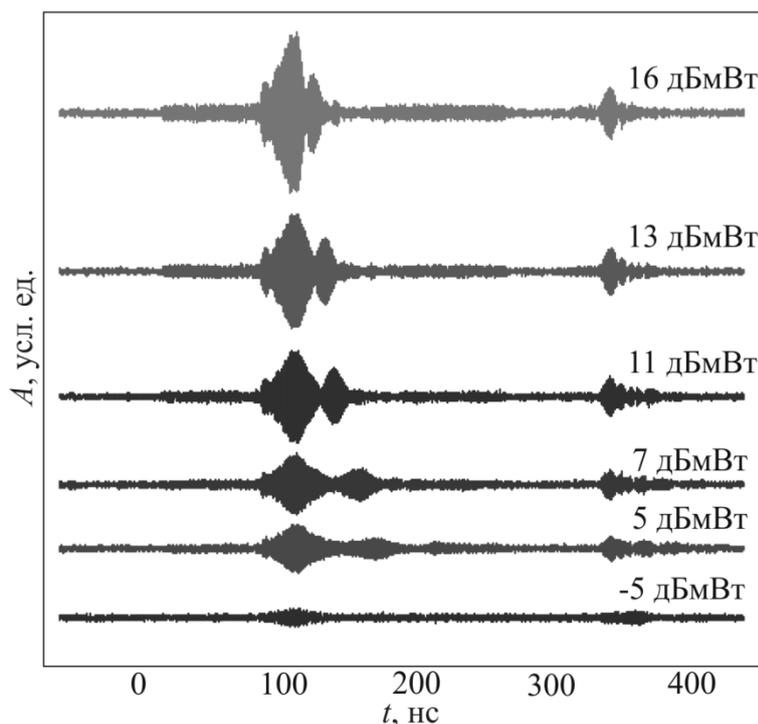


Рис.7. Временная реализация выходного сигнала при различных уровнях мощности.

такой солитоноподобный импульс с ростом входной мощности появляется ближе к фронту выходного сигнала.

На рис. 8 представлены результаты измерения амплитуды и фазы огибающей прошедшего сигнала для $P_{вх}=16$ дБмВт. Видно, что внутри дополнительного импульса фаза имеет характерную «полочку», что также является критерием для определения солитона [23]. Следует отметить, что при больших отстройках от центра зоны частотный спектр импульса не перекрывает-

ся с запрещенной зоной и распространение прямоугольного импульса аналогично поведению его в однородной ферритовой пленке при мощности сигнала больше пороговой для трехмагнанных процессов распада.

В п. 3.3 было проведено численное моделирование прохождения супергауссовых импульсов различной длительности и амплитуды через МК конечных размеров. Были рассчитаны энергетические коэффициенты отражения и прохождения. Показано, что прохождение импульсов носит пороговый характер по амплитуде и зависит от его длительности и отстройки от центра запрещенной зоны. Проведено сравнение характеристик импульсов, рассчитанных на основе экспериментальных данных, с результатами расчета характеристик брэгговских солитонов по модели СНУШ.

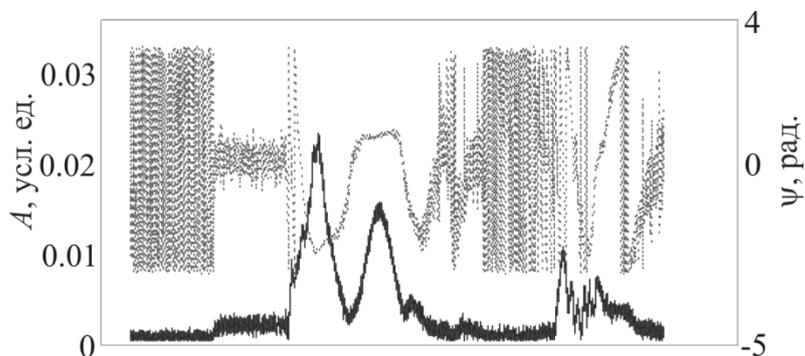


Рис.8. Амплитуда (чёрная кривая) и фаза (серая кривая) прошедшего сигнала при $P_{вх}=16$ дБмВт.

В п. 3.4 приведены результаты экспериментального исследования активного кольцевого резонатора с нелинейным элементом в виде одномерного МК при возбуждении в нем поверхностной МСВ. Показано, что у такого нелинейного элемента в полосе частот запрещенной зоны МК, где разрешены трехмагнанные процессы распада МСВ, при определенных уровнях мощности входного сигнала наблюдается уменьшение нелинейных потерь, приводящее к эффекту насыщающегося поглощения СВЧ сигнала. Экспериментально продемонстрирована возможность формирования в исследуемом активном кольцевом резонаторе генерации периодической последовательности хаотических автосолитонов за счет пассивной синхронизации частот автомодуляции спиновых волн в полосе частот первой запрещенной зоны, обусловленной наличием насыщающегося поглощения сверхвысокочастотного сигнала в запрещенной зоне МК. Показано также, что с увеличением коэффициента усиления кольца наблюдается новый сценарий перехода от хаотической генерации к одночастотному режиму через формирование периодической последовательности сверхдлинных СВЧ импульсов.

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Построена модель в виде системы нелинейных уравнений Шредингера с когерентной и некогерентной связью для исследования нелинейных и нестационарных процессов при распространении магнитостатических волн в слоистой структуре, состоящей из двух ферромагнитных пленок, разделенных диэлектрическим слоем. На основе этой модели проведено численное исследование эффектов самовоздействия, связанных с распространением прямых объемных магнитостатических волн в таких структурах.
2. В случае одноволнового приближения, когда в слоистой структуре возбуждается одна нормальная мода (быстрая или медленная), исследована зависимость коэффициентов в НУШ от параметра связи. Показано что пороги возникновения автомодуляции, частота автомодуляции, пороги перехода к хаотической динамике существенно зависят от величины связи и способа возбуждения структуры. Полученные зависимости качественно совпадают с аналитическими, описывающими общие закономерности систем с модуляционной неустойчивостью на основе одиночного НУШ.
3. Показано, что наличие когерентной связи при одновременном возбуждении волн приводит к возникновению таких нелинейных эффектов, как неустойчивость быстрого солитона и биения между быстрой и медленной волнами. Получено, что длина биений уменьшается как при увеличении разницы групповых скоростей и коэффициентов дисперсии для быстрой и медленной волн, так и при увеличении параметра кросс-модуляции. Эффект неустойчивости быстрого солитона наблюдается в узком интервале значений дисперсий и групповых скоростей быстрой и медленной волн, причем ширина этого интервала увеличивается с ростом амплитуды входного сигнала.
4. Показано, что наличие некогерентной связи приводит к возникновению таких нелинейных эффектов, как эффект захвата и сопровождения. Эффект захвата заключается в том, что при малой мощности входного сигнала импульсы на быстрой и медленной волнах движутся с различными скоростями, а при большой мощности входного сигнала импульсы взаимно захватываются и движутся с одной скоростью (при равных интенсивностях взаимодействующих импульсов). В режиме сопровождения более интенсивный импульс создает волновод, в котором распространяется импульс с меньшей амплитудой.
5. На основе дисперсионного соотношения для бесконечного одномерного магнетонного кристалла рассчитана зависимость ширины первой запрещенной зоны от геометрических параметров структуры (толщины ферромагнитной пленки, глубины и ширины канавки). Показано, что ширина запрещенной зоны увеличивается при увеличении глубины канавки и становится максимальной, когда ширина канавки равна половине периода.
6. На основе системы нелинейных уравнений Шредингера построена модель, описывающая распространение прямой и встречной МСВ в одномерной периодической ферромагнитной структуре. Получено выражение для коэффициента связи, определяющего взаимодействие прямой и встречной волн, учитывающее тип распространяющейся магнитостатической волны и геометрическую конфигурацию периодической структуры (профиль и период структуры). Проведен расчет коэффициента связи для различных ти-

- пов МСВ и для случая, когда одна из поверхности ферромагнитной пленки задана в виде ступенчатой функции. Показано, что с увеличением глубины канавки, коэффициент связи увеличивается, а максимум его наблюдается при периоде структуры в два раза больше ширины канавки.
7. При распространении ПОМСВ в бесконечном МК в центре запрещенной зоны показана возможность формирования солитонов, подобных брэгговским с различными свойствами, в частности, солитонов с нулевой скоростью и солитонов, локализованных на ограниченной длине структуры. Основным механизмом формирования таких солитонов является наличие перекачки мощности между прямой и встречной волнами, которая определяется величиной коэффициента связи, взаимный захват импульсов на прямой и встречной волнах и образование единой структуры, которая движется с общей скоростью, меньшей, чем групповая скорость волны в однородной пленке. Рассчитаны области параметров, соответствующие формированию таких солитонов, при изменении групповой скорости и коэффициента связи.
 8. Проведены экспериментальные исследования АЧХ и ФЧХ МК в линейном режиме при распространении ПМСВ в МК. На основе полученных результатов определены групповое время задержки и коэффициенты дисперсии групповой скорости для ПМСВ. Показано, что в окрестности запрещенных зон величина этих коэффициентов существенно превосходит коэффициент дисперсии для ПМСВ в однородной пленке, а на частотах выше частоты запрещенной зоны существует область, в которой выполняется критерий Лайтхилла.
 9. При различных уровнях входной мощности определены зависимости коэффициента ослабления СВЧ-сигнала, проходящего через магнетонный кристалл, от частоты. Показано, что на динамической характеристике такой структуры на частотах первой запрещенной зоны могут наблюдаться падающие участки (относительно прямой линии, определяемой линейными потерями) и участки подъема (нелинейная характеристика с насыщающимся поглощением).
 10. На основе экспериментальных исследований показано, что в условиях трехмагнетонных процессов распада ПМСВ, при прохождении импульсов через одномерный магнетонный кристалл с частотой несущей, совпадающей с центральной частотой запрещенной зоны и мощностью больше пороговой, в выходном сигнале наблюдается последовательность импульсов, которые обладают свойствами солитонов: постоянной фазой, линейной зависимостью пиковой мощности от величины $1/\Delta T_s^2$ и скорость их движение пропорциональна амплитуде. Проведено сравнение характеристик импульсов, рассчитанных на основе экспериментальных данных, с результатами расчета характеристик брэгговских солитонов по модели СНУШ для нелинейного магнетонного кристалла конечных размеров.
 11. Экспериментально показано, что использование МК в качестве нелинейного элемента с насыщающимся поглощением в активном кольцевом резонаторе приводит к генерации последовательности хаотических автосолитонов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А. // Вестник российской академии наук. 2008. Т.78, №5. С.438-449.
2. Grigorieva N.Yu, Kalinikos B.A., Kostylev M.A., Stashkevich A. A. Spin waves in multilayered and patterned magnetic structures, *Metamaterials Handbook: Theory and Phenomena of Metamaterials*, Edited by F. Capolino, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2009, Chapter 34.
3. Adam J.D., Daniel M.R., Emtage P.R., Tilisa S.N. Magnetostatic wave. Thin films for advanced electronics devices. Boston. 1991. P. 1-141.
4. Анфиногенов В.Б., Высоцкий С.Л., Гуляев Ю.В. и др. // Радиотехника и электроника. 2000. №8. С.6-14.
5. Nikitov S.A., Taihades Ph., Tsai C.S. // J. Magn. Magn. Mater. 2001. V.236, No.3. P.320.
6. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Животовский Л.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т.77, Вып.10. С.670-674.
7. Serga A.A, Chumak A.V. and Hillebrands B. //J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V.43. P.264002.
8. Kruglyak V.V., Demokritov S.O. and Grundler D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V.43. P.264001.
9. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. М.: Физматлит. 2005. 647 с.
10. Устинов А.Б., Григорьева Н.Ю., Калиникос Б.А. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т.88. Вып.1. С.34-39.
11. Дроздовский А.В., Черкасский М.А., Устинов А.Б. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т.91. Вып.1. С.17-22.
12. Высоцкий С.Л., Никитов С.А., Новицкий Н.Н. и др. // Изв.вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т.20, №2. С.3-11.
13. Диссипативные солитоны. Под ред. Ахмедиева Н.А. и Анкевича А.А. М.: Физматлит, 2008. 504 с.
14. Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П.// ПЖТФ. 2010. Т. 36, № 22. С. 37-44.
15. Karenowska A.D., Chumak A.V., Serga A.A., Gregg J.F., Hillebrands B. // Appl. Phys. Lett. 2010. V.96. P.082505.
16. Karenowska A.D., Chumak A.V., Serga A.A., Gregg J.F., Hillebrands B. // J. Phys.: Conf. Ser. 2011. V.303. P.012007.
17. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Изд.-во СГУ. 1993. 312с.
18. Высоцкий С.Л., Казаков Г.Т., Маряхин А.В., Филимонов Ю.А. // ЖТФ. 1998. Т.68, № 7. С.97.
19. Малюгина М.А., Шараевский Ю.П. // Изв.вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2000. Т.8. С.59-69.
20. Xuan-Zhang Wang, Shu-Rong Xu. // Phys. Rev. B. 2001. V.63. P.054415.
21. Шутый А.М., Семенцов Д.И. // ФТТ. 2006. Т.48. С.472.
22. Шутый А.М., Семенцов Д.И. // ЖТФ. 2006. Т.76. С.110.
23. Nash J.M., Kabos P., Staudinger R., Patton C.E. // J. App. Phys. 1998. V. 83. Pp. 2689-2699.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Морозова М.А., Шараевский Ю.П., Шешукова С.Е. Механизмы формирования солитонов огибающей в периодических ферромагнитных структурах // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т.18, №5. С. 113-124.
- A2. Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П., Шешукова С.Е. Электродинамические характеристики периодических и фрактальных волноведущих микроструктур на основе ферритовых пленок // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2011. №9. С.16-28.
- A3. Шешукова С.Е., Морозова М.А. Брэгговские солитоны огибающей в периодических ферромагнитных структурах при возбуждении магнитостатических волн // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т.16, №7. С.24-29.
- A4. Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Никитов С.А., Шараевский Ю.П., Шешукова С.Е. Генерация хаотических автосолитонов в активных кольцевых резонаторах на основе одномерных периодических ферромагнитных микроструктур // ПЖТФ. 2011. Т. 37, № 22. С. 50-60.
- A5. Морозова М.А., Шараевский Ю.П., Шешукова С.Е., Жаманова М.К. Исследование эффектов самовоздействия магнитостатических волн в ферромагнитной структуре на основе системы уравнений Шредингера с когерентной или некогерентной связью // ФТТ. 2012. Т.54, Вып.8. С.1478-1486.
- A6. Grishin S.V., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A., Beginin E.N., Sheshukova S.E. Self-generation of chaotic dissipative soliton trains in active ring resonator with 1D magnonic crystal // IEEE Trans. on Magnetics. 2011. V.47, N.10. P.3716-3719.
- A7. Morozova M.A., Nikitov S.A., Sharaevskii Yu.P. and Sheshukova S.E. Mechanisms of Gap Solitons Formation in Periodic Ferromagnetic Structures // Acta Physica Polonica A. 2012. V.121, №5-6. P.1173-1176.
- A8. Шешукова С.Е. Исследование эффектов самовоздействия волн в ферромагнитных структурах на основе системы связанных нелинейных уравнений Шредингера // Сборник материалов научной школы-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2009». Саратов: ООО ИЦ «Наука», 2010. С.56-59.
- A9. Morozova M.A., Sharaevskii Yu.P., Sheshukova S.E. Envelope solitons in periodic ferromagnetic structures at excitation of magnetostatic waves near the band-gap // Modeling in applied electromagnetic and electronics. 2010. Issue 10. Saratov University Press. P.72-78.
- A10. Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шешукова С.Е. Электродинамические характеристики структур на основе магнонных кристаллов // 20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010). Материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2010. С.687-688.
- A11. Шешукова С.Е. Формирование и генерация солитонов в магнонных кристаллах в диапазоне сверхвысоких частот // Сборник конкурсных научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых в области стратегического партнерства вузов и предприятий радиоэлектронного комплекса. Санкт-Петербург, 2011. С.215-220.
- A12. Morozova M.A., Sharaevskii Yu.P., Sheshukova S.E., Zhamanova M.K. Self-action effects of magnetostatic waves in layered ferromagnetic structure. Spin Wave 2011 International Symposium. Saint-Petersburg, 2011. P.112.
- A13. Sheshukova S.E., Morozova M.A., Sharaevskii Yu.P. Formation of Bragg Solitons in Magnon Crystals // INTERMAG 2011 Conference Digest. Taiwan, Taipei, 2011. AW-03.
- A14. Sheshukova S.E., Beginin E.N., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A., Morozova M.A. Envelope solitons formation near the band gap in magnonic crystals // Abstract of 3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'12). France, Paris, Telecom ParisTech University. 2012. P.38-39.
- A15. Sheshukova S.E., Beginin E.N., Morozova M.A., Nikitov S.A. Microwave pulse passing through 1D finite magnonic crystal // Days On Diffraction. International Conference. Abstracts. Saint-Petersburg, 2012. P.170-171.