

На правах рукописи



САДОВНИКОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИЕСЯ  
В 1D ФОТОННЫХ И МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛАХ  
НА ЧАСТОТАХ, БЛИЗКИХ К ГРАНИЦАМ ЗОН НЕПРОПУСКАНИЯ

01.04.03 — Радиофизика

01.04.05 — Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2012

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

Научные руководители: член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук, профессор  
**Трубецков Дмитрий Иванович**  
старший научный сотрудник  
**Рожнёв Андрей Георгиевич**

Официальные оппоненты:

**Мельников Леонид Аркадьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина

**Дудко Галина Михайловна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет Информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург

Защита состоится 28 сентября 2012 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 при Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III корпус, ауд. 34

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.** Изучение электродинамических характеристик и процессов распространения электромагнитного излучения в периодических распределенных волновых системах в настоящее время относится к числу наиболее актуальных направлений в современной радиофизике, оптике, оптоэлектронике и нелинейной динамике. Диэлектрические структуры, показатель преломления которых периодически меняется в пространственных направлениях с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света, получили название фотонных кристаллов (ФК). Такие структуры позволяют получать запрещенные зоны для энергий фотонов и препятствовать распространению излучения в определенном частотном диапазоне по одному или нескольким пространственным направлениям. В связи с развитием новых технологий изготовления периодических структур актуальным является исследование нового класса волноведущих систем на основе ферромагнитных пленок с периодическими и квазипериодическими неоднородностями – магнитных кристаллов (МК). По аналогии с ФК, МК образован периодически чередующимися областями с различными значениями магнитной проницаемости, либо с периодически изменяющимися геометрическими параметрами. В диссертации исследованы три системы, относящиеся к классу ФК или МК. Особое внимание уделено рассмотрению периодических в одном из направлений структур (1D ФК и МК), ограниченных в поперечном направлении.

Первая система представляет собой микроструктурное оптическое волокно (МОВ). Оболочка волокна образована из полых стеклянных трубок, и в поперечном сечении представляет собой периодическую или квазипериодическую структуру, существование запрещенных зон в которой препятствует распространению света в поперечном направлении. Такие оптические волокна активно изучаются в последние годы (Д. Найт, Т. Биркс, П. Рассел, А.М. Желтиков, Л.А. Мельников и др.). Управление дисперсионными свойствами волноводных мод МОВ открывает новые возможности в оптике и позволяет наблюдать такие эффекты, как генерация суперконтинуума, спектральное солитонное туннелирование. Поскольку перестраивать в широком диапазоне длину волны излучения, генерируемого лазером довольно сложно, важной задачей является изготовление волокон, с наперед заданными дисперсионными характеристиками. В связи с этим необходима разработка методов численного моделирования, позволяющих быстро проводить количественные оценки дисперсионных характеристик МОВ с зависимостью показателя преломления материала волокна от длины волны распространяющегося в нем света. На момент начала работы над диссертацией способы управления дисперсией МОВ, оболочка которого образована из полых стеклянных трубок с последовательным увеличением радиусов отверстий относительно радиуса воздушных отверстий в первом ряду оболочки волокна, не были рассмотрены достаточно подробно.

Вторая система – планарная нелинейная периодическая брэгговская решетка (БР) с зависимостью показателей преломления слоев от мощности распространяющегося излучения. Такая структура находит применение в различных оптических устройствах, таких как перестраиваемые и фиксированные узкополосные фильтры, компенсаторы дисперсии, ответвители, системы чисто оптической обработки, хранения и передачи информации, рефрактометры. В БР за счет действия дисперсии периодической структуры и нелинейности материалов слоев оказывается возможным формирование и распространение уединенных волн – щелевых солитонов (ЩС)<sup>1</sup>. Процессы солитонного туннелирования и формирования ЩС рассматривались в работах А. Ньюэлла, В. Ченна, Д.Л. Миллза, Б. Эгглетона, М. де Стэрке, Ж. Сипэ, Ю.С. Кившаря, Н.Н. Розанова, Б.И. Манцызова, А.П. Сухорукова, А.А. Сухорукова, Н.М. Рыскина и др. В большинстве работ эффекты генерации ЩС в планарных структурах рассматривались либо с использованием модельных уравнений связанных мод и нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ), либо на примере 1D периодической системы, однородной в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны. В то же время важной представляется задача изучения аналогичных явлений в планарной БР, ограниченной в поперечном направлении, поскольку в этом случае возможно наблюдение нелинейных эффектов при меньших значениях мощности распространяющегося в структуре излучения за счет локализации энергии в центре системы. Сравнительно малоизученными являются нестационарные процессы начала генерации ЩС в планарной БР с произвольным контрастом показателей преломления слоев на частотах вблизи верхней частотной границы полосы не пропускания при распространении излучения большой мощности. Для решения этой задачи принципиальный интерес представляет рассмотрение открытой диэлектрической нелинейной системы. При этом важным является учет подводящей структуры, в которой формируется входное излучение в виде волны с постоянной частотой и амплитудой.

Третья из рассматриваемых систем – периодическая ферромагнитная структура, состоящая из материала с зависящими от частоты компонентами тензора магнитной проницаемости. Особенности распространения волн в таких структурах детально исследованы в работах Ю.В. Гуляева, С.А. Никитова, Б.А. Калиникоса, Б. Хиллебрандса, В.В. Кругляка, Г. Губиотти, Ю.А. Филимонова, Ю.П. Шараевского и др. В слоистых ферритовых структурах могут распространяться спиновые магнитостатические волны (МСВ) различного типа. Периодическое изменение параметров среды приводит к появлению частотных запрещенных зон в спектре распространения МСВ, причем положением зон можно управлять путем изменения внешнего постоянного магнитного поля. Благодаря этим свойствам системы подобного типа могут найти применение в таких устройствах, как перестраиваемые СВЧ фильтры, сенсоры, высокоскоростные нелинейные переключатели, уст-

---

<sup>1</sup> Chen W., Mills D.L. Gap Solitons and the Nonlinear Optical Response of Superlattices. Phys.Rev.Lett. 1987. V. 58, N. 2. Pp. 160–163.

ройства магنونной логики и делители мощности<sup>2</sup>. Хотя перечисленные выше системы, выполненные на основе МК, являются периодическими только по одному из пространственных направлений, в поперечном сечении они могут иметь сложную слоистую структуру, в том числе могут быть нагружены различными металлическими экранами, служащими для эффективного управления их свойствами. Аналитическое исследование таких систем, в общем случае, не представляется возможным, поэтому важной задачей является разработка метода расчета электродинамических характеристик собственных мод (дисперсионных характеристик и распределений полей) в 1D МК. Наличие численной методики, позволяющей моделировать одномерные МК достаточно общего вида, позволяет использовать ее для изучения некоторых общих свойств электромагнитных волн в системах подобного типа. В частности, интересным является исследование вопроса о скорости распространения энергии в периодических структурах, состоящих из материала с тензорными значениями магнитной проницаемости. Другим важным вопросом, который возникает при исследовании общих свойств МК, является вопрос о невзаимности этих систем и выяснение того, насколько сильно сказываются эффекты нарушения геометрической симметрии системы на различия между характеристиками распространяющихся в ней по двум противоположным направлениям. Важным фактором, оказывающим влияние на свойства МК в обоих этих случаях, оказывается наличие в них запрещенных зон и того, насколько частота сигнала близка к критической частоте периодической структуры.

Для всех исследуемых в диссертационной работе систем (микроструктурированное оптическое волокно, нелинейная брэгговская решетка, одномерный магنونный кристалл) существенным является использование методик численного моделирования, основанных на решении либо уравнений Максвелла, либо полученного непосредственно из них волнового уравнения. Лишь в этом случае удастся проследить в полной мере динамику распространения электромагнитного излучения в рассматриваемых структурах без существенных упрощающих предположений относительно геометрии системы, нелинейных свойств и параметров исследуемых типов сигналов.

Указанные обстоятельства позволяют считать тему диссертации актуальной и важной для современной радиофизики, оптики и теории волн.

**Цель диссертационной работы** состоит в исследовании путем непосредственного численного моделирования уравнений электродинамики свойств собственных мод и нелинейной динамики электромагнитных волн, распространяющихся на частотах вблизи границ зон пропускания фотоннокристаллических и периодических магنونных структур.

Для достижения поставленных целей в работе решаются следующие **основные задачи**:

1. С использованием метода плоских волн последовательно исследуются способы управления дисперсионными свойствами микроструктурирован-

---

<sup>2</sup> Serga A.A., Chumak A.V., Hillebrands B. YIG magnonics //J. Phys. D: Appl.Phys. 2010. V. 43. 264002.

ного оптического волокна, оболочка которого образована из полых стеклянных трубок с конечной толщиной стенок.

2. Путем прямого численного решения уравнений Максвелла изучаются нестационарные процессы, реализующиеся при распространения электромагнитного излучения в нелинейной планарной брэгговской решетке, при условии, что основная частота сигнала близка к верхней или нижней частотной границе полосы непропускания периодической структуры. В частности, проводится детальное исследования процессов генерации и взаимодействия между собой щелевых солитонов в рассматриваемой структуре.
3. Осуществляется разработка методики численного моделирования, базирующейся на методе конечных элементов и предназначенной для расчета дисперсии и полей собственных магнитостатических волн, распространяющихся в одномерных магнетонных кристаллах с произвольным законом периодического изменения их свойств в направлении распространения волн и с произвольной геометрией системы в поперечном сечении.
4. С использованием разработанной методики проводится исследование свойства невзаимности и особенностей процессов передачи энергии волн, распространяющихся в магнетонных кристаллах, на примере поверхностной магнитостатической волны в одномерном магнетонном кристалле, выполненном в виде ферритовой пленки с периодически деформированной поверхностью.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Одновременное применение различных методов управления дисперсией в микроструктурированном волокне, оболочка которого образована из полых стеклянных трубочек с конечной толщиной стенок, в том числе с последовательным увеличением радиусов отверстий относительно радиуса воздушных отверстий в первом ряду оболочки волокна, позволяет создавать волокна с заданным значением дисперсионного коэффициента в нужном диапазоне длин волн.
2. При возбуждении планарной нелинейной брэгговской решетки сигналом постоянной амплитуды, частота которого лежит вблизи верхней границы полосы непропускания, существует возможность жесткого и мягкого начала генерации щелевых солитонов. Если частота входного сигнала лежит ниже верхней частоты отсечки полосы непропускания линейной системы, то наблюдается жесткое начало генерации щелевых солитонов. В случае если частота входного излучения немного превышает верхнюю частоту отсечки линейной системы, генерация солитонов происходит мягким образом.
3. При распространении поверхностной электромагнитной волны вдоль периодической структуры, выполненной в виде пленки с нанесенной на одну из ее сторон гребенкой и изготовленной из анизотропного материала, свойства которого описываются эрмитовым тензором магнитной прони-

цаемости, на частотах, лежащих внутри полосы пропускания, скорость передачи энергии совпадает с групповой скоростью.

4. Аномально малое проявление свойств невзаимности, наблюдаемое при распространении поверхностных магнитостатических волн вдоль ферритовой пленки с периодически деформированной с одной стороны поверхностью, объясняется тем, что энергия магнитного поля в пленке железиттриевого граната на 4-5 порядков больше энергии электрического поля, а распределение магнитного поля в случае рассматриваемой геометрии для прямой и встречных волн практически идентично (для одинакового значения частоты) и локализовано преимущественно в области изломов пленки.

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

1. Предложен оригинальный способ вычисления коэффициента дисперсии микроструктурированных оптических волокон, основанный на методе адаптивной сплайн-аппроксимации, позволяющий подавить эффекты численной неустойчивости, возникающие при расчете второй производной от эффективного показателя преломления собственной моды как функции длины волны, из-за конечной погрешности данных, получаемых в процессе моделирования.
2. Впервые проведено исследование возможности управления дисперсионными свойствами микроструктурированного волокна, оболочка которого образована из полых стеклянных трубок с конечной толщиной стенок с последовательным увеличением радиусов отверстий относительно радиуса воздушных отверстий в первом ряду оболочки волокна.
3. Впервые метод численного решения системы уравнений Максвелла используется для изучения нестационарных процессов генерации щелевых солитонов в нелинейной планарной брэгговской решетке на частотах, близких к верхней границе полосы непропускания.
4. Впервые показано, что эффективность преобразования непрерывного лазерного излучения в периодическую последовательность солитоноподобных импульсов с помощью планарной периодической нелинейной диэлектрической структуры может достигать высоких значений (до 70%).
5. Предложена оригинальная методика расчета электродинамических параметров одномерных магнитных кристаллов, основанная на методе конечных элементов и позволяющая моделировать свойства таких структур, имеющих произвольную геометрию и состоящих из анизотропных материалов, компоненты тензоров магнитной или диэлектрической проницаемости которых зависят от частоты.
6. Впервые показано выполнение равенства групповой скорости и скорости переноса энергии для поверхностной магнитостатической волны, распространяющейся в периодической ферромагнитной структуре.
7. Обнаружено отсутствие проявления свойств невзаимности на дисперсионной характеристике для поверхностной магнитостатической волны,

распространяющейся в ферромагнитной пленке с периодически нанесенными на ее поверхность канавками.

**Научная и практическая значимость.** Развитые в диссертационной работе методы расчета диэлектрических и магнитных периодических систем могут быть использованы при разработке новых СВЧ-устройств и устройств интегральной оптики. Результаты исследований различных способов управления дисперсией в МОВ представляют практический интерес для возможности создания таких волокон с наперед заданными дисперсионными характеристиками. Полученные в диссертации результаты развивают и дополняют представления о происходящих в нелинейной периодической структуре нестационарных процессах распространения электромагнитного излучения, на частотах вблизи границ полосы непропускания. Результаты исследования нестационарной динамики распространения излучения в планарных нелинейных брэгговских структурах представляют самостоятельный интерес в связи одним из возможных применений таких устройств в качестве преобразователей входного излучения с постоянной частотой и амплитудой в сигнал, состоящий из последовательности солитоноподобных импульсов. Результаты диссертации, касающиеся изучения ферромагнитных периодических структур, могут быть использованы для расчета электродинамических параметров при изготовлении магнетонных кристаллов с заданными свойствами, что представляет очевидный практический интерес.

Результаты диссертации представляют интерес для радиофизики, интегральной и нелинейной оптики, нелинейной динамики. Ряд результатов диссертации может быть использован в учебном процессе на факультете нелинейных процессов Саратовского государственного университета (лекционные курсы «Нелинейные волны», «Электродинамика СВЧ»).

**Личный вклад соискателя.** Все результаты, включенные в диссертацию, получены лично автором. Автор также совместно с научными руководителями, участвовал в постановке основных задач, анализе и интерпретации полученных результатов. Автором лично разработаны описанные в диссертации оригинальные методики моделирования электромагнитных процессов в фотонных и магнетонных кристаллах и проведены все численные расчеты.

**Достоверность результатов** диссертации обеспечивается использованием широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя аналитических и численных методов, воспроизводимостью результатов моделирования при изменении параметров численных схем, соответствием результатов, полученных с помощью численных методик, с результатами аналитических расчетов для систем с простой геометрией, допускающих точное решение. В частности, полученные с помощью моделирования методом плоских волн результаты расчета коэффициента дисперсии для микроструктурированного поликапиллярного оптического волокна совпадают с зависимостями, полученными методом конечных элементов. Эффекты генерации щелевых солитонов, обнаруженные в численном эксперименте, качественно совпадают с известными в литературе данными, полученными с помощью решения мо-

дельных уравнений. Достоверность полученных результатов также подтверждается хорошим совпадением экспериментальных данных, известных из литературы, с рассчитанными в диссертации дисперсионными характеристиками и величинами групповой скорости для поверхностной магнитостатической волны в одномерном магнетонном кристалле.

**Апробация и публикации.** Результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались на школах-конференциях «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (Саратов, 2007–2011 гг.), II–VI конференциях молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2007–2011 гг.), XV и XVI всероссийских школах «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2010, 2012 гг.), IX международной школе «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, 2010 гг.), XIV и XV международных зимних школах-семинарах по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 2009, 2012 гг.), международной школе-семинаре «Статистическая физика и информационные технологии (StatInfo-2009)» (Саратов, 2009 г.), международных школах для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике Saratov Fall Meeting (Саратов, 2009–2011 г.), международной научно-технической конференции Актуальные проблемы электронного приборостроения, АПЭП-2010 (Саратов, 2010 г.), конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2010» (Санкт-Петербург, 2010 г.), XII всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн» (Москва, 2009 г.), XII всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах – 2010» (Москва, 2010 г.), международных конференциях «Дни дифракции» (Санкт-Петербург, 2012 г.), «INTERMAG 2011: Asia International Magnetism Conference» (Тайвань, Тайпей, 2011), «The European Conference Physics of Magnetism (PM'11)» (Польша, Познань, 2011), «3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics META'12» (Франция, Париж, 2012), а также на научных семинарах кафедры Электроники, колебаний и волн Саратовского государственного университета (СГУ) и научном семинаре ИЦ «Технопарк» СГУ. Результаты диссертации были использованы при выполнении НИР, поддержанных программой «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № 2.1.1/1738), проектами РФФИ (гранты №№ 06-02-16805-а, 08-02-00621-а, 10-02-01403-а, 11-02-01280-а), проектом 11.Г34.31.0030.

По результатам диссертации опубликовано 36 работ, из них 4 статьи в российских журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций, 10 статей в сборниках трудов российских и международных конференций и 22 тезиса докладов. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 157 страниц текста, включая иллюстрации. Список литературы на 13 страницах включает 182 наименования.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **Главе 1** проводится изучение влияния на дисперсию изменения параметров микроструктурированного оптического волокна.

В п. 1.1 рассмотрено МОВ с сердцевинной из чистого кварцевого стекла и окружающей ее оболочкой, имеющей структуру двумерного ФК, образованного из трубок с конечной толщиной стенок (рис. 1, а). В пп. 1.2-

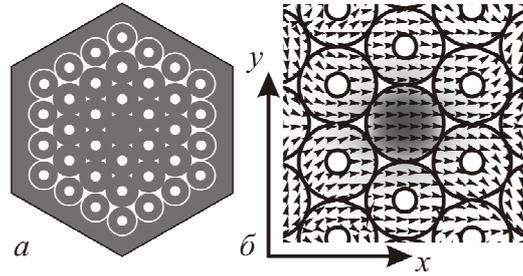


Рис. 1. а) Поперечное сечение МОВ; б) распределение комплексной амплитуды поперечной компоненты  $E_x$  электрического поля в центре МОВ

1.4 описана разработанная методика расчета зависимости дисперсионного коэффициента  $D$  от длины волны  $\lambda$  с учетом хроматической дисперсии материала волокна. Для расчета параметров собственных (направляемых) мод оптических волокон различной конструкции, в том числе и МОВ, используется метод плоских волн (МПВ) на суперячейке и методика подавления эффекта численной неустойчивости, основанная на применении сглаживающих сплайнов высокого порядка. Распределение поля основной моды, поляризованной вдоль оси  $x$ , в поперечном сечении волокна показано на рис. 1, б. Интенсивность поля изображена в градациях серого цвета. Стрелки указывают поляризацию поперечной компоненты вектора напряженности электрического поля. В п. 1.5 рассматриваются три способа управления дисперсией в рассматриваемом МОВ. Выявлены особенности каждого из предложенных методов. Исследована трансформация дисперсионной характеристики МОВ при изменении геометрических параметров в оболочке волокна – радиусов всех воздушных отверстий  $r$  и интервала между отверстиями  $\Lambda$ . Показано, что меняя параметр  $\Lambda$ , можно управлять наклоном дисперсионной характеристики, и изменять абсолютное значение коэффициента дисперсии. При значении  $\Lambda = 1.84$  мкм (кривая 3, рис. 2, а) появляется интервал длин волн ( $0.9 < \lambda < 1.1$  мкм), в котором коэффициент дисперсии  $D$  слабо меняется и принимает значения в интервале  $0 < D < 7$  пс/(нм\*км). При этом в интервале длин волн  $0.8 < \lambda < 1.6$  мкм существует две области с нормальной дисперсией и область с аномальной дисперсией. Получено хорошее соответствие результатов расчета дисперсии МОВ с помощью МПВ и метода конечных элементов (МКЭ)<sup>3</sup>. В п. 1.5.2 предложена модификация предложенного в работе<sup>4</sup> метода

<sup>3</sup> Садовников А.В., Рожнёв А.Г., Черняев М.П. Расчёт и оптимизация дисперсионных характеристик оптических микроструктурированных волокон с поликапиллярной оболочкой // Нелинейный мир. 2011. Т. 9, № 2. С. 99.

<sup>4</sup> Saitoh K., Koshiba M., Hasegawa T., Sasaoka E. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion // Opt. Express. 2003. V. 11, N. 23. P. 843.

управления дисперсией в МОВ, заключающегося в изменении радиусов капилляров при последовательном переходе от одного слоя отверстий, окружающих центральный стержень в оболочке волокна, к следующему.

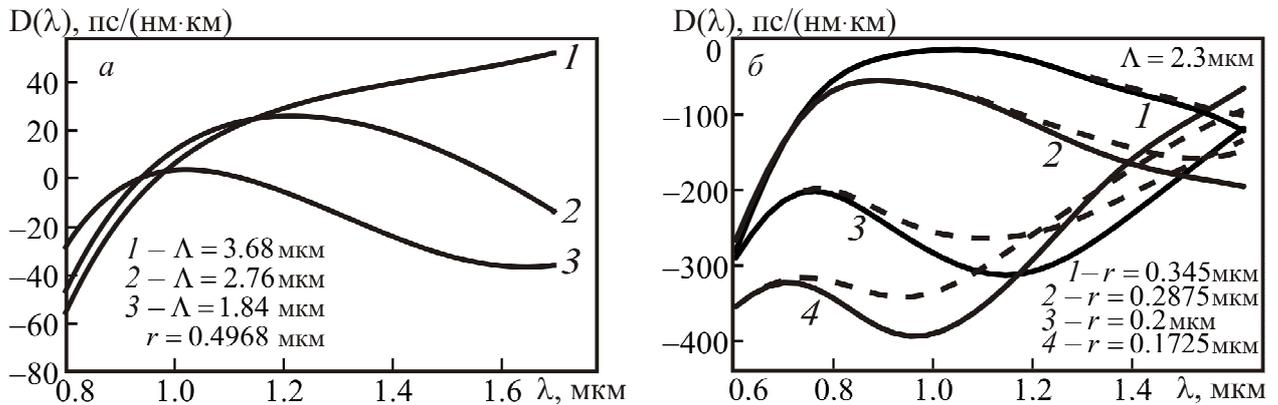


Рис. 2 а) Дисперсионная характеристика МОВ с различными значениями расстояний между отверстиями  $\Lambda$ ; б) дисперсионная характеристика МОВ с последовательным увеличением радиусов отверстий в оболочке. На рисунке отмечены значения параметра  $r$  – радиуса воздушных отверстий в первом относительно центрального стержня ряде

На рис. 2, б сплошными линиями обозначены зависимости дисперсионного параметра  $D$  от длины волны для волокна с одинаковым размером воздушных отверстий в оболочке, пунктирными линиями – для волокон с 20% увеличением каждого последующего ряда отверстий относительно предыдущего, начиная от ряда, расположенного вокруг центрального стержня. Данные результаты для МОВ со значением радиуса отверстий в первом ряду относительно сердцевины  $r = 0.1725$  мкм (кривая 4 на рис. 2, б) показывают, что предложенная методика изменения радиусов отверстий позволяет получать область на дисперсионной характеристике с меньшим перепадом коэффициента  $D$  в определённом диапазоне длин волн. В п. 1.5.3 было проведено исследование влияния на дисперсию изменения мольной доли  $GeO_2$  в сердцевине МОВ. Показано, что при увеличении мольной доли  $GeO_2$  в стекле значение параметра  $D$  уменьшается во всем рассматриваемом диапазоне значений длин волн ( $0.6 \leq \lambda \leq 1.8$  мкм), при этом на дисперсионной характеристике появляется область с малым значением параметра дисперсии в интервале длин волн  $1.0 < \lambda < 1.1$  мкм.

В **Главе 2** исследуется двумерная структура, представляющая собой планарную брэгговскую решетку.

В п. 2.1 рассматривается явление солитонного туннелирования, возникающее при распространении электромагнитного излучения в периодических структурах вблизи границы полосы запрещенной зоны. В п. 2.2 построена модель нелинейной планарной БР, состоящей из слоев кубично-нелинейного диэлектрика. Обсуждается использование области подводящего волновода (ПВ) для учета многомодового характера распространения излучения в волноведущей структуре, в которой расположен источник излучения на линии  $L_0$  (рис. 3, а). Параметры структуры:  $d = 1$  мкм,  $n_1 = 1.45$ ,  $n_2 = 2.0$ , длина БР 400 мкм.

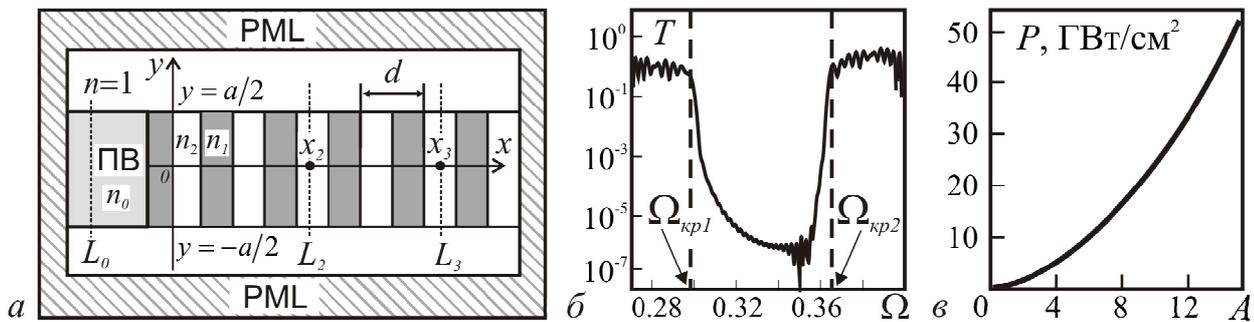


Рис. 3. а) Схема расчетной области; б) Спектр прохождения через брэгговскую решетку гауссова импульса с центральной частотой  $\Omega_{ц} = 0.335$  и шириной  $\Delta\Omega = 0.11$ ; в) Зависимость плотности мощности входного сигнала от безразмерной амплитуды  $A$

В п. 2.3 анализируются дисперсионные свойства планарной БР модифицированным методом эффективного показателя преломления, позволяющим проводить оценки частот отсечек зон непропускания. В п. 2.4 описана методика численного моделирования брэгговской решетки, основанная на применении метода конечных разностей во временной области<sup>5</sup> (Finite-Difference Time Domain – FDTD). Поскольку рассматриваемая система является открытой, граничные условия в численном эксперименте устанавливаются в виде идеально согласованных слоев (Perfectly Matched Layer — PML).

Показано хорошее соответствие рассчитанных модифицированным методом показателя преломления значений частотных границ первых двух запрещенных зон и положения границ зон на спектре пропускания, рассчитанном методом FDTD (п. 2.5).

На рис. 3, б показана зависимость коэффициента пропускания  $T$  от безразмерной частоты  $\Omega = fa/c$  через рассматриваемую систему в линейном случае ( $f$  – частота,  $a = 1$  мкм поперечный размер решетки,  $c$  – скорость света в вакууме). Обозначения  $\Omega_{кр1}$  и  $\Omega_{кр2}$  соответствуют частотам границ первой зоны непропускания периодической структуры. В п. 2.6 представлены результаты численного моделирования динамики распространения излучения в линейной структуре на частотах внутри и вне полосы непропускания. Построена зависимость плотности мощности входного излучения от амплитуды сигнала  $A$  (рис. 3, в). В п. 2.7 проведены оценки трансформации дисперсионной кривой (рис. 4). При увеличении мощности излучения, ветви дисперсионной характеристики смещаются в более низкочастотную область, ширина полосы непропускания уменьшается, при этом верхняя частотная граница запрещенной зоны смещается на большую величину, чем нижняя.

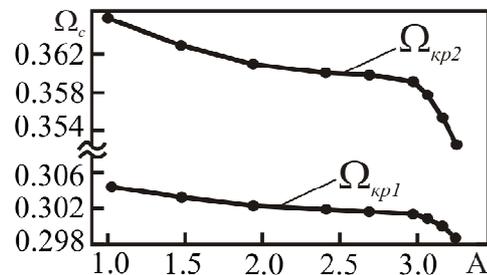


Рис. 4. Зависимость частоты отсечки от амплитуды для нижней ( $\Omega_{кр1}$ ) и верхней ( $\Omega_{кр2}$ ) границ первой полосы непропускания БР

<sup>5</sup>Oskooi A.F., Roundy D., Ibanescu M., Bermel P., Joannopoulos J.D., Johnson S.G. MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method // Computer Physics Communications. 2010. N. 181. Pp. 687-702.

**Глава 3** посвящена исследованию влияния нелинейности на динамику распространения излучения в планарной БР (рис. 3, *a*).

На плоскости параметров амплитуда – частота входного сигнала ( $A - \Omega$ ) можно выделить области с характерной динамикой распространения излучения в структуре (рис. 5, *a*): 1 – непропускание сигнала; 2 – стационарное распространение сигнала; 3 – распространение сигнала в виде последовательности солитонов. На графике (рис. 5, *a*) кружками показаны пороговые значения амплитуды, при которых жестко происходит смена режима непропускания на режим солитонного туннелирования, а квадратами отмечены мягкие переходы от режима пропускания к режиму генерации щелевых солитонов. Зафиксировав значение частоты сигнала ( $\Omega = 0.360$ ) вблизи  $\Omega_{кр2}$  и плавно увеличивая амплитуду можно наблюдать смену режима непропускания на режим солитонного туннелирования (п. 3.2), что соответствует движению вдоль отрезка  $GL$  (рис. 5, *a*) снизу вверх. Когда амплитуда сигнала лежит в диапазоне  $0 < A < 6.5$ , наблюдается затухание сигнала вдоль системы, как это должно происходить в линейном режиме, поскольку частота сигнала попадает в полосу непропускания. По мере того, как амплитуда входного сигнала растет, критическая частота приближается к частоте сигнала, и возникают периодические колебания амплитуды поля, хотя волна экспоненциально затухает вглубь среды. Проводя аналогию с работой<sup>6</sup>, такое поведение можно назвать туннелированием с потерями (п. 3.5). При увеличении амплитуды и превышении порогового значения наблюдается жесткое начало генерации щелевых солитонов и в спектре сигнала жестко возникают автомодуляционные компоненты. Пространственное распределение поля и временная реализация в точке  $x_2$  на оси системы (рис. 5, *b*) имеют сложную форму следующих друг за другом солитоноподобных импульсов. По сравнению со случаем малой амплитуды в спектре сигнала (рис. 5, *в*), кроме максимума, соответствующего частоте источника излучения, появляются новые независимые частотные компоненты, одна из которых соответствует критической частоте (с учетом ее зависимости от  $A$ ).

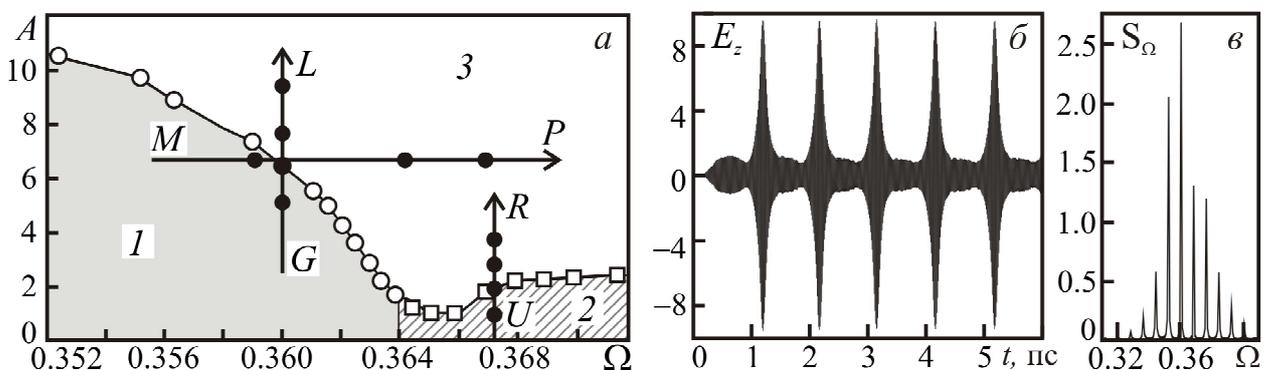


Рис. 5. Разбиение плоскости параметров амплитуда – частота входного сигнала на области с различным характером динамики (*a*) и временная реализация (*b*) и спектр (*в*)  $E_z$  компоненты поля. Амплитуда входного сигнала  $A = 9$ , частота  $\Omega = 0.360$

<sup>6</sup>Newell A.C. Nonlinear tunnelling // J. Math. Phys. 1978. V. 19, N 5. Pp. 1126-1134.

При увеличении мощности сигнала расстояние между спектральными компонентами увеличивается, при этом период следования щелевых солитонов уменьшается. На рис. 6, *a–г* изображены результаты расчета пространственно-временной динамики распространения сигнала. При значении амплитуды  $A = 6$  на протяжении всего времени расчета поле локализовано в области ПВ (рис. 6, *a*) и начала периодической структуры, и сигнал затухает вдоль оси системы в установившемся режиме. При плавном увеличении амплитуды входного сигнала характер пространственно-временной динамики меняется. При  $A = 6.5$  наступает режим генерации одиночных импульсов, которые распространяются вдоль периодической структуры с постоянной скоростью и формой (рис. 6, *б, в*). При амплитуде входного сигнала  $A = 10$  расстояние между последовательно генерируемыми щелевыми солитонами уменьшается настолько, что начинается взаимодействие между ними (рис. 6, *г*). В п. 3.7 показано, что после взаимодействия щелевые солитоны сохраняют свою форму и скорость, но происходит сдвиг в их пространственном положении, причем взаимодействовать могут как солитоны, двигающиеся в одном направлении, так и распространяющиеся навстречу друг другу. При увеличении амплитуды входного сигнала, частота которого превышает критическую  $\Omega = 0.367 > \Omega_{кр2}$  (движение верх вдоль отрезка  $UR$  на рис. 5, *a*), наблюдается смена режима стационарного распространения излучения на режим солитонной генерации (п. 3.8). Начало генерации солитонов происходит мягко – в спектре сигнала мягко появляются автомодуляционные компоненты. При большем увеличении амплитуды, солитоны начинают формироваться ближе к левому краю периодической структуры, что видно по пространственно-временному распределению поля (рис. 6, *д–з*). Смена характера распространения излучения в решетке и начало генерации щелевых солитонов может происходить в случае, когда амплитуда входного сигнала остается неизменной, а частота плавно меняется вблизи верхней частотной границы первой запрещенной зоны, например, при движении по области параметров  $A - \Omega$  слева направо вдоль отрезка  $MP$  (п. 3.4). В п. 3.6 рассчитаны характеристики распространения щелевых солитонов в двумерной брэгговской структуре. Было показано, что период следования солитонов  $T$  уменьшается с ростом амплитуды по закону, близкому к  $T \sim 2\pi/(\Omega - \Omega_{кр2}(A))$ . В случае, если частота сигнала выбрана ниже критической ( $\Omega = 0.36$ ), минимальное значение скорости щелевых солитонов достигает  $0.21c$  ( $c$  – скорость света в вакууме), что составляет около 35% скорости излучения в волноводе без решетки. При приближении частоты сигнала к  $\Omega_{кр2}$  скорость распространения солитонов уменьшается. Показано, что эффективность преобразования энергии входного непрерывного излучения в энергию импульсного сигнала, состоящего из последовательности ШС может достигать значения 60-70% без специального подбора геометрии и электрических параметров решетки. Форма одиночного щелевого солитона согласуется с формой односолитонного решения НУШ. Длительность солитона во временной области уменьшается с ростом ампли-

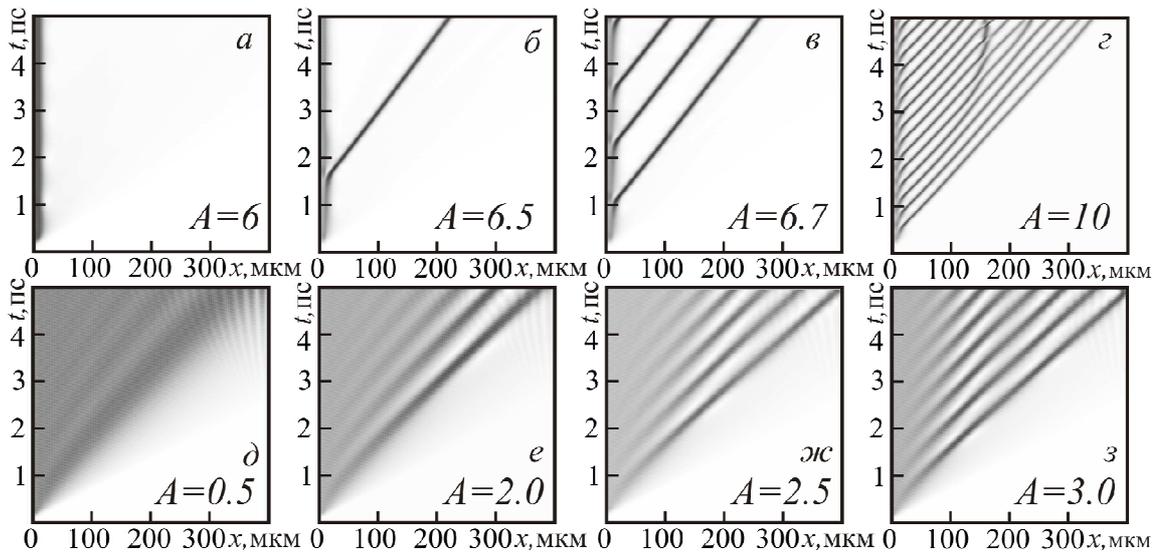


Рис. 6. Пространственно-временная динамика распространения сигнала в брэгговской решетке, демонстрирующая различные способы возникновения генерации солитонов: при фиксированном значении частоты входного сигнала – жесткое (а–д) и мягкое (е–з)

туды входного излучения, что согласуется с поведением солитонов НУШ и с теоретическими соотношениями для семейства двухпараметрических солитоноподобных решений, описывающих брэгговский солитон<sup>7</sup>.

В **Главе 4** рассмотрена периодическая ферромагнитная структура, образованная из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) с периодически повторяющимися неоднородностями. В п. 4.1 проводится постановка задачи о расчете электродинамических параметров одномерной магнито-кристаллической структуры, изготовленной из анизотропного материала, свойства которого описываются эрмитовым тензором магнитной проницаемости, компоненты которого зависят от частоты. В п. 4.2, 4.3 описана основанная на МКЭ методика расчета электродинамических характеристик распространения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в периодических анизотропных волноведущих структурах с произвольной геометрией. При этом решается волновое уравнение, полученное из системы уравнений Максвелла. В построенной модели затухание ПМСВ в феррите не учитывается. В качестве тестовой задачи в п.4.4 приведены результаты расчета дисперсии и распределения компонент электромагнитного поля для поверхностных мод Дэймона-Эшбаха в однородной пленке ЖИГ. В п. 4.5 рассмотрена периодическая ферромагнитная структура, экспериментально исследованная в работе<sup>8</sup>. В качестве ферромагнитного материала (область 1 на рис. 7, а) рассматривался ЖИГ. Подложкой для пленки служил галлий-гадолиниевый гранат (область 2). Сверху пленка нагружена слоем поликора (область 3).

<sup>7</sup> Aceves A.B., Wabnitz S. Self-induced transparency solitons in nonlinear refractive periodic media // Phys. Lett. A. 1989. V. 141. N. 1-2. Pp. 37-42.

<sup>8</sup> 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.

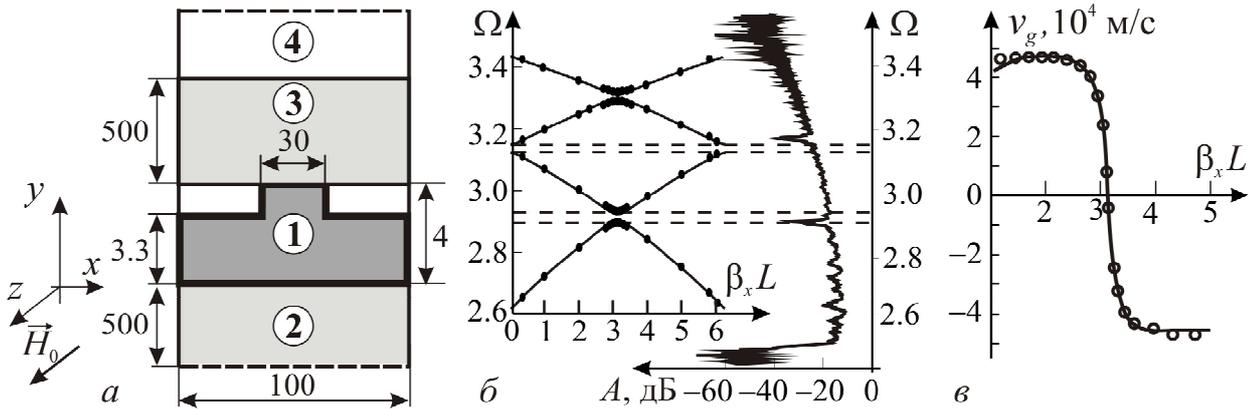


Рис. 7. а) Схема примитивной ячейки МК и ее геометрические размеры (в микронах); б) рассчитанная дисперсионная характеристика (слева) и экспериментальная АЧХ<sup>8</sup> для периодической структуры (справа); в) зависимость групповой скорости (сплошная кривая) и скорости переноса энергии (кружки) от волнового числа

В области 4 и в светлой области канавки между ЖИГ и поликором  $\epsilon = 1$  и  $\mu = 1$ . На рис. 7, б представлены результаты расчета дисперсии (слева) и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) из работы<sup>8</sup> (справа). Здесь введены обозначения:  $\Omega = \omega/\omega_H$  – безразмерная частота,  $\beta_x L$  – безразмерное продольное волновое число,  $L = 100$  мкм – период структуры,  $\omega_H = \gamma H_0$ ,  $\gamma = 2\pi \cdot 2.8$  МГц/Э – гиромагнитное отношение в ЖИГ,  $H_0 = 300$  Э – напряженность внешнего постоянного магнитного поля. Пунктирной линией показаны границы первых двух полос непропускания на рассчитанной дисперсионной характеристике, которые хорошо совпадают с положением первых двух зон непропускания на экспериментальной АЧХ<sup>8</sup>. Рассчитанные значения групповой скорости для первой ветви дисперсионной кривой согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Для распространяющейся в периодической ферромагнитной структуре ПМСВ обнаружено совпадение групповой скорости и скорости переноса энергии, определяемой как отношение усредненного по периоду колебаний потока мощности, переносимого собственной волной вдоль системы, к усредненной энергии, запасенной на одном периоде структуры (рис. 7, в). С помощью разработанной методики численного моделирования были рассчитаны электродинамические характеристики периодической ферромагнитной структуры с непрямоугольным профилем канавок на ее поверхности, возникающим при изготовлении такой структуры. В п. 4.6 было показано, что учет «бортиков» на краях канавки приводит к смещению дисперсионной характеристики в область больших частот, по сравнению с рассчитанной дисперсией для структуры с прямоугольным профилем канавок. В результате исследования пространственного распределения напряженностей электрического и магнитного полей в пределах примитивной ячейки периодической структуры была обнаружена взаимность в распределении электрического поля для волн, распространяющихся в прямом и встречном направлениях. Магнитное поле оказывается локализованным преимущественно на изломах структуры. Такая ситуация имеет место для волн, распространяющихся как в положительном, так и в отрица-

тельном направлении оси  $x$ . Основной вклад в характеристики распространения ПМСВ вносит магнитное поле, поскольку энергия магнитного поля в пленке ЖИГ на 4-5 порядков больше энергии электрического поля. Отсутствие не взаимности в распределении магнитного поля приводит к тому, что и на дисперсионной характеристике проявление свойств не взаимности обнаружить не удается. Действительно, представленные на рис. 7, б ветви дисперсионной кривой симметричны относительно линии  $\beta_x L = \pi$ . Не взаимность в распределении магнитного поля в структуре с непрямоугольной формой канавки на поверхности ЖИГ проявляется более явно, чем в случае рассмотрения структуры с прямоугольным профилем канавки, однако она выражена слабо, что затрудняет ее обнаружение на дисперсионной кривой и в эксперименте.

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

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, состоят в следующем:

1. Проведено исследование трех методов управления дисперсионной характеристикой МОВ, оболочка которого образована из полых стеклянных трубок. При одновременном увеличении радиусов отверстий  $r$  в оболочке волокна значение дисперсионного коэффициента существенно увеличивается в длинноволновой области  $\lambda > 1.0$  мкм. При изменении значения расстояния между отверстиями  $\Lambda$  можно изменять как наклон дисперсионной характеристики, так и абсолютное значение коэффициента дисперсии. При этом на дисперсионной кривой в интервале длин волн  $0.8 < \lambda < 1.6$  мкм можно получить две области с нормальной дисперсией и область с аномальной дисперсией. При увеличении мольной доли двуокиси германия в стекле значение дисперсионного параметра уменьшается во всем рассматриваемом диапазоне значений длин волн, что позволяет смещать длину волны нулевой дисперсии.
2. В результате применения методики последовательного увеличения радиусов относительно радиуса отверстий в первом ряду оболочки волокна, оказывается возможным одновременное управление как абсолютной величиной коэффициента дисперсии, так и наклоном зависимости коэффициента дисперсии от длины волны. При этом появляется область длин волн с меньшим перепадом коэффициента дисперсии, по сравнению с волокном с фиксированным радиусом трубок в оболочке.
3. Путем прямого численного моделирования уравнений Максвелла показана возможность генерации уединенных импульсов при прохождении непрерывного излучения через нелинейную БР. По качественному поведению уединенные импульсы демонстрируют свойства солитонов, что проявляется в том, что уединенные импульсы распространяются с постоянной скоростью и амплитудой; скорость импульса растет, а его ширина уменьшается с ростом амплитуды; при взаимодействии между собой импульсы сохраняют свою форму и скорость, но происходит сдвиг в их пространственном положении; огибающая

импульса может быть хорошо аппроксимирована солитонным решением нелинейного уравнения Шрёдингера.

4. Детально изучены характеристики распространения щелевых солитонов в периодической структуре. Минимальное значение скорости ЩС составляло около 35% скорости распространения излучения в волноводе без решетки. Эффективность преобразования энергии непрерывного излучения в энергию солитонов может достигать 60-70%.

5. Для рассматриваемой планарной нелинейной БР на плоскости параметров амплитуда – частота входного сигнала выделены области с характерной динамикой распространения излучения: затуханием сигнала с частотой, ниже критической; распространением сигнала с частотой входного источника, превышающим верхнюю частоту отсечки; распространение сигнала в виде последовательности ЩС. При возбуждении БР сигналом постоянной амплитуды, частота которого лежит вблизи верхней границы полосы непропускания, существует возможность жесткого и мягкого начала генерации солитонов. При этом слева от верхней частоты отсечки первой запрещенной зоны линейной системы наблюдаются жесткие переходы при увеличении амплитуды – от режима непропускания к режиму солитонного туннелирования. Если же частота входного сигнала выбирается справа от критической, то при увеличении амплитуды генерация ЩС возникает мягко.

6. С помощью разработанной методики расчета электродинамических характеристик периодических ферромагнитных структур, основанной на реализации МКЭ, проведено численное моделирование и расчет дисперсионных характеристик ПМСВ в пленке ЖИГ, на верхней поверхности которой расположены периодически повторяющиеся канавки прямоугольной формы. Рассмотрен процесс распространения поверхностных магнитостатических волн, и детально изучено пространственное распределение электрического и магнитного полей в примитивной ячейке рассматриваемой ферромагнитной структуры в различных точках на дисперсионной кривой.

7. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными спектрами прохождения ПМСВ через микрополосковую линию, с неоднородностями, периодически нанесенными на верхнюю поверхность пленки ЖИГ. Показано хорошее соответствие расположения первых двух частотных зон непропускания в спектре периодической структуры, путем сравнения экспериментального спектра пропускания и положения зон непропускания на рассчитанной дисперсионной кривой.

8. Для распространяющейся в периодической ферромагнитной структуре поверхностной магнитостатической волны обнаружено совпадение групповой скорости и скорости переноса энергии. Рассчитанные значения групповой скорости согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

9. Обнаружено отсутствие проявления свойств невзаимности в распространении прямой и встречной поверхностных магнитостатических волн в структурах с прямоугольным и непрямоугольным профилем канавок на поверхности пленки ЖИГ, что объясняется локализацией магнитного поля на изломах периодической структуры для волны, распространяющейся в прямом и встречном направлениях.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Садовников А.В., Рожнёв А.Г.* Анализ распространения электромагнитных волн в устройствах на основе нелинейных брэгговских решеток // *Нелинейный мир*. М.: Радиотехника, 2011. № 3. Т. 9. С. 131 – 134.
2. *Садовников А.В., Рожнёв А.Г., Черняев М.П.* Расчёт и оптимизация дисперсионных характеристик оптических микроструктурированных волокон с поликапиллярной оболочкой // *Нелинейный мир*. М.: Радиотехника, 2011. № 2. Т. 9. С. 99 – 106.
3. *Садовников А.В., Рожнёв А.Г.* Анализ распространения щелевых солитонов в нелинейной брэгговской решетке // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 1. С. 23-30.
4. *Садовников А.В., Рожнёв А.Г.* Моделирование распространения магнитостатических волн в одномерных магнонных кристаллах // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. 2012. Т. 20, №. 1. С. 143–159.
5. *Sadovnikov A.V., Rozhnev A.G.* The dynamics of the electromagnetic wave propagation in the nonlinear Bragg grating structure // *Proc. of SPIE*. Vol. 7999, Pp. 79990C. 2010.
6. *Rozhnev A.G., Sadovnikov A.V.* Microstructured optical fiber with ultra-low dispersion // *Modeling in applied electromagnetics and electronics*. 2009. Issue 9. Saratov: Saratov University Press. Pp. 81–84.
7. *Садовников А.В., Черняев М.П.* Управление дисперсией микроструктурированных оптических волокон // *Сборник материалов научной школы–конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых–2008»*. Саратов: ООО ИЦ «Наука», 2009. С 163-166.
8. *Садовников А.В., Рожнёв А.Г.* Динамика распространения электромагнитных волн вблизи границы полосы прозрачности нелинейных брэгговских решеток // *Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2010. Материалы международной научно-технической конференции*. Саратов: Изд. центр «Наука», 2010. С. 222-227.
9. *Садовников А.В., Рожнёв А.Г.* Солитонное туннелирование электромагнитных волн в нелинейной брэгговской решетке // *Материалы IX Международной школы «Хаотические автоколебания и образование структур*. Саратов, 2010. С. 68.
10. *Садовников А.В., Рожнёв А.Г.* Расчет электродинамических параметров периодической магнитной структуры // *Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Материалы VI конференции молодых ученых*. Саратов: Изд-во Сарат. Ун-та. Саратов, 2011. С. 145-146.
11. *Садовников А.В., Рожнёв А.Г.* Моделирование распространения щелевых солитонов в нелинейной брэгговской решетке // *Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Материалы VI конференции молодых ученых*. Саратов: Изд-во Сарат. Ун-та. Саратов, 2011. С. 143–144.
12. *Sadovnikov A.V., Rozhnev A.G.* Nonlinear Dynamics of Gap Solitons Generation and Propagation in 2D Bragg Grating Structure // *3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics META'12*. France, Paris, Telecom ParisTech University, 2012. P. 42.
13. *Sadovnikov A.V., Rozhnev A.G., Sharaevsky Yu.P.* Electrodynamical characteristics of 1D magnonic crystal structure // *Days On Diffraction. International Conference. Abstracts*. Saint Petersburg, 2012. P. 165-166.