

На правах рукописи

**Матвеев Олег Валерьевич**

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СЛОИСТЫХ И  
МУЛЬТИФЕРРОИДНЫХ СТРУКТУРАХ НА  
ОСНОВЕ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ**

Специальность 01.04.03 — Радиоп физика

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Саратов — 2019

Работа выполнена на кафедре нелинейной физики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Научный руководитель: **Морозова Мария Александровна**,  
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Устинов Алексей Борисович**,  
доктор физико-математических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», профессор кафедры физической электроники и технологии

**Дудко Галина Михайловна**,  
кандидат физико-математических наук, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, старший научный сотрудник

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»**

Защита состоится 26 сентября 2019 г. в 17:30 на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 при Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского (410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III корпус СГУ, Большая физическая аудитория).

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич СГУ.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д. ф.-м. н., профессор

Аникин Валерий Михайлович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В настоящее время исследование композитных структур на основе тонких ферромагнитных пленок является актуальным направлением развития радиофизики. В таких структурах распространяются магнитостатические волны (МСВ), которые являются волнами прецессии магнитных моментов атомов в ферромагнетике. На основе ферромагнитных пленок могут быть созданы периодические структуры, подобные фотонным кристаллам, которые называют магنونными кристаллами (МК)<sup>1,2</sup>. Принципиальной особенностью периодических структур является наличие брегговских резонансов, которые приводят к возникновению запрещенных зон в спектре МСВ. Наличие запрещенных зон открывает широкие возможности по использованию МК в СВЧ устройствах функциональной обработки сигналов.

Нелинейные эффекты в ферромагнитных плёнках на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ) проявляются при сравнительно малых уровнях мощности порядка 1 мВт. К настоящему времени исследованы трехволновые параметрические взаимодействия в МК<sup>3</sup>, а также процессы четырёхволнового взаимодействия<sup>4,5</sup>. Показана возможность формирования солитонов на частотах, лежащих на краях запрещенной зоны МК, формирования щелевых солитонов на частотах, соответствующих центру запрещенной зоны и формирования солитонов в кольцевых автоколебательных системах. Также показана возможность нелинейного сдвига запрещенных зон, что приводит к эффекту «нелинейного переключения» МК, при котором периодическая структура начинает пропускать сигнал большой мощности на частотах, лежащих внутри запрещенной зоны<sup>6</sup>. Данная особенность позволяет рассматривать волноведущую структуру на основе

---

<sup>1</sup>Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Магنونные кристаллы и спиновые волны в периодических структурах // ДАН, Сер. Физика. – 2001. – Т. 380. – С. 469.

<sup>2</sup>Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. Magnonics // J. Phys. D, Appl. Phys. – 2006. – V. 43. – P. 264001.

<sup>3</sup>E.N. Beginin et al. Self-generation of chaotic dissipative soliton trains in active ring resonators with 1D magnonic crystals // IEEE Trans. on Magn. – 2011. – V. 80. – P. 264001.

<sup>4</sup>Ustinov A.B. et al. Formation of gap solitons in ferromagnetic films with a periodic metal grating // Phys. Rev. B. – 2010. – V. 81. – P. 180406.

<sup>5</sup>Sheshukova S.E., Morozova M.A., Beginin E.N. Formation of gap solitons in a finite magnonic crystal // Phys. Wave Phenom. – 2013. – V. 21. – P. 304.

<sup>6</sup>Ustinov A.B., Drozdovskii A.V., Kalinikov B.A. Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing // Appl. Phys. Lett. – 2010. – V. 96. – P. 142513.

МК в качестве нелинейного фазовращателя и усилителя отношения сигнал/шум.

Связанные структуры существенно расширяют функциональные возможности радиофизических систем, т.к. появляется дополнительный управляющий параметр - связь. Такие структуры широко используются как в микроволновой технике, так и в оптических системах. К настоящему времени показано, что наличие связи между однородными ферромагнитными плёнками приводит к таким нелинейным эффектам, как эффекты захвата, сопровождения и неустойчивости быстрого солитона, даёт возможность управлять режимами перехода к хаосу и автомодуляции<sup>7,8,9</sup>.

Использование композитных мультиферроидных структур на основе ферромагнитных пленок и сегнетоэлектриков открывает возможности для двойного электрического и магнитного управления характеристиками волн, распространяющихся в таких структурах. В структуре ферромагнитная пленка – сегнетоэлектрик при больших значениях диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика электромагнитные волны в сегнетоэлектрике оказываются сильно замедленными. В этом случае в структуре ферромагнитная пленка – сегнетоэлектрик на частотах, близких к частоте фазового синхронизма между электромагнитной волной и магнитостатической волной, возникают гибридные электромагнитно-спиновые волны<sup>10</sup>. В структуре ферромагнитная пленка - сегнетоэлектрик проявляются нелинейные свойства как магнитной, так и сегнетоэлектрической подсистем, причем они по-разному влияют на закон дисперсии и могут конкурировать и приводить к модуляционной неустойчивости<sup>11</sup>.

Таким образом, задачи, посвященные исследованию связанных волн в различных периодических нелинейных системах и средах, в том числе и в слоистых периодических ферромагнитных структурах,

---

<sup>7</sup> Морозова М.А. и др. Исследование эффектов самовоздействия магнитостатических волн в ферромагнитной структуре на основе системы уравнений Шредингера с когерентной или некогерентной связью // ФТТ. – 2012. – Т. 54. – С. 1478.

<sup>8</sup> Ueda T., Tsutsumi M. Nonlinear behavior of magnetostatic surface waves in ferrite-film multilayer structure // IEEE Trans. Magn. – 2002. – V. 38. – P. 3114.

<sup>9</sup> Шутый А.М., Семенцов Д.И. Квазисолитоны магнитостатических волн в двухслойной структуре при одномодовом возбуждении // ЖЭТФ. – 2005. – Т. 127. – С. 1207.

<sup>10</sup> Spin-electromagnetic waves in planar multiferroic multilayers / A.A. Nikitin et al. // J. Appl. Phys. – 2017. – V. 122. – P. 014102.

<sup>11</sup> Черкасский М.А., Никитин А.А., Калинин Б.А. Теория мультинелинейных сред и ее приложение к солитонным процессам в феррит-сегнетоэлектрических структурах // ЖЭТФ. – 2016. – Т. 149. – С. 839.

а также в слоистых периодических мультиферроидных структурах, являются важными и представляют значительный научный интерес для современной радиофизики и нелинейной динамики.

**Цель диссертационной работы** состоит в выявлении новых нелинейных и резонансных эффектов в слоистых периодических волноведущих структурах на основе ферромагнитных плёнок, магнетонных кристаллов и сегнетоэлектриков, а также механизмов связи как в линейных, так и в нелинейных режимах, которые позволят эффективно управлять волновыми процессами в таких структурах.

**Научная новизна работы.** Все результаты, включенные в диссертацию, являются новыми и получены впервые, в частности:

1. Построена волновая модель в виде системы четырёх нелинейных уравнений связанных волн, описывающая пространственно-временную эволюцию амплитуд огибающих прямых и отраженных волн в структуре двух связанных магнетонных кристаллов и структуре магнетонный кристалл – ферромагнитная плёнка.
2. Выявлен нелинейный механизм связи в слоистой структуре на основе связанных ферромагнитных плёнок. Нелинейная связь приводит к подавлению линейной перекачки сигнала между слоями структуры, что объясняется увеличением разности фаз распространяющихся волн при увеличении мощности входного сигнала. Показано, что пороговое значение мощности входного сигнала, необходимое для наблюдения указанного эффекта, определяется геометрическими и магнитными параметрами структуры, а также величиной магнитного поля.
3. В структуре двух связанных магнетонных кристаллов (МК-1 и МК-2) выявлен эффект двойного нелинейного переключения. Эффект заключается в следующем: если импульс подается в МК-1, то при малой амплитуде импульс отражается от МК-2. При увеличении амплитуды импульса имеет место первое переключение – импульс проходит через связанную структуру и выходит из МК-2, при дальнейшем увеличении амплитуды имеет место второе переключение – импульс выходит из МК-1. Определены условия, необходимые для наблюдения эффекта двойного нелинейного переключения.
4. Получены дисперсионные соотношения для гибридной электромагнитно-спиновой волны в мультиферроидных структурах магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик и магнетонный кристалл

– сегнетоэлектрик – магнетонный кристалл при касательном намагничивании. Выявлен механизм формирования дополнительных гибридных запрещенных зон в области первого брэгговского резонанса в таких структурах, связанный с взаимодействием прямых и отраженных быстрых и медленных гибридных электромагнитных-спиновых волн.

5. Выявлен механизм совместного действия электрической и магнитной нелинейности на характеристики запрещенных зон в структуре магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик. За счёт действия магнитной нелинейности уменьшается намагниченность ферромагнитной среды и гибридная зона сдвигается вниз по частоте, за счёт действия электрической нелинейности уменьшается диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрической среды и гибридная зона сдвигается вверх по частоте. Показано, что действие электрической нелинейности может компенсировать действие магнитной нелинейности на гибридную запрещенную зону. На основную запрещенную зону электрическая нелинейность не влияет.

6. Показана возможность динамического двойного (электрического и магнитного) управления характеристиками запрещенных зон в мультиферроидных структурах магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик и магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик - магнетонный кристалл. В частности, при увеличении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика, которая зависит от приложенного электрического поля, все запрещенные зоны сдвигаются вниз по частоте, а при увеличении напряженности магнитного поля, приложенного к ферромагнитному слою, все запрещенные зоны сдвигаются вверх по частоте.

**Научная и практическая значимость.** Полученные в работе результаты расширяют фундаментальные представления о физических процессах в связанных периодических магнитных и мультиферроидных структурах. В частности, построенная волновая модель, описывающая распространение магнитостатических волн в связанных магнетонных кристаллах, открывает возможность изучения широкого спектра нелинейных явлений, обусловленных влиянием связи и периодичности в слоистых периодических структурах на основе магнитных плёнок, а также может представлять интерес при исследо-

вании нелинейных явлений в связанных периодических структурах различной физической природы.

В прикладном плане выявленные эффекты, открывают широкие возможности для создания новых устройств спин-волновой электроники в диапазоне СВЧ с возможностью динамического управления характеристиками при изменении электрического и магнитного поля, а также мощности входного сигнала. В частности, на базе структуры связанных магнитных кристаллов возможно создание устройств пространственного разделения сигналов разного уровня мощности, подавления сигналов большой мощности, подавления слабых сигналов, выделения сигналов в некотором диапазоне мощностей. На основе связанных магнитного кристалла и ферромагнитной плёнки возможно создание устройства, позволяющего осуществлять частотное мультиплексирование/демультиплексирование сигналов в зависимости от способа возбуждения структуры.

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

1. Поведение огибающей магнитостатической волны в слоистой структуре, состоящей из двух магнитных кристаллов, в предположении, что связь между слоями носит электродинамический характер, а нелинейность каждого слоя обусловлена изменением продольной составляющей вектора намагниченности, можно описать на основе модели в виде четырёх нелинейных уравнений связанных волн для огибающих прямых и отраженных волн в каждом слое.
2. В слоистой структуре на основе связанных ферромагнитных плёнок существует пороговое значение мощности входного сигнала, при превышении которого наблюдается эффект подавления пространственной перекачки, обусловленный увеличением разности фаз между волнами в каждой плёнке вдоль направления распространения за счет действия нелинейности.
3. В слоистой структуре на основе связанных магнитных кристаллов при увеличении мощности входного сигнала имеет место эффект двойного нелинейного переключения, который обусловлен совместным проявлением эффекта нелинейного подавления перекачки (характерного для слоистых структур) и эффекта нелинейного сдвига запрещенной зоны (характерного для периодических структур).

4. В слоистых мультиферроидных структурах на основе магнетонных кристаллов и сегнетоэлектрика взаимодействие прямых быстрых и отраженных медленных гибридных электромагнитно-спиновых волн в структуре приводит к формированию дополнительных запрещенных зон в области первого брэгговского резонанса, по сравнению со структурами на основе магнетонных кристаллов.

**Личный вклад автора.** 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. Экспериментальные исследования выполнялись совместно с научным руководителем и Романенко Д.В.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием физически обоснованных теоретических моделей, широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя аналитических и численных методов. Достоверность также обеспечивается однозначным переходом от результатов, полученных для связанных периодических и мультиферроидных структур к широко представленным в литературе результатам исследований, касающихся процессов в одиночных ферромагнитных плёнках, связанных ферромагнитных плёнках, одиночных магнетонных кристаллах, неперiodических структурах ферромагнитная плёнка - сегнетоэлектрик, а также сравнением теоретических результатов с полученными в работе экспериментальными данными.

**Апробация работы и публикации.** Результаты, представленные в работе, докладывались на следующих всероссийских и международных конференциях: International Symposium «Spin Waves» (Санкт-Петербург, 2018 г.); Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) (Москва, 2017 г.); XXV-XXVIII Международные конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо) (Севастополь, 2015-2018 гг.); International Workshop Brillouin and Microwave Spectroscopy of Magnetic Micro- and Nanostructures (BrilMics) (Саратов, 2014 г.); VI Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism» (EASTMAG) (Красноярск, 2016 г.); XVII Всероссийская школа «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2016 г.); XIV, XV, XVII Всероссийские школы-семинары



«Физика и применение микроволн» (Красновидово, 2014 г., 2015 г., 2019 г.); IV Всероссийская конференция «Актуальные проблемы микро- и нанoeлектроники» (Уфа, 2016 г.); Всероссийские научные школы-семинары «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» (Саратов 2014-2018 гг.); XVI, XVII Международные зимние школы-семинары по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, 2015 г., 2018 г.); X, XI школы-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, 2013 г., 2016 г.); VIII–XIII конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2013–2018 гг.).

По результатам научной деятельности опубликовано 37 работ, включая 7 статей в рецензируемых журналах (из которых 5 статей в изданиях, входящих в международные наукометрические базы Web of Science и Scopus (из которых 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций), 2 статьи в других журналах), 8 статей в сборниках и 22 тезиса докладов. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Результаты работы были использованы при выполнении НИР, поддержанных проектами РФФИ (№13-07-12409-офи-м, №14-07-00273-а, №14-02-00577-а, №15-07-05901-а, №16-29-14021-офи-м, №18-37-00373-мол-а, №19-02-00075-а, №19-29-03049-мк), проектами РНФ (№16-19-10283, №19-79-20121).

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Полный объём работы составляет 168 страниц, включая 72 рисунка. Список литературы содержит 152 наименования.

## **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 волновые модели для описания нелинейных процессов при распространении магнитостатических волн в магнитных кристаллах, структуре на основе связанных

однородных плёнок и в структуре на основе связанных магнитных кристаллов.

Приведен обзор основных методов и подходов, используемых при разработке волновых моделей для магнитного кристалла, представляющего собой ферромагнитную пленку с периодической системой канавок. Приводятся результаты анализа и численного исследования нелинейного сдвига брэгговской запрещенной зоны и образование целевых солитонов, взятые как из литературных источников, так и полученные автором. Показано, что в такой структуре при увеличении амплитуды входного сигнала наблюдается эффект «нелинейного переключения» между режимами отражения и пропускания сигнала.

Приводятся результаты, касающиеся построения нелинейной волновой модели, описывающей распространение магнитостатических волн в слоистой структуре на основе двух однородных ферромагнитных плёнок, разделенных слоем диэлектрика (ФП-1/ФП-2) на длинах больших длины линейной перекачки. Показано, что при малой амплитуде входного сигнала наблюдается пространственная перекачка сигнала из одной плёнки в другую вдоль длины структуры, что характерно для любых пространственно-распределенных связанных систем. При увеличении амплитуды входного сигнала существует пороговое значение амплитуды, при котором сигнал делится поровну между плёнками и далее вдоль длины структуры перекачка не наблюдается. Выявлен эффект полного «подавления пространственной перекачки» в рассматриваемой структуре при уровне входного сигнала, значительно превышающем пороговый. Механизм данного эффекта обусловлен увеличением разности фаз между сигналами вдоль направления распространения в каждой пленке за счет действия нелинейности.

Приведен вывод оригинальной нелинейной волновой модели для описания эволюции амплитуд огибающих прямых  $A_{1,2}$  и отраженных  $B_{1,2}$  магнитостатических волн в слоистой структуре на основе двух МК, разделенных слоем диэлектрика (МК-1/МК-2). При построении модели предполагалось, что взаимное влияние волн в каждом МК осуществляется через высокочастотные магнитные поля (связь носит чисто электродинамический характер). Волна в окрестности первой зоны Бриллюэна в каждом МК представлялась в виде суперпозиции нулевой гармоники прямой волны и минус первой гар-

моники отраженной волны. Полученная система представляет собой нелинейную систему уравнений связанных волн:

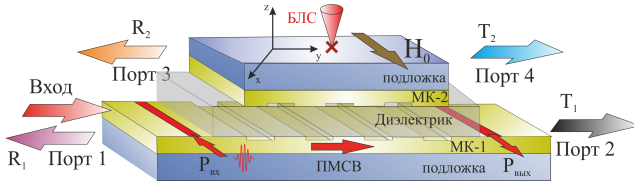
$$\begin{cases} j \left( \frac{\partial A_{1,2}}{\partial t} + V \frac{\partial A_{1,2}}{\partial y} \right) + \eta A_{1,2} + \chi A_{2,1} + \kappa B_{1,2} + \sigma B_{2,1} + \\ + \gamma (|A_{1,2}|^2 + 2|B_{1,2}|^2) A_{1,2} = 0; \\ j \left( \frac{\partial B_{1,2}}{\partial t} - V \frac{\partial B_{1,2}}{\partial y} \right) + \eta B_{1,2} + \chi B_{2,1} + \kappa A_{1,2} + \sigma A_{2,1} + \\ + \gamma (|B_{1,2}|^2 + 2|A_{1,2}|^2) B_{1,2} = 0, \end{cases}$$

где  $V$  - групповая скорость волны в однородной плёнке,  $\chi$  - коэффициент связи прямых (отраженных) волн в разных МК (т.е. между прямой (отраженной) волной в МК-1 и прямой (отраженной) волной в МК-2) и зависит от расстояния между МК (толщины диэлектрика),  $\kappa$  - коэффициент связи прямых и отраженных волн в одном МК (т.е. между прямой волной в МК-1 (МК-2) и отраженной волной в МК-1 (МК-2)), зависит от геометрии периодической «ячейки» МК,  $\sigma$  - коэффициент связи прямых и отраженных волн в разных МК (т.е. между прямой волной в МК-1 (МК-2) и отраженной волной в МК-2 (МК-1)), зависит от расстояния между МК и геометрии периодической «ячейки»,  $\eta$  - отстройка от частоты Брэгга,  $\gamma$  - коэффициент нелинейности. Найдены выражения для коэффициентов в полученной системе для случая нормального и касательного намагничивания ферромагнитных пленок.

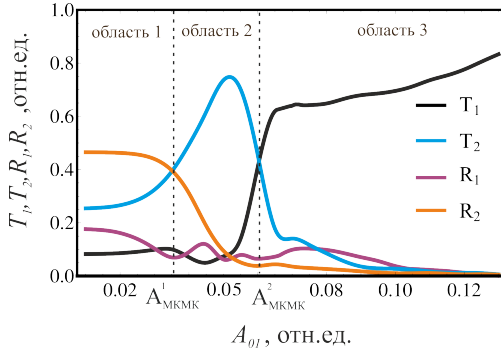
Во **второй главе** приводятся результаты численного моделирования особенностей распространения импульсов магнитоэлектрических волн в слоистых структурах на основе двух магнетонных кристаллов (МК-1/МК-2) (рис. 1а), а также магнетонного кристалла и ферромагнитной пленки (МК/ФП).

Показано, что нелинейные эффекты в структуре МК-1/МК-2 обусловлены одновременным проявлением эффекта «нелинейного переключения», характерного для МК, и эффекта «подавления пространственной перекачки», характерного для ФП-1/ФП-2. Основным нелинейным эффектом в структуре МК-1/МК-2 является эффект двойного нелинейного переключения при увеличении амплитуды входного сигнала  $A_{01}$  до пороговых значений  $A_{\text{МКМК}}^1$  и  $A_{\text{МКМК}}^2$ . Эффект заключается в следующем: при малой амплитуде ( $A_{01} < A_{\text{МКМК}}^1$ ) входной импульс, подаваемый в МК-1, отражается от МК-2; при увеличении амплитуды ( $A_{01} > A_{\text{МКМК}}^1$ ) имеет место первое переключение – импульс проходит через слоистую структуру и выходит из МК-2;

при дальнейшем увеличении амплитуды ( $A_{01} > A_{\text{МКМК}}^2$ ) имеет место второе переключение - импульс выходит из МК-1.



(а)



(б)

Рис. 1 — (а) Схема структуры МК-1/МК-2. (б) Зависимости коэффициентов пропускания для выходных портов от амплитуды входного сигнала.

Данный эффект позволяет рассматривать структуру МК-1/МК-2 в качестве базового элемента для систем многофункциональной обработки сигналов. Структура МК-1/МК-2 является четырехпортовой структурой с одним входом и четырьмя выходами (см. рис. 1а). На рис. 1б показаны зависимости коэффициентов пропускания каждого из портов 1, 2, 3, 4 ( $T_1, T_2, R_1, R_2$ , соответственно) от амплитуды входного сигнала  $A_{01}$ . Видно, что при снятии сигнала с порта 3 структура выполняет функции ограничителя мощности (оранжевая кривая на рис. 1б), при снятии сигнала с порта 4 имеет место выделение сигналов в некотором диапазоне мощностей (синяя кривая на рис. 1б), при снятии сигнала с порта 2 - подавление слабых сигналов (черная кривая на рис. 1б). При снятии сигнала со всех портов структура позволяет выполнять функции пространственного разделения сигналов разного уровня мощности: сигнал малой мощности будет выходить с порта 3, сигнал большой мощности - с порта 2, сигнал средней мощности - с порта 4.

Рассмотрен другой нелинейный эффект в структуре МК-1/МК-2 - формирование щелевых солитонов. Показано, что щелевые солитоны в слоистой структуре формируются только в некотором диапазоне значений параметров, характеризующих расстояние между МК и геометрию периодической «ячейки» МК. По мере распространения происходит перекачка энергии из одного слоя в другой, в результате чего возникают пульсирующие в противофазе солитоны, принадлежащие разным МК (см. рис. 2). Отличительной особенностью таких солитонов является то, что длина преобразования солитона в одном МК в солитон в другом МК отлична от длины перекачки импульсов в ФП-1/ФП-2 и зависит от геометрии периодической «ячейки» МК.

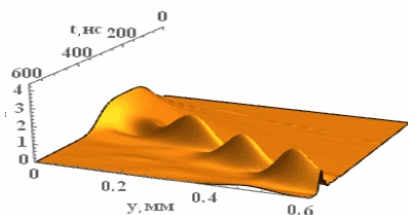


Рис. 2 — Пространственно-временная эволюция амплитуды огибающей в МК-1.

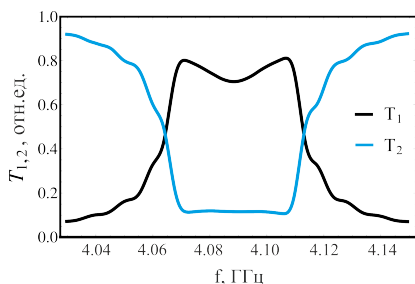


Рис. 3 — Зависимость коэффициентов пропускания ФП (черная кривая  $T_1$ ) и МК (синяя кривая  $T_2$ ) от частоты.

Рассмотрено распространение сигналов в структуре МК/ФП. На рис. 3 приведена зависимость коэффициентов пропускания для ФП, в которую подается сигнал, и МК от частоты входного сигнала. Видно, что такая структура обладает свойством частотного разделения сигналов по различным выходным портам. Данный эффект позволяет рассматривать структуру МК/ФП в качестве функционального элемента для систем мультиплексирования/демультиплексирования сигналов.

**Третья глава** посвящена исследованию слоистых периодических мультиферроидных структур, в частности, рассматриваются структуры типа магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик (МК/СЭ) и магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик - магнетонный кристалл (МК-1/СЭ/МК-2).

С использованием метода связанных волн получены дисперсионные соотношения для гибридных электромагнитно-спиновых волн (ГЭМСВ) в таких структурах. Показано, что добавление слоя СЭ приводит к увеличению количества запрещенных зон (ЗЗ).

В структуре МК/СЭ дисперсионная кривая для ГЭМСВ расщепляется на две ветви, соответствующие быстрой ГЭМСВ и медленной ГЭМСВ. За счет взаимодействия прямой и отраженной медленной ГЭМСВ образуется основная ЗЗ  $b$  (закрашенная область  $b$  на рис. 4). Механизм её формирования аналогичен механизму формирования ЗЗ в одиночном МК. За счет взаимодействия прямой быстрой ГЭМСВ и отраженной медленной ГЭМСВ образуется гибридная ЗЗ  $c$  (область  $c$ ). В одиночном МК такая зона не формируется.

В структуре МК-1/СЭ/МК-2 дисперсионная кривая для ГЭМСВ расщепляется на три ветви, соответствующие быстрой ГЭМСВ (ветви 1) и двум медленным ГЭМСВ (ветви 21, 22) (рис. 5). В результате на частотах фазового синхронизма прямых и отраженных ГЭМСВ происходит взаимодействие следующих типов волн:

- прямых и отраженных медленных ГЭМСВ (ветви 22 и 22', точка E), образуется основная запрещенная зона  $c$  (закрашенная область  $c$ );
- прямых и отраженных медленных ГЭМСВ (ветви 21 и 21', точка C), образуется основная ЗЗ  $e$  (область  $e$ );
- прямых и отраженных медленных ГЭМСВ (ветви 21 и 22', точка G; ветви 22 и 21', точка G'), образуется основная ЗЗ  $g$  (область  $g$ );
- прямой быстрой ГЭМСВ и отраженной медленной ГЭМСВ (ветви 1 и 21', точка D; ветви 1' и 21, точка D'), образуется гибридная ЗЗ  $d$  (область  $d$ );
- прямой быстрой ГЭМСВ и отраженной медленной ГЭМСВ (ветви 1 и 22', точка F; ветви 1' и 22, точка F'), образуется гибридная ЗЗ  $f$  (область  $f$ ).

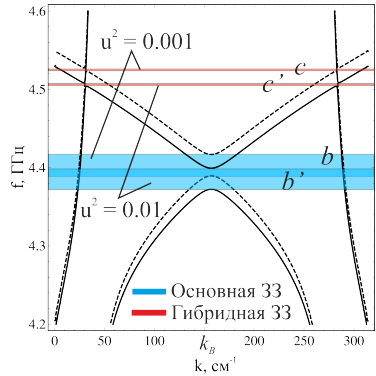


Рис. 4 — Дисперсионные характеристики ГЭМСВ в структуре МК/СЭ в линейном (штриховые кривые) и нелинейном (сплошные кривые) случаях.

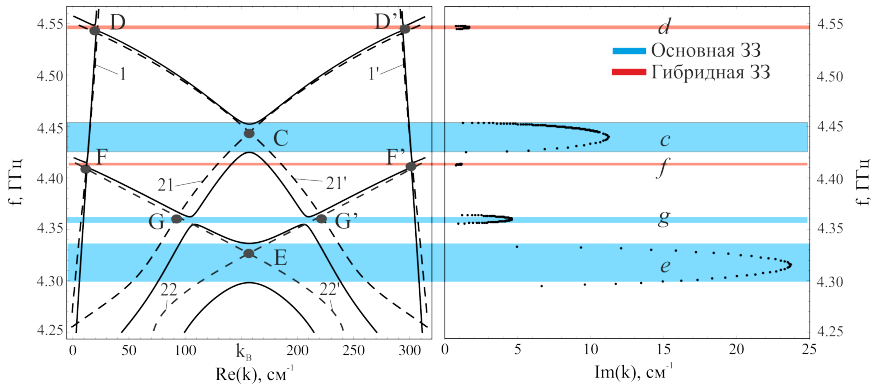


Рис. 5 — Дисперсионные характеристики ГЭМСВ в МК-1/СЭ/МК-2 в отсутствии связи между прямыми и отраженными волнами (штриховые кривые) и при наличии связи между волнами (сплошные кривые). Действительные части волнового числа слева, мнимые - справа.

Запрещенные зоны  $c$ ,  $e$ ,  $g$  (синие области) являются основными, т.к. они формируются за счёт взаимодействия медленных ГЭМСВ и механизм их формирования аналогичен механизму формирования ЗЗ в структуре МК-1/МК-2. Запрещенные зоны  $d$ ,  $f$  (красные области) являются гибридными, т.к. они формируются за счёт взаимодействия быстрых и медленных ГЭМСВ и в структуре МК-1/МК-2 такие зоны не формируются. Как видно из графика для мнимых частей волнового числа (рис. 5), затухание сигнала в основных зонах более значительное.

Существует возможность двойного управления характеристиками запрещенных зон: при увеличении диэлектрической проницаемости СЭ, зависящей от величины электрического поля, гибридные зоны расширяются, при этом все запрещенные зоны сдвигаются вниз по частоте; при увеличении магнитного поля все запрещенные зоны сдвигаются вверх по частоте.

Для волн в структуре МК/СЭ проведен учёт двух типов нелинейности в системе – магнитной и электрической. Показано, что учёт магнитной нелинейности приводит к сдвигу обеих запрещенных зон вниз по частоте, учёт электрической нелинейности приводит к сдвигу только гибридной запрещенной зоны вверх по частоте. Таким образом, влияние магнитной нелинейности на гибридную запрещенную зону может быть скомпенсировано электрической нелинейностью. Показано, что для структуры на основе пленки ЖИГ и пластины титаната бария-стронция (БСТ) влияние магнитной нелинейности

более существенно и гибридная запрещенная зона сдвигается вниз по частоте (рис. 4).

**Четвертая глава** содержит результаты экспериментального исследования нелинейных эффектов при распространении волн в структурах МК, ФП-1/ФП-2, МК-1/МК-2 и МК/СЭ. Экспериментальное исследование спин-волновых процессов в исследуемых структурах проводилось с использованием подхода, основанного на совмещении радиофизических методов и оптического зондового метода с использованием Мандельштам - Бриллюэновской спектроскопии.

Структура ФП-1/ФП-2 была сформирована на основе плёнок ЖИГ толщиной 12 мкм, разделенных слюдяной пластиной толщиной 50 мкм. Сигнал подавался на вход ФП-1. На рис. 6 приведены карты пространственного распределения интенсивности рассеянного света (пропорционального интенсивности магнитостатической волны) в ФП-2. При малой входной мощности видна картина чередующихся максимумов и минимумов (с пространственным периодом  $\lambda$ ) интенсивности вдоль направления распространения (рис. 6а), что объясняется периодической перекачкой сигнала между пленками. При большой мощности периодическое распределение сигнала в пленках не наблюдается. Часть сигнала перекачивается из ФП-1 в ФП-2, однако обратной перекачки не наблюдается (рис. 6б). Выберем точку наблюдения в максимуме сигнала в ФП-2 при малом уровне сигнала, например, на расстоянии  $l = 3\lambda/2$  от входа. На данной длине весь сигнал, который подавался в ФП-1, перекачался в ФП-2. На рис. 6в приведена зависимость коэффициентов пропускания ФП-1 и ФП-2 от мощности входного сигнала. Видно, что существует такая пороговая мощность  $P_{пл}^*$ , при которой коэффициенты пропускания равны. При уровне входного сигнала выше порогового, большая часть мощности сосредоточена в ФП-1. Следовательно, при такой входной мощности имеет место эффект «подавления пространственной перекачки», что было теоретически показано в главе 1.

Структура МК-1/МК-2 была сформирована на основе магнетонных кристаллов, разделенных слоем слюды толщиной 50 мкм. МК-1 и МК-2 представляли собой плёнки ЖИГ толщиной 12 мкм, на поверхности которых создана периодическая система канавок с периодом 200 мкм, шириной канавки 100 мкм, глубиной 1 мкм (см. рис. 1а). Рабочая частота выбиралась в центре запрещенной зоны структуры. В такой структуре, в отличие от ФП-1/ФП-2, периодическое чередо-



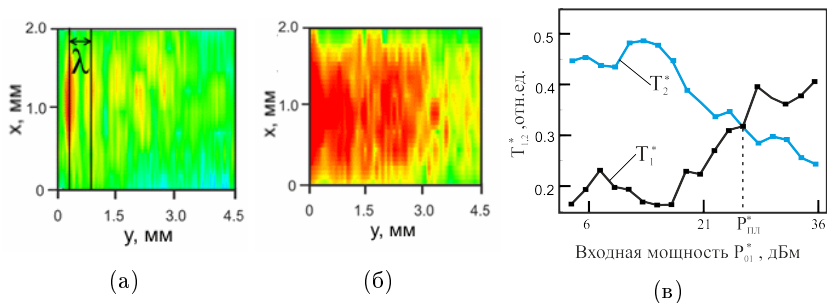


Рис. 6 — Распределение интенсивности магнитостатических волн в ФП-2 при входной мощности (а) 6 дБм, (б) 36 дБм. (в) Зависимости коэффициентов пропускания для ФП-1 (черная кривая) и ФП-2 (синяя кривая) от мощности входного сигнала.

вание максимумов и минимумов интенсивности имеет место только в некотором диапазоне мощностей входного сигнала (рис. 7а).

Выберем точку наблюдения в максимуме сигнала в МК-2, например, на расстоянии  $l = 3\lambda/2$  от входа. Для этого сечения построены передаточные характеристики каждого из выходных портов для такой структуры, показанные разным цветом (рис. 7б). Видно, что существуют два пороговых значения мощности  $P_{МКМК}^{1*}$  и  $P_{МКМК}^{2*}$ , при которых меняется динамика системы. Можно выделить три области: большая часть сигнала выходит через порт 3 при малой мощности, через порт 4 – при средней, через порт 2 – при большой. Данный эффект был теоретически исследован в главе 2.

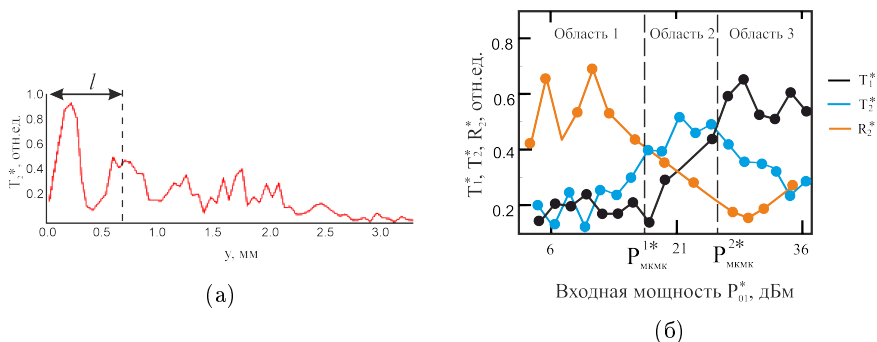


Рис. 7 — Зависимость коэффициентов пропускания (а) от продольной координаты для МК-2 при мощности входного сигнала  $P_{01}^* = 20$  дБм; (б) от мощности входного сигнала для порта 2 (черная кривая), порта 3 (оранжевая кривая), порта 4 (синяя кривая) от мощности сигнала.

Для формирования мультиферроидной структуры МК/СЭ в качестве слоя СЭ использовалась пластина БСТ толщиной 500 мкм, диэлектрической проницаемостью 4000. На амплитудно-частотной характеристике МК (черная кривая на рис. 8а) видны два провала соответствующие первой и второй основным брэгговским запрещенным зонам (основная зона (1) и основная зона (2)).

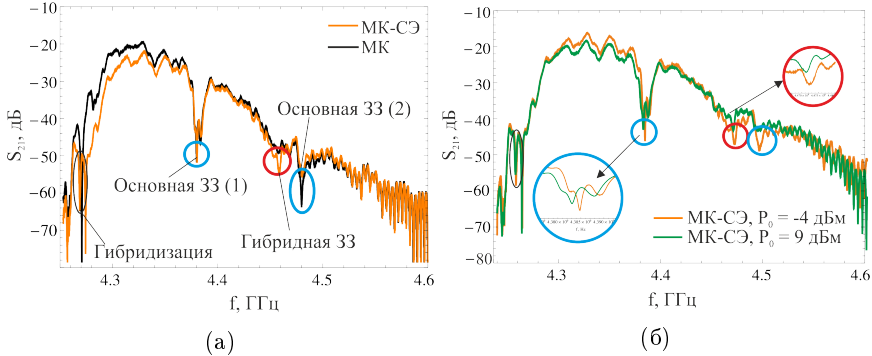


Рис. 8 — Амплитудно-частотные характеристики (а) поверхностной МСВ в МК (черная кривая) и ГЭМСВ в структуре МК/СЭ (оранжевая кривая) при мощности входного сигнала -4 дБм; (б) ГЭМСВ в структуре МК/СЭ при мощностях входного сигнала -4 дБм (оранжевая кривая) и 9 дБм (зеленая кривая).

При наложении слоя СЭ на МК на амплитудно-частотной характеристике структуры (оранжевая кривая на рис. 8а) появляется дополнительный провал, соответствующий гибридной запрещенной зоне. Формирование гибридной зоны теоретически было объяснено в главе 3. Увеличение мощности входного сигнала приводит к сдвигу всех запрещенных зон вниз по частоте (рис. 8б).

## Основные результаты и выводы

1. Построена нелинейная волновая модель, описывающая распространение магнитоэлектрических волн в структуре на основе связанных однородных плёнок. Выяснен механизм влияния нелинейной связи между волновыми процессами в такой структуре при увеличении уровня входного сигнала. Показано, что при уровне входного сигнала, значительно превышающем пороговый, наблюдается эффект полного «подавления пространственной перекачки» в рассматриваемой структуре. Основной

механизм данного эффекта обусловлен увеличением разности фаз между сигналами в каждой плёнке за счет действия нелинейности. Эффект подавления перекачки наблюдался экспериментально для структуры на основе плёнок ЖИГ с использованием методики Мандельштам - Бриллюэновской спектроскопии посредством послышной визуализации пространственно-временной эволюции интенсивности магнитостатической волны. Пороговое значение мощности входного сигнала составляло 21 дБм.

2. На основе метода связанных волн, построена нелинейная волновая модель, описывающая распространение волн в периодической связанной ферромагнитной структуре в виде двух связанных МК. Волновая модель представляет собой систему четырёх нелинейных уравнений связанных волн, описывающих линейную и нелинейную связь между прямыми и отраженными волнами в каждом слое структуры. Показано, что в окрестности первого брэгговского резонанса характер волновой эволюции определяется двумя линейными коэффициентами связи: первый обусловлен связью между МСВ, распространяющимися в каждом слое (зависит от расстояния между слоями), второй определяется связью между прямыми и отраженными волнами, которая зависит от геометрических размеров периодической «ячейки», а также нелинейной связью.

3. На основе численного исследования полученной модели показано, что в структуре связанных МК в зависимости от коэффициентов связи реализуются различные режимы нелинейного переключения. Если коэффициенты связи близки по значениям реализуется эффект двойного нелинейного переключения. Основным механизмом данного эффекта является одновременное проявление нелинейных эффектов характерных для одиночного МК и для ФП-1/ФП-2, имеющих разные пороговые мощности. Эффект двойного переключения наблюдался при экспериментальном исследовании структуры МК-1/МК-2 методом Мандельштам - Бриллюэновской спектроскопии. Пороговые значения мощности входного сигнала составляли 14 дБм и 28 дБм, соответственно. Эффект двойного нелинейного переключения позволяет использовать структуру МК-1/МК-2 в качестве элемента нелинейного СВЧ устройства для многофункциональной обработки сигналов, осуществляющего подавление слабого сиг-

нала, подавление сигнала большой мощности, выделение сигнала в заданном диапазоне мощностей, пространственное разделение сигналов разного уровня мощности.

4. При распространении МСВ в структуре МК/ФП в линейном случае возможен эффект частотного разделения/объединения сигнала. Если многочастотный сигнал подается в ФП, то сигнал на частотах, лежащих вне запрещенной зоны, выходит из МК, а сигнал на частотах запрещенной зоны выходит из ФП. Данная структура может быть положена в основу устройства демультимплексирования сигналов. Если сигнал на частоте запрещенной зоны подается в ФП, а на частотах вне запрещенной зоны в МК, то структура осуществляет мультимплексирование сигнала и сигнал на всех частотах выйдет из ФП.

5. Построена модель, описывающая дисперсионные характеристики ГЭМСВ в мультиферроидной структуре МК/СЭ. Показана возможность формирования дополнительной гибридной запрещенной зоны в области первого брэгговского резонанса. Основным механизмом формирования гибридной запрещенной зоны является взаимодействие на частотах фазового синхронизма прямой быстрой ГЭМСВ и отраженной медленной ГЭМСВ. Показана возможность двойного (электрического и магнитного) управления характеристиками запрещенных зон. Для структуры на основе плёнки ЖИГ и пластины БСТ экспериментально подтверждено формирование двух запрещенных зон (основной на частоте 4.4 ГГц и гибридной на частоте 4.49 ГГц), отстроенных друг относительно друга на 90 МГц. Получено хорошее соответствие экспериментальных и теоретических результатов.

6. Построена теоретическая модель, описывающая дисперсионные характеристики ГЭМСВ в структуре МК-1/СЭ/МК-2. В такой структуре связь между МК является электрически управляемой за счёт изменения величины электрического поля, приложенного к СЭ. В этом случае формируется пять запрещенных зон, три из которых формируются за счёт взаимодействия прямых и отраженных медленных ГЭМСВ и являются основными, а две формируются за счёт взаимодействия прямых быстрых и отраженных медленных ГЭМСВ и являются гибридными. При увеличении диэлектрической проницаемости СЭ гибридные зоны расширяются и все запрещенные зоны сдвигаются вниз по

частоте, при увеличении магнитного поля все запрещенные зоны сдвигаются вверх по частоте.

7. Получено дисперсионное соотношение для ГЭМСВ в структуре МК/СЭ с учётом электрической и магнитной нелинейности. Показано, что учёт магнитной нелинейности приводит к сдвигу основной и гибридной запрещенных зон вниз по частоте. Учёт электрической нелинейности приводит к сдвигу только гибридной запрещенной зоны вверх по частоте. Для структуры на основе плёнки ЖИГ и пластины БСТ экспериментально показано, что увеличение мощности входного сигнала до 9 дБм приводит к нелинейному сдвигу обеих запрещенных зон вниз по частоте на величину порядка 2 МГц. Получено хорошее соответствие экспериментальных и теоретических результатов.

### Основные публикации по теме диссертации

A1. Morozova M.A. Suppression of periodic spatial power transfer in a layered structure based on ferromagnetic films / M.A. Morozova, D.V. Romanenko, O.V. Matveev // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – V. 466. – P. 119-124.

A2. Морозова М.А. Распространение импульсов в нелинейной системе на основе связанных магнетонных кристаллов / М.А. Морозова, О.В. Матвеев, Ю.П. Шараевский // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58. – С. 1899-1906.

A3. Морозова М.А. Управление запрещенными зонами в слоистой структуре магнетонный кристалл-сегнетоэлектрик-магнетонный кристалл / М.А. Морозова, О.В. Матвеев, Ю.П. Шараевский // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58. – С. 266-272.

A4. Morozova M.A. Propagation of nonlinear pulses of magnetostatic waves in coupled magnonic crystals / M.A. Morozova, O.V. Matveev // Physics of Wave Phenomena. – 2015. – V. 23. – P. 114-121.

A5. Morozova M.A. Numerical modeling of wave processes in coupled magnonic crystals with periods shifted relative to each other / M.A. Morozova, A.Yu. Sharaevskaya, O.V. Matveev // Physics of Wave Phenomena. – 2016. – V. 24. – P. 1-6.

A6. Матвеев О.В. Нелинейные эффекты в связанных магнетонных кристаллах / О.В. Матвеев, М.А. Морозова // Ученые записки физического факультета МГУ. – 2014. – Т. 4. – С. 67-69.

- A7. Матвеев О.В. Электрическое управление дисперсионными характеристиками гибридных волн в структуре магнотонн кристалл – сегнетоэлектрик – магнотонн кристалл / О.В. Матвеев, М.А. Морозова // Ученые записки физического факультета МГУ. – 2015. – Т. 4. – С. 154335.
- A8. Matveev O.V. Nonlinear waves in coupled magnonic crystals / O.V. Matveev, M.A. Morozova, Y.P. Sharaevskii // International Workshop «Brillouin and Microwave Spectroscopy of Magnetic Micro- and Nanostructures». – Saratov, 2014. - P. 37.
- A9. Матвеев О.В. Нелинейные дисперсионные характеристики гибридных волн в мультиферроидных структурах / О.В. Матвеев, М.А. Морозова // XVI Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. – Саратов, 2015. – С. 102.
- A10. Матвеев О.В. Функциональная обработка СВЧ-сигналов на основе периодических магнитных материалов / О.В. Матвеев, М.А. Морозова // Сборник материалов 25-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2015. – С. 556-557.
- A11. Matveev O.V. Nonlinear dispersion characteristics of hybrid spinelectromagnetic waves in two-layered multiferroics / O.V. Matveev, M.A. Morozova // VI Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» (EASTMAG-2016). – Krasnoyarsk, 2016. – P. 582.
- A12. Morozova M.A. Nonlinear phenomena in layered structures based on magnonic crystals / M.A. Morozova, O.V. Matveev, D.V. Romanenko // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM). - Moscow, 2017. – P. 215.
- A13. Morozova M.A. Nonlinear directional coupler based on coupled magnonic crystals: theory and experment / M.A. Morozova, O.V. Matveev, D.V. Romanenko // International Symposium «Spin Waves 2018». - Saint Petersburg, 2018. - P. 132.
- A14. Матвеев О.В. Исследование особенностей распространения целевых солитонов в структуре связанных магнотонных кристаллов / О.В. Матвеев, М.А. Морозова // Сборник материалов 28-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2018. – С. 891-897.