

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

**Нелинейные явления в слоистых и мультиферроидных структурах на  
основе магнитных кристаллов**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 курса

направления 03.06.01 «Физика и астрономия»

факультета нелинейных процессов

Матвеев Олег Валерьевич

Научный руководитель

д.ф.-м.н, профессор

\_\_\_\_\_ Ю.П. Шараевский

Саратов 2017

## 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 спиновые волны (СВ), которые являются волнами прецессии магнитных моментов атомов в ферромагнетике. На основе ферромагнитных пленок могут быть созданы периодические структуры, подобные фотонным кристаллам (см. работы Кашьяпа Р., Кившаря Ю.С., Агравала Г.П., Сухорукова А.П.), которые называют магнотонными кристаллами (МК). Принципиальной особенностью периодических структур является наличие брэгговских резонансов, которые приводят к возникновению запрещенных зон в спектре СВ. Наличие запрещенных зон открывает широкие возможности по использованию МК в СВЧ устройствах функциональной обработки сигналов. Особенности распространения волн в таких структурах подробно исследована в работах Ю.В. Гуляева, С.А. Никитова, Б.А. Калиникоса, Б. Хиллебрандса, В.В. Кругляка, М. Кравчика, Ю.А. Филимонова, Ю.П. Шараевского.

Нелинейные эффекты в ферромагнитных плёнках на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ) проявляются при сравнительно малых уровнях мощности порядка 1 мкВт. К настоящему времени исследованы трехволновые параметрические взаимодействия в МК и процессы четырехволнового взаимодействия в таких системах. 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 запрещённых зон, что приводит к эффекту «нелинейного переключения МК», при котором периодическая структура начинает пропускать сигнал большой мощности на частотах, лежащих внутри запрещённой зоны. Данная особенность позволяет рассматривать волноведущую структуру на основе МК в качестве нелинейного фазовращателя и усилителя отношения сигнал/шум.

Необходимо отметить, что связанные структуры существенно расширяют функциональные возможности радиofизических систем, т.к. появляется дополнительный управляющий параметр – связь. Такие структуры широко используются как в микроволновой технике, так и в оптических системах. В случае двух связанных волноведущих ферромагнитных структур связь приводит к появлению быстрой и медленной волн, распространяющихся с различными групповыми и фазовыми скоростями, характеристиками которых можно управлять путем изменения величины связи.

К настоящему времени показано, что наличие связи между однородными ферромагнитными плёнками приводит к таким нелинейным эффектам, как эффект захвата, сопровождения и неустойчивости быстрого солитона, даёт возможность управлять режимами перехода к хаосу и автомодуляции. В частности, в связанных однородных структурах имеет место эффект подавления линейной перекачки мощности между плёнками в структуре при большом уровне мощности.

Использование мультиферроидных структур на базе ферромагнитных пленок открывает возможности для управления дисперсионными характеристиками СВ, распространяющихся в ферромагнетике. Первые работы по исследованию таких структур, в частности структуры ферромагнитная пленка – сегнетоэлектрик (ФП-СЭ) относятся к 80-м годам прошлого века (Анфиногенов В.Б., Зильберман П.Е., Гуляев Ю.В., Калиникос Б.А.). При больших значениях диэлектрической проницаемости СЭ, которая зависит от приложенного постоянного электрического поля, электромагнитные волны (ЭМВ) в СЭ оказываются сильно замедленными, и в этом случае в структуре ФП-СЭ на частотах, близких к частоте фазового синхронизма между ЭМВ и СВ, возникают гибридные электромагнитно-спиновые волны (ГЭМСВ). Интерес к таким структурам был возобновлен в последние годы (Демидов В.Е., Устинов А.Б., Никитов С.А.) в связи с развитием технологий производства керамических сегнетоэлектриков (титанат бария ( $\text{BaTiO}_3$ ), титанат стронция( $\text{SrTiO}_3$ )) с широким диапазоном перестраиваемой диэлектрической

проницаемости. Необходимо отметить, что к настоящему времени эффекты гибридизации волн в структурах ФП-СЭ исследованы достаточно подробно при возбуждении различных типов СВ, а также показана возможность создания на их основе СВЧ-устройств с двойным управлением.

Таким образом, задачи, которые рассматриваются в данной научно-квалификационной работе и посвященные исследованию связанных волн в различных периодических нелинейных системах и средах, в том числе и в слоистых периодических ферромагнитных структурах, а также в слоистых периодических мультифероидных структурах, являются важными и представляют значительный научный интерес. Это позволяет считать тему работы актуальной для современной радиофизики и нелинейной динамики.

**Цель работы** состоит в исследовании нелинейных, нестационарных и резонансных процессов в новом классе слоистых периодических волноведущих структур на основе ферромагнитных плёнок, магнетонных кристаллов и сегнетоэлектриков и возможности управления этими процессами за счёт изменения связи между слоями, магнитного и электрического поля.

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

1. Разработка нелинейной волновой модели для исследования распространения импульсов спиновых волн в структуре связанных магнетонных кристаллов и структуре магнетонный кристалл – однородная плёнка.

2. Численное исследование основных нелинейных эффектов на основе полученной модели, таких как нелинейные переключения и формирование щелевых солитонов.

3. - Разработка математических моделей для описания дисперсионных свойств гибридных электромагнитных спиновых волн в структурах магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик и магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик - магнетонный кристалл.

4. Исследование дисперсионных характеристик ГЭМСВ в таких структурах, в том числе особенностей формирования запрещенных зон в

зависимости от величины магнитного и электрического полей, а также мощности входного сигнала.

5. Проведение экспериментальных исследований радиофизическими методами и методом бриллюэновской спектроскопии основных эффектов, полученных в результате теоретического исследования, для структур МК-МК и МК-СЭ.

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

1. Построена волновая модель в виде системы четырёх связанных нелинейных уравнений связанных мод для исследования эффектов самовоздействия в структуре двух связанных магнетонных кристаллов и структуре магнетонный кристалл – однородная плёнка. Показано, что в окрестности первого брэгговского резонанса характер волновой эволюции определяются двумя коэффициентами связи: электродинамическим, обусловленным связью между МСВ, распространяющимися в каждом МК, а также за счёт связи между прямыми и встречными волнами, которая зависит от геометрических размеров периодической «ячейки».

2. Показано, что в структуре двух связанных магнетонных кристаллов в зависимости от коэффициентов связи имеют место различные режимы разделения сигнала по портам связанной структуры при увеличении входной мощности. Если длина структуры кратна половине длины линейной перекачки, входной импульс подается в первый магнетонный кристалл, а также коэффициент связи между слоями структуры много больше коэффициента между прямой и отраженной волнами, то при малой амплитуде сигнал перекачивается во второй магнетонный кристалл. При большой входной амплитуде сигнал проходит через первый магнетонный кристалл: наблюдается, так называемый, “заграждающий режим”, имеет место одно нелинейное переключение. Если коэффициент связи между слоями структуры много меньше коэффициента связи между прямой и отраженной волнами, то при малой мощности подаваемый импульс отражается

от второго магнетонного кристалла, при большой – проходит через второй магнетонный кристалл. Также имеет место одно нелинейное переключение.

3.. Показано, что в структуре двух связанных магнетонных кристаллов возможен эффект двойного нелинейного переключения, если коэффициенты связи близки по значениям. Эффект заключается в следующем: если длина структуры равна половине длины линейной перекачки и импульс подается в первый магнетонный кристалл, то при малой входной мощности импульс отражается от второго магнетонного кристалла. При увеличении входной мощности имеет место первое переключение – импульс проходит через связанную структуру и выходит из первого магнетонного кристалла, при дальнейшем увеличении амплитуды имеет место второе переключение – импульс выходит из второго магнетонного кристалла. На основе этого эффекта основана принципиальная схема многофункционального нелинейного ответвителя, в котором можно управлять распределением сигналов на портах структуры.

4. Получено дисперсионное соотношение для гибридной электромагнитной спиновой волны в слоистой структуре магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик. Показано, что в такой структуре имеет место формирование дополнительной запрещенной зоны в области первого брэгговского резонанса. Дополнительная гибридная запрещенная зона формируется за счёт гибридизации прямой электромагнитной волны в сегнетоэлектрике и встречной магнитостатической волны в магнетонном кристалле. При увеличении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика дополнительная запрещенная зона сдвигается вниз по частоте и расширяется.

5. Получено нелинейное дисперсионное соотношение для гибридной электромагнитной спиновой волны в слоистой структуре магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик. Показано, что учет нелинейности приводит к сдвигу обеих запрещенных зон вниз по частоте.

6. Показано, что возможно двойное (электрическое и магнитное) управление характеристиками запрещенных зон в структуре магнетонный

кристалл - сегнетоэлектрик – магнетонный кристалл. В частности, при увеличении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика 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** работы состоит в следующем: результаты работы, касающиеся вывода нелинейных уравнений, описывающих распространение магнитостатических волн в связанных магнетонных кристаллах, и результаты их анализа открывают возможность изучения широкого спектра нелинейных явлений, обусловленных влиянием связи и периодичности, в новом классе распределённых систем – слоистых периодических структурах на основе ферромагнитных плёнок, а также могут представлять интерес при исследовании аналогичных явлений в связанных системах различной физической природы. В частности, для слоистых периодических структур показана возможность эффекта двойного нелинейного переключения в зависимости от параметров связи и периодичности, а также определен диапазон параметров, при которых возможно формирование щелевых солитонов в таких структурах. Результаты работы, касающиеся построения модели для слоистых мультиферроидных периодических структур, открывают новые возможности по электрическому управлению резонансными эффектами в таких структурах.

В прикладном плане полученные результаты открывают возможности для создания новых устройств спинволновой электроники в диапазоне сверхвысоких частот. В частности, показано, что структура МК-МК может быть положена в основу устройств нелинейного ответвления, выделения сигналов определенной мощности. Особенность частотной селекции сигналов в структуре МК-ФП может быть полезна при разработке устройств частотного мультиплексирования/ демультиплексирования; показана возможность электрического управления положением запрещенных зон в спектре гибридных волн в структурах МК-СЭ и МК-СЭ-МК, что актуально при создании электрически управляемых СВЧ-фильтров.

**Достоверность результатов** работы обеспечивается использованием физически обоснованных теоретических моделей, широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя аналитических и численных методов, однозначным переходом от результатов, полученных для связанных периодических структур либо связанных периодических мультиферроидных структур, к широко представленным в литературе результатам исследований, касающихся процессов в одиночных однородных структурах, а также сравнением теоретических результатов с полученными в работе экспериментальными данными.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 117 страниц текста, включая иллюстрации. Список литературы включает 141 наименование.

**Первая глава** посвящена обзору физических и математических основ теории спиновых волн, методов теоретических исследований слоистых и периодических структур. Приводится вывод системы нелинейных волновых уравнений для амплитуд огибающих волн структуре двух связанных однородных плёнок с учётом керровского типа нелинейности. На основе приведенной системы рассматриваются основные нелинейные эффекты в такой структуре, в частности эффект подавления перекачки мощности между слоями связанной структуры при увеличении мощности входного сигнала. С использованием метода связанных волн приводится вывод системы нелинейных уравнений для огибающих прямой и встречной волн в одиночном МК. Обсуждается механизм формирования запрещенных зон в такой структуре. На основе приведенной системы описывается нелинейный сдвиг запрещенной зоны, приводящий к такому нелинейному эффекту, как нелинейное переключение, в результате которого структура начинает пропускать сигнал на частотах запрещенной зоны. Описывает также формирование целевых солитонов огибающей в запрещенной зоне МК при увеличении мощности входного сигнала. Основным отличительным свойством таких солитонов

является то, что их скорость меньше групповой скорости в однородной плёнке и растёт с увеличением амплитуды.

На основе указанных теоретических методов произведена разработка оригинальной нелинейной волновой модели для описания эволюции амплитуд огибающих прямых  $A_{1,2}$  и встречных  $B_{1,2}$  спиновых волн в структуре на основе связанных МК, которая представляет собой нелинейную систему уравнений связанных мод и имеет следующий вид:

$$i \left( \frac{\partial B_{1,2}}{\partial t} - V_g \frac{\partial B_{1,2}}{\partial y} \right) + \eta B_{1,2} + \chi B_{2,1} + \kappa A_{1,2} + \chi_i A_{2,1} + \gamma (|B_{1,2}|^2 + 2|A_{1,2}|^2) B_{1,2} = 0$$

$$i \left( \frac{\partial A_{1,2}}{\partial t} + V_g \frac{\partial A_{1,2}}{\partial y} \right) + \eta A_{1,2} + \chi A_{2,1} + \kappa B_{1,2} + \chi_i B_{2,1} + \gamma (|A_{1,2}|^2 + 2|B_{1,2}|^2) A_{1,2} = 0$$

где  $V_g$  - групповая скорость в однородной плёнке,  $\chi$  - коэффициент связи прямых (встречных) волн в связанных МК (т.е. между прямой (встречной) волной в МК 1 и прямой (встречной) волной в МК 2),  $\kappa$  - коэффициент связи прямых и встречных волн в одном МК (т.е. между прямой волной в МК 1 (МК 2) и встречной волной в МК 1 (МК 2) и наоборот),  $\chi_i$  - коэффициент связи прямых и встречных волн в связанных МК (т.е. между прямой волны в МК 1 (МК 2) и встречной волны в МК 2 (МК 1) и наоборот),  $\eta$  - отстройка от частоты Брэгга,  $\omega_B$  - частота, соответствующая постоянной распространения Брэгга,  $\gamma$  - коэффициент нелинейности.

Во **второй главе** приводятся результаты численного моделирования распространения магнитостатических волн в структуре двух связанных магнетонных кристаллов на основе построенной модели. Нелинейные эффекты в такой структуре обусловлены одновременным проявлением таких нелинейных эффектов, характерных для одиночного МК и для двух связанных однородных плёнок, как нелинейный сдвиг запрещенной зоны и подавление линейной перекачки мощности между слоями структуры. На рис. 1 показаны передаточные характеристики четырех портов структуры (зависимости

коэффициентов пропускания каждого из портов от амплитуды входного сигнала  $A_{01}$ ). Основным нелинейным эффектом в такой структуре является эффект двойного нелинейного переключения. Этот эффект проявляется в том, что в зависимости от входной амплитуды, один из коэффициентов пропускания больше остальных, т.е. большая часть мощности выходит через один из портов связанной структуры, кроме того, существует два значения амплитуды  $A_{01}$  при которых происходит переключение между выходными портами. В связи с этим структура МК-МК может выполнять функции ограничителя мощности, может выделять сигнал в некотором диапазоне мощностей либо подавлять сигналы малой мощности. Эта особенность может быть использовано при создании устройств нелинейного ответвления в СВЧ-диапазоне.

Результаты экспериментального исследования такой структуры методом бриллюэновской спектроскопии приведены на рис. 2, видно, что полученные передаточные характеристики имеют хорошее качественное соответствие с результатами численного моделирования.

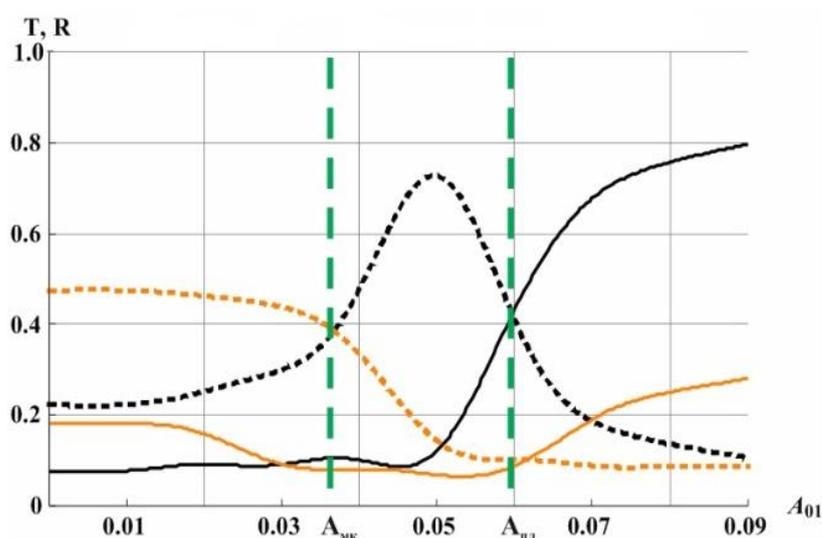


Рис. 1. Зависимости коэффициентов передачи выходных портов структуры МК-МК от амплитуды входного сигнала.

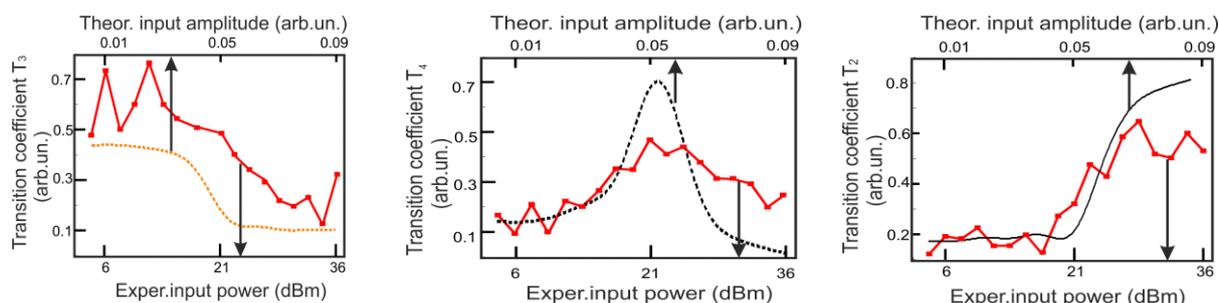


Рис. 2. Экспериментальные (сплошные кривые) и теоретические (штриховые кривые) зависимости коэффициентов передачи портов структуры МК-МК от мощности входного сигнала

Также в этой главе показана возможность использования полученной математической модели для исследования структуры связанных магнетонного кристалла и однородной ферромагнитной пленки. На рис. 3 приведена зависимость коэффициентов пропускания для однородной плёнки, в которую подается сигнал (сплошная кривая), и МК (пунктирная кривая) от частоты входного сигнала. Видно, что такая структура обладает свойством частотного разделения сигналов по различным выходным портам. Это свойство может быть использовано при создании устройств частотного мультиплексирования/демультиплексирования.

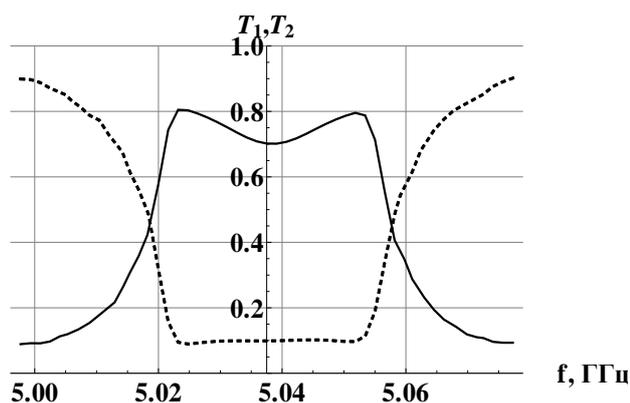


Рис. 3. Зависимость коэффициентов передачи выходных портов структуры МК-ФП от частоты

Во второй главе также рассмотрен другой нелинейный эффект – формирование щелевых солитонов (ЩС). Показано, что по мере распространения происходит перекачка энергии из одного слоя в другой, в результате чего возникают пульсирующие в противофазе квазисолитоны

принадлежащие разным МК. Отличительной особенностью таких солитонов является то, что длина преобразования солитона в одном МК в солитон в другом МК отлична от длины перекачки энергии в связанных однородных плёнках. Кроме того, показано, что щелевые солитоны формируются только в некотором диапазоне значений параметров, характеризующих связь между слоями и характер периодичности МК.

**Третья глава** посвящена исследованию слоистых периодических мультиферроидных структур, в частности, рассматриваются структуры типа МК-СЭ и МК-СЭ-МК. С использованием метода связанных волн построены математические модели в виде дисперсионных соотношений для гибридных волн в таких структурах. Показано, что добавление слоя СЭ в связанную структуру приводит к увеличению количества запрещенных зон, формирующихся в области первого брэгговского резонанса. В частности, возможно формирование двух зон для структуры МК-СЭ, трёх запрещенных зон в симметричной структуре МК-СЭ-МК и пяти зон в несимметричной структуре МК-СЭ-МК. Последний случай показан на рис. 4 (в структуре МК-МК спектр спиновых волн содержит только две запрещенные зоны).

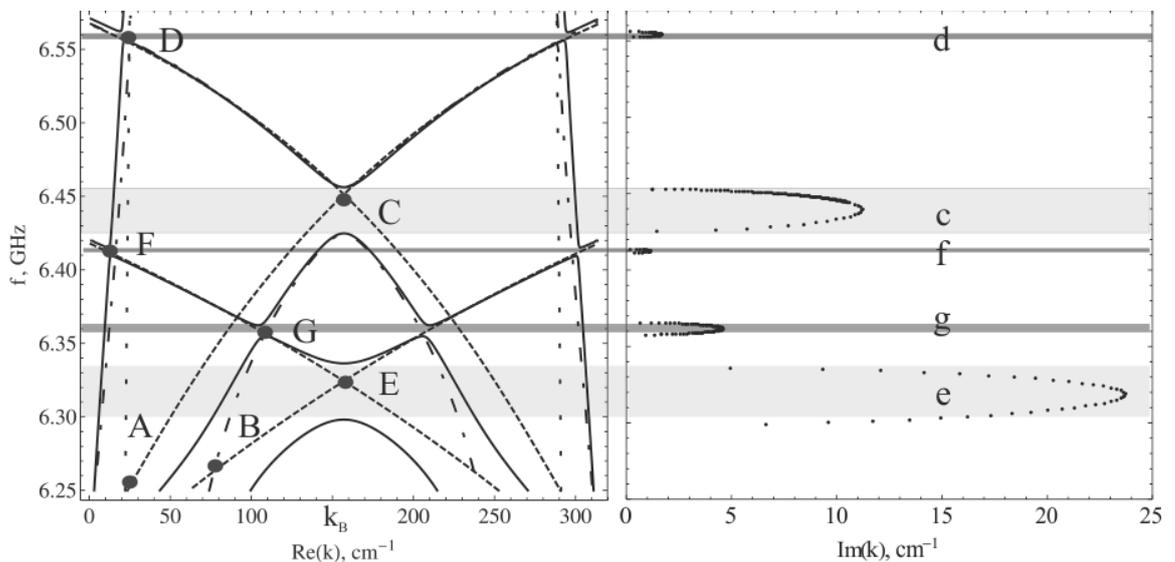


Рис. 4. Дисперсионные характеристики ГЭМСВ в структуре МК-СЭ-МК (сплошные кривые, слева), мнимые части решений дисперсионного уравнения (справа). На график нанесены ЭМВ (пунктиром) и МСВ (штрихом) в изолированных слоях, дисперсия ГЭМСВ в структуре МК-СЭ (штрих-пунктир)

Приведены результаты исследования возможности управления числом, положением и шириной этих запрещенных зон при изменении величины магнитного и электрического поля.

Также в третьей главе приводятся результаты исследований формирования запрещенных зон с учётом магнитной и электрической нелинейности. Показано, что увеличение амплитуды входного сигнала приводит к сдвигу запрещенных зон вниз по частоте. На рис. 5а показана дисперсионная характеристика ГЭМСВ в структуре МК-СЭ в линейном (штриховые кривые) и нелинейном (сплошные кривые) случаях. На рис. 5б показаны экспериментальные амплитудно-частотные характеристики, на которых видно наличие дополнительной запрещенной зоны в полосе первого брэгговского резонанса, а так же сдвиг запрещенных зон при увеличении мощности входного сигнала.

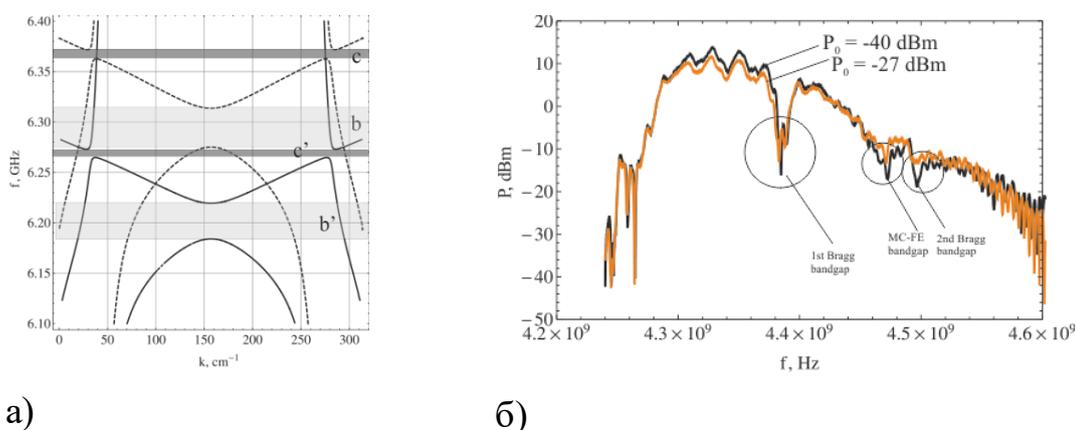


Рис. 5. Дисперсионные характеристики ГЭМСВ в структуре МК-СЭ в линейном (штриховые линии) и нелинейном режиме (сплошные) (а), экспериментальная АЧХ структуры МК-СЭ при мощности  $P = -40$  dBm (темная кривая),  $P = -27$  dBm (светлая кривая).

## ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Поведение огибающей магнитостатической волны в связанной (слоистой) системе, состоящей из двух магнетонных кристаллов (или магнетонного кристалла и однородной ферромагнитной плёнки), в предположении, что связь носит электродинамический характер и нелинейность каждого слоя зависит

только от переменной намагниченности этого слоя, можно описать на основе модели в виде четырёх связанных нелинейных уравнений связанных мод. В полученной модели связь приводит не только к изменению значений групповой скорости волн, коэффициентов дисперсии и нелинейности в уравнениях, но и к появлению перекрёстных членов, т.е. к появлению нелинейной связи между прямыми и отраженными волнами в слоях структуры.

2. В связанной периодической ферромагнитной структуре имеет место эффект двойного нелинейного переключения, который заключается в следующем: если длина структуры кратна половине длины линейной перекачки и импульс подается в первый магнетонный кристалл, то при малой входной мощности импульс отражается от второго магнетонного кристалла. При увеличении входной мощности имеет место первое переключение – импульс проходит через связанную структуру и выходит из первого магнетонного кристалла, при дальнейшем увеличении амплитуды имеет место второе переключение – импульс выходит из второго магнетонного кристалла. Таким образом, в зависимости от входной амплитуды импульсы выходят через разные порты связанной структуры. В зависимости от выбора выходного порта структура двух связанных магнетонных кристаллов может выполнять функции ограничителя мощности, подавителя малых сигналов либо выделять сигналы с мощностью в некотором диапазоне значений.

3. В слоистой структуре магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик имеет место формирование двух запрещенных зон в области первого брэгговского резонанса. Основным механизмом формирования основной запрещенной зоны является взаимодействие прямой и отраженной магнитостатических волн в магнетонном кристалле, дополнительная гибридная запрещенная зона формируется за счёт гибридизации прямой электромагнитной волны в сегнетоэлектрике и встречной магнитостатической волны в магнетонном кристалле. Учет нелинейности приводит к сдвигу обеих запрещенных зон вниз по частоте.

4. В слоистой структуре магنونный кристалл - сегнетоэлектрик - магنونный кристалл имеет место формирование пяти запрещенных зон в области первого брэгговского резонанса, две из которых строго соответствуют условию брэгговского резонанса, а три обусловлены гибридизацией магнитостатической волны и электромагнитной волны и расширяются с увеличением диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. В слоистой структуре магنونный кристалл - сегнетоэлектрик – магنونный кристалл за счет изменения связи между ферромагнитными слоями существует функциональная возможность двойного управления (электрическим и магнитным полями) плотностью и характеристиками запрещенных зон в спектре распространяющихся волн.

### **ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

Проведенное исследование показало, что композитные структуры на основе магنونных кристаллов и сегнетоэлектрических пластин обладают рядом уникальных нелинейных эффектов, а также существенно расширяют функциональные возможности систем, построенных на базе тонких ферромагнитных пленок.

Показано, что в структуре двух связанных магنونных кристаллов имеет место наличие как запрещенных зон, характерных для периодических структур, так и перекачка энергии между слоями, характерная для слоистых структур. Причем в такой структуре имеет место зависимость распределения волн по слоям в зависимости от амплитуды входного сигнала. Если представить структуру МК-МК как четырехпортовое устройство, то в зависимости от геометрии, могут наблюдаться различные режимы переключения между выходными портами в зависимости от амплитуды входного сигнала.

На базе структуры МК-МК могут быть реализованы устройства нелинейного ответвления сигнала, ограничения сигналов, нелинейного выделения сигналов средней мощности, нелинейного подавления сигналов малой мощности. Данные эффекты подтверждены в ходе экспериментального исследования такой структуры.

Наличие слоя сегнетоэлектрика, размещенного на одиночном магнетонном кристалле или разделяющего два магнетонных кристалла, приводит к тому, что такие структуры становятся мультиферроидными и в них могут распространяться гибридные электромагнитно-спиновые волны.

В структуре МК-СЭ спектр гибридных волн содержит две запрещенные зоны в полосе первого брэгговского резонанса, в структуре МК-СЭ-МК образуются три запрещенные зоны для случая идентичных МК и пять запрещенных зон для случая различных МК.

Возможность электрического управления спектром ГЭМСВ в мультиферроидной структуре позволяет создавать электрически управляемые устройства в СВЧ-диапазоне, такой способ управления может оказаться более простым и энергоэффективным по сравнению с магнитным управлением. В ходе экспериментального исследования подтверждена выводу относительно спектра гибридных волн в структуре МК-СЭ, а также исследована зависимость положения запрещенных зон от мощности входного сигнала.

### **АПРОБАЦИЯ И ПУБЛИКАЦИИ РАБОТЫ.**

Результаты, представленные в работе, докладывались на следующих школах, семинарах и конференциях:

- VIII–XI конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2013–2017 гг.);
- X–XI школы-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, 2013, 2016 гг.);
- XVII всероссийская школа «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2016 г.);
- XIV–XVI всероссийские школы-семинары «Физика и применение микроволн» (Красновидово, 2014–2016).
- XXV, XXVI международные конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо) (Севастополь, 2015, 2016 гг.);

- VI Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism» (Krasnoyarsk, 2016)
- IV Всероссийская конференция Актуальные проблемы микро- и наноэлектроники (Уфа, 2016 г.)
- “Brillouin and Microwave Spectroscopy of Magnetic Micro- and Nanostructures – BrillMics” (Saratov, 2014)

Результаты диссертации были использованы при выполнении НИР, поддержанных, проектами РФФИ (гранты №№ 13-07-12409-офи-м, № 14-07-00273-а, 15-07-05901-а, 16-29-03120-офи м), проектом РНФ (грант № 16-19-10283).

По результатам работы опубликовано 23 работы, включая 4 статьи в российских и международных журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций [1-4], 2 статьи в других журналах [5-6] и 17 тезисов докладов [7-23].

## **СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. Morozova M. A, Matveev O. V. Propagation of Nonlinear Pulses of Magnetostatic Waves in Coupled Magnonic Crystals // Phys. Wave Phenom.— 2015 . — Vol. 23, no. 2 . — Pp . 114–121 .
2. Morozova M. A, Sharaevskaya A, Yu. Matveev O. V, Beginin E. N, Sharaevskii Yu. P. Numerical modeling of wave processes in coupled magnonic crystals with periods shifted relative to each other // Phys. Wave Phenom. — 2016. — Vol. 24, no. 2 . — Pp . 1–6 .
3. Морозова М.А, Матвеев О. В, Шараевский Ю.П, Никитов С.А . Управление запрещенными зонами в слоистой структуре магнонный кри-сталл- сегнетоэлектрик-магнонный кристалл // ФТТ. — 2016. — Т. 58, № 2 . — С . 266–272 .
4. Морозова М.А, Матвеев О. В, Шараевский Ю.П. Распространение импульсов в нелинейной системе на основе связанных магнонных кристаллов // ФТТ. — 2016. — Т. 58, № 10. — С . 1899–1906.

5. Морозова М.А, Матвеев О. В. Нелинейные эффекты в связанных магнонных кристаллах // Ученые записки физического факультета МГУ.—2014. — Т. 4. — С . 144324.

6. Морозова М.А, Матвеев О. В. Электрическое управление дисперсионными характеристиками гибридных волн в структуре магнонный кристалл – сегнетоэлектрик – магнонный кристалл // Ученые записки физического факультета МГУ. — 2015. — Т. 4. — С. 154335.

7. Матвеев О. В, Морозова М. А. Нелинейные эффекты при распространении магнитостатических волн в связанных магнонных кристаллах //Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых "Нанопотоника, наноэлектроника, нелинейная физика" . — Саратов: Издательство Саратовского университета, 2013. — С . 158

8. Матвеев О. В., Морозова М. А. Нелинейное переключение в структурах на основе связанных магнонных кристаллов и ферромагнитных пленок // Тезисы докладов X школы-конференции "Хаотические автоколебания и образование структур" . — 2013.

9. Матвеев О. В., Морозова М. А., Шараевский Ю. П. Нелинейные эффекты в связанных магнонных кристаллах // Материалы Всероссийской научной школы-семинара "Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами" . — Саратов: Саратовский источник, 2014. — С . 53.

10 . Matveev O. V., Morozova M. A., Sharaevskii Yu. P. Nonlinear waves incoupled magnonic crystals // Book of Abstracts "International Workshop Brillouin and Microwave Spectroscopy of Magnetic Micro- and Nanostructures " . — Saratov: Publishing center " Nauka 2014.

11. Матвеев О. В., Морозова М. А. Дисперсионные характеристики структуры магнонный кристалл – сегнетоэлектрик - магнонный кристалл // Тезисы докладов IX Всероссийской конференции молодых ученых

"Нанопотоника, наноэлектроника, нелинейная физика". — Саратов: Издательство Саратовского университета, 2014. — С . 104.

12. Матвеев О. В., Морозова М. А. Нелинейные дисперсионные характеристики гибридных волн в мультиферроидных структурах // Материалы XVI Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. — Саратов: Издательство Саратовского университета, 2015 . — С . 102 .

13. Матвеев О. В., Морозова М. А. Дисперсионные характеристики поверхностных магнитостатических волн в структуре магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик - магнетонный кристалл // Материалы Всероссийской научной школы-семинара " Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами" . — Саратов: Саратовский источник, 2015 . — С . 55 .

14. Матвеев О. В., Морозова М. А. Функциональная обработка СВЧ-сигналов на основе периодических магнитных материалов // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015) . Севастополь, 6—12 сентября 2015 г.: материалы конф. в 2 т. — Севастополь: 2015. — С . 556.

15. Матвеев О. В., Морозова М. А. Нелинейный направленный ответчик на основе связанных магнетонных // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). Севастополь, 6—12 сентября 2015 г.: материалы конф. в 2 т. — Севастополь: 2015 . — С . 545 .

16. Матвеев О. В., Морозова М. А. Управление запрещенными зонами гибридных электромагнитно-спиновых волн в слоистых мультиферроидных структурах // Тезисы докладов X Всероссийской конференции молодых ученых " Нанопотоника, наноэлектроника, нелинейная физика".—Саратов: Издательство "Техно-Декор 2015. — С. 96.

17. Матвеев О. В., Морозова М. А. Нелинейные дисперсионные характеристики гибридных волн в двухслойных мультиферроиках // «НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ – 2016» XVII научная школа 27 февраля - 4 марта 2016 года, Нижний Новгород ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ (электронная версия) . — 2016. — С. 98.

18. Матвеев О. В., Морозова М. А. Система связанных магнонных кристаллов для функциональной обработки нелинейных СВЧ сигналов // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016) . Севастополь, 4—10 сентября 2016 г. — 2016.

19. Матвеев О. В., Морозова М.А. Нелинейные эффекты в слоистой мультиферроидной структуре Магнонный кристалл – сегнетоэлектрик //26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и теле-коммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016) . Севастополь, 4—10 сентября 2016 г. — 2016.

20. Матвеев О. В., Морозова М. А. Влияние нелинейных явлений на распространение волн в мультиферроидной структуре магнонный кристалл – сегнетоэлектрик // «Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика» : докл. XI Всерос. конф. молодых ученых. — Саратов: Издательство "Техно-Декор 2016. — С. 254.

21. Матвеев О. В., Морозова М. А. Нелинейное переключение в структурах на основе связанных магнонных кристаллов и ферромагнитных пленок // Материалы XI Международной школы-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2016) , 3-8 октября 2016, Саратов. — Саратов: Издательский центр " Наука 2016.

22. Матвеев О. В., Морозова М.А., Шараевский Ю.П. Исследование нелинейных дисперсионных характеристик гибридных электромагнитно-спиновых волн в мультиферроидной структуре магнонный кристалл - сегнетоэлектрическая пластина // Актуальные проблемы микро- и

нанoelectronics Сборник тезисов докладов IV Всероссийской научной молодежной конференции с международным участием. Уфа, С . 201 – 202.

23. Matveev O. V., Morozova M. A . Nonlinear dispersion characteristics of hybrid spin-electromagnetic waves in two-layered multiferroics // VI Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2016) : Abstracts. – Krasnoyarsk, Kirensky Institute of Physics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch. — 2016 . — P. 582 .