

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по научной и
исследовательской деятельности
Южного федерального университета
доктор химических наук, с.н.с.

А.В. Метелица

2019 г.



« 3 » сентября

ОТЗЫВ

ведущей организации ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» о диссертационной работе Матвеева Олега Валерьевича «Нелинейные явления в слоистых и мультиферроидных структурах на основе магнонных кристаллов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Магнонные кристаллы - периодические структуры, подобные фотонным кристаллам, которые могут быть созданы на основе ферромагнитных пленок. Принципиальной особенностью периодических структур является наличие брэгговских запрещенных зон в спектре волн, распространяющихся в данных структурах, что позволяет использовать магнонные кристаллы в частотно-селективных СВЧ устройствах.

В волноведущей структуре на основе магнонного кристалла имеет место эффект «нелинейного переключения», при котором она начинает пропускать сигнал большой мощности на частотах, лежащих внутри запрещённой зоны. Данная особенность позволяет рассматривать такую структуру в качестве нелинейного фазовращателя и усилителя отношения сигнал/шум.

Связанные структуры существенно расширяют функциональные возможности радиофизических систем, так как появляется дополнительный управляющий параметр – связь. Такие структуры широко используются как в

микроволновой технике, так и в оптических системах в качестве делителей мощности и направленных ответвителей.

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 связи с вышеизложенным тема диссертационной работы Матвеева О.В. достаточно **актуальна**. Тематика работы соответствует специальности 01.04.03 - «Радиофизика».

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 168 страниц и содержит 72 рисунка, список литературы состоит из 152 наименований.

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

В **первой главе** приводятся результаты анализа и численного исследования нелинейного сдвига брэгговской запрещенной зоны и образования брэгговских солитонов в магнетонном кристалле, представляющем собой ферромагнитную пленку с периодической системой канавок. 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 магнитоэлектрических волн в слоистой структуре на основе двух однородных ферромагнитных плёнок, разделенных слоем диэлектрика на длинах, больших длины линейной перекачки. Исследован нелинейный эффект подавления пространственной перекачки: наличие пороговой амплитуды сигнала при которой сигнал перестает перекачиваться между слоями структуры. Показано, что механизм данного эффекта обусловлен увеличением разности фаз между сигналами вдоль

направления распространения в каждой пленке за счет действия нелинейности.

Приведен вывод нелинейной волновой модели для описания эволюции амплитуд огибающих прямых и отраженных магнитостатических волн в слоистой структуре на основе двух магнетонных кристаллов, разделенных слоем диэлектрика в случаях нормального и касательного намагничивания.

Во **второй главе** приводятся результаты численного моделирования распространения импульсов магнитостатических волн в структуре на основе двух магнетонных кристаллов. Обнаружен эффект двойного нелинейного переключения, позволяющий использовать данную структуру в качестве базового элемента для систем функциональной обработки сигналов: подавления сигналов разного уровня мощности, нелинейного ответвления сигналов.

Кроме этого, численно исследовано распространение сигналов в структуре магнетонный кристалл - ферромагнитная пленка. Показано, что такая структура обладает свойством частотного разделения сигналов по различным выходным портам, что может быть использовано для создания систем мультиплексирования/демультиплексирования сигналов.

Третья глава посвящена исследованию слоистых периодических мультиферроидных структур, в частности, рассматриваются структуры типа магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик и магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик – магнетонный кристалл.

Построена модель для описания спектра гибридных электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в таких структурах. Показано, что в структуре магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик для гибридных электромагнитно-спиновых волн формируется дополнительная гибридная запрещенная зона в области первого брэгговского резонанса (помимо брэгговской запрещенной зоны магнетонного кристалла). Также 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.

В структуре магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик – магнетонный кристалл в случае идентичных магнетонных кристаллов в спектре волн имеет место формирование трёх запрещенных зон, в случае различных магнетонных кристаллов в спектре волн формируются пять запрещенных зон.

Четвертая глава содержит результаты экспериментального исследования нелинейных эффектов при распространении волн в структурах связанных ферромагнитных пленок, связанных магнетонных кристаллов, а также структуре магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик. Экспериментальное исследование проводилось с использованием радиофизических методов и оптического зондового метода с использованием Мандельштам - Бриллюэновской спектроскопии. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с выводами предложенных теоретических моделей.

В заключении представлены основные выводы и результаты, полученные в ходе работы.

К наиболее значимым научным результатам диссертационной работы следует отнести следующие:

1. Разработана нелинейная волновая модель, описывающая распространение магнитостатических волн в двухслойной периодической ферромагнитной структуре в случаях нормального и касательного намагничивания.

2. Выявлен механизм нелинейного эффекта подавления линейной перекачки сигнала между слоями структуры связанных ферромагнитных пленок, объясняющийся увеличением разности фаз распространяющихся волн при увеличении мощности входного сигнала.

3. Исследовано влияние связи между слоями структуры и характера периодичности МК на возникновение нелинейных эффектов в такой структуре. Обнаружен эффект двойного нелинейного переключения между выходами структуры связанных магнетонных кристаллов.

4. Построены модели, описывающие дисперсионные характеристики гибридных электромагнитно-спиновых волн (ГЭМСВ) в мультиферроидных структурах магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик и магнетонный кристалл - сегнетоэлектрик - магнетонный кристалл. Выявлены механизмы формирования полос непропускания в спектре гибридных электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в таких структурах.

Результаты работы имеют несомненную ценность для практики. В частности, нелинейные эффекты в структуре связанных магнетонных кристаллов могут быть использованы в устройствах пространственного разделения сигналов разного уровня мощности, подавления сигналов большой мощности, подавления слабых сигналов, выделения сигналов в некотором диапазоне мощностей. На основе слоистой структуры магнетонный кристалл - ферромагнитная плёнка возможно создание устройства, позволяющего осуществлять частотное мультиплексирование или демуплексирование сигналов в зависимости от способа возбуждения структуры. Исследование мультиферроидных структур открывают возможности для создания новых СВЧ устройств, управляемых электрическим и магнитным полем.

Достоверность результатов обеспечивается использованием физически обоснованных теоретических моделей, широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя аналитических и численных методов, использованием современной измерительной аппаратуры и апробированных методов измерений при экспериментальном исследовании, качественным и количественным соответствием выводов теории основным результатам, полученным экспериментально.

По содержанию диссертации Матвеева О.В. следует также сделать ряд замечаний:

1. В экспериментальной части работы в главе 4 подтверждены основные эффекты, обнаруженные при теоретическом исследовании. В частности, наглядно продемонстрирован эффект двойного нелинейного переключения. Однако, как показано в теоретической части, в структуре МК-

1/МК-2 возможен также эффект одиночного нелинейного переключения при параметрах структуры, лежащих в некотором диапазоне значений. Данный эффект также было бы интересно пронаблюдать экспериментально.

2. В работе рассматриваются два типа магнитостатических волн – прямые объемные и поверхностные магнитостатические волны. Однако, для общности картины было бы полезно рассмотреть также и третий тип магнитостатических волн – обратные объемные магнитостатические волны и осветить вопрос, будут ли для такого типа волн наблюдаться схожие нелинейные эффекты.

3. В теоретической части работы в главе 2 приводятся результаты расчетов для длины структуры равной $\lambda/2$ (где λ – длина пространственной перекачки волны между слоями структуры). Однако, при экспериментальных исследованиях в главе 4 длина структуры выбиралась равной $3*\lambda/2$. Выбор разной длины структуры при численных расчётах и при экспериментальных исследованиях требует пояснения.

4. В главе 3 приведены результаты исследования влияния двойной нелинейности (электрической и магнитной) в структуре МК/СЭ на положение основной и гибридной запрещенных зон. В то же время, при рассмотрении трёхслойной структуры типа МК-1/СЭ/МК-2 влияние нелинейности вообще не исследуется.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Автореферат достаточно полно отражает содержимое диссертации.

По материалам диссертации опубликовано 7 статей в журналах (из которых 4 статьи в российских и международных журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций), 1 статья в журнале, входящем в системы цитирования Web of Science и Scopus, 2 статьи в других журналах.

Результаты представленных в диссертации исследований могут быть рекомендованы к использованию в Институте радиотехники и электроники

им. Котельникова РАН (г. Москва), Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А., Саратовском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского», Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Южном федеральном университете (г. Ростов-на-Дону), Институте физики микроструктур РАН, Физико-техническом институт им. А.Ф. Иоффе, Московском энергетическом институте.

На основании приведенных фактов можно заключить, что диссертационная работа Матвеева Олега Валерьевича «Нелинейные явления в слоистых и мультиферроидных структурах на основе магнетонных кристаллов» удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Матвеев Олег Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - «Радиофизика».

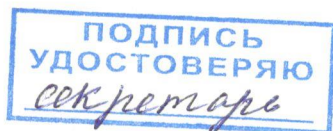
Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук (01.04.03 - «Радиофизика»), профессором, профессором кафедры радиофизики физического факультета Южного федерального университета Бабичевым Рудольфом Карповичем (344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5, тел.: +7(790) 347-01-75, e-mail: rbabichev@sfedu.ru).

Отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры радиофизики физического факультета ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» «30» августа 2019 г., протокол № 1.

Заведующий кафедрой
радиофизики ЮФУ,
д.ф.-м.н., профессор

Заргано Геннадий Филиппович

3.09.2019



Кейчева А.М.