



«СУТВЕРЖДАЮ»

Проректор ВГТУ по научной работе

Дроздов И.Г.

апреля 2019 г

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации *Снисаренко Дарьи Валерьевны* «Исследование магнитоэлектрического микроволнового эффекта в слоистых феррит – пьезоэлектрических структурах», представленной на соискание автором ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Современное развитие электронной техники, в частности, твердотельной электроники СВЧ, требует создания новых функциональных материалов, в том числе, материалов, обладающих значительным магнитоэлектрическим эффектом в диапазоне сверх высоких частот. Наиболее эффективными в этом отношении в настоящее время являются композиционные материалы, получаемые на основе ферритов и сегнетоэлектриков, в которых магнитоэлектрическое и электромагнитное взаимодействия реализуются благодаря упругим напряжениям, возникающим под действием электрического, или магнитного полей. Коэффициенты преобразования зависят от связности композита, размеров составляющих его компонентов, их электрических, механических, магнитных свойств и т.д. Разработка материалов с магнитоэлектрическим взаимодействием, совместимых с технологией радиоэлектронных устройств, в том числе в интегральном исполнении, проводится во многих исследовательских центрах.

В связи с этим актуальность диссертации *Снисаренко Д. В.*, целью которой явилось исследование слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах в диапазоне СВЧ в области магнитного резонанса не вызывает сомнения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Уточнено выражение для сдвига линии ферромагнитного резонанса слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры, находящейся под действием постоянного электрического поля.
2. Сделано сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей сдвига линии ферромагнитного резонанса под действием постоянного электрического поля.
3. Проведено теоретическое исследование магнитоэлектрического микроволнового эффекта в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре на основе биморфной пьезоэлектрической структуры и в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре на основе ферритовой фазы со ступенчатым изменением намагниченности, а также магнитоэлектрического микроволнового эффекта при воздействии на данные структуры электрическим полем с частотой электромагнитного резонанса.

4. Разработаны рекомендации по практическому использованию слоистых феррит-пьезоэлектрических структур в невзаимных СВЧ устройствах, работающих на магнитоэлектрическом микроволновом эффекте микроволновом эффекте.

На основании проведенных экспериментов и их анализа автором получен ряд важных, принципиально **новых результатов**, среди которых наиболее интересными, на наш взгляд, являются следующие:

1. Уточнено выражение для сдвига линии ферромагнитного резонанса (ФМР) слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры под действием постоянного электрического поля, что позволяет более точно определить ее зависимость от параметров слоистой структуры.

2. Показано, что использование биморфных пьезоэлектрических слоев в феррит-пьезоэлектрической структуре приводит к возрастанию сдвига линии ФМР по сравнению с феррит-пьезоэлектрической структурой, содержащей один пьезоэлектрический слой благодаря возникновению изгибных деформаций.

Отметим, что полученные в работе результаты представляются **достоверными**, а выводы и основные положения, выносимые на защиту – **обоснованными**, что, в частности, обеспечивается использованием апробированных методов теории конденсированных сред, обоснованностью принятых допущений, совпадением предельных переходов с известными ранее результатами, совпадением результатов теоретического исследования и компьютерного моделирования с экспериментальными данными.

Диссертационная работа включает в себя введение, три главы, заключение и список используемых литературных источников. Общий объем диссертации составляет 128 страниц машинописного текста, в том числе 18 рисунков и 5 таблиц. Список цитированной литературы содержит 127 наименований.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Изложенные в диссертации результаты достаточно хорошо обоснованы и прошли *апробацию* в ходе 8 международных и российских семинаров и конференций. На основе проведенных исследований опубликовано *14 работ*, из них *3 статьи* – в рецензируемых российских журналах из *перечня ВАК Минобрнауки РФ*, 8 публикаций в виде *тезисов докладов* всероссийских и международных конференций, получены *3 патента* на полезную модель.

Во введении сформулированы цели задачи, решаемые в диссертационной работе, показана их актуальность, новизна и практическая значимость. Изложены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов. Приведены сведения о структуре и объеме диссертации. Представлена информация об апробации материалов диссертации, публикациях, выделен личный вклад автора.

Первая глава работы посвящена литературному обзору по теме диссертации. Рассмотрены перспективные композиционные материалы для создания на их основе магнитоэлектрических СВЧ устройств, работающих на эффекте ферромагнитного резонанса, описаны основные физические свойства, достоинства и недостатки ферритмагнетиков и тонких пленок магнитных сплавов, а также пьезоэлек-

трических материалов на основе титаната свинца и бесвинцовых пьезоэлектрических материалов. Проведен обзор невзаимных и управляющих СВЧ устройств на основе магнитоэлектрических композитов.

Во **второй** главе изложены результаты теоретического исследования микроволнового магнитоэлектрического эффекта в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах, сделанные с учетом диссипации энергии в ферритовом слое.

Сделано сравнение теоретических и экспериментальных результатов расчета величины сдвига линии ферромагнитного резонанса с результатами компьютерного моделирования для двухслойной феррит-пьезоэлектрической структуры в форме диска состава железо иттриевый гранат - гадолиний-галлиевый гранат - PMN-PT.

Показано, что теоретическая зависимость, полученная без учета диссипации, при отношении толщины ферритовой фазы к толщине пьезоэлектрической фазы, равному (0,25...0,5), близка к линейной, а учет диссипации приводит к нелинейной зависимости сдвига линии ФМР от отношения толщин фаз слоистой структуры.

Представлены результаты теоретического исследования микроволнового магнитоэлектрического эффекта феррит-пьезоэлектрических структурах на основе неоднородных по составу фаз.

При построении теоретической модели микроволнового магнитоэлектрического эффекта в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре на основе биморфной пьезоэлектрической фазы в качестве модели рассматривается трехслойная структура, состоящая из ферритовой фазы с кубической ($m3m$) симметрией и двух соединенных вместе и поляризованных в противоположных направлениях слоев пьезоэлектриков. Слои композита расположены в плоскости (x, y), а ось z – перпендикуляр к плоскости композиционной структуры. Слои пьезоэлектрика поляризованы по нормали к плоскостям контактов (вдоль оси z), ось поляризации пьезоэлектрической фазы совпадает с осью [111] ферритовой фазы, электрическое поле прикладывается вдоль оси поляризации пьезоэлектрической фазы. Поверхности образца свободные, длина и ширина образца значительно больше его толщины.

Получены выражения для механических напряжений, индуцируемых в ферритовой фазе данных структур.

В **третьей** главе диссертации обсуждаются результаты исследования, проведенного методом компьютерного моделирования. Получены зависимости прямых и обратных потерь, а также вентиляльного отношения от толщины слоев слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры для различных моделей магнитоэлектрических СВЧ вентиля-аттенюаторов, реализованных на микрополосковой линии передачи, копланарном волноводе и щелевой линии передачи. На основе данных результатов разработаны рекомендации по выбору параметров конструкции МЭ СВЧ вентиля-аттенюаторов.

Представлены экспериментальные результаты исследования СВЧ вентиля-аттенюатора-фазовращателя на основе структуры ЖИГ – PMN-PT, реализованного на МПЛ, а также СВЧ вентиля-аттенюатора на основе структуры ЖИГ-ЦТС, реализованного на копланарном волноводе. Данные результаты очень хорошо согласуются с теоретическими и показывают перспективность практического использования слоистых феррит-пьезоэлектрических композитов в СВЧ устройствах с электрическим управлением, таких как фазовращатели, аттенюаторы и вентиля, реализованные на планарных линиях передачи.

Диссертация *Снисаренко Д. В.* имеет важное **практическое значение**.

Уточненные с учетом диссипации энергии формулы для сдвига линии ферромагнитного резонанса слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры под влиянием постоянного электрического поля позволяет более точно определить зависимость сдвига линии резонанса от отношения толщин слоев структуры. Кроме того, получены выражения для сдвига линии ферромагнитного резонанса в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах с одним и биморфным пьезоэлектрическими слоями, а также выражения для вычисления механических напряжений, индуцируемых в слое феррита феррит-пьезоэлектрической структуры со ступенчатым изменением намагниченности, которые позволяют определить величину сдвига линии ферромагнитного резонанса под влиянием постоянного электрического поля и переменного электрического поля, имеющего частоту электромеханического резонанса.

Эти соотношения могут быть использованы при конструировании элементов СВЧ электроники.

Соискателем предложен ряд конструкций принципиально новых устройств твердотельной СВЧ электроники, работающих на магнитоэлектрическом микроволновом эффекте «Вентиль сверхвысокочастотный магнитоэлектрический» (патент № 119940); «Аттенюатор магнитоэлектрический» (патент № 115125); «Компланарный вентиль-аттенюатор» (патент № 148921).

Разработаны практические рекомендации по выбору параметров конструкции планарных СВЧ вентилях-аттенюаторов на основе слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры и построены зависимости значений прямых потерь, обратных потерь и вентиляльного отношения от размеров феррит-пьезоэлектрической структуры для магнитоэлектрических СВЧ вентилях-аттенюаторов, реализованных на микрополосковой линии передачи, копланарном волноводе и щелевой линии передачи.

Данные результаты представляют несомненный интерес для научных центров и лабораторий, занимающихся синтезом и исследованиями новых функциональных материалов, обладающих пьезоэлектрическим и магнитоэлектрическим эффектами, а также электронных приборов на их основе. Они могут быть востребованы такими научными коллективами, как Московский технологический университет (МИЭРА) г. Москва, ЛЭТИ (г. С.-Петербург), ФТИ РАН им. Иоффе, г. С.-Петербург, и др.

Вместе с тем, диссертация не лишена **недостатков**, некоторые из которых отмечены ниже:

1. В диссертации отсутствует информация о методах и погрешностях измерения определяемых экспериментально физических величин.
2. При обсуждении слоистой системы феррит – пьезоэлектрик (стр.56) говорится о деформациях «растяжение – сжатие», тогда как очевидно должны быть и изгибные деформации.
3. В формулах (2.22) и (2.23) на стр. 56 и 57 не учитываются деформации, обусловленные пьезомодулем d_{32} , который в монокристалле PMN-PT не равен d_{31} .
4. В разделе «Научная новизна», пункт 4, написано: «Проведено теоретическое исследование МЭ микроволнового эффекта в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре на основе ферритовой фазы со ступенчатым изменением намагниченности и в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре на ос-

нове биморфной пьезоэлектрической фазы при воздействии на данную структуру электрическим полем с частотой ЭМР.» Однако в тексте диссертации этот вопрос, на наш взгляд, обсуждается недостаточно подробно.

5. Работа изобилует аббревиатурами, затрудняющими ее восприятие.

Вместе с тем, отмеченные недостатки не являются существенными и слабо влияют на общее хорошее впечатление от работы.

Заключение о диссертации

Диссертация *Снисаренко Д. В.* «Исследование магнитоэлектрического микроволнового эффекта в слоистых феррит – пьезоэлектрических структурах» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно и на высоком научном уровне. Диссертация соответствует критериям п.п. 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции 2017 г.), а её автор *Снисаренко Дарья Валерьевна* заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Отзыв о диссертации *Снисаренко Д. В.* обсуждён и утверждён на заседании кафедры физики твердого тела Воронежского государственного технического университета, протокол № 12 от 21 февраля 2019 года. Присутствовало на заседании: 11 человек. Результаты: «за» – 11 человек, «против» – 0 человек, «воздержались» – 0 человек.

Отзыв составлен профессором кафедры физики твердого тела, доктором физико-математических наук (специальность 01.04.07), профессором Коротковым Леонидом Николаевичем.

И.о. Заведующего кафедрой физики
твердого тела ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
технический университет» (ВГТУ),

к.ф.-м.н., доцент

Александр Викторович Костюченко

Служебный адрес и телефон: 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14 (ауд. 225); av-kostuchenko@mail.ru; телефон: +7 (473) 246-66-47.