НОВГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени ЯРОСЛАВА МУДРОГО

На правах рукописи

СНИСАРЕНКО ДАРЬЯ ВАЛЕРЬЕВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МИКРОВОЛНОВОГО ЭФФЕКТА В СЛОИСТЫХ ФЕРРИТ-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Специальность: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Великий Новгород – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и технология радиоаппаратуры» Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого» Татаренко Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

Кукушкин Сергей Арсеньевич - доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией Структурных и фазовых превращений в конденсированных средах, Институт Проблем Машиноведения Российской Академии Наук (ИПМаш РАН), Лауреат премии президиума РАН им. П.А. Ребиндера, премии А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург;

Карпенков Дмитрий Юрьевич – кандидат физико-математических наук, эксперт научно-образовательного центра энергоэффективности, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.

Защита состоится «21» марта 2019 года в 15-30 на заседании диссертационного совета Д 212.168.11 при Новгородском государственном университете имени Ярослава Мудрого по адресу: 173003, Великий Новгород, ул. Б. Санкт-Петербургская, д. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого.

Автореферат разослан «_____» _____2019 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.168.11 Коваленко Д. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы.

Магнитоэлектрический (далее – МЭ) микроволновый или МЭ эффект в СВЧ диапазоне в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах реализуется приложением электрического поля к пьезоэлектрической фазе, вследствие чего происходит обусловленный магнитоупругим эффектом сдвиг линии ферромагнитного резонанса (далее - ФМР) [1]. Как известно, в композиционных МЭ материалах МЭ эффект наблюдается при комнатной температуре и может быть на несколько порядков выше, чем в однофазных материалах, а слоистые композиционные структуры в сравнении с объемными композитами являются более перспективными из-за отсутствия тока утечки, легкости поляризации и большего пьезоэлектрического эффекта [2].

В полученном ранее выражении для сдвига линии ФМР при приложении электрического поля к феррит-пьезоэлектрической структуре в СВЧ диапазоне [2] не учтены потери, таким образом, для точного расчета величины сдвига выражение для расчета данной величины необходимо уточнить учетом потерь.

Современное развитие электронной техники, в частности, твердотельной электроники СВЧ, требует от разработчиков создания новых материалов с широким диапазоном физических свойств. Таким образом, поиск и исследование материалов, обладающих МЭ эффектом, является актуальной задачей физики конденсированного состояния. Создание МЭ СВЧ приборов на основе слоистых феррит-пьезоэлектрических структур позволит перейти к интегральной технологии изготовления, а также повысить быстродействие, уменьшить массогабаритные характеристики и энергопотребление по сравнению с ферритовыми аналогами [3]. Однако, такие ранее разработанные МЭ СВЧ устройства, работающие на МЭ микроволновом эффекте, имеют малый диапазон частотной перестройки и требуют приложения больших внешних подмагничивающих полей. Таким образом, основная задача современных исследований в области МЭ микроволнового эффекта сводится к поиску способов

повышения МЭ взаимодействия в феррит-пьезоэлектрических структурах, что позволит увеличить диапазон частотной перестройки.

Усиление МЭ микроволнового взаимодействия в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах может быть достигнуто за счет вклада изгибных деформаций при определенном соотношении толщин фаз слоистой структуры, а также при приложении переменного электрического поля с частотой электромеханического резонанса (далее - ЭМР). К появлению дополнительного изгибающего момента при определенных условиях может привести наличие неоднородностей или градиентов состава фаз слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры. Для уменьшения внешнего подмагничивающего поля, которое требуется для выбора рабочего частотного диапазона феррит-пьезоэлектрической структуры, могут быть использованы создающие внутреннее магнитное поле градиентные ферритовые материалы или ферритовая фаза, состоящая из двух слоев ферритовых материалов с различными величинами намагниченности.

Перечисленные выше достоинства управляемых электрическим полем МЭ СВЧ устройств, работающих на явлении ФМР, и недостаток исследований, связанных с невзаимными устройствами, такими как вентили и аттенюаторы на основе МЭ эффекта, указывают на актуальность разработки такого класса МЭ устройств.

Целью диссертационного исследования являлось исследование МЭ микроволнового эффекта в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах в диапазоне СВЧ в области магнитного резонанса.

Для достижения указанной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Уточнить учетом диссипации выражение для сдвига линии ФМР слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры под влиянием постоянного электрического поля.

2. Рассчитать, смоделировать и сравнить теоретические и экспериментальные результаты зависимость сдвига линии ФМР под влиянием

постоянного электрического поля от отношения толщин фаз слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры.

3. Провести теоретическое исследование МЭ микроволнового эффекта в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре на основе биморфной пьезоэлектрической фазы и в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре на основе ферритовой фазы со ступенчатым изменением намагниченности, а также МЭ микроволнового эффекта при воздействии на данные структуры электрическим полем с частотой ЭМР.

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

Объектом исследований были выбраны образцы двухслойных феррит-пьезоэлектрических структур в форме диска состава монокристаллический никелевый феррит – поликристаллический цирконат-титанат свинца (ЦТС), монокристаллический железо-иттриевый гранат (ЖИГ) – монокристаллический магнониобат свинца – титанат свинца (PMN-PT) и трехслойной феррит-пьезоэлектрической структуры в форме пластины, состоящей из монокристаллического ЖИГ и двух одинаковых слоев поликристаллического ЦТС с противоположными направлениями поляризации.

В составе СВЧ устройств, работающих на МЭ микроволновом эффекте, были исследованы образцы двухслойных феррит-пьезоэлектрических структур в форме диска и пластины состава монокристаллический ЖИГ – монокристаллический PMN-PT, монокристаллический ЖИГ – поликристаллический ЦТС.

Методы проведенных исследований. При математическом моделировании МЭ взаимодействия использовались уравнения эластостатики, эластодинамики, электростатики, магнитостатики, уравнение движения вектора намагниченности. Численные расчеты выполнены с помощью математического пакета Maple. Компьютерное моделирование выполнено с помощью пакета программ,

вычисляющего многомодовые S-параметры и электромагнитные поля в трехмерных пассивных структурах. Для измерений СВЧ характеристик макетов МЭ устройств применялся метод ферромагнитного резонанса и метод панорамных СВЧ измерений. Экспериментальные исследования проводились на векторном анализаторе цепей, постоянное магнитное поле обеспечивалось электромагнитом и источником постоянного тока, постоянное электрическое поле обеспечивалось источником питания постоянного тока.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Уточнено учетом диссипации выражение для сдвига линии ФМР слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры под влиянием постоянного электрического поля.

2. Проведено сравнение результатов, выполненных методом компьютерного моделирования и расчета, с теоретическими и экспериментальными результатами зависимости сдвига линии ФМР под влиянием постоянного электрического поля от отношения толщин фаз слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры.

3. Разработана теоретическая модель МЭ микроволнового эффекта в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре на основе биморфной пьезоэлектрической фазы и получены выражения для сдвига линии ФМР под влиянием постоянного электрического поля через материальные параметры и геометрические размеры фаз структуры для данной структуры в форме пластины.

4. 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 основе биморфной пьезоэлектрической фазы при воздействии на данную структуру электрическим полем с частотой ЭМР;

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

Практическая значимость работы:

1. Уточненное учетом диссипации выражение для сдвига линии ФМР слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры под влиянием постоянного электрического поля позволяет более точно определить зависимость сдвига линии ФМР от отношения толщин фаз структуры, а также оценить влияние диссипации в ферритовой фазе на данную величину.

2. Полученные выражения для сдвига линии ФМР через материальные параметры и геометрические размеры фаз слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры на основе биморфной пьезоэлектрической фазы позволяют определить оптимальный состав данной структуры для достижения максимального значения данной величины сдвига. Полученные выражения для механических напряжений, индуцируемых в ферритовой фазе, через материальные параметры и геометрические размеры фаз слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры на основе ферритовой фазы со ступенчатым изменением намагниченности, а также слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры на основе биморфной пьезоэлектрической фазы при приложении к данной структуре электрического поля с частотой ЭМР, позволяют рассчитать величину сдвига линии ФМР под влиянием электрического поля.

3. Предложены конструкции принципиально новых устройств твердотельной СВЧ электроники, работающих на МЭ микроволновом эффекте «Вентиль сверхвысокочастотный магнитоэлектрический» (патент № 119940); «Аттенюатор магнитоэлектрический» (патент № 115125); «Компланарный вентиль-аттенюатор» (патент № 148921).

4. Разработаны практические рекомендации по выбору параметров конструкции планарных СВЧ вентилей-аттенюаторов на основе слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры и построены зависимости значений прямых потерь, обратных потерь и вентильного отношения от размеров феррит-пьезоэлектрической структуры для МЭ СВЧ вентилей-аттенюаторов, реализованных на микрополосковой линии передачи, копланарном волноводе и щелевой линии передачи. Полученные результаты позволяют подобрать

оптимальные размеры слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры для достижения достаточных для практического применения вентильного отношения и диапазона сдвига линии ФМР.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Учет потерь в ферритовой фазе при получении выражения для сдвига линии ФМР слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры под влиянием постоянного электрического поля приводит к нелинейной зависимости величины сдвига линии ФМР от диссипативного члена.

2. Использование биморфной пьезоэлектрической фазы в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре приводит к обусловленному наличием изгибных деформаций росту величины сдвига линии ФМР под влиянием постоянного электрического поля при определенных соотношениях толщин фаз слоистой структуры по сравнению с феррит-пьезоэлектрической структурой, содержащей один пьезоэлектрический слой.

3. Величины прямых потерь, обратных потерь и вентильного отношения реализованных на различных линиях передачи СВЧ вентилей-аттенюаторов на основе слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры существенно зависят от геометрических размеров ферррит-пьезоэлектрической структуры. Увеличение геометрических размеров данной структуры, без учета влияния параметров линий передачи, приводит к росту прямых и обратных потерь данных устройств.

Достоверность полученных в диссертации результатов 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.

Апробация работы

Основные материалы, изложенные в диссертационной работе, были представлены на Международных и Всероссийских конференциях:

1) Всероссийская научная конференция студентов-физиков ВНКСФ- 18, секция 18 "Материаловедение", 29 марта - 5 апреля 2012 г., г. Красноярск.

2) Всероссийская конференция «Микроэлектроника СВЧ», г. Санкт-Петербург, 4-7 июня, 2012 г.

3) Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2012), Moscow, Russia, 19-23 August, 2012.

4) 11th International Conference on Applied Electromagnetics PES Conference, Serbia, 2013.

5) IV Всероссийская конференция "Электроника и микроэлектроника СВЧ", секция "Элементы, приборы и устройства СВЧ электроники и микроэлектроники", 2 июня 2015 г.

6) Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2015), Prague, Czech Republic, July 6–9, 2015.

6) 26-ая Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 4-10 сентября 2016 г.

7) Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2016), Shanghai, 8 - 11 August, 2016.

8) 27-ая Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 6-10 сентября, 2017.

Внедрение результатов. Результаты, полученные в диссертации, являются частью НИР:

- фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «Участник Молодежного Научно-Инновационного Конкурса» («У.М.Н.И.К.»), 2013 г. Тема НИР: «Разработка магнитоэлектрического сверхвысокочастотного вентиля-аттенюатора»;

- гранта РФФИ № 16-07-00510 А «Исследование микроэлектронных магнитоэлектрических устройств на основе изгибных и сдвиговых колебаний в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах» 2016 г.;

- гранта РНФ № 15-19-10036 « Разработка физических принципов создания СВЧ устройств функциональной электроники на основе композиционных мультиферроиков»;

- гранта РФФИ № 18-07-00490 А «Теоретическое и экспериментальное исследование СВЧ антенн с управляемыми параметрами на основе магнито-пьезоэлектрических композитов» 2017-2018 гг.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано **14 статей**, из них **3 статьи** в журналах, входящих в перечень ВАК, получены **3** патента на полезную модель, а также опубликованы **тезисы 8 докладов** на Международных и Всероссийских научных конференциях.

Личный вклад автора. Обсуждение и формулировка цели и задач работы проведено совместно с научным руководителем. Построение математических моделей, вывод конечных формул и компьютерное моделирование выполнены лично автором. Разработка плана эксперимента, обработка экспериментальных данных, подготовка и обсуждение публикаций проводились при участии соавторов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка используемых литературных источников. Общий объем диссертации составляет 128 страниц машинописного текста, включающего 18 рисунков, 5 таблиц, 66 формул. Список цитированной литературы содержит 127 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, практическая значимость и научные положения, выносимые на защиту. Приведен список публикаций по теме исследования и апробация работы.

В **первой главе** обобщены выполненные ранее теоретические и экспериментальные исследования в области микроволнового МЭ эффекта в слоистых магнитостркционно-пьезоэлектрических структурах, в том числе исследования влияния изгибных деформаций на сдвиг и ширину линии ФМР в таких структурах. Выполнен обзор перспективных композиционных материалов для создания на их основе МЭ СВЧ устройств, работающих на эффекте ФМР, описаны основные физические свойства, достоинства и недостатки ферримагнетиков и тонких пленок магнитных сплавов, а также пьезоэлектрических материалов на основе титаната свинца и бессвинцовых пьезоэлектрических материалов. Проведен обзор невзаимных и управляющих СВЧ устройств на основе МЭ композитов.

Во **второй главе** представлены результаты исследования микроволнового МЭ эффекта в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах.

С учетом диссипации выражение для тензора магнитной восприимчивости слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры при наличии заданных внешних постоянного электрического и переменного магнитного полей примет вид [4]:

$$\chi^m = \begin{bmatrix} \chi_1 & \chi_s + i\chi_a & 0 \\ \chi_s - i\chi_a & \chi_2 & 0 \\ 0 & 0 & \chi_3 \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

а его компоненты с учетом диссипации и размагничивающих факторов будут определяться выражениями:

$$\chi_1 = \frac{\gamma^2 M_0 \left[H_{03} + M_0 \sum_i (N_{22}^i - N_{33}^i) \right] + \chi_0 \omega_r^2 \left(1 + \chi_0 \sum_i N_{22}^i \right) + i \chi_0 \omega \omega_r}{\omega_{рез}^2 - \omega^2 + i\omega\omega_r \left\{ 2 + \chi_0 \left[\sum_i (N_{11}^i + N_{22}^i) \right] \right\}}, \qquad (2)$$

$$\chi_2 = \frac{\gamma^2 M_0 \left[H_{03} + M_0 \sum_i (N_{11}^i - N_{33}^i) \right] + \chi_0 \omega_r^2 \left(1 + \chi_0 \sum_i N_{11}^i \right) + i \chi_0 \omega \omega_r}{\omega_{рез}^2 - \omega^2 + i\omega\omega_r \left\{ 2 + \chi_0 \left[\sum_i (N_{11}^i + N_{22}^i) \right] \right\}}, \qquad (3)$$

$$\chi_s = \frac{-\gamma^2 M_0^2 \sum_i N_{12}^i}{\omega_{рез}^2 - \omega^2 + i\omega\omega_r \left\{ 2 + \chi_0 \left[\sum_i (N_{11}^i + N_{22}^i) \right] \right\}}, \qquad (4)$$

$$\chi_a = \frac{\gamma M_0 \omega}{\omega_{рез}^2 - \omega^2 + i\omega\omega_r \left\{ 2 + \chi_0 \left[\sum_i (N_{11}^i + N_{22}^i) \right] \right\}}, \qquad 5$$

$$\chi_3 = \frac{\chi_0 \omega_r}{i\omega + \omega_r \left(1 + \chi_0 \sum_i N_{33}^i \right)}; \qquad (6)$$

$\gamma = 2{,}8 \cdot 2\pi \cdot 10^6$ 1/э·с – гиромагнитное отношение для спина; M_0 – намагниченность насыщения; H_{03} – проекция внешнего магнитного поля H_0 на направление равновесной намагниченности; N_{kl}^i – компоненты тензора размагничивающих факторов $\widehat{N}$, посредством которых выражаются составляющие эффективных магнитных полей анизотропии формы ферритовой фазы (N_{kl}^F), кристаллографической анизотропии вещества ферритовой фазы (N_{kl}^A) и анизотропии, которая имеет место при наличии МЭ взаимодействия (N_{kl}^E); ω – частота переменного магнитного поля; $\chi_0 = \dfrac{M_0}{H_{i0}}$ – статическая восприимчивость, H_{i0} - внутреннее статическое магнитное поле. $H_{i0} = H_0 - NM_0$; $\omega_r = \alpha\gamma H_0$ –

частота релаксации; α - безразмерный параметр, характеризующий потери в ферритовой фазе.

Выражение для сдвига линии ФМР слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры под влиянием внешнего электрического поля с учетом диссипации получается из выражения для резонансной частоты слоистой структуры если взять только члены, линейные по N_{kl}^{E}:

$$\delta H_E = -M_0 Q_1^{-1} \times$$
$$\times\left[Q_2\left(N_{11}^E - N_{33}^E\right) + Q_3\left(N_{22}^E - N_{33}^E\right) - Q_4 N_{12}^E + \alpha^2\gamma^2 H_{03}\left(Q_5 N_{22}^E + Q_6 N_{11}^E\right)\right], \quad (7)$$

где

$$Q_1 = 2H_{03} + M_0\sum_{i\neq E}\left[\left(N_{11}^i - N_{33}^i\right) + \left(N_{22}^i - N_{33}^i\right)\right] + \alpha^2\gamma^2 H_{03} \times$$
$$\times\left\{2 + M_0 H_{i0}^{-3}\left[2M_0\left(H_{i0} - H_{03}\right)\sum_{i\neq E} N_{11}^i N_{22}^i + H_{i0}\left(2H_{i0} - H_{03}\right)\sum_{i\neq E}\left(N_{11}^i + N_{22}^i\right)\right]\right\};$$

$$Q_2 = H_{03} + M_0\sum_{i\neq E}\left(N_{22}^i - N_{33}^i\right);$$

$$Q_3 = H_{03} + M_0\sum_{i\neq E}\left(N_{11}^i - N_{33}^i\right);$$

$$Q_4 = 2M_0\sum_{i\neq E} N_{12}^i;$$

$$Q_5 = 1 + \chi_0\sum_{i\neq E} N_{11}^i;$$

$$Q_6 = 1 + \chi_0\sum_{i\neq E} N_{22}^i \ .$$

В следующем разделе второй главы представлено сравнение теоретических и экспериментальных результатов расчета величины сдвига линии ФМР с результатами компьютерного моделирования для двухслойной феррит-пьезоэлектрической структуры в форме диска состава ЖИГ + ГГГ (гадолиний-галлиевый гранат) - PMN-PN.

Компьютерное моделирование было выполнено с помощью программы, вычисляющей многомодовые S-параметры и электромагнитные поля в

трехмерных пассивных структурах. В данной программе была построена модель двухслойной структуры и вычислено значение величины сдвига линии ФМР под влиянием постоянного электрического поля на частоте 9,3 ГГц в зависимости от толщины ферритовой фазы (см. рис. 1). Слой пьезоэлектрической фазы поляризован по нормали к плоскостям контактов, электрическое поле, напряженность которого 8 кВ/см, приложено вдоль оси поляризации пьезоэлектрической фазы, которая совпадает с осью [111] ферритовой фазы.

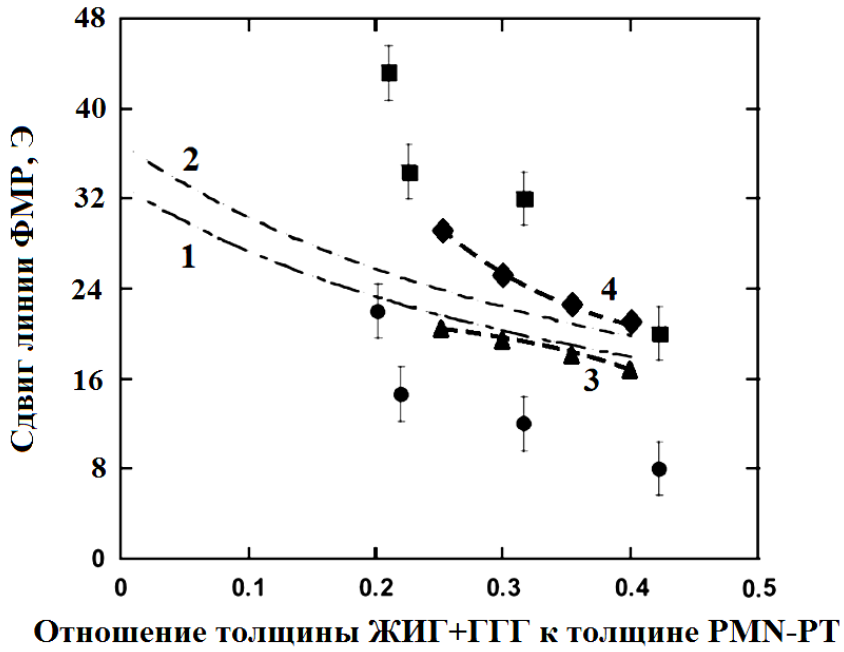

Рис. 1 – Сравнение результатов компьютерного моделирования (кривые 3, 4) с теоретическими (кривые 1, 2) и экспериментальными результатами (квадраты, круги) зависимости сдвига линии ФМР от отношения толщины ЖИГ + ГГГ к толщине PMN-PT: 1, 3, круги – H_0 параллельно <011> в плоскости (111) ЖИГ; 2, 4, квадраты – H_0 параллельно ЖИГ

По рис. 1 видно, что теоретическая зависимость, полученная без учета диссипации, при отношении толщины ферритовой фазы к толщине пьезоэлектрической фазе, равном (0,25...0,5), близка к линейной, а учет диссипации приводит к нелинейной зависимости сдвига линии ФМР от отношения толщин фаз слоистой структуры.

Моделирование в данной программе при учете влияния диссипации в ферритовой фазе, позволяет уменьшить погрешность определения величины сдвига линии ФМР на (5...10) % по сравнению с теоретическим расчетом без учета диссипации.

В третьем разделе второй главы представлены результаты теоретического исследования микроволнового МЭ эффекта феррит-пьезоэлектрических структурах на основе неоднородных по составу фаз.

При построении теоретической модели микроволнового МЭ 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 пьезоэлектрической фазы с симметрией ∞m относительно оси поляризации. Слои композита расположены в плоскости (x, y), а ось z – перпендикуляр к плоскости композиционной структуры. Слои пьезоэлектрической фазы 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.

Общие выражения для компонент тензоров деформаций ${}^{p1}S_i$ верхнего (граничащего с ферритовым слоем) и ${}^{p2}S_i$ нижнего слоев пьезоэлектрической фазы запишутся в следующем виде [6]:

$$ {}^{p1}S_i = {}^{p}s_{ij}\,{}^{p1}T_j - {}^{p}d_{ki}\,E_k, \qquad (8) $$

$$ {}^{p2}S_i = {}^{p}s_{ij}\,{}^{p2}T_j + {}^{p}d_{ki}\,E_k, $$

где ${}^{p}s_{ij}$ – константы упругой податливости пьезоэлектрической фазы; ${}^{p1}T_i$, ${}^{p2}T_i$ - компоненты тензоров механических напряжений верхнего и нижнего слоев пьезоэлектрической фазы соответственно; ${}^{p}d_{ki}$ – компоненты тензора

пьезоэлектрических модулей; E_k – компоненты вектора напряженности внешнего постоянного электрического поля.

Осевые деформации каждого слоя феррит-пьезоэлектрической структуры, возникающие вследствие МЭ эффекта, можно рассматривать как сумму связанных с изгибом деформаций и продольных деформаций нейтральной оси [7].

Выражения для механических напряжений для каждого слоя феррит-пьезоэлектрической структуры на основе биморфной пьезоэлектрической фазы получаются при совместном решении системы уравнений (8), выражений для осевых деформаций, закона Гука для ферритовой фазы, а также с учетом граничных условий. Данные выражения включают неизвестные величины для деформаций нейтральных осей ${}^{m}S_{10}$, ${}^{m}S_{20}$ вдоль оси x и оси y при $z_i = 0$ для ферритовой и пьезоэлектрической фаз и радиусы кривизны нейтральной оси структуры R_1 и R_2 в x и y направлениях. z_i – расстояние от i-го слоя структуры до срединной плоскости этого слоя, $i = m$ для ферритового слоя. Деформации ${}^{m}S_{10}$, ${}^{m}S_{20}$ находятся при подстановке выражений для механических напряжений в условия равновесия [8, 9], согласно которым осевые силы в слоях структуры должны в сумме равняться нулю. Радиусы кривизны R_1 и R_2 находятся после подстановки выражений для механических напряжений и выражений для деформаций ${}^{m}S_{10}$, ${}^{m}S_{20}$ в условия равновесия [8, 9], согласно которым сумма моментов осевых сил каждого слоя должна уравновешиваться результирующим изгибным моментом, возникающим в пьезоэлектрических и ферритовом слоях в расчете на единицу ширины слоя.

В случае, когда образец имеет форму длинной тонкой пластины, плоскость образца совпадает с кристаллографической плоскостью (111) ферритовой фазы, а поле H_0 параллельно направлению [011] и лежит в плоскости образца, выражение для сдвига линии ФМР примет вид:

$$\delta H_E = \frac{3\lambda_{100}}{4M_0\,{}^{m}s_{11}}\left\{\frac{s_1 Y_p}{t}\left[\int_0^{{}^{p}t/2}\left(\frac{h_m t_p}{R_1} + {}^{p}d_{31}E_3\right)dz + \int_{-{}^{p}t/2}^{0}\left(\frac{h_m t_p}{R_1} - {}^{p}d_{31}E_3\right)dz\right] + \frac{z_m}{R_1}\right\} \tag{9}$$

где λ_{100} – константа магнитострикции; $s_1 = t(t_m Y_m + t_p Y_p)^{-1}$, $t = t_m + t_p$, Y_m, Y_p – модули упругости магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз, соответственно; ${}^m s_{11}$ – константа упругой податливости ферритовой фазы; $h_m = (t_p + t_m)/2$ – средняя толщина слоев ферритовой и пьезоэлектрической фаз, t_m – толщина ферритовой фазы, t_p – толщина пьезоэлектрической фазы.

На рис. 2 представлена зависимость сдвига линии ФМР δH_E от отношения толщины ферритовой фазы к толщине пьезоэлектрической фазы для слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры состава ЖИГ и два слоя ЦТС, поляризованных в противоположных направлениях. Постоянное магнитное поле H_0 приложено параллельно плоскости образца, напряженность электрического поля, приложенного перпендикулярно плоскости образца, E = 8 кВ/см.

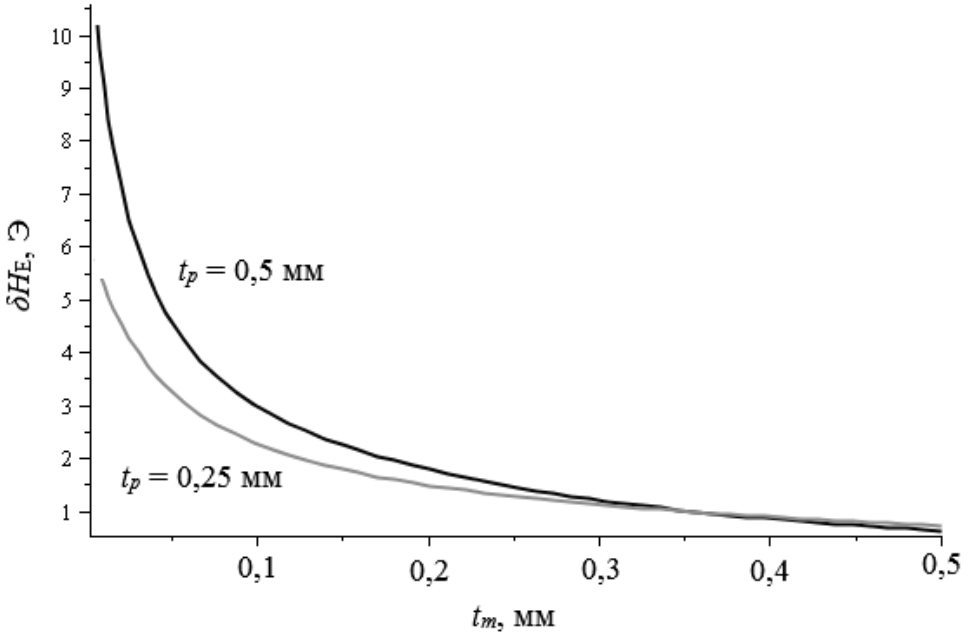

Рис. 2 - Зависимость сдвига линии ФМР δH_E от толщины ферритовой фазы для структуры состава ЖИГ и два слоя ЦТС с противоположными направлениями поляризации

При приложении электрического поля E = 8 кВ/см и соотношении толщины ферритовой фазы к толщине пьезоэлектрической фазы равном 0,1, при использовании феррит-пьезоэлектрической структуры с двумя слоями ЦТС, поляризованными в противоположных направлениях, величина сдвига

резонансного магнитного поля увеличивается более чем в три раза по сравнению со случаем использования феррит-пьезоэлектрической структуры с одним слоем ЦТС.

Результатом теоретического исследования микроволнового МЭ эффекта в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре на основе ферритовой фазы, состоящей из двух слоев ферритового материала с различными значениями намагниченности, и в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре на основе биморфной пьезоэлектрической фазы при приложении к данной структуре электрического поля с частотой ЭМР, являются выражения для механических напряжений, индуцируемых в ферритовой фазе данных структур.

В **третьей главе** рассмотрена возможность практического использования слоистых феррит-пьезоэлектрических композитов в СВЧ устройствах с электрическим управлением, таких как фазовращатели, аттенюаторы и вентили, реализованные на планарных линиях передачи – микрополосковой (МПЛ), копланарном волноводе (КВ) и щелевой линии передачи (ЩЛП). Предложенные устройства в отличие от ферритовых аналогов могут быть реализованы в интегральной технологии изготовления, имеют более высокое быстродействие, уменьшенные массогабаритные характеристики и энергопотребление, и, вместе с тем, сохраняют преимущества ферритовых приборов перед активными устройствами на основе p-i-n диодов или полевых транзисторов.

Представлены результаты исследования, проведенного методом компьютерного моделирования, зависимости прямых потерь, обратных потерь и вентильного отношения от размеров слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры для различных моделей МЭ СВЧ вентилей-аттенюаторов, реализованных на микрополосковой линии передачи (далее - МПЛ), копланарном волноводе и щелевой линии передачи. На основе полученных результатов разработаны рекомендации по выбору параметров конструкции МЭ СВЧ вентилей-аттенюаторов. Для примера, на рис. 3.5 показана зависимость затухания и вентильного отношения от диаметра слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры для МЭ СВЧ вентиля-аттенюатора, реализованного на МПЛ.

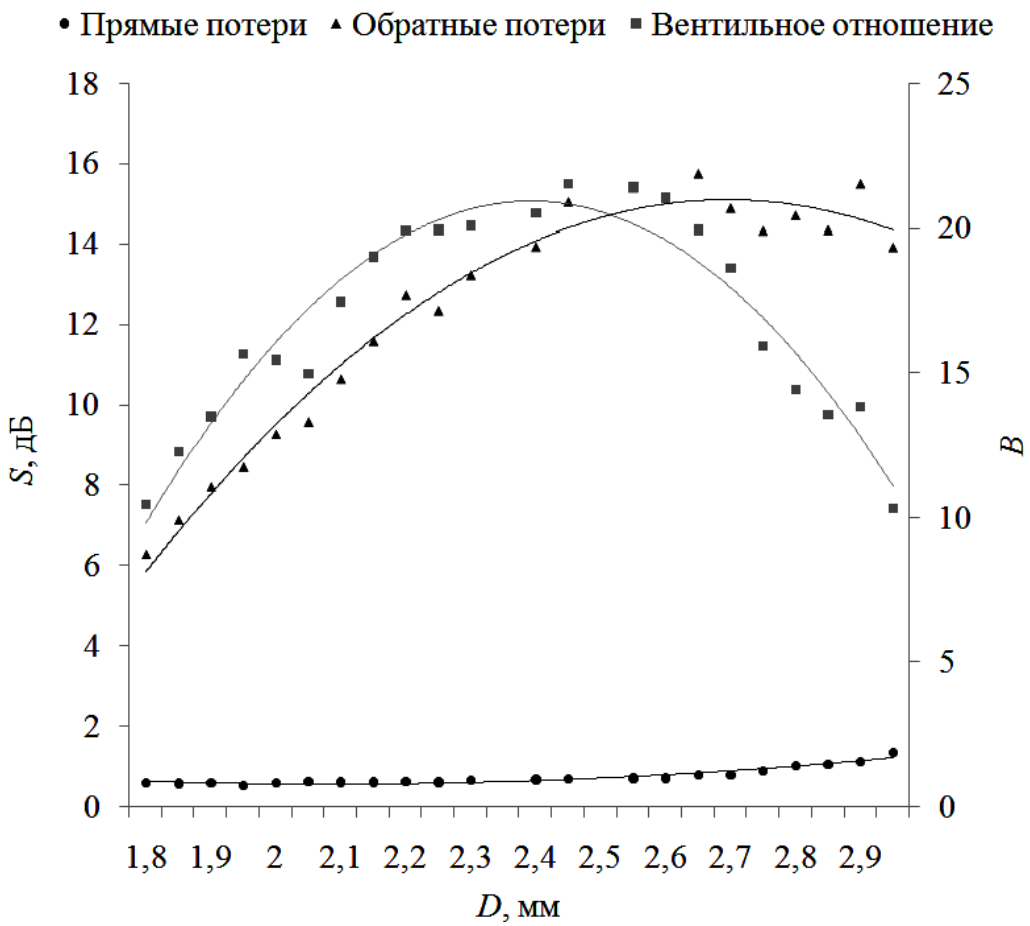

Рис. 3.5 – Зависимость прямых потерь, обратных потерь (S, дБ) и вентильного отношения (B) от диаметра феррит-пьезоэлектрической структуры (D, мм). Параметры МЭ СВЧ вентиля-аттенюатора, реализованного на МПЛ: толщина пленки ЖИГ: 0,05 мм, толщина ЦТС: 0,5 мм; ширина центрального проводника: 1 мм, ε = 10, h = 1 мм; длины шлейфов: 1,5 и 4,5 мм; H_0 = 2011 Э

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 вентили, реализованные на планарных линиях передачи.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования:

Уточнено выражение учетом диссипации для сдвига линии ФМР слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры под влиянием постоянного электрического поля. Полученные выражения позволяют более точно определить зависимость данной величины сдвига от отношения толщин фаз слоистой структуры, а также оценить влияние потерь в ферритовой фазе на сдвиг линии ФМР.

Проведено сравнение результатов, выполненных методом компьютерного моделирования и расчета с теоретическими и экспериментальными результатами зависимости сдвига линии ФМР под влиянием постоянного электрического поля от отношения толщин фаз слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры. Наблюдается очень хорошее соответствие между результатами, выполненными методом компьютерного моделирования и расчета с теоретическими и экспериментальными результатами.

Разработана теоретическая модель микроволнового МЭ эффекта в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах на основе биморфной пьезоэлектрической фазы и получены выражения для сдвига линии ФМР через материальные параметры и геометрические размеры ферритовой и пьезоэлектрической фаз для данной структуры в форме пластины.

Проведено теоретическое исследование микроволнового МЭ эффекта в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре на основе ферритовой фазы со ступенчатым изменением намагниченности и в феррит-пьезоэлектрической структуре на основе биморфной пьезоэлектрической фазы при воздействии на данную структуру электрическим полем с частотой ЭМР. Как результат, получены выражения для механических напряжений, индуцируемых в ферритовой фазе данных структур, через материальные параметры и геометрические размеры ферритовой и пьезоэлектрической фаз.

Разработаны рекомендации по выбору параметров конструкции планарных СВЧ вентилей-аттенюаторов на основе слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры.

Цитируемая литература

1. Bichurin M.I. and Petrov V.M. Composite magnetoelectrics: their microwave properties // Ferroelectrics. 1994. V. 162. P. 33-36.

2. Бичурин М.И., Петров В.М., Филиппов Д.А., Сринивасан Г., Нан С.В.. Магнитоэлектрические материалы. – М.: Изд-во Академия Естествознания, 2006. – 296 с.

3. Proceedings of the 3rd International conference on magnetoelectric interaction phenomena in crystals (MEIPIC–3) / Ed. M.Bichurin. Ferroelectrics. 1997. V. 204. 356 p.

4. Гуревич А. Г. Ферриты на сверхвысоких частотах / А. Г. Гуревич. – М.: Физматгиз, 1960. – С. 203–255.

5. S. Shastry, G. Srinivasan, M. I.Bichurin, V. M. Petrov, A.S.Tatarenko. Microwave Magnetoelectric Effects in Single Crystal Bilayers of Yttrium Iron Garnet and Lead Magnesium Niobate - Lead Titanate // Phys.Rev. B70, 064416 (2004).

6. Беличева К.В. Магнитоэлектрический эффект в слоистых магнитостикционно-пьезоэлектрических структурах с неоднородными компонентами: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Беличева К.В.;[Место защиты: Новг. гос. университет им. Ярослава Мудрого].- Великий Новгород, 2016.- 132 с.

7. Kenta Takagi, Jing-Feng Li, Shohei Yokoyama, Ryuzo Watanabe, Abdulhakim Almajid & Minoru Taya. Design and fabrication of functionally graded PZT/ Pt piezoelectric bimorph actuator//Science and Technology of Advanced Materials. 2002. V. 3, p. 217-224.

8. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле: Под ред. чл.-корр. АН СССР Григолюк Э.И. — М.: Машиностроение, 1985. — 472 с.

9. Лаврентьева К.В., Петров В.М., Бичурин М.И. Моделирование магнитоэлектрического эффекта в структурах на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.; URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?Id=16652 (дата обращения: 01.09.2018).

Основные положения отражены в следующих публикациях:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. A.S. Tatarenko, D.V. Lavrentieva, M.I. Bichurin. Dual tunable magnetoelectric resonator in a slot line for microwave applications // PIERS Proceedings, Shanghai, China, 2016, 2831 - 2833.

2. Татаренко А.С., Лаврентьева Д.В., Семенов Г.А., Семенов Д.А. СВЧ фазовращатель миллиметрового диапазона на основе магнитоэлектрической слоистой структуры Zn_2Y/PMN-PT/ // Вестник НовГУ. – 2011. - № 65. - С. 36-38.

3. Лаврентьева Д.В., Татаренко А .С. Магнитоэлектрический управляемый копланарный СВЧ вентиль-аттенюатор / // Вестник НовГУ. – 2014. - № 81. - С. 55-58.

Статьи и тезисы докладов:

1. Лаврентьева Д. В. СВЧ резонатор на основе слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры // Материалы Всероссийской научной конференции студентов - физиков и молодых ученых (ВНКСФ-18), Красноярск, 2012, с. 615.

2. Лаврентьева Д. В. СВЧ резонатор на основе слоистой феррит-пьезоэлектрической структуры // тезисы докладов Второй областной конференции участников молодежного научно-инновационного конкурса программы УМНИК. Молодежь. Наука. Инновации, Великий Новгород, 2012 г.

3. Лаврентьева Д.В., Бичурин М.И., Татаренко А.С. Магнитоэлектрический СВЧ аттенюатор-фазовращатель / Сборник трудов конференции Микроэлектроника СВЧ, 2012, с. 159-162.

4. Лаврентьева Д. В. Магнитоэлектрический СВЧ резонатор // тезисы докладов Первой областной конференции участников молодежного научно-инновационного конкурса программы УМНИК. Молодежь. Наука. Инновации, Великий Новгород, 2012 г.

5. M.I. Bichurin, A.S. Tatarenko, D.V. Lavrenteva, S.R. Aleksić. Magnetoelectric microwave devices // Proc. of the 11th International Conference on Applied Electromagnetics - ПЕС'2013, Niš, Serbia, September 01 – 04, 2013, pp.77-78.

6. Лаврентьева Д.В. Магнитоэлектрический управляемый копланарный СВЧ вентиль-аттенюатор // Сборник статей четвертой всероссийской конференции Электроника и микроэлектроника СВЧ, том 2, 2015 г., с. 83-87.

7. A.S. Tatarenko, D.V. Lavrentieva, M.I. Bichurin, D.V. Kovalenko. Microwave Magnetoelectric Isolator-attenuator Based on Coplanar Line // PIERS Proceedings, Prague, Czech Republic, 2015, 594-596.

8. Лаврентьева Д.В., Татаренко А.С. Моделирование магнитоэлектрических управляемых невзаимных СВЧ устройств/ // Вестник НовГУ, сер. Техн. науки. – 2016. - № 4 (95). - С. 69-72.

9. Снисаренко Д.В., Татаренко А.С., Коваленко Д.В., Лобекин В.Н. Моделирование магнитоэлектрического СВЧ вентиля-аттенюатора, реализованного на щелевой линии передачи/ // Вестник НовГУ, сер. Техн. науки. – 2016. - № 7 (98). - С. 89-93.

10. Снисаренко Д.В., Татаренко А.С. Исследование зависимости вентильного отношения от параметров магнитоэлектрического СВЧ вентиля-аттенюатора, реализованного на щелевой линии передачи // Вестник НовГУ, сер. Техн. науки. – 2017. - № 6 (104). - С. 67-70.

11. Татаренко А.С., Лаврентьева Д.В., Бичурин М.И. Моделирование магнитоэлектрических развязывающих СВЧ устройств // Сборник статей 26-ой Международной Крымской конференции СВЧ техника и телекоммуникационные технологии, 2016 г., с. 1371-1377.

12. Татаренко А.С., Снисаренко Д.В., Бичурин М.И., Хаванова М.А. Магнитоэлектрические СВЧ вентили-аттенюаторы // Сборник статей 27-ой Международной Крымской конференции СВЧ техника и телекоммуникационные технологии, 2017 г.

13. A. Tatarenko, D. Snisarenko, M. Bichurin. Modeling of Magnetoelectric Microwave Devices // FACTA UNIVERSITATIS Series: Electronics and Energetics, vol. 30, no. 3, pp. 285 – 293, September 2017.

Интеллектуальная собственность

1. Патент на полезную модель № 148921 Российская Федерация, МПК H01P/32. Компланарный вентиль-аттенюатор / Бичурин М.И., Лаврентьева Д.В., Татаренко А.С.; патентообладатель Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого. - Опубл. 19.11.2014.

2. Патент на полезную модель № 115125 Российская Федерация, МПК H01P/32. Аттенюатор магнитоэлектрический / Бичурин М.И., Татаренко А.С., Семенов Г.А., Лаврентьева Д.В., Семенов Д.А.; патентообладатель Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого. - Опубл. 20.04.2012.

3. Патент на полезную модель № 119940 Российская Федерация, МПК H01P/32. Вентиль сверхвысокочастотный магнитоэлектрический / Бичурин М.И., Лаврентьева Д.В., Татаренко А.С.; патентообладатель Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого. - Опубл. 27.08.2012.