

*На правах рукописи*

Белявский Павел Юрьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛЕВЫХ ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ  
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ФЕРРИТ-СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СЛОИСТЫХ СТРУКТУР.

Специальность: 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор, С.Ф. Карманенко

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, старший научный сотрудник С.В. Яковлев  
кандидат физико-математических наук, доцент А.Д. Канарейкин

Ведущая организация – ОАО «Холдинговая компания «Ленинец»

Защита состоится «\_16\_» \_\_декабря\_\_ 2008 г. в \_15:30\_ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «\_6\_» \_\_ноября\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций,  
к.т.н., доцент

Е.А. Смирнов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** По мере возрастания значения сверхвысокочастотных (СВЧ) систем связи, локации и навигации в современном обществе усиливаются требования к их надежности, мобильности, энергопотреблению. Телекоммуникационные сотовые и спутниковые радиотелефонные системы, передвижные навигационные и радарные станции, глобальные и локальные компьютерные сети испытывают потребность в электрически управляемых и недорогих устройствах. Эта потребность может быть обеспечена заменой сложных схем, использующих активные компоненты, на перестраиваемые СВЧ линии на основе пленочных материалов с нелинейными физическими свойствами, таких как сегнетоэлектрики и ферриты.

Один из способов управления параметрами радиоэлектронных компонентов основан на изменении диэлектрической проницаемости компонентов под действием внешнего электрического поля. «Электрический» способ управления отличается высокой скоростью и малыми энергетическими затратами, поскольку перестройка выполняется без протекания токов через управляющие цепи. Свойство управляемости под действием электрического поля сохраняется у некоторых сегнетоэлектриков в широком частотном диапазоне – от низких до крайневысоких частот. Это свойство активно используется в СВЧ устройствах для быстрой перестройки амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ, соответственно).

К недостаткам сегнетоэлектрических управляемых структур следует отнести сравнительно узкий диапазон перестройки рабочей частоты и высокий уровень напряжения, прикладываемого к электродам. Указанные недостатки могут преодолеваются путем построения новых модификаций линий передачи, а также применением слоистых структур, содержащих не только сегнетоэлектрические, но и ферромагнитные пленки. При использовании слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик управление рабочими характеристиками может осуществляться как электрическим, так и магнитным полем. В подобных устройствах можно совместить преимущества «электрического» и «магнитного» способов управления, т. е. высокую скорость и широкий диапазон перестройки рабочей частоты и параметров СВЧ устройств.

Анализ современного состояния в области устройств СВЧ диапазона, управляемых с помощью электрического и магнитного полей, указывает на существование научно-технической проблемы, включающей радиофизические и физико-технологические аспекты. Эта проблема определяет ряд научных задач, таких как теоретические исследования электродинамических характеристик и совершенствование конструкций СВЧ линий передачи, экспериментальные исследования волновых процессов в щелевых линиях на основе активных диэлектриков, проектирование и разработку управляемых приборных структур.

**Объектом исследования диссертационной работы** являются щелевые линии, сформированные на основе сегнетоэлектрических пленок и феррит-сегнетоэлектрических структур.

**Целью диссертационной работы** является исследование процессов распространения электромагнитных волн в щелевых линиях на основе сегнетоэлектрических и феррит-сегнетоэлектрических слоистых структур, а также разработка и реализация на основании проведенного исследования пере-страиваемых устройств СВЧ диапазона, таких как сегнетоэлектрические фазовращатели и феррит-сегнетоэлектрические резонаторы.

**Достижение цели работы обеспечено решением следующих задач:**

- исследованием процессов распространения электромагнитных волн в щелевых СВЧ линиях передачи, включая изопланарные и многощелевые структуры;
- разработкой методик измерений характеристик сегнетоэлектрических пленок в широком диапазоне частот (1-100 ГГц);
- теоретическим анализом волновых процессов в многощелевой линии (МЩЛ), в пленочной слоистой структуре феррит-сегнетоэлектрик и в структуре феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка;
- экспериментальным исследованием характеристик сегнетоэлектрических пленок и резонаторных структур, направленным на выбор объектов, соответствующих приборным требованиям;
- экспериментальным исследованием слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик и структуры феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка;
- разработкой планарных фазовращателей на основе многощелевых сегнетоэлектрических структур и технологического процесса их изготовления;
- разработкой управляемых СВЧ интегральных приборов на волноведущих структурах феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка.

**Методы исследования.** Теоретические исследования волноведущих и резонаторных структур проводились с применением метода полноволнового анализа. Результаты теоретических исследований сравнивались с экспериментальными зависимостями. Для проведения экспериментальных исследований применялись оригинальные измерительные макеты и специализированное оборудование, включая векторный измеритель комплексных коэффициентов передачи. Надежные теоретические и расчетные методы, а также современное экспериментальное оборудование обеспечили высокую достоверность полученных результатов.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Многощелевая линия на поверхности сегнетоэлектрической пленки, содержащая несколько внутренних полосковых электродов, по затуханию щелевой моды близка к аналогичной по ширине щелевой линии без внутренних электродов, что позволяет в несколько раз снизить управляющее напряжение.

2. Многощелевая СВЧ линия передачи, сформированная на поверхности сегнетоэлектрической пленки, представляет собой фазовращатель, который в сочетании с интегральными планарными экспоненциальными щелевыми элементами согласования (линия Вивальди) в режиме на проход излучает энергию в угле раскрытия  $H$  –плоскости 40 – 60 градусов, при параметре качества  $\sim 30$  град/дБ на частоте около 30 ГГц.

3. Взаимодействие поверхностной магнитостатической волны в ферромагнитной пленке с основной модой щелевой линии на основе сегнетоэлектрической пленки приводит к волновой гибридизации, позволяющей эффективно управлять дисперсионными характеристиками такой структуры посредством изменения как электрического, так и магнитного полей смещения .

4. Максимальная гибридизация поверхностной магнитостатической и электромагнитной волны щелевой сегнетоэлектрической линии достигается путем уменьшения ширины щели (в интервале 10 - 50 мкм) и увеличения толщин сегнетоэлектрической и ферромагнитной пленок (более 10 мкм) как результат роста замедления электромагнитной волны в щелевой линии.

В процессе проведения исследования получены **новые научные результаты:**

1. Созданы оригинальные электродинамические модели и методики численного анализа волновых процессов в щелевых структурах на основе сегнетоэлектрических и феррит-сегнетоэлектрических структур.
2. Предложены оригинальные конструкции щелевых линий передачи, обладающие улучшенными эксплуатационными параметрами для применений в управляемых СВЧ приборах.
3. Проведен теоретический анализ волновых процессов в щелевых и многощелевых линиях, получены зависимости характеристик передачи линий от их конструктивных и физических параметров.
4. Исследованы дисперсионные характеристики гибридных электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в структуре феррит-сегнетоэлектрик и в структуре феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка.
5. Определены условия для эффективной гибридизации щелевой моды в линиях передачи на основе структуры феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка.
6. Проведены испытания волноводно-планарных фазовращателей-излучателей на основе сегнетоэлектрических пленок и многощелевых линий, показавшие их пригодность для реализации линейных фазированных антенных решеток.
7. Измерены смещения резонансной частоты в структуре ферритовый резонатор – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка в результате действия электрического и магнитного полей.

**Теоретическую и практическую ценность работы составляют:**

- электродинамическая модель и методика численного анализа процесса распространения гибридных электромагнитно-спиновых волн в структуре феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка, позволяющая рассчитывать параметры СВЧ устройств;
- СВЧ фазовращатели-излучатели на основе многощелевых линий с экспоненциальным профилем (линии Вивальди), демонстрирующие в частотном диапазоне 30-40 ГГц параметр качества  $\sim 30$  град/дБ при подаче смещающего напряжения до 200 В;
- методики измерения и программы расчета параметров сегнетоэлектрических пленок в широком диапазоне СВЧ-КВЧ;
- СВЧ резонатор с рабочей частотой около 6 ГГц на основе структуры феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка, продемонстрировавший сдвиг резонансной частоты под действием электрического поля;
- технология изготовления сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция и методика формирования слоистых структур и щелевых линий на основе сегнетоэлектрических пленок и ферритовых слоев.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использовались в следующих организациях: ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Холдинговой компании «Ленинец», ОАО «Гириконд», НПК «Государственный Оптический институт им С.И. Вавилова»; ОАО «Феррит-Домен», техническом университете «МИРЭА», лаборатории микроэлектроники и физики материалов университета г. Оулу (Финляндия), Корейском институте науки и техники (KIST, г. Сеул).

Результаты работы реализованы в следующих проектах и грантах:

- в проекте Министерства Образования Российской Федерации «Разработка элементной базы и устройств СВЧ радиоэлектроники на основе сегнетоэлектрических пленок» (код проекта: 208.05.05.012);
- в проекте Международного научно-технического центра (МНТЦ – 2896) «Исследование планарных слоистых структур на основе сегнетоэлектрических пленок с целью применения в радиоэлектронных устройствах миллиметрового диапазона длин волн» (2005 – 2007 гг.);
- в проекте Международного научно-технического центра (МНТЦ – 2616) «Миниатюрные перестраиваемые сверхвысокочастотные генераторы» (2004 – 2006 гг.);
- в проекте Корейского института науки и техники (KIST – AA134/2004) «Управляемые пленочные компоненты на основе сегнетоэлектрических пленок» (2005 – 2007).
- **Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на различных конференциях, совещаниях и симпозиумах, которые указаны ниже.
- Научно-технические конференции профессорско-преподавательского со-

става Санкт-Петербургского Государственного Электротехнического Университета (ЛЭТИ) (2002 – 2008), Санкт-Петербург, Россия.

- 7-ой симпозиуме по сегнетоэлектричеству Россия-СНГ-Страны Балтии-Япония (7-th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF-7), Июнь 24 – 28, 2002, Санкт-Петербург, Россия.
- Международной школе-конференции «Молодые учёные – науке, технологиям и проф. образованию», 1-4 октября 2002, Москва, Россия.
- IV Международной научно-технической конференции «Электроника и Информатика - 2002», Зеленоград, Россия.
- 17-ый международном симпозиуме по интегрированным сегнетоэлектрикам (17-th International Symposium on Integrated Ferroelectrics.) апрель 2005. Шанхай, Китай.
- Международной конференции по электрокерамике ICE-2005 (International conference on Electroceramics), Июнь, 2005, Сеул, Корея.
- Международном студенческом семинаре по СВЧ технике и новым физическим явлениям (International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena; 2006 – 2008), Санкт-Петербург, Россия.
- 4-я международной конференции по СВЧ материалам и их применениям (4-th International Conference on Microwave Materials and Their Applications), 12 – 15 июня, 2006, Оулу, Финляндия.
- Международной научно-технической школе-конференции. Молодые ученые – 2006. 14 – 18 ноября, 2006, Москва, МИРЭА, Россия
- 19-ый международном симпозиуме по интегрированным сегнетоэлектрикам (ISIF-19; Int. Symp. on Int. Ferroelectrics). май, 2007. Бордо, Франция.
- 37-я Европейской конференции по СВЧ технике (37-th European Microwave Conference. Microwave week), октябрь 2007, Мюнхен, Германия.
- VI Международной научно-технической конференции. Intermatic. 23 – 27 октября, 2007, МИРЭА, Москва, Россия.
- XVII Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков. 9 – 14 июня, 2008, Санкт-Петербург.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, из них 5 статей (4 статьи опубликованы в научных изданиях, определенных ВАК), 4 доклада в трудах международных и всероссийских конференций и 1 патент.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения. Она изложена на 109 страницах машинописного текста, включает 42 рисунка, 8 таблиц, и содержит список литературы из 92 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** кратко обоснована актуальность проблемы, ее научная новизна. Приведены научные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** имеет обзорный характер.

Кратко рассматриваются физические основы магнитоэлектрических волн (МСВ), распространяющихся в ферромагнитных средах, таких как железо-иттриевый гранат (ЖИГ). Анализируются достоинства приборов спин-волновой электроники, управляемых магнитным полем; особо выделяются устройства на поверхностных МСВ (ПМСВ).

Рассматривается альтернативный «электрический» способ управления волноведущими структурами на основе сегнетоэлектрических материалов. Формируются требования к сегнетоэлектрическим пленкам с точки зрения их применения в СВЧ электронных устройствах. Сравнения показывают, что пленки титаната бария-стронция  $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$  – БСТ являются наиболее пригодным материалом для управляемых СВЧ устройств. Пленки БСТ отличаются отсутствием частотной дисперсии вплоть до частоты  $\sim 100$  ГГц и сравнительно малыми диэлектрическими потерями. Рассмотрены примеры реализации волноведущих структур на основе сегнетоэлектрических пленок, конструкции фазовращателей, фазированных антенных решеток, их эксплуатационные параметры.

Отмечаются достоинства и недостатки «электрического» и «магнитного» способа управления волновыми процессами в волноведущих структурах. Обсуждается возможность построения СВЧ устройств на основе слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик (ЖИГ/БСТ), в которых обеспечиваются дополнительные возможности управления фазовыми характеристиками и групповым временем задержки СВЧ сигналов. Анализируются ранее проведенные исследования феррит-сегнетоэлектрических структур, теоретические и экспериментальные зависимости волновой дисперсии.

В заключении делаются выводы по проведенному литературному обзору и уточняются задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** приводятся результаты исследования процессов распространения электромагнитных волн в щелевых линиях.

Для решения задач распространения электромагнитных волн в щелевых линиях применялся полноволновый анализ, включающий следующие стадии:

- (а) – определение Фурье-образов касательных компонент векторов электрического и магнитного полей на щелевых линиях;
- (б) – составление системы интегральных уравнений для напряженностей касательных полей на щелях –  $E_x$ ,  $E_z$ ,  $H_x$  и  $H_z$ ;
- (в) – применение метода Бубнова – Галеркина, позволяющего преобразовать интегральные уравнения в систему алгебраических уравнений;
- (г) – расчет постоянной распространения  $\gamma$  посредством приведения определителя системы уравнений к нулю.

На основе результатов электродинамического анализа были разработаны оригинальные вычислительные программы для расчета параметров резонаторов и характеристик СВЧ устройств на основе МЦЛ структур.



Для уменьшения управляющего напряжения необходимо уменьшать ширину щели. Это приводит к увеличению эффективности замедления, но в щелевой линии возрастает затухание волны, поэтому выбор оптимальной ширины щели не имеет однозначного решения.

Для обеспечения однозначности выбора параметров щелевой линии и снижения управляющего напряжения была предложена оригинальная конструкция линии, представляющая собой слоистую структуру, показанную на рис. 1. На поверхность диэлектрической подложки ( $\epsilon_3$ ) осаждается слой платины, на котором формируется пленка БСТ ( $\epsilon_2$ ). Противоположный электрод платины наносится на поверхность БСТ. Пленка линейного диэлектрика ( $\epsilon_1$ ) осаждается на слой БСТ, и на ее поверхности формируется сравнительно широкая щелевая линия. В такой «сэндвич» щелевой линии управляющие электроды выполнены в виде тонких слоев платины, причем для снижения емкости управляющие электроды с обеих сторон пленки не должны перекрыватьсь. В рассматриваемой конструкции осуществляется многопараметрический

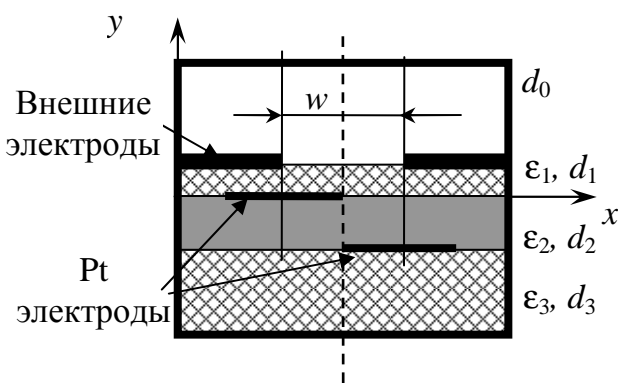


Рис. 1.

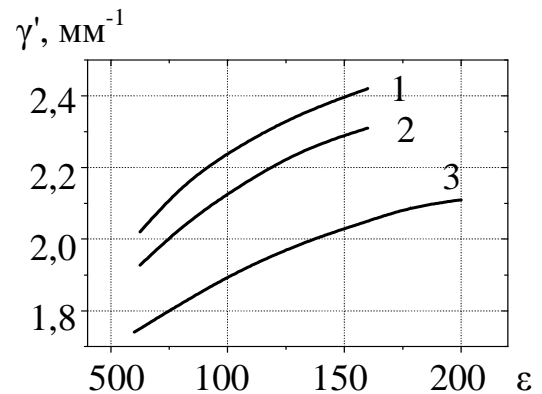


Рис. 2.

поиск требуемых электродинамических характеристик щелевой линии.

Следует обратить внимание на нелинейный характер зависимостей постоянной распространения от диэлектрической проницаемости пленки БСТ (рис. 2), который связан со сложной структурой электромагнитного поля в трехслойной диэлектрической топологии. На рис. 2 приведены дисперсионные кривые для определенного набора параметров щелевой линии, 1 –  $\epsilon_1 = 100$ ,  $d_1 = 0,5$  мкм, 2 –  $\epsilon_1 = 10$ ,  $d_1 = 1$  мкм, 3 –  $\epsilon_1 = 10$ ,  $d_1 = 0,5$  мкм.

Выбор топологии должен быть направлен на снижение вклада потерь в электродах линии в суммарные потери при соответствующем наборе физических и размерных параметров. Уменьшение зазора приводит к возрастанию электродных потерь. На описанную конструкцию щелевой линии автором получен патент.

Другим вариантом щелевой линии является многощелевая линия (МЩЛ), поперечное сечение которой показано на рис. 3. На подложку ( $\epsilon_2$ ) осаждается слой сегнетоэлектрика ( $\epsilon_1$ ), на поверхности которого формируется МЩЛ, содержащая несколько парциальных щелей и узких электродов,

расположенных между широкими крайними электродами. Основная электромагнитная мода в многощелевой линии близка к поверхностной ТЕ-волне, теоретически существующей в волноводной структуре с бесконечной решеткой емкостных электродов.

Вклад омических потерь узких парциальных электродов в затухание щелевой моды относительно невелик в сравнении с аналогичным вкладом электродов «обычный» щелевой линии, который определяется продольным током в ее электродах. Рассчитанные зависимости постоянной распространения  $\gamma'$ , показанные на рис. 4, где  $w_0 = w_1 = l = 5$  мкм, кривая 1 соответствует  $\varepsilon = 600$ , 2 –  $\varepsilon = 800$ , 3 –  $\varepsilon = 1000$ , 4 –  $\varepsilon = 2000$ , подтверждают прогнозы относительно характеристик МЦЛ.

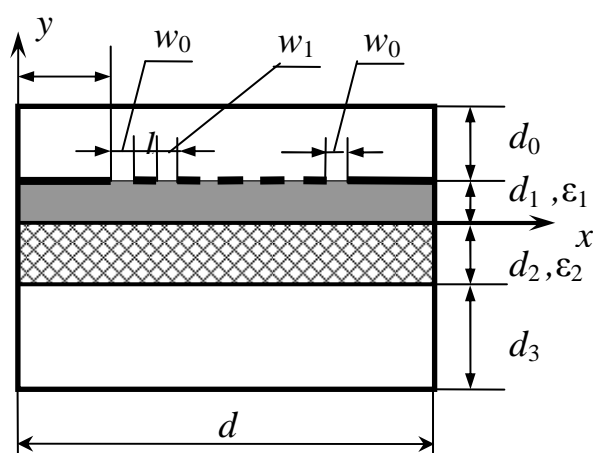


Рис. 3.

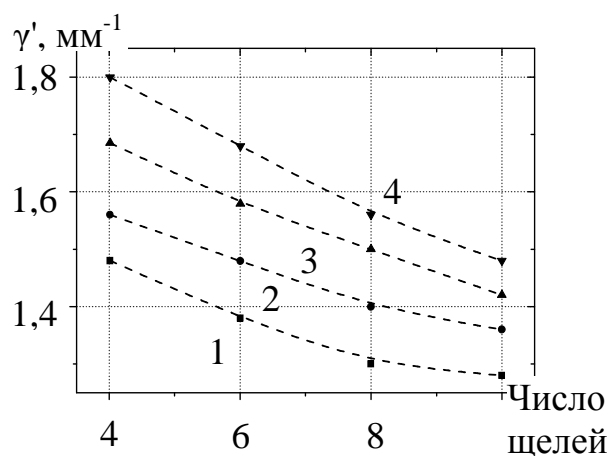


Рис. 4.

Например, при шести щелях в многощелевой линии  $w = w_0 = l = 0.005$  мм при  $\varepsilon = 1000$   $\dot{\gamma} = 2.1 - j \cdot 8 \cdot 10^{-3}$ , что очень близко к значению  $\dot{\gamma} = 1.96 - j \cdot 6.7 \cdot 10^{-3}$  щелевой линии с шириной щели  $w = 0.05$  мм.

Для подключения МЦЛ к генератору используется полосково-щелевой переход или согласующие линии в виде экспоненциального перехода (линии Вивальди). В работе предложена методика расчета формы согласующего щелевого перехода, который обеспечивает согласование в широком диапазоне частот, что позволяет создавать СВЧ устройства, такие как фазовращатели с плавным изменением фазы в широком частотном диапазоне.

**В третьей главе** рассматриваются методы исследований и результаты измерений СВЧ характеристик сегнетоэлектрических пленок и МЦЛ фазовращателей.

Основным требованием, предъявляемым к методикам измерения свойств пленок или перестраиваемых устройств на их основе, является высокая точность значений диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon$ ) и диэлектрических потерь ( $\text{tg} \delta$ ) при изменении в широком диапазоне управляющих напряжений ( $U$ ). Подача на сегнетоэлектрическую плёнку управляющего электри-

ческого поля требует применения металлических электродов. Однако, пленки металла могут исказить параметры плёнки БСТ, поэтому необходимо использовать и безэлектродные методики определения характеристик пленок.

Измерения диэлектрических параметров пленок БСТ проводились в широком диапазоне частот от 1 МГц до 100 ГГц. Для измерения применялись как известные, так и оригинальные, специально разработанные методики. В частности, для рабочего диапазона частот 20 – 40 ГГц был предложен метод щелевого резонатора, учитывающий влияние металлических электродов на свойства пленок БСТ. Для сравнения использовались результаты измерений в частично-заполненном волноводном резонаторе.

На рис. 5 а) показан резонатор на основе отрезка щелевой линии, короткозамкнутой на обоих концах. Длина резонатора –  $l$ , ширина –  $w$ , элемент согласования –  $\Delta$ . Резонатор помещается в прямоугольный волновод сечением  $7.2 \times 3.4$  мм (см. рис. 5 б). Постоянная распространения щелевой линии и длина резонатора связаны следующим соотношением  $\gamma = n\pi/l$ .

На рис. 5 в) показан МЩЛ резонатор (1), имеющий 4 парциальные щели.

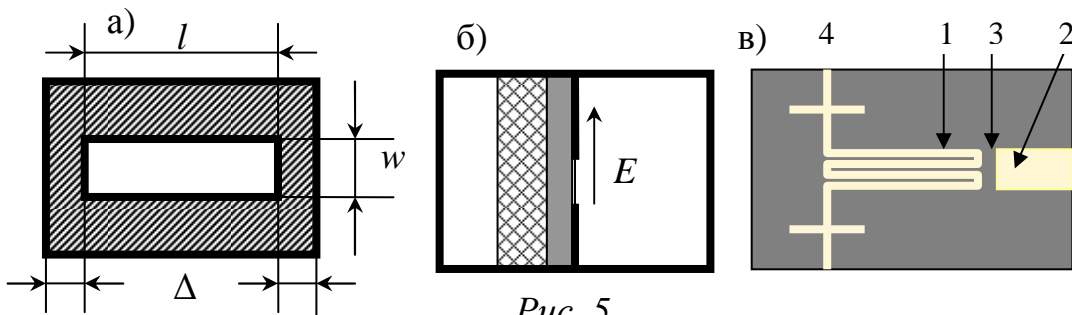


Рис. 5.

Резонатор связан с внешней щелевой согласующей линией (2) через элемент согласования (3). С противоположной стороны резонатор имеет электродинамическую «закоротку» на СВЧ, позволяющую одновременно прикладывать постоянное напряжение смещения на резонансную структуру и измерять ее управляемость в режиме на отражение.

Значение частичной добротности, определяемой потерями в электродах, равно

$$Q_{\sigma} = \frac{\omega_0}{2\gamma_{\sigma}'} \frac{\partial \gamma}{\partial \omega} \Big|_{\omega = \omega_0}, \quad Q_0 = \frac{1}{\xi(\operatorname{tg} \delta + q)},$$

где  $q = \gamma_{\sigma}' \left( \varepsilon \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon} \right)^{-1}$ .

Если из эксперимента известна собственная добротность, то  $\operatorname{tg} \delta$  сегнетоэлектрической пленки вычисляется по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = (Q_0 \xi)^{-1} - q.$$

Таким образом, полученное соотношение позволяет исключить возможные потери в электродах резонатора при вычислении  $\text{tg}\delta$  сегнетоэлектрической пленки.

Экспериментальное значение добротности  $Q_{\text{экс}}$  определялось по спаду АЧХ на уровне 3 дБ (см. рис. 6). Значение нагруженной добротности может быть пересчитано в собственную добротность при известном экспериментальном значении коэффициента прохождения  $T$  (дБ) на резонансной частоте

$$Q_0 = \frac{Q_{\text{экс}}}{1 - 10^{-\frac{T}{20}}}$$

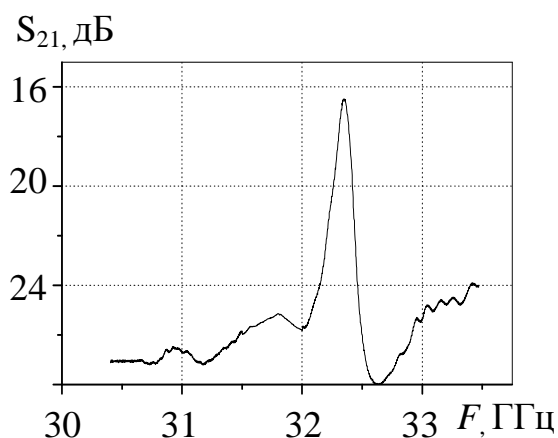


Рис. 6.

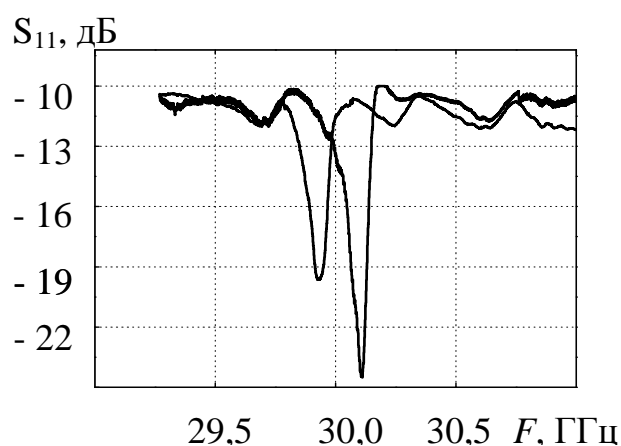


Рис. 7.

Для МЦЛ резонатора длиной  $l = 2$  мм, состоящего из трех электродов и четырех зазоров между ними (рис. 5 в), которые имеют равную ширину 0,05 мм (полная ширина щели - 0,35 мм), изготовленного на основе БСТ пленки толщиной  $\sim 1,0$  мкм и диэлектрической проницаемости  $\epsilon = 1100$ , значение  $Q$ -фактора составило  $\sim 30$  на частоте 32,38 ГГц. Для аналогичного щелевого резонатора, имевшего ширину щели 0,35 мм, длину 2 мм, изготовленного на той же пленке БСТ, измерения  $Q$ -фактора показали практически одинаковое значение  $\sim 30$  на частоте 33,41 ГГц (рис. 6). Таким образом, полученный результат позволил сделать вывод о равенстве СВЧ потерь в щелевом и МЦЛ резонаторе, что является подтверждением первого научного положения диссертационной работы.

Подавая управляющее напряжение на электроды МЦЛ можно изменять диэлектрическую проницаемость и резонансную частоту резонатора. На рис. 7 показана «электрическая» перестройка МЦЛ резонатора вследствие изменения диэлектрической проницаемости пленки БСТ. Перестройка резонансной частоты составила  $\sim 190$  МГц при напряжении смещения 1 кВ (20 В/мкм). С приложением напряжения смещения добротность резонатора возрастала, что свидетельствовало об уменьшении диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) в пленке.

На основе МЦЛ топологий были разработаны конструкции фазовращателей отражательного и проходного типа. Планарная топология МЦЛ фазовращателя была интегрирована с согласующим и излучательным элементами, которые имели форму экспоненциальной щелевой линии (линии Вивальди). Для реализации проходных фазовращателей потребовалось применить электромагнитно-прозрачные электроды из платины. На рис. 8 показана топология проходного МЦЛ фазовращателя (парциальные электроды внутри щели не отображены из-за их малой ширины). На рис.8 отдельно вынесен «электромагнитно-прозрачный» электрод, соединяющий поочередно парциальные электроды внутри щелевой линии, на которые подавалась смещение. На соседние электроды прикладывался потенциал корпуса прибора. На рис. 9 приведена микрофотография, показывающая вид платиновых и медных электродов в месте соединения фазовращательной и излучательной частей интегрального устройства.

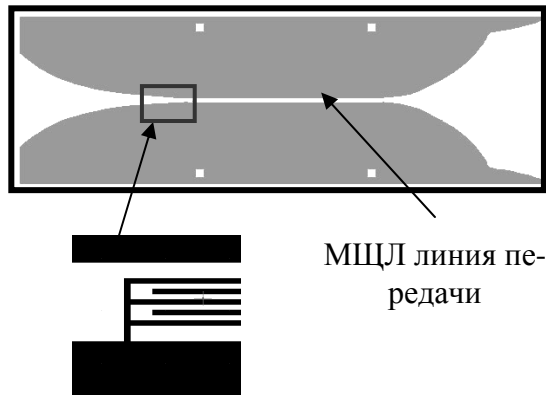


Рис. 8.

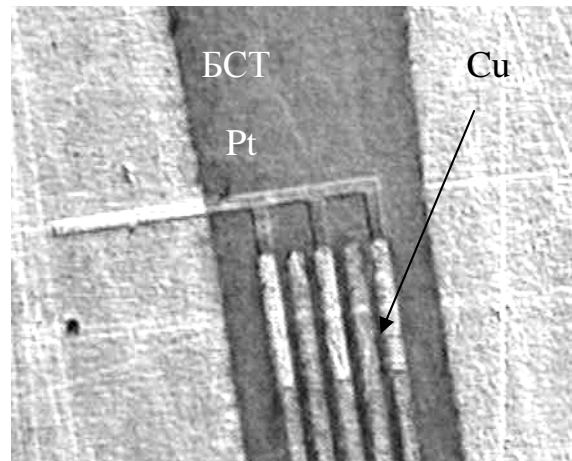


Рис. 9.

Для экспериментального исследования СВЧ - характеристик фазовращателей была разработана специальная конструкция приборного макета. Плоскость перпендикулярная поверхности планарной структуры соответствовала  $H$ -компоненте электромагнитного поля. Диаграмма направленности излучателя в  $H$ -плоскости приведена на рис. 10. Сплошной линией показана диаграмма направленности при нулевом смещающем поле, а пунктирной линией – при 10 В/мкм (200 В).

Важно отметить, что форма диаграммы направленности практически не изменялась при приложении смещающего напряжения. Наблюдался только незначительный рост излучаемой мощности при приложении смещающего напряжения. Это объясняется тем, что СВЧ потери в сегнетоэлектрических линиях передачи уменьшаются при приложении смещающего электрического поля, поэтому в эксперименте наблюдалось небольшое увеличение излучаемой мощности.

Измерения дифференциального фазового сдвига и вносимых потерь показали, что интегральная МЦЛ структура фазовращателя-излучателя вносит

СВЧ потери не более 10 дБ, которые практически не меняются при изменении частоты. Зависимость дифференциального фазового сдвига от приложенного напряжения смещения приведена на рис. 11. Она имеет характер, близкий к линейному. Фазовый сдвиг составил около 270 градусов при приложении смещающего напряжения  $\sim 250$  В, что соответствовало напряженности электрического поля 12,5 В/мкм.

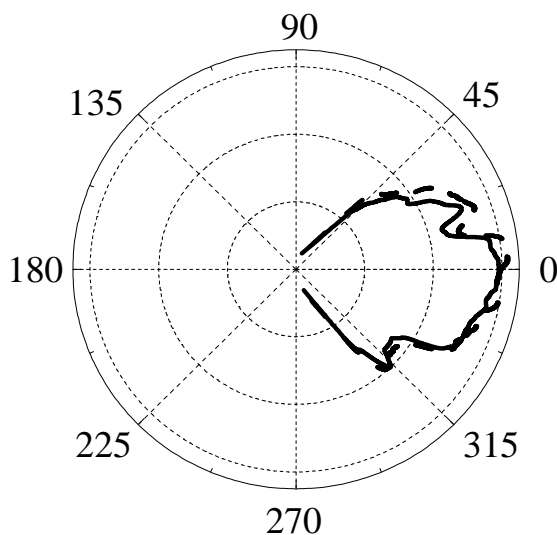


Рис. 10.

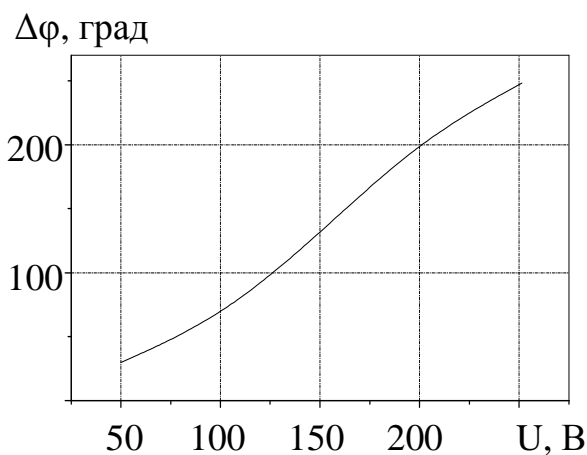


Рис. 11.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили то, что МЦЛ структура пригодна для создания электрически управляемых СВЧ устройств, таких как резонаторы и фазовращатели.

**В четвертой главе** рассматривается структура феррит-сегнетоэлектрик как основа принципиально новых СВЧ устройств с магнитным и электрическим управлением.

Для анализа слоистой структуры феррит – сегнетоэлектрик применялся метод полноволнового анализа, основные этапы которого приводятся в разделе 2 (см. с. 9). Ранее анализ подобной слоистой структуры «металл – диэлектрик – феррит – сегнетоэлектрик – металл» был проведен в работах В.Е. Демидова и Б.А. Калиникова (ПЖТФ. – 1999. – т. 24. – вып. 21. – С. 86-93) иным способом. Полученные в обеих работах дисперсионные зависимости соответствуют друг другу, что подтверждает адекватность обоих аналитических подходов.

Выведенные ранее дисперсионные уравнения имеют достаточно громоздкий вид и не вполне удобны для аналитического описания дисперсионных свойств электромагнитно-спиновых волн. Поэтому в данной работе использовалась хорошо отработанная методика полноволнового анализа. Расчет граничной структуры феррит-сегнетоэлектрик на основе полноволновой методики послужил начальным этапом для анализа более сложной структуры феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка.

Для получения эффективного электрического управления структурой феррит-сегнетоэлектрик, как известно из литературы, необходимо применение сегнетоэлектрических слоев толщиной в сотни микрон. Однако, наличие такого слоя требует использовать высокое управляющее напряжение – более 1000 В – для создания необходимого электрического поля. Кроме того, значительная емкость такой структуры становится причиной сравнительного большого времени переключения – до 10 мкс.

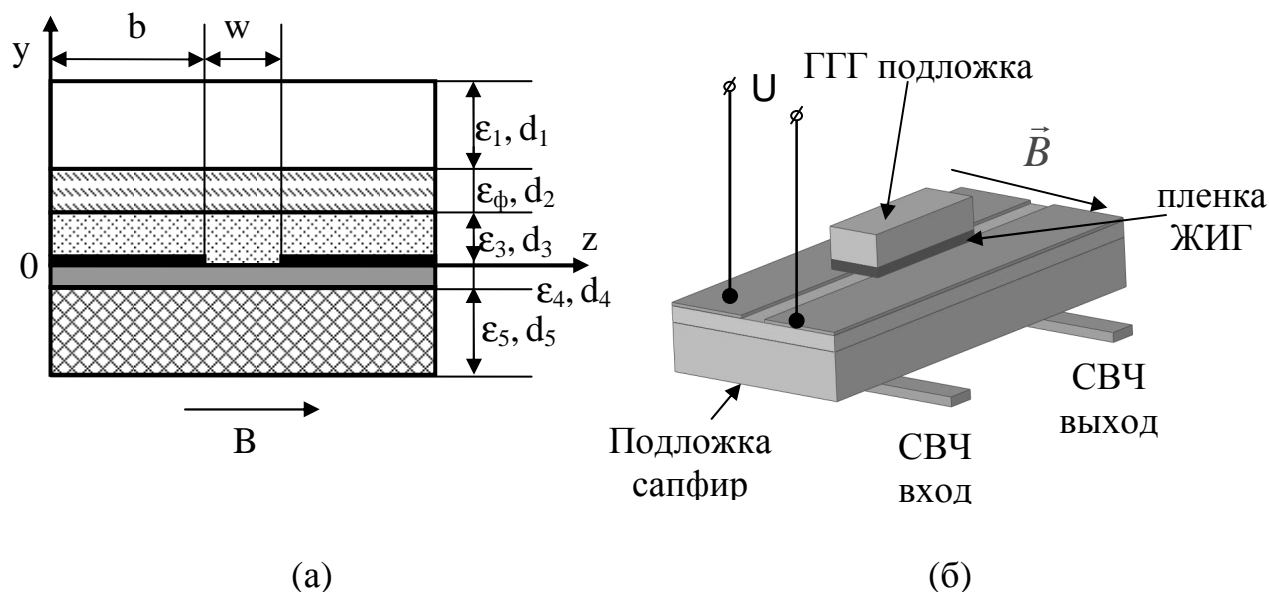


Рис. 12.

Устранить отмеченные недостатки можно, заменив толстый слой сегнетоэлектрика щелевой линией на основе сегнетоэлектрической пленки (рис. 12). Структура электромагнитного поля основной моды щелевой линии соответствует структуре поля ПМСВ в ферритовом резонаторе (волноводе), поэтому возможно формирование гибридной электромагнитно-спиновой волны. Учитывая это обстоятельство, в качестве объекта дальнейшего исследования была выбрана слоистая структура феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка.

В работе приводится вывод дисперсионного уравнения для структуры феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка, а также последовательные этапы его численного решения. На рис. 13 показана перестройка дисперсионных зависимостей для щелевой сегнетоэлектрической линии и для структуры феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрик при разных значениях диэлектрической проницаемости БСТ и разном магнитном поле. Сплошная линия соответствует  $\epsilon = 1200$ , а пунктирная линия –  $\epsilon = 2000$ . Приложение магнитного поля приводит к насыщению зависимости  $F(k)$ , что указывает на гибридизацию электромагнитных и спиновых волн.

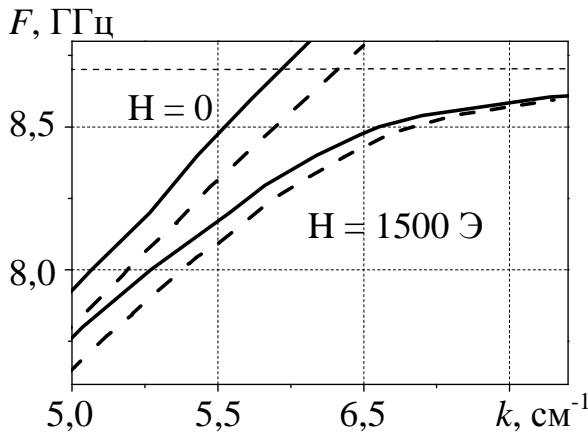


Рис. 13.

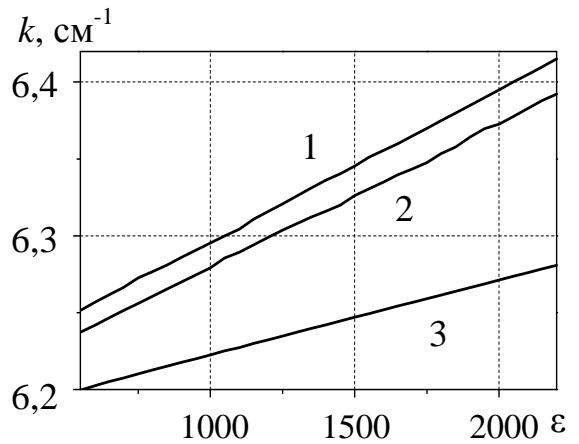


Рис. 14.

На рис. 14 представлена зависимость постоянной распространения гибридной волны в структуре феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка от проницаемости пленки БСТ для разных значений ширины щели и толщины пленки БСТ (линия 1 – ширина щели  $w = 100$  мкм, толщина БСТ  $d_4 = 5$  мкм, линия 2 –  $w = 50$  мкм,  $d_4 = 1,5$  мкм, линия 3 –  $w = 100$  мкм,  $d_4 = 1,5$  мкм). В диапазоне диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = 1000 - 1500$  перестройка в структуре феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка превышает перестройку в сегнетоэлектрической щелевой линии. При уменьшении ширины щелевой линии и увеличении толщины пленки БСТ увеличивается диапазон перестройки параметров в исследуемой слоистой структуре.

Для измерения передаточных характеристик щелевой линии, содержащей сегнетоэлектрические и ферритовые слои, был изготовлен измерительный макет, как это показано на рис. 12 б). На поверхности сегнетоэлектрической пленки толщиной около 10 мкм формировалась щелевая линия шириной 150 мкм. На поверхности щелевой линии располагался ферромагнитный ЖИГ резонатор (намагниченность насыщения  $M_0 = 1750$  Э), толщиной 6 мкм.

На рис. 15 приведены частотные характеристики экспериментального макета. Кривая 1 соответствует нулевой напряженности управляющего электрического поля и напряженности магнитного поля 1420 Э.

Кривые 2 и 3 сняты при напряженности магнитного поля 1570 Э, причем для кривой 2 электрическое поле отсутствует, а для кривой 3 поле составляет 5

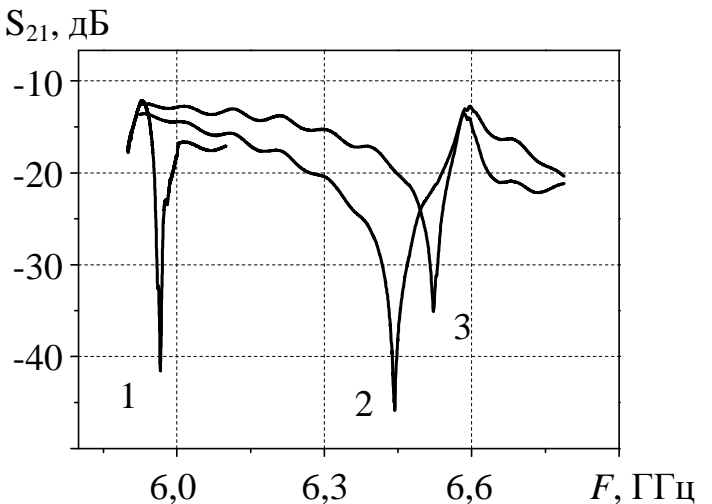


Рис. 15.



В/мкм. Электрическая перестройка составила 77 МГц, что соответствует трем полосам пропускания резонатора.

В отличие от слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик, содержащей толстый керамический слой сегнетоэлектрика, слоистая структура феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка отвечает требованиям интегральной технологии микроэлектронных СВЧ устройств.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

1. С помощью численного анализа и экспериментальных исследований показано, что многощелевая линия на поверхности сегнетоэлектрической пленки по уровню затухания СВЧ щелевой моды близка к щелевой линии без внутренних электродов.
2. Разработана конструкция интегральных проходных волноводно-планарных фазовращателей-излучателей на основе сегнетоэлектрических пленок, в которых щелевые линии с экспоненциальным профилем (линии Вивальди) обеспечивают согласование МЦЛ с прямоугольными волноводами и излучателями в широком частотном диапазоне
3. Получено дисперсионное уравнение для структуры феррит – щелевая линия – сегнетоэлектрическая пленка и проведен его численный анализ. Показано, что взаимодействие ПМСВ и щелевой моды приводит к волновой гибридизации, позволяющей эффективно управлять дисперсионными характеристиками посредством электрического и магнитного полей.
4. Экспериментально показана электрическая и магнитная перестройка резонатора на основе щелевой линии с ферритовым и сегнетоэлектрическим заполнением. Электрическая перестройка, составила 77 МГц при напряженности управляющего поля 5 В/мкм, а магнитная – 477 МГц при изменении напряженности магнитного поля от 1420 до 1570 Э.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### *В рецензируемых журналах из списка ВАК*

1. Белявский П.Ю. Слоистые структуры феррит-сегнетоэлектрик как основа сверхвысокочастотных устройств с электрическим управлением / П.Ю. Белявский, А.Н. Голиков, А.А. Семенов, С.Ф. Карманенко // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника, вып. 1. – 2005. – С. 8-10.
2. Белявский П.Ю. Радиоэлектронные управляемые фазовращатели на основе сегнетокерамики / П.Ю.Белявский, С.Ф. Карманенко, А.А. Семенов // Известия ВУЗов: Радиоэлектроника, вып. 1. – 2005. – С. 32-36.
3. Chong-Yun Kang. The investigation of dielectric characteristics of (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> thin films in millimeter wavelength range (Исследование диэлектрических характеристик тонких пленок (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> в миллиметровом диапазоне длин волн) / Chong-Yun Kang, S.F.Karmanenko, I.G. Mironenko, A.A. Semenov, A.I. Dedyk, A.A. Ivanov, P.Ju. Beljavski, U.V. Pavlova // Integrated ferroelectrics. – 2006. – Vol. 86. – P. 131-140.

4. Mironenko I. G. Multislot transmission lines and microwave phase shifters based on (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> films (Многощелевые линии передачи и СВЧ фазовращатели на основе пленок (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub>) / I. G. Mironenko, A. A. Semenov, A. A. Ivanov, P. J. Beljavski, Chong-Yun Kang, S. F. Karmanenko // *Integrated Ferroelectrics*. – 2008. – V. 97. – P. 58 – 66

*В других изданиях*

5. Пат. 2336609 РФ. Щелевая линия / И.Г. Мироненко, С.Ф. Карманенко, А.А. Иванов, А.А. Семенов, П.Ю. Белявский; опубл. 20.10.2008. Бюллетень № 29.
6. Белявский П.Ю. Исследование диэлектрических свойств тонких пленок сегнетоэлектриков с помощью щелевого резонатора / П.Ю. Белявский, А.А. Семенов // *Материалы научно-технической школы-конференции. Молодые ученые 2006, часть 2.* - 2006. - С. 68-71.
7. Белявский П.Ю. Электрически управляемый фазовращатель на основе многощелевой линии для применения в фазированных антенных решетках / П.Ю. Белявский, А.А. Иванов, И.Г. Мироненко // *Материалы VI Межд. научно-технической конференции. Intermatic 2007.* – 2007. – С. 73-77.
8. Белявский П. Ю. Слоистый феррит-сегнетоэлектрический резонатор с электрическим и магнитным управлением / П. Ю. Белявский, А. А. Никитин, С. Ф. Карманенко, А. А. Семенов // *Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ" (Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета).* – 2008. – Вып. 6. – С. 24-28.
9. Semenov A.A. Multislot transmission line phase shifter combined with the planar irradiator for scanning antenna (Многощелевой фазовращатель, совмещенный с планарным излучателем, для сканирующей антенны) / A.A. Semenov, I.G.Mironenko, A.A. Ivanov, Chong-Yun Kang, P.J. Beljavski, S.F. Karmanenko // *Proceedings of 37 European Microwave Conference, 2007.* – 2007. – P. 1633-1636.
10. Карманенко С.Ф. Интегральные сегнетоэлектрические структуры в управляемых радиоэлектронных устройствах / А.Б. Козырев, И.Г. Мироненко, О.Ю. Буслов, П.Ю. Белявский, Chong-Yun Kang // *Материалы международной научно-практической конференции «Наука, образование и общество в XXI веке», посвященной 120-летию ЛЭТИ, С-Петербург.* – 2006. – С. 89 – 94.