

На правах рукописи

Колмакова Ирина Владимировна

Микрополосковые узкополосные СВЧ фильтры с подавлением
паразитных полос

05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), кафедры «Микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры»

Научный руководитель

доктор физико-математических наук, профессор Вендик Ирина Борисовна

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор, Козырев Андрей Борисович, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), профессор кафедры «Физической электроники и технологий»

Кандидат технических наук, доцент, Седышев Эрнест Юрьевич, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, доцент кафедры «Электронных и квантовых приборов» Ведущая организация – ОАО «Научно-производственное предприятие» РАДАР ММС»

Защита состоится 19 июня 2013 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им.

В.И.Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан 17 мая 2013 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.03

Баруздин С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широкое распространение наземных и спутниковых систем связи, работающих в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне частот, привело к повышению требований к характеристикам всех компонентов радиосистем, в том числе, и к полосовым фильтрам. Основные требования: малые габариты и вес, низкие потери в полосе и высокая избирательность. Уменьшение габаритов фильтра возможно при использовании планарной технологии. Наибольшее распространение в области СВЧ применений среди планарных линий получила микрополосковая линия передачи. Она проста в изготовлении, обладает малыми габаритами, имеет высокую надежность и сравнительно малые потери. Одним из недостатков структур на микрополосковых линиях передачи является наличие паразитных полос пропускания, которые ограничивают возможности применения фильтров. Существуют различные способы подавления паразитных полос, которые используются в зависимости от топологии фильтра и области применения. Все методы могут быть разделены на две группы – собственно методы подавления и методы частотного сдвига паразитных полос пропускания. В методах подавления в фильтр вводится некоторый элемент, который либо разрушает паразитный резонанс полностью, либо подавляет его до какого-то уровня (20-40 дБ). В методах смещения паразитные отклики смещаются вверх по частоте, расстояние между основным и паразитными резонансами увеличивается. Несмотря на разнообразие предложенных на сегодняшний день методов подавления, проблема проектирования фильтров без паразитных откликов с сохранением параметров частотной характеристики и размеров топологии фильтра является актуальной задачей. Современные исследователи находятся в поисках новых форм резонаторов и их взаимного расположения на подложке, которые позволят увеличить компактность устройства. С появлением новых конфигураций фильтров возникает и проблема поиска эффективного метода подавления паразитных откликов.

В настоящее время в радиосвязи, радиолокации и устройствах телекоммуникации широко применяются узкополосные устройства, что определяет востребованность узкополосных фильтров. Узкополосные сигналы применяются в системах с частотным разделением каналов при организации каналов связи в общедоступных частотных диапазонах. При частотном разделении каналов часто требуются узкополосные полосно-пропускающие фильтры (ППФ) с равным уровнем подавления по соседним каналам

(симметричной передаточной характеристикой), из которых можно было бы сформировать блок разделения частотных каналов (мультиплексор).

Узкополосным фильтрам на отрезках планарных линий передачи разработчики долгое время уделяли мало внимания из-за значительно более низкой добротности таких резонаторов по сравнению с объемными резонаторами. Из-за этого было нецелесообразно применять планарные резонаторы при проектировании фильтров высокого порядка (более 8 порядка).

Открытие явления высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), появление технологии выращивания высококачественных ВТСП пленок привело к развитию планарных СВЧ устройств и особенно узкополосных ППФ высокого порядка. Стало возможным разрабатывать ППФ, состоящие из десятка резонаторов и более. Это привело к созданию фильтров с недостижимыми ранее параметрами, например, сверхузкополосных фильтров с относительной полосой пропускания менее 0,5% и потерями не более 0,5 дБ в полосе пропускания. В результате возникла новая область – проектирование сверхпроводниковых планарных полосовых фильтров с уникальными характеристиками.

Таким образом, две сформулированных проблемы – разработка сверхпроводниковых сверхузкополосных фильтров и разработка методов подавления паразитных полос пропускания – определяют актуальность данной работы.

Целью диссертационной работы является исследование и разработка методов проектирования узкополосных планарных фильтров с подавлением паразитных полос пропускания.

Поставленная цель была достигнута решением следующих задач:

- 1) Исследование усовершенствованных конфигураций топологий фильтров, обеспечивающих подавление паразитных полос пропускания;
- 2) Исследование возможности применения искусственной линии передачи с отрицательной дисперсией в составе фильтра для сдвига паразитной полосы пропускания;
- 3) Разработка итерационного метода синтеза фильтра высокого порядка;
- 4) Создание оригинальной конструкции двухполосного ППФ на микрополосковых и встречно-штыревых резонаторах;
- 5) Разработка узкополосных высокоизбирательных ВТСП фильтров с предельно низкими потерями в полосе пропускания.

Основные методы исследования:

- а) Теоретические: методы теории электрических цепей, численные методы

электродинамического моделирования;

- б) Экспериментальные: измерения амплитудно-частотных характеристик фильтра.

Научные положения, выносимые на защиту:

- 1) Для эффективного моделирования фильтра с подавлением паразитных откликов методом емкостной компенсации следует применять метод обобщенной модели связи, который позволяет учесть несоседние связи между резонаторами в фильтре и введенные дополнительные элементы для подавления паразитных полос пропускания.
- 2) Двухполосный полосно-пропускающий фильтр может быть выполнен на комбинации микрополосковых резонаторов и встречно-штыревых резонаторов, расположенных внутри «окна», находящегося в слое экрана микрополосковой структуры. При этом «окно» выполняет дополнительную функцию сдвига паразитной полосы пропускания.
- 3) Использование комбинации отрезков линий с положительной дисперсией и искусственной линии с отрицательной дисперсией при проектировании резонаторов позволяет создавать фильтры с частотным сдвигом паразитных полос пропускания.
- 4) Синтез фильтра высокого порядка на решетке связанных микрополосковых резонаторов может быть выполнен с применением итерационной процедуры: проектирование следует начинать с фильтра 4-го порядка и далее процедуру синтеза фильтра продолжить последовательным дополнением 2-х, 4-х, 6-и и т.д. резонаторов в центр структуры фильтра с сохранением расстояний между резонаторами.

Научная новизна работы

- 1) Предложены усовершенствованные конфигурации топологий фильтров, обеспечивающих подавление паразитных полос пропускания: фильтры со встроенными емкостями, фильтры с частично удаленным слоем экрана.
- 2) Продемонстрирована возможность реализации компактного двухполосного ППФ на микрополосковых и встречно-штыревых резонаторах.
- 3) Предложено использование линии с отрицательной дисперсией в составе ППФ для обеспечения сдвига паразитной полосы пропускания.
- 4) Предложен итерационный метод синтеза фильтров высокого порядка на решетке связанных резонаторов.
- 5) Разработаны сверхузкополосные планарные полосовые фильтры высокого порядка с применением ВТСП.

Степень обоснованности и достоверности полученных результатов

Полученные теоретические результаты не противоречат ранее полученным и описанным в литературе результатам. Результаты электродинамического моделирования и экспериментального исследования тестовых образцов подтверждают достоверность результатов, полученных теоретически.

Практическая значимость результатов работы

- 1) Предложенные методы подавления и сдвига паразитных полос пропускания существенно улучшают характеристики ППФ и обеспечивают их востребованность в системах различного назначения.
- 2) Разработанные узкополосные планарные фильтры могут применяться в радиосвязи, радиолокации и устройствах телекоммуникации. Фильтры с подавлением паразитных полос пропускания могут найти применение в системах с частотным разделением каналов, например, в дуплексерах и мультиплексерах. Сверхпроводниковые ППФ могут использоваться в радиоастрономии и метеорологии. Режекторные фильтры на пленках ВТСП могут найти применение в широкополосной радиолокации.
- 3) Разработанная итерационная методика синтеза ППФ высокого порядка сокращает время проектирования фильтров на решетке связанных резонаторов.

Реализация и внедрение результатов исследования

Полученные в рамках работы результаты могут быть использованы в современной радиоэлектронной промышленности. Узкополосные полосно-пропускающие и полосно-заграждающие ВТСП фильтры были разработаны в рамках совместной работы с корпорацией «Русский сверхпроводник».

Апробация

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях.

Международные конференции: 11th International Student Seminar «Microwave Application of Novel Physical Phenomena» (Июнь 2004, Санкт-Петербург, Россия), 13th International Student Seminar «Microwave Applications of Novel Physical Phenomena» (Август 2006, Рованиеми, Финляндия), 36th European Microwave Conference (Октябрь 2006, Мюнхен, Германия), 40th European Microwave Conference (Сентябрь 2010, Париж, Франция), COMCAS (Ноябрь 2011, Телль Авив, Израиль). 15th International Symposium «Нанозифика и нанозлектроника» (Март 2011, Нижний Новгород, Россия).

Всероссийские конференции: Всероссийская конференция и научная школа молодых ученых «Новые материалы и нанотехнологии в электронике СВЧ»

(ноябрь 2010г., Санкт-Петербург, Россия), Всероссийская конференция «Микроэлектроника СВЧ» (июнь 2012 г., Санкт-Петербург, Россия).

Прочие конференции и семинары: Политехнический симпозиум «Молодые ученые - промышленности северо-западного региона» (2004, Санкт-Петербург, Россия), Научно-технический семинар «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ» в рамках 58^{ой} и 62^{ой} научно-технических конференций профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» (2005 и 2010гг., Санкт-Петербург, Россия), конференция «Прикладная сверхпроводимость» (2010 и 2011 гг., Москва, Россия).

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 17 статьях и докладах на конференциях разного уровня, среди которых 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 12 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях, перечисленных в конце автореферата.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, включает 105 рисунков, 37 таблиц, 2 приложения и список литературы из 101 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи диссертации. Сформулирована научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «Планарные СВЧ фильтры» посвящена обзору литературы по теме работы. В главе рассматриваются особенности проектирования планарных фильтров, методы анализа структур на связанных линиях передачи. Далее анализируются различные методы подавления паразитных полос фильтра, приводится их классификация. Обсуждаются достоинства и недостатки методов. Отмечается эффективность использования высокотемпературных сверхпроводниковых материалов для создания планарных фильтров. Описаны основные свойства высокотемпературных сверхпроводников, и обсуждается их применение для проектирования узкополосных СВЧ ППФ. В заключении к

главе 1 сформулированы основные выводы и задачи исследований в рамках диссертационной работы.

Глава 2 «Методы подавления паразитных полос пропускания фильтра» посвящена методам подавления паразитных откликов фильтра с помощью метода емкостной компенсации и использования резонаторов со скачком волнового сопротивления. Метод емкостной компенсации заключается в выравнивании фазовых скоростей мод связанных микрополосковых линий передачи при помощи введения дополнительных емкостей между связанными резонаторами (рисунок 1). Номиналы емкостей могут быть найдены в процессе применения процедуры анализа пары связанных резонаторов.

В главе 1 рассмотрены симметричная и несимметричная структуры в виде пары связанных резонаторов типа «шпилька» с введенными между резонаторами дополнительными емкостями. Для анализа симметричной структуры (рисунок 1а) используется метод синфазно-противофазного возбуждения, для анализа несимметричной структуры (рисунок 1б) - метод обобщенной модели связи [1].



Рисунок 1 – Конфигурация пары связанных резонаторов-шпилек с дополнительными емкостями: симметричная ориентация (а), инверсно-симметричная ориентация (б).

По результатам исследований несимметричной структуры пары связанных резонаторов-шпилек был разработан ППФ 4-го порядка с подавлением паразитной полосы пропускания (рисунок 2). Емкости между резонаторами реализуются в виде сильно связанных коротких отрезков микрополосковых линий передачи. Планарный МПЛ фильтр был изготовлен по тонкопленочной технологии на подложке из поликора ($\epsilon = 9,6$), материал проводников - медь. Центральная частота фильтра 2,5 ГГц, относительная полоса пропускания 6 %. Потери в полосе пропускания составили 2,6 дБ. Экспериментальное значение уровня подавления первой паразитной полосы пропускания на частоте 4,4 ГГц порядка 12 дБ.

Для подавления паразитных полос фильтра используются также резонаторы со скачком волнового сопротивления, которые представляют собой комбинацию отрезков линий передач с разными волновыми сопротивлениями

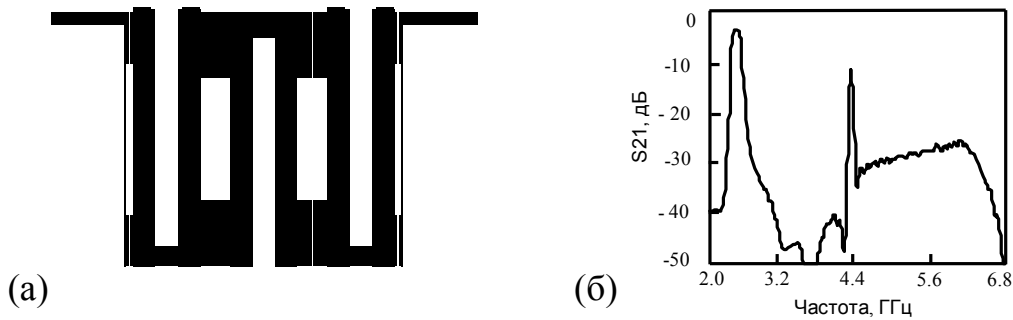


Рисунок 2 – Топология (а) и экспериментальные характеристики (б) фильтра.

Z_1 , Z_2 и электрическими длинами θ_1 и θ_2 (рисунок 3). Условия резонанса для основной моды (1) и первой паразитной моды (2) для структуры на рисунке 3 описываются выражениями:

$$\operatorname{tg}\left(\theta_{02} \frac{\omega}{\omega_0}\right) = \frac{Z_2}{Z_1} \operatorname{ctg}\left(\theta_{01} \frac{\omega}{\omega_0}\right), \quad (1)$$

$$\operatorname{ctg}\left(\theta_{02} \frac{\omega_1}{\omega_0}\right) = -\frac{Z_2}{Z_1} \operatorname{ctg}\left(\theta_{01} \frac{\omega_1}{\omega_0}\right), \quad (2)$$

где θ_{01} и θ_{02} – электрические длины сегментов резонатора с различными значениями волнового сопротивления Z_1 и Z_2 на резонансной частоте основной моды ω_0 . Частота первой паразитной моды ω_1 . По заданным значениям частот первого и второго резонансов и выбранной величины отношения волновых сопротивлений находятся электрические длины сегментов.

На основе резонаторов со скачком волнового сопротивления был спроектирован ППФ 5-го порядка, топология которого приведена на рисунке 4.

Материал подложки – поликор. Центральная частота 3 ГГц, относительная полоса пропускания 17 %, потери в полосе пропускания 2 дБ, уровень

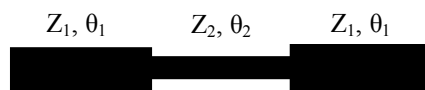


Рисунок 3 – Конфигурация микрополоскового резонатора со скачком волнового сопротивления.

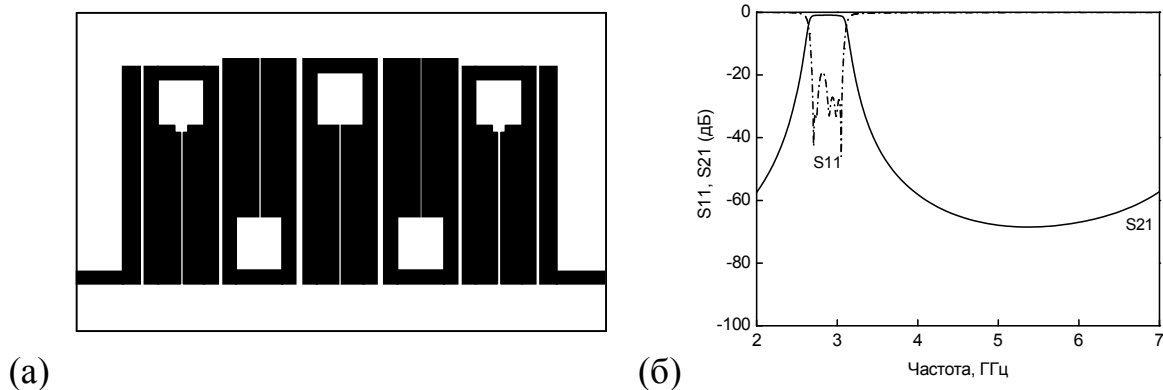


Рисунок 4 – Топология (а) и расчетные характеристики (б) ППФ 5-го порядка.

отражения в полосе пропускания составляет 18 дБ. Уровень подавления первой паразитной полосы 65 дБ.

Глава 3 «Методы сдвига полос пропускания фильтра в полосе частот» посвящена методам сдвига, которые направлены на смещение основных и паразитных полос пропускания по частоте. Рассматривается метод сдвига полос пропускания с использованием частично удаленного слоя экрана, который состоит в частичном удалении слоя металлизации под структурой фильтра. «Окно» в слое экрана приводит к уменьшению емкости резонаторов на землю и, как следствие, к увеличению коэффициента связи между резонаторами и сдвигу рабочих резонансов вниз по частоте. При этом паразитная полоса пропускания смещается вверх по частоте. Исследуется влияние размеров и формы «окна» на характеристики резонаторов.

Введение «окна» в слое экрана вызывает, в том числе, увеличение коэффициента связи между резонаторами, что приводит к расширению полосы пропускания фильтра. Это свойство было использовано при проектировании широкополосного фильтра 4-го порядка с центральной частотой 3 ГГц и относительной полосой пропускания 76 % (рисунок 5). Материал подложки - поликор, материал проводников - медь. Центральная частота первой паразитной полосы пропускания находится на частоте 10 ГГц.

Большое прямоугольное «окно» не следует использовать в узкополосных фильтрах, поскольку оно приводит к значительному расширению полосы фильтра. Поэтому для узкополосного фильтра находится другое решение - несколько прямоугольных «окон» небольшого размера под каждым из резонаторов, которые проявляют свойства щелевых резонаторов. На рисунке 6а представлена топология узкополосного фильтра, где под микрополосковыми резонаторами в слое экрана располагаются щелевые резонаторы в форме

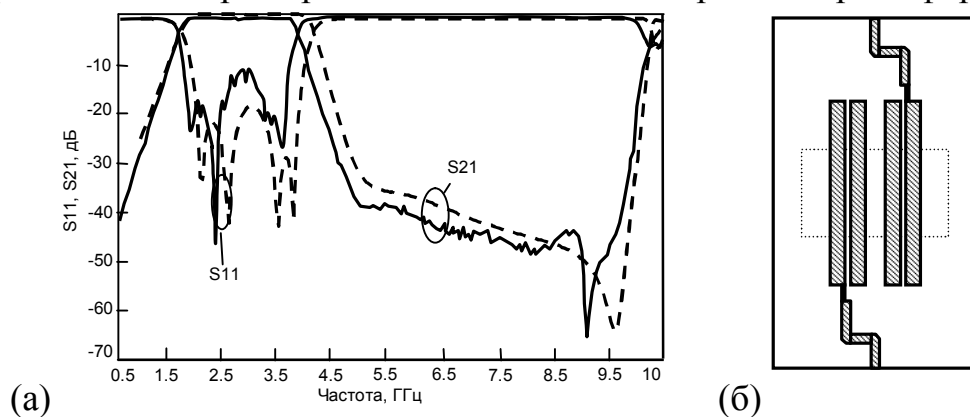


Рисунок 5 – Топология ПП фильтра 4-го порядка с прямоугольным «окном» в слое экрана (а). Расчетные (пунктирная линия) и экспериментальные (сплошная линия) АЧХ фильтра (б).

гантели (рисунок 6б). Щелевой резонатор формируется каскадным соединением отрезков щелевых линий с разными волновыми сопротивлениями. Подобная структура позволяет сдвигать рабочий резонанс вниз по частоте, при этом щелевой резонатор в слое металлизации формирует резонансный отклик на некротной частоте, существенно превышающей рабочую. Расчетные характеристики фильтра приведены на рисунке 6в. Центральная частота фильтра 8 ГГц, относительная полоса пропускания 6,5 %, потери в полосе пропускания 1,8 дБ. Материал подложки – поликор.

Описанные выше резонансные «окна» в слое металлизации можно использовать в качестве функциональных элементов. Предлагается расположить в прямоугольном «окне» систему связанных встречно-штыревых резонаторов, формирующих полосно-пропускающий фильтр. Создание такой структуры в слое экрана решает проблему с паразитными полосами (за счет прямоугольного «окна») и одновременно создает дополнительную полосу пропускания фильтра.

На рисунке 7а показана топология двухполосного фильтра с центральными частотами 3,15 и 5,34 ГГц и относительными полосами пропускания, 5,4 % и 3 %. Первый фильтр 2-го порядка выполнен на микрополосковых резонаторах, второй фильтр 4-го порядка формируется встречно-штыревыми резонаторами (рисунок 7б, 7в). В структуре возбуждающие линии находятся над первым и последним встречно-штыревыми резонаторами в слое металлизации. Материал подложки – поликор.

Во второй части Главы 3 рассматривается метод сдвига паразитных резонансов с применением искусственной линии передачи с отрицательной

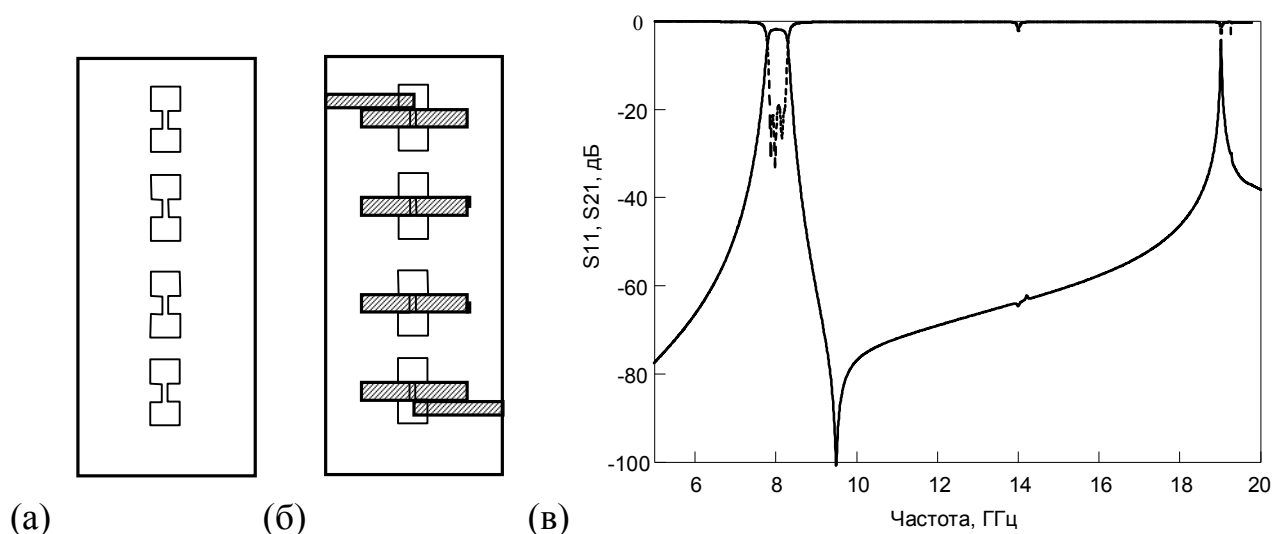


Рисунок 6 – Топология фильтра 4-го порядка с частично удаленным слоем экрана (а); слой металлизации (б), АЧХ фильтра (в).

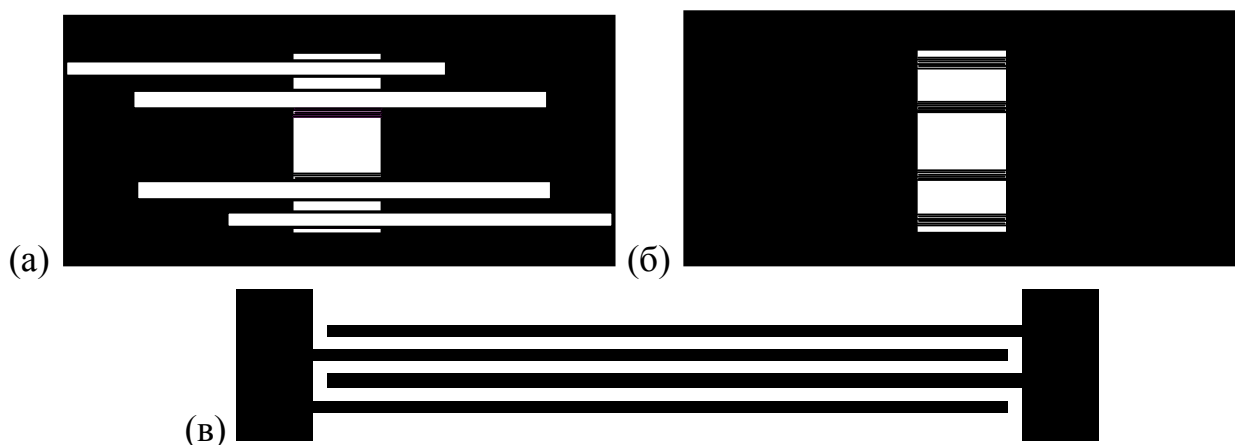


Рисунок 7 – Топология двухполосного фильтра 2-го и 4-го порядка с частично удаленным слоем экрана (а), экран с «окном» и встречно-штыревыми резонаторами (б), увеличенный фрагмент встречно-штыревого резонатора в слое экрана (в).

частотной дисперсией. Линией передачи с отрицательной дисперсией называется искусственная линия с отрицательной электрической длиной, в которой фазовая и групповая скорости направлены навстречу друг другу [2]. На рисунке 8 приведена конфигурация резонатора на основе линий с положительной и отрицательной дисперсией и со скачком волнового сопротивления. Резонатор состоит из двух секций линий с разными волновыми сопротивлениями Z_R , Z_L и, соответственно, электрическими длинами θ_R и θ_L . Условия резонанса для основной моды (3) и первой паразитной моды (4) для структуры на рисунке 8 описываются выражениями:

$$\operatorname{tg}\left(\theta_{0L} \frac{\omega_0}{\omega}\right) = \frac{Z_R}{Z_L} \operatorname{ctg}\left(\theta_{0R} \frac{\omega}{\omega_0}\right), \quad (3)$$

$$\operatorname{tg}\left(\theta_{0L} \frac{\omega_1}{\omega}\right) = -\frac{Z_L}{Z_R} \operatorname{tg}\left(\theta_{0R} \frac{\omega}{\omega_1}\right), \quad (4)$$

где Z_R и Z_L – волновые сопротивления линии с положительной и отрицательной дисперсией, θ_{0R} и θ_{0L} – электрические длины отрезков линий с положительной и отрицательной дисперсией на резонансной частоте основной моды ω_0 . Частота первой паразитной моды ω_1 . Из условий резонанса могут быть определены электрические длины для заданного отношения волновых сопротивлений линий. На рисунке 9 представлена топология и характеристики

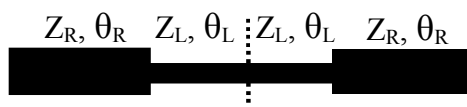


Рисунок 8 - Конфигурация резонатора на основе линий с положительной и отрицательной дисперсией.

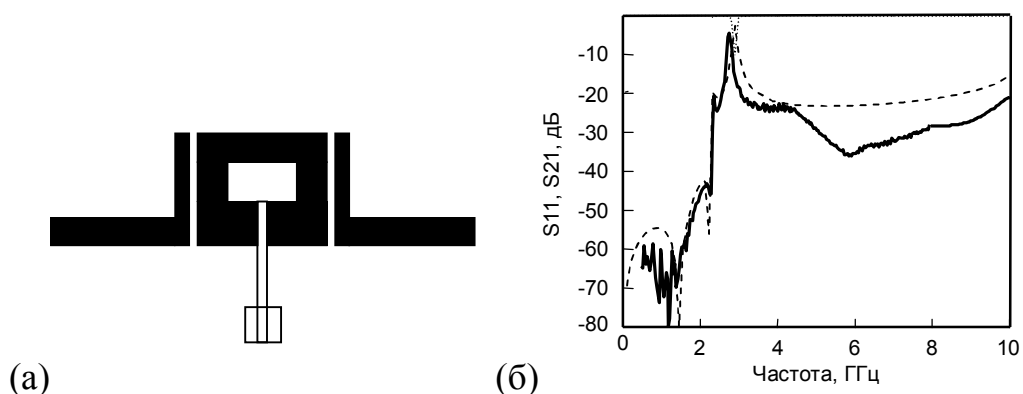


Рисунок 9 – Топология резонатора на линиях с положительной и отрицательной дисперсией (а). Расчетные (пунктирная линия) и экспериментальные (сплошная линия) амплитудно-частотные характеристики резонатора (б).

резонатора на отрезках линий с положительной и отрицательной дисперсией. Подложка, на которой выполнен резонатор, изготовлена по многослойной технологии с применением керамики с низкой температурой обжига [3] и представляет комбинацию двух диэлектрических керамических слоев с печатными слоями металлизации, выполненными по толсто пленочной технологии. Отрезок линии с положительной дисперсией реализуется в качестве традиционной линии передачи, свернутой в кольцо и располагающейся в верхнем проводящем слое.

Отрезку линии с отрицательной дисперсией соответствует эквивалентная Т - схема на сосредоточенных элементах. Последовательные конденсаторы схемы реализуются в виде сильно связанных микрополосковых секций, обкладки которых находятся в двух проводящих слоях структуры, разделенных керамическим слоем. Параллельная индуктивность реализуется в нижнем проводящем слое в виде отрезка линии передачи, один из концов которого соединяется с нижними обкладками конденсатора, а другой, с помощью металлизированных отверстий, закорочен на слой экрана. В дальнейшем был разработан ППФ 2-го порядка, топология и характеристики которого представлены на рисунке 10. Центральная частота $f_0=1,56$ ГГц, относительная полоса пропускания 7,6 %, потери в полосе пропускания 2,7 дБ, отражение не хуже 12 дБ. Первый паразитный резонанс появляется на частоте 5 ГГц.

Глава 4 «Узкополосные высокоизбирательные сверхпроводниковые фильтры» посвящена узкополосным фильтрам на основе пленок высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП). Рассматриваются особенности проектирования планарных фильтров на ВТСП пленках. Представлена модель поверхностного импеданса ВТСП пленки. Изучено влияние параметров модели на характеристики резонатора. Описана процедура

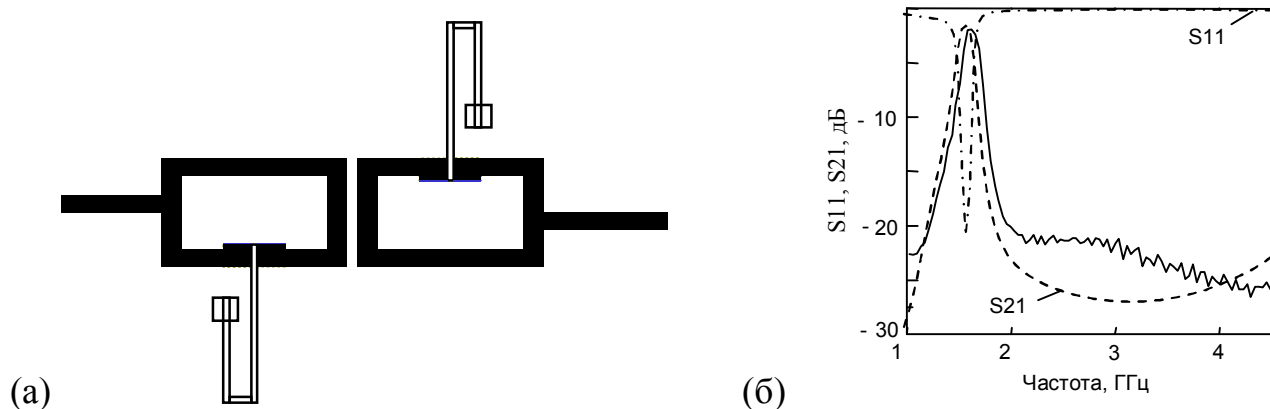


Рисунок 10 – Топология фильтра на комбинации линий с положительной и отрицательной дисперсией (а). Расчетные (пунктирная линия) и экспериментальные (сплошная линия) характеристики фильтра (б).

извлечения параметров пленки ВТСП из результатов измерений тестовых образцов резонаторов и фильтров. Используются пленки ВТСП состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, изготовленные с использованием двух методов: метод осаждения пленки из трех источников (фирма Theva GmbH), метод магнетронного распыления (пленки Института физики микроструктур, ИФМ). На рисунках 11 и 12 представлены топологии и экспериментальные характеристики ВТСП ППФ 4-го порядка на S-образных резонаторах на пленках с разными технологиями изготовления. Поверхностное сопротивление пленки фирмы Theva GmbH на центральной частоте $f_0 = 2,5$ ГГц при $T=65$ К составляет 0,038 мОм. Поверхностное сопротивление пленки ИФМ при $T = 65$ К на центральной частоте $f_0 = 3$ ГГц составляет 0,045 мОм.

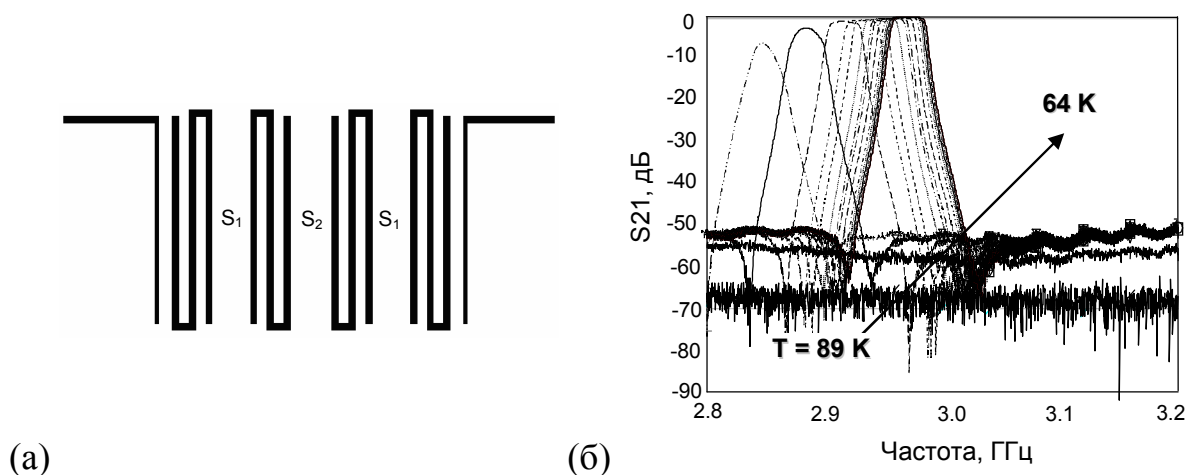


Рисунок 11 – Топология (а) и экспериментальные характеристики для разных рабочих температур (б) фильтра на S-образных резонаторах, выполненного на ВТСП пленках ИФМ.

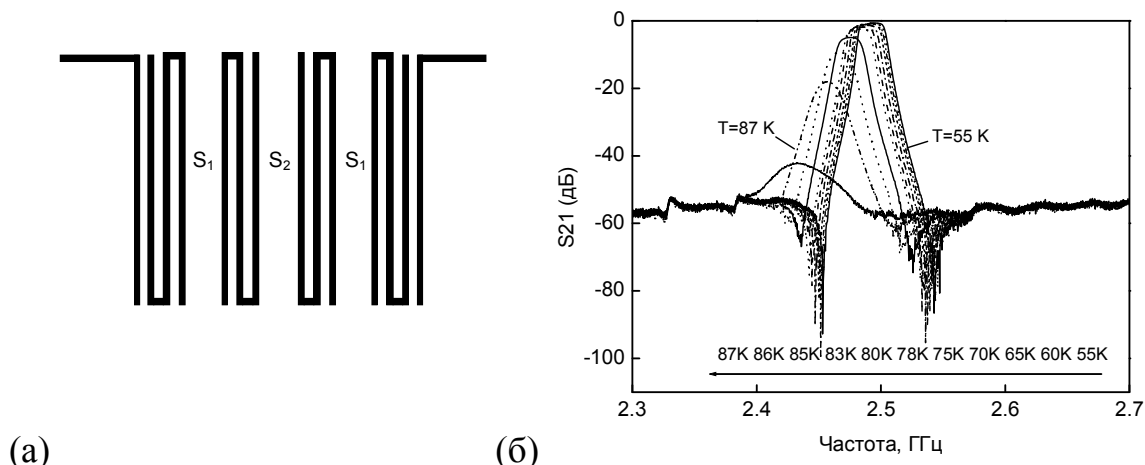


Рисунок 12 – Топология (а) и экспериментальные характеристики для разных температур (б) фильтра на S-образных резонаторах, выполненного на ВТСП пленках фирмы Theva GmbH.

Далее предложен итерационный метод синтеза фильтров высокого порядка на решетке связанных резонаторов. Фильтры высокого порядка обладают особенностью: в них можно выделить центральную группу резонаторов, коэффициенты связи между которыми, а, следовательно, и расстояния между резонаторами, равны с некоторой заданной погрешностью [4]. На рис. 13а показаны коэффициенты связи между резонаторами для фильтров N = 4, 6, 8, 10 и 12-го порядков, которые демонстрируют этот эффект. Графики совмещены таким образом, чтобы коэффициенты связи между центральными резонаторами имели одинаковую координату по оси *i* (коэффициент связи с нулевым индексом соответствует связи между двумя центральными резонаторами). Предлагается начать процедуру синтеза с фильтра малого порядка (рекомендуется N=4). Далее процедура синтеза фильтра заключается в последовательном дополнении двух, четырех, шести и т.д. резонаторов в центр структуры фильтра с сохранением расстояний между резонаторами.

По предложенной итерационной методике был синтезирован фильтр 14-го порядка. Фильтр в корпусе представлен на рисунке 13. В фильтре используются S-образные резонаторы. Расчетные и экспериментальные характеристики фильтра приведены на рисунке 14. Центральная частота 2,5 ГГц, полоса пропускания 1% и крутизна фронтов 30 дБ/МГц.

Исследуются также узкополосные полосно-заграждающие (ПЗ) фильтры для смежных частотных каналов диапазона 3,7-4,2 ГГц. Резонатор имеет форму, представленную на рисунке 15. Микрополосковая линия в резонаторе свернута таким образом, чтобы внутри резонатора образовалась петля. Такая форма приводит к минимальной связи между соседними резонаторами в составе фильтра. Центральная частота первого фильтра 3,726 ГГц, второго – 3,766 ГГц,

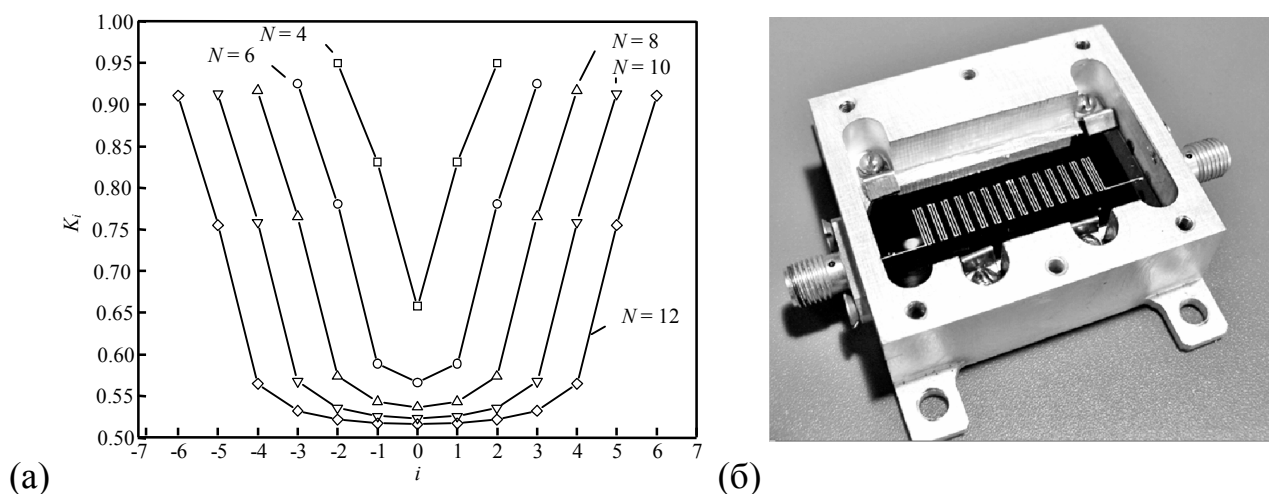


Рисунок 13 – Зависимость коэффициента связи между смежными резонаторами для фильтров разных порядков N (а). Фильтр 14-го порядка в корпусе (б).

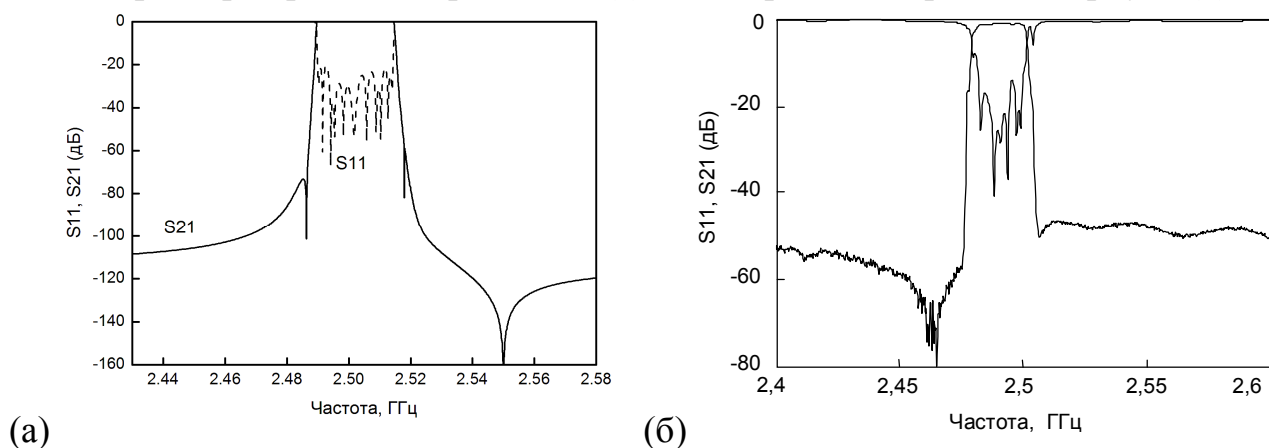


Рисунок 14 – Расчетные (а) и экспериментальные (б) характеристики ВТСП фильтра 14-го порядка.

полоса заграждения 36 МГц, вносимые потери за пределами полосы заграждения 0,5 дБ. Расстояние между центрами двух соседних полос заграждения 40 МГц.

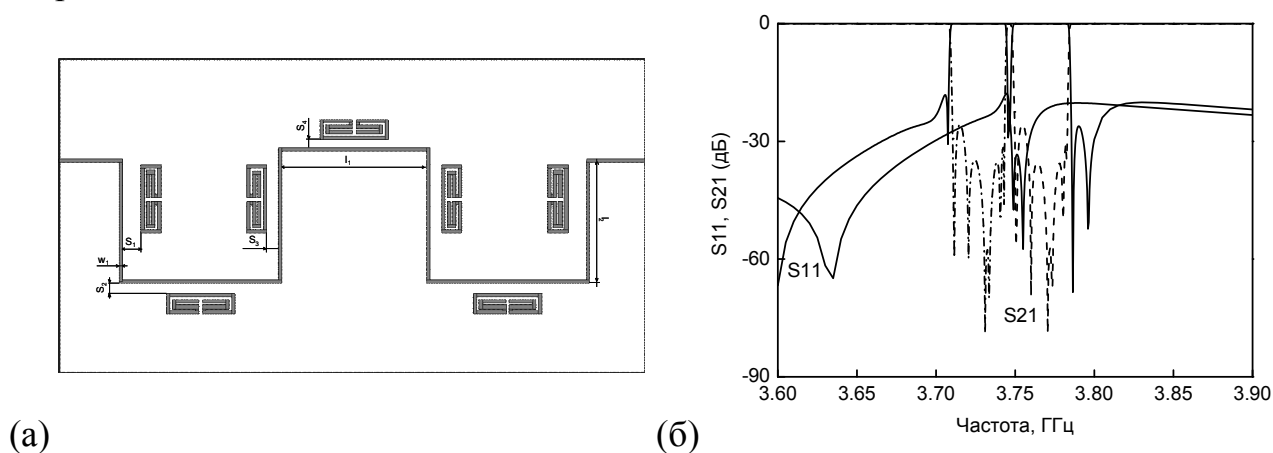


Рисунок 15 – Топология (а) и расчетные характеристики (б) ПЗ фильтра 7-го порядка.

В Заключение сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

Список литературы

1. Swanson, Daniel G. A Novel Method for Modeling Coupling Between Several Microstrip Lines in MICs and MMICs / Daniel G. Swanson // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1991. – vol. 39. – № 6. – pp. 917-923.
2. Lai Anthony, Composite Right/ Left-Handed Transmission Line Metamaterials / Anthony Lai, Christophe Caloz and Tatsuo Itoh // Microwave Journal. – 2004. – V. 5. – №3. – pp. 34-50.
3. Kholodnyak, D. Application of sandwich multilayer technology to MICs design / D. Kholodnyak, A. Simin, P. Kapitanova, and I. Vendik // Proc. of 35th European Microwave Conf., Paris, France . – 2005. – pp. 389-392.
4. Mattei, G. L. Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures // North Bergen: Artech house, 1985.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИСЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

- [1] Kolmakova, I. V. Microwave Devices Based On Transmission Lines with Positive/Negative Dispersion (СВЧ устройства на основе линий передач с положительной/отрицательной дисперсией) [Text] / I. V. Vendik, D. V. Kholodnyak, I. V. Kolmakova, E. V. Serebryakova, and P. V. Kapitanova // Microwave and Optical Technology Letters. – 2006. – vol. 48. – № 12. – pp. 2632-2638.
- [2] Колмакова, И. В. Моделирование и экспериментальное исследование микрополосковых резонаторов и фильтра на основе высокотемпературного сверхпроводника [Текст] / М. Ф. Ситникова, И. Б. Вендик, О. Г. Вендик, Д. В. Холодняк, П. А. Туральчук, И. В. Колмакова, П. Ю. Белявский, А. А. Семенов // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – т. 36. – вып. 18. – с. 67-74.
- [3] Колмакова, И. В. СВЧ-фильтры на высокотемпературных сверхпроводниках [Текст] / И. В. Колмакова, П. А. Туральчук, К. Н. Земляков, С. А. Павлов, Д. В. Мастеров и А. Е. Парафин // Письма в журнал технической физики. – 2011. – т. 37. – вып. – 9. – с. 64-69.

Другие статьи и материалы конференций:

- [4] Колмакова, И. В. Микрополосковый фильтр без кратной паразитной полосы пропускания / Колмакова И. В. [Текст] // Политехнический симпозиум Молодые ученые - промышленности северо-западного региона, Санкт-Петербург, Россия. – 2004. – с. 44.
- [5] Kolmakova, Irina V. Microwave filter without spurious passband / Irina V. Kolmakova and Yaroslav Kolmakov [Text] // 11th International student seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena, Saint-Petersburg, Russia. – 2004. – pp. – 54-56.
- [6] Колмакова, И. В. Микрополосковый полосно-пропускающий фильтр без паразитной полосы пропускания / И. В. Колмакова, Я. А. Колмаков [Текст] // Известия вузов России, Радиоэлектроника. – 2005. – № 1. – с. 71-74.
- [7] Колмакова, И. В. Разработка планарных фильтров с подавлением паразитных полос пропускания / И. В. Колмакова, Я. А. Колмаков // 58 научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета, Санкт-Петербург, Россия. – 2005.
- [8] Kolmakova, I. V. Microwave filter without spurious passband (СВЧ фильтр без паразитной полосы) [Text] / I. V. Kolmakova // 13th International student seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena, Rovaniemi, Finland. – 2006. – pp. 54-56.
- [9] Vendik, I. V. Applications of right/left handed and resonant left handed transmission lines for microwave circuit design (Применение левых/правых и резонансных линий передач для

- проектирования СВЧ устройств) [Text] / I. B. Vendik, D. V. Kholodnyak, I. V. Kolmakova, E. V. Serbryakova, P. V. Kapitanova, F. Martin, J. Bonache, J. Garcia, I. Gil, and M. Gil // Proc. of 36-th European Microwave Conf., Manchester, UK. – 2006. – pp. 955-958.
- [10] Колмакова, И. В. Применение линий передачи с отрицательной и положительной дисперсиями для разработки планарных резонаторов и фильтров СВЧ с подавлением паразитных полос пропускания [Текст] / И. Б. Вендик, И. В. Колмакова, П. В. Капитанова // Известия вузов России, Радиоэлектроника. – 2007. – № 6. – с. 57-61.
- [11] Колмакова, И. В. Узкополосные полосно-пропускающие СВЧ-фильтры на пленках высокотемпературного сверхпроводника [Текст] / И. В. Колмакова, М. Ф. Ситникова, П. А. Туральчук, А. К. Никитин, Д. В. Холодняк // Научно-технический семинар «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ», Санкт-Петербург, Россия. – 2010. – с. 16.
- [12] Turalchuk, P. Trimmingless Design of Miniature High-Tc Superconducting Filters (Миниатюрные ВТСП - фильтры с улучшенными характеристиками) [Text] / P. Turalchuk, I. Kolmakova, D. Kholodnyak, M. Sitnikova, O. Vendik, I. Vendik // 40th European Microwave Conference (EUMC), Paris, France. – 2010. – September 28-30.
- [13] Туральчук, П. А. Полосовые СВЧ-фильтры на высокотемпературных сверхпроводниках [Текст] / И. В. Колмакова, П. А. Туральчук, К. Н. Земляков, С. А. Павлов, Д. В. Мастеров и А. Е. Парафин // Российская конференция «Новые материалы и нанотехнологии в электронике СВЧ», Санкт-Петербург, Россия. – 2010. – ноябрь 18-20.
- [14] Мастеров, Д. В. Полосовые СВЧ-фильтры на пленках высокотемпературного сверхпроводника YBCO [Текст] / Д. В. Мастеров, С. А. Павлов, А. Е. Парафин, И. В. Колмакова, К. Н. Земляков, П. А. Туральчук // Материалы XV Международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника», Нижний Новгород, Россия. – 2011. – с. 294-295.
- [15] Колмакова, И. В. Узкополосные высокоизбирательные фильтры на высокотемпературных сверхпроводниках [Текст] / И. В. Колмакова, К. Н. Земляков, П. А. Туральчук, Д. В. Холодняк, С. А. Павлов, Д. В. Мастеров, А. Е. Парафин // Научно-технический семинар «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ», Санкт-Петербург, Россия. – 2011 – с. 24-25.
- [16] Vendik, I. B. Accurate design of trimmingless high-temperature superconducting filters (Проектирование высокотемпературных сверхпроводниковых фильтров с улучшенными характеристиками без подстройки после изготовления) [Text] / I. B. Vendik, O. G. Vendik, P. A. Turalchuk, I. V. Kolmakova, K. N. Zemlyakov, D. V. Kholodnyak, M. F. Sitnikova, V. V. Khaikin, // COMCAS, Tel Aviv, Israel. – 2011. – November 7-9.
- [17] Колмакова, И. В. Планарные полосно-пропускающие фильтры без паразитных полос пропускания [Текст] / И. В. Колмакова, И. Б. Вендик // Всероссийская конференция «Микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, Россия. – 2012. – Июнь 4-7.