

На правах рукописи

Холодняк Дмитрий Викторович

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СВЧ-УСТРОЙСТВА НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
СВЕРХПРОВОДНИКАХ И ИСКУССТВЕННЫХ ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ
С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" имени В. И. Ульянова (Ленина) на кафедре микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Вендик Ирина Борисовна

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Головков Александр Алексеевич, профессор кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" имени В. И. Ульянова (Ленина)

Доктор технических наук, Парнес Михаил Давидович, главный инженер ООО "Резонанс" (г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация – ОАО "Холдинговая компания "Ленинец" (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится "29" февраля 2012 г. в ____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.03 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 " ____ " января 2012 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций

Баруздин С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Непрерывное улучшение характеристик радиоэлектронных устройств, повышение их помехозащищенности, снижение массогабаритных показателей и потребляемой мощности невозможно без разработки и внедрения новой элементной базы, использования новых физических явлений и принципов, применения новых материалов и высоких технологий.

Открытие в 1986 г. явления высокотемпературной сверхпроводимости дало мощный импульс фундаментальным и прикладным исследованиям, направленным на практическое использование принципиально новых возможностей, предоставляемых высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП). В СВЧ-диапазоне сверхпроводниковые материалы характеризуются чрезвычайно низким поверхностным сопротивлением в сверхпроводящем состоянии, что позволяет создавать на основе пленок ВТСП планарные СВЧ-устройства с предельно малыми вносимыми потерями и низким уровнем шума. В основном пленки ВТСП применяются для создания высокоизбирательных узкополосных планарных СВЧ-фильтров, которые по своим характеристикам сопоставимы с фильтрами на объемных резонаторах, но обладают меньшими габаритами и весом. Такие фильтры и мультиплексоры на их основе имеют преимущества для систем сотовой и спутниковой связи.

Другим важным толчком, давшим начало новому направлению в развитии СВЧ-техники, стало появление в 2000 г. первого экспериментального прототипа метаматериалов – искусственно формируемых на физическом уровне сред, обладающих в некотором диапазоне частот специфическими электромагнитными свойствами, такими как отрицательная диэлектрическая и/или магнитная проницаемость, возможность создания которых была теоретически предсказана за несколько десятилетий до этого. К настоящему моменту разработано и исследовано большое количество разнообразных структур, проявляющих свойства метаматериалов в различных частотных диапазонах. Большинство из них принципиально являются резонансными и, как следствие, характеризуются сравнительно узкой рабочей полосой частот и заметными вносимыми потерями, которые в ряде случаев могут быть компенсированы применением ВТСП. Этих недостатков лишены одномерные метаматериалы, выполненные по типу искусственных длинных линий с отрицательной частотной дисперсией. На основе таких структур можно создавать двумерные и трехмерные нерезонансные метаматериалы. Наряду с этим на комбинации длинных линий с отрицательной дисперсией (ДЛОД) и отрезков традиционных линий передачи (микрополосковых, копланарных и т.п.), которые являются длинными линиями с положительной дисперсией (ДЛПД), можно создавать СВЧ-устройства с улучшенными параметрами и расширенными функциональными возможностями.

В диссертационной работе обобщены и систематизированы результаты исследований, которые выполнялись автором в течение 15 лет в области разработки пассивных микроэлектронных СВЧ-устройств с улучшенными характеристиками (полосно-пропускающих фильтров, направленных ответвителей, дискретных фазовращателей) с применением пленок ВТСП и искусственных ДЛОД.

Цель диссертационной работы – исследование и разработка СВЧ-устройств с улучшенными характеристиками (низкими вносимыми потерями, уменьшенными габаритами, расширенной рабочей полосой частот) на основе сверхпроводниковых материалов и на комбинации искусственных длинных линий с разным законом частотной дисперсии.

Цель диссертационной работы достигается решением следующих задач:

- 1) Разработка и верификация модели связанных сверхпроводниковых микрополосковых линий (МПЛ) на анизотропной подложке из сапфира.
- 2) Исследование чувствительности узкополосных сверхпроводниковых СВЧ-фильтров к разбросу физических и геометрических параметров. Разработка методики проектирования таких фильтров, позволяющей устранить необходимость их подстройки после изготовления.
- 3) Разработка и экспериментальное исследование узкополосных сверхпроводниковых СВЧ-фильтров для систем телекоммуникаций.
- 4) Исследование направленных ответвителей (НО) с переходным ослаблением 0 дБ для реализации однослойных пересечений двух потоков мощности в сверхпроводниковых интегральных схемах (ИС) СВЧ.
- 5) Исследование характеристик искусственных длинных линий (ИДЛ) с разным законом частотной дисперсии.
- 6) Исследование и разработка НО с уменьшенными габаритными размерами и расширенной рабочей полосой частот на комбинации искусственных ДЛОД и ДЛПД.
- 7) Исследование и разработка широкополосных дискретных фазовращателей (ФВ) на переключаемых отрезках ДЛОД и ДЛПД.

Научная новизна работы:

- 1) Для связанных МПЛ на анизотропной подложке из сапфира предложена концепция эквивалентной изотропной диэлектрической проницаемости подложки для четной и нечетной мод, которая определена как диэлектрическая проницаемость изотропной подложки, обеспечивающей в структуре связанных МПЛ той же геометрии такую же фазовую скорость, что и в случае анизотропной подложки.
- 2) В магнитостатическом приближении получены аналитические выражения для распределения плотности поверхностного тока в полосках и заземленном экране связанных сверхпроводниковых МПЛ для четной и нечетной мод.
- 3) Предложена универсальная методика проектирования сверхпроводниковых фильтров, позволяющая исключить необходимость подстройки.
- 4) Разработаны и экспериментально исследованы уникальные полосно-пропускающие СВЧ-фильтры в планарном исполнении для систем телекоммуникаций.
- 5) Предложена оригинальная конструкция широкополосного НО с переходным ослаблением 0 дБ для реализации пересечения двух потоков мощности в одном слое.
- 6) Предложен простой и корректный подход к разработке СВЧ-устройств на искусственных ДЛОД с использованием оригинальных вариантов реализации искусственных ДЛОД и ДЛПД в виде полностью интегральных многослойных структур.
- 7) Выполнена оценка минимального количества элементарных ячеек, необходимых для реализации искусственных ДЛОД и ДЛПД.
- 8) Определен теоретический предел ошибки фазового сдвига дискретного ФВ на переключаемых отрезках ДЛПД и ДЛОД.
- 9) Предложены и исследованы оригинальные структуры малогабаритных и широкополосных НО, и широкополосных дискретных ФВ на комбинации отрезков искусственных ДЛПД и ДЛОД.

Основные методы исследования:

- а) Теоретические: теория цепей, численные методы электродинамического моделирования;
- б) Экспериментальные.

Научные положения, выносимые на защиту:

- 1) Расчет эффективной диэлектрической проницаемости и волнового сопротивления связанных сверхпроводниковых МПЛ на анизотропной подложке из сапфира может выполняться на основе стандартных моделей с использованием эквивалентной изотропной диэлектрической проницаемости сапфировой подложки для четной и нечетной мод с учетом поправки на кинетическую индуктивность ВТСП.
- 2) В отсутствие потерь параметры рассеяния НО с переходным ослаблением 0 дБ типа "окно" на центральной частоте не зависят от волнового сопротивления отрезков линий передачи, входящих в состав устройства.
- 3) Практическая реализация искусственных ДЛПД и ДЛОД из расчета одна элементарная Т- или П-образная ячейка на каждые 45° электрической длины обеспечивает рабочую полосу частот шириной более октавы.
- 4) Рабочая полоса частот по минимуму ошибки фазового сдвига ФВ на переключаемых отрезках ДЛПД и ДЛОД максимальна при равенстве их электрических длин по абсолютной величине на центральной частоте. Теоретический предел ошибки фазового сдвига такого ФВ составляет $\pm 2,9\%$ в полосе частот равной октаве и $\pm 11,1\%$ в полосе частот шириной в две октавы.

Практическая значимость результатов работы:

- 1) Введение эквивалентной изотропной диэлектрической проницаемости подложки для четной и нечетной мод связанных сверхпроводниковых МПЛ на анизотропной подложке из сапфира позволяет применять стандартные эмпирические модели для расчета волновых параметров связанных МПЛ с учетом поправки на кинетическую индуктивность ВТСП.
- 2) Разработанная аналитическая модель связанных сверхпроводниковых МПЛ на анизотропной подложке из сапфира может быть использована в системах автоматизированного проектирования (САПР) СВЧ-устройств.
- 3) Предложенная универсальная методика проектирования СВЧ-фильтров на пленках ВТСП позволяет свести к минимуму необходимость в их подстройке после изготовления.
- 4) Предложенная конструкция НО с переходным ослаблением 0 дБ типа "окно" может использоваться в сверхпроводниковых ИС СВЧ для обеспечения широкополосных пересечений двух потоков мощности в одном слое.
- 5) Предложенный подход, использующий упрощенную эквивалентную схему ДЛОД, заметно упрощает разработку СВЧ-устройств на основе ДЛОД. Адекватность подхода подтверждена практической реализацией ряда СВЧ-устройств.
- 6) Предложенные варианты реализации искусственных ДЛОД и ДЛПД в виде полностью интегральных многослойных структур на квазисосредоточенных элементах без использования навесных компонентов могут применяться для реализации широкого класса СВЧ-устройств.

Апробация работы: Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

На международных конференциях: IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS) – 2000, Boston, MA, USA; European Microwave Conference (EuMC) – 1996, Prague, Czech Republic; 1999, 2007, Munich, Germany; 2005, 2010, Paris, France; 2006, Manchester, UK; 2008, Amsterdam, The Netherlands; European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) – 2011, Rome, Italy; European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) – 2009, Rimini, Italy; International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials) – 2007, Rome, Italy; 2009, London, UK; 2010, Karlsruhe, Germany; IMAPS/ACerS International Conference on Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies (CICMT) – 2009, Denver, CO, USA; SPIE Metamaterials Conference – 2005, Warsaw, Poland; International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON) – 2006, Krakow, Poland; Conference on Microwave Techniques (COMITE) – 2008, Prague, Czech Republic; Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (IWK) – 2006, Ilmenau, Germany; Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) – 1997, Cambridge, MA, USA; 1998 – Nantes, France; International Superconductive Electronics Conference (ISEC) – 1997, Berlin, Germany; Applied Superconductivity Conference (ASC) – 1998, Palm Desert, CA, USA; 2000 – Virginia Beach, VA, USA; Symposium of High-Temperature Superconductors in High-Frequency Field – 2000, Capri, Naples, Italy; International Conference "Microwave Electronics: Measurements, Identification, Applications" (MEMIA) – 2005, Novosibirsk, Russia; Крымская Микроволновая Конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо) – 2005, 2006, Севастополь, Украина.

На конференциях: Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ", 1996–2007; Научно-технический семинар "Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ", 2008–2011, С.-Петербург.

Публикации: Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 32 статьях и докладах, среди которых 16 статей в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 1 глава в монографии и 15 публикаций в других изданиях и сборниках материалов международных научных конференций. Доклады были представлены и получили одобрение на 42 вышеперечисленных международных и российских научных и научно-технических конференциях.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами, заключения и списка литературы, включающего 190 наименований. Основная часть работы изложена на 198 страницах машинописного текста. Работа содержит 96 рисунков и 18 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 "Высокотемпературные сверхпроводники и метаматериалы в технике СВЧ" посвящена обзору литературы по теме работы.

В разделе 1.1 рассмотрены преимущества СВЧ-устройств на основе ВТСП, обсуждаются применения и типы ВТСП-устройств, сформулированы основные проблемы, возникающие при разработке таких устройств.

Ряд особенностей, связанных с корректным модельным описанием пленок ВТСП как физических объектов, анизотропией диэлектрических свойств сапфировой подложки и условиями эксплуатации при криогенных температурах обсуждаются в разделе 1.2.

В разделе 1.3 рассмотрены основные свойства и характеристики метаматериалов, обсуждается тождественность ДЛОД и одномерных метаматериалов с одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей, различия между ИДЛ и фильтровыми структурами, приведены примеры использования ДЛОД для создания новых СВЧ-устройств с улучшенными характеристиками и расширенными функциональными возможностями, обозначены существующие проблемы.

В разделе 1.4 сформулированы задачи исследований в рамках диссертационной работы.

Глава 2 "Связанные сверхпроводниковые микрополосковые линии на анизотропной подложке из сапфира" посвящена разработке и верификации аналитической модели, описывающей распространение электромагнитной волны в таких линиях передачи.

Связанные сверхпроводниковые МПЛ находят широкое применение для создания фильтров, направленных ответвителей и разделителей частотных каналов (мультиплексоров) с низким уровнем вносимых потерь, который обусловлен низким поверхностным сопротивлением ВТСП.

Среди монокристаллических подложек, используемых для роста эпитаксиальных пленок сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, сапфир имеет ряд преимуществ, при этом обладает анизотропией диэлектрических свойств. Необходимость учитывать различный вклад компонентов тензора диэлектрической проницаемости сапфира в эффективную диэлектрическую проницаемость планарных линий передачи значительно осложняет разработку СВЧ-устройств. В случае связанных МПЛ эффективная диэлектрическая проницаемость различается для четной и нечетной моды, что создает дополнительные трудности.

В разделе 2.1 для расчета характеристик связанных МПЛ на подложке из сапфира (Рис. 1) предложено ввести в рассмотрение для каждой моды эквивалентную изотропную диэлектрическую проницаемость подложки, определив ее как диэлектрическую проницаемость изотропной подложки, которая обеспечивает в структуре связанных МПЛ той же геометрии такую же фазовую скорость, что и в случае анизотропной подложки:

$$\epsilon_{из,е} = \frac{\int_0^h \int_0^\infty (\epsilon_{zz} E_{ze}^2 + \epsilon_{yy} E_{ye}^2) dz dy}{\int_0^h \int_0^\infty (E_{ze}^2 + E_{ye}^2) dz dy}, \quad \epsilon_{из,о} = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \int_0^\infty (\epsilon_{zz} E_{zo}^2 + \epsilon_{yy} E_{yo}^2) dz dy}{\int_{-h/2}^{h/2} \int_0^\infty (E_{zo}^2 + E_{yo}^2) dz dy}, \quad (1)$$

где $\epsilon_{из,е}$ и $\epsilon_{из,о}$ – соответственно эквивалентная изотропная диэлектрическая проницаемость подложки для четной и нечетной мод, E_{ze} , E_{ye} , E_{zo} и E_{yo} – компо-

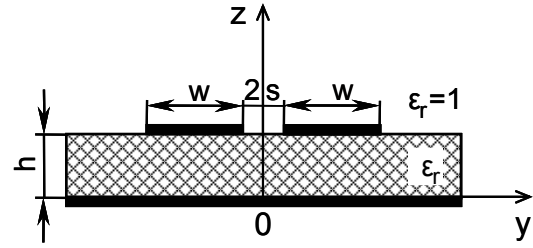


Рис. 1. Поперечное сечение связанных МПЛ.

ненты электрического поля для четной и нечетной мод, ϵ_{zz} и ϵ_{yy} – компоненты тензора диэлектрической проницаемости сапфира. Распределение электрического поля находится методом конформных отображений в предположении, что слабая анизотропия сапфира не влияет на распределение поля в процессе конформных преобразований.

Расчет $\epsilon_{из,е}$ и $\epsilon_{из,о}$ по формулам (1) позволяет применить для нахождения эффективной диэлектрической проницаемости и волнового сопротивления каждой моды связанных МПЛ на сапфире известные эмпирические модели, разработанные для изотропной подложки. Адаптация моделей для случая сверхпроводниковых связанных МПЛ с учетом кинетической индуктивности ВТСП представлена в разделе 2.2. Сравнение результатов расчета характеристик сверхпроводниковых связанных МПЛ на подложке из сапфира m -среза по модели с использованием эквивалентной изотропной диэлектрической проницаемости и результатов моделирования численными методами подтверждает адекватность предложенной модели.

Неоднородность распределения тока в проводниках планарных линий передачи обуславливает существенную зависимость вносимых потерь от геометрии связанных сверхпроводниковых МПЛ. В разделе 2.3 приведены аналитические выражения для распределения плотности поверхностного тока в полосковых проводниках и заземленной пластине связанных сверхпроводниковых МПЛ для четной и нечетной мод, полученные в магнитостатическом приближении, которое справедливо для ВТСП до частот порядка 100 ГГц. С использованием полученных аналитических выражений выполнено исследование влияния взаимного расположения проводников на погонный импеданс и затухание электромагнитной волны в структуре связанных сверхпроводниковых МПЛ при возбуждении четной и нечетной мод.

В разделе 2.4 представлены результаты исследования полуволновых резонаторов на связанных сверхпроводниковых МПЛ на анизотропной подложке из сапфира. Аналитическая модель резонатора включает полное модельное описание связанных сверхпроводниковых МПЛ, разработанное с учетом анизотропии подложки, неоднородного распределения тока в проводниках связанных МПЛ, частотной и температурной зависимости поверхностного импеданса пленки ВТСП, а также типовую эмпирическую модель зазора, используемого в качестве элементов связи, которая была адаптирована для случая сапфировой подложки с использованием концепции эквивалентной изотропной диэлектрической проницаемости. Аналитическая модель резонатора демонстрирует хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными (Рис. 2) и может быть использована в САПР сверхпроводниковых СВЧ-устройств.

Глава 3 "Планарные СВЧ-устройства на высокотемпературных сверхпроводниках" посвящена исследованию и разработке полосно-пропускающих СВЧ-фильтров с низкими вносимыми потерями и высокой частотной избирательностью, а также направленных ответвителей с переходным ослаблением 0 дБ, которые

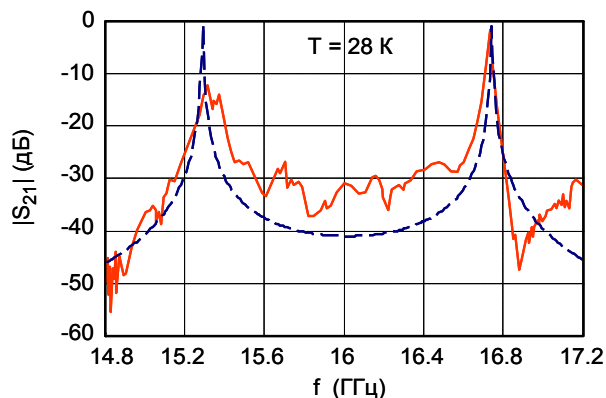


Рис. 2. Коэффициент передачи полуволнового резонатора на связанных сверхпроводниковых МПЛ на сапфире r -среза (аналитическая модель – пунктир, эксперимент – сплошная линия).

находят применение в сверхпроводниковых ИС СВЧ для реализации пересечений двух потоков мощности в одном слое.

В разделе 3.1 обсуждается возможность проектирования узкополосных СВЧ-фильтров на основе ВТСП без дополнительной подстройки после изготовления. Необходимость подстройки сверхпроводниковых СВЧ-фильтров должна быть сведена к минимуму, т.к. в условиях криогенных температур манипулирование настроечными винтами представляет технически сложную и трудоемкую процедуру. Причинами возможного расхождения экспериментальных и расчетных характеристик фильтров являются: 1) отсутствие достоверной информации о параметрах модели поверхностного импеданса пленки ВТСП и/или параметрах диэлектрической подложки; 2) разброс физических и геометрических параметров с выходом за допустимые пределы. Для устранения подстройки фильтров после изготовления необходимо: 1) исследовать чувствительность фильтров к разбросу параметров и определить пределы допустимых отклонений параметров; 2) разработать процедуру достоверного определения модельных параметров.

Чувствительность узкополосных сверхпроводниковых фильтров к разбросу параметров исследовалась на примере 11-звенного полосно-пропускающего ВТСП-фильтра с относительной полосой пропускания 0,5%, выполненного на резонаторах типа "шпилька" на подложке из монокристалла LaAlO_3 . Установлено, что наиболее критичными параметрами являются: геометрические размеры (ширина линий и зазоров), диэлектрическая проницаемость и толщина подложки, а также параметр γ феноменологической модели поверхностного импеданса пленки ВТСП.

Предложена следующая универсальная методика проектирования сверхпроводниковых фильтров: 1) после определения требуемого порядка фильтра и выбора типа резонаторов изготавливается и экспериментально исследуется резонатор той же конфигурации, что будет использоваться в составе фильтра, и на той же пленке ВТСП; 2) из АЧХ резонатора, измеренных при разных значениях температуры, извлекаются значения параметров феноменологической модели поверхностного импеданса пленки ВТСП и диэлектрической проницаемости подложки; 3) на следующем этапе выполняется моделирование характеристик фильтра с учетом найденных параметров; 4) изготавливается фильтр и проводится измерение его характеристик, которые сравниваются с расчетными; 5) при необходимости топология фильтра корректируется, а этапы 3 и 4 итерационно повторяются. Применение данной методики позволяет получить требуемую характеристику фильтра без дополнительной подстройки уже после 1–2 итераций.

В разделе 3.2 представлены результаты разработки и исследования полосно-пропускающих сверхпроводниковых СВЧ-фильтров на подложках из сапфира и LaAlO_3 с пленками $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.

8-звенный чебышевский фильтр с центральной частотой характеристики 1,75 ГГц и относительной полосой пропускания 3,5%, выполненный на параллельных полуволновых микрополосковых резонаторах с боковой связью, стал первым в мире фильтром высокого порядка, реализованном на анизотропной подложке из сапфира г-среза. Адекватный учет свойств пленки ВТСП и сапфировой подложки обеспечил хорошее совпадение расчетных и экспериментальных характеристик фильтра без дополнительной подстройки (Рис. 3). Измеренное значение вносимых потерь фильтра на центральной частоте составило 0,8 дБ при температуре 27 К и 1,5 дБ при температуре 40 К. Повышенный уровень вносимых потерь связан с использованием нормально-проводящего заземленного экрана, выполненного из золота.

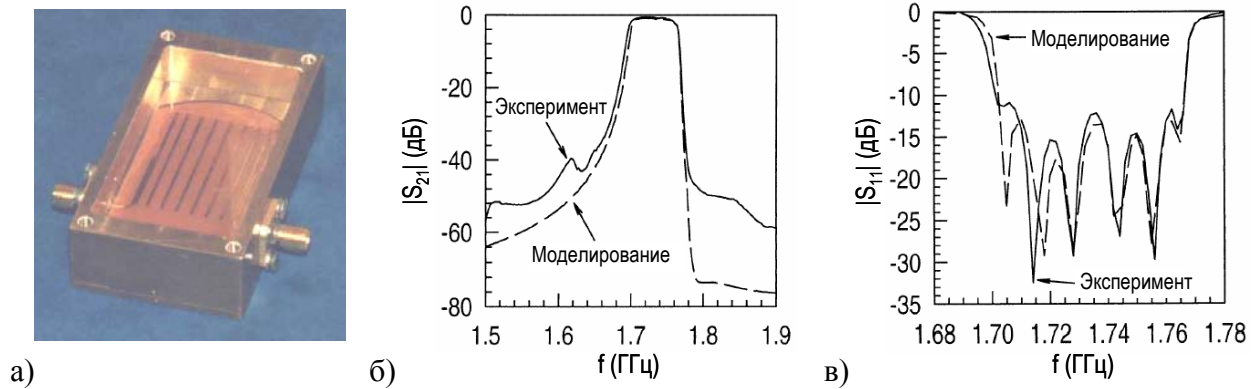


Рис. 3. Экспериментальный образец (а), коэффициент передачи (б) и коэффициент отражения (в) 8-звенного полосно-пропускающего ВТСП-фильтра на сапфире r -среза.

Для применения в базовых станциях сотовой связи стандарта *PCS* был разработан и исследован 12-звенный планарный квазиэллиптический ВТСП-фильтр с центральной частотой характеристики 1,775 ГГц, относительной полосой пропускания 0,5% и частотной избирательностью 40 дБ/МГц. Использование в составе фильтра резонаторов специальной формы обеспечивает дополнительные нули передаточной характеристики вблизи границ полосы пропускания, что позволяет увеличить частотную избирательность фильтра. Фильтр, выполненный на подложке из LaAlO_3 с $\epsilon_r = 23,6$, имеет размеры 35×20 мм². По результатам экспериментального исследования вносимые потери в полосе пропускания составляют не более 0,5 дБ при температуре 60 К, запираение вне полосы пропускания превышает 75 дБ (Рис. 4).

В разделе 3.3 исследуются НО с переходным ослаблением 0 дБ, применяемые для организации пересечения двух потоков мощности в сверхпроводниковых ИС СВЧ, в которых отсутствует технологическая возможность выполнения многослойных структур типа ВСП-диэлектрик-ВТСП. Известные конструкции таких НО обладают сравнительно узкой рабочей полосой частот (10–12%), имеют боль-

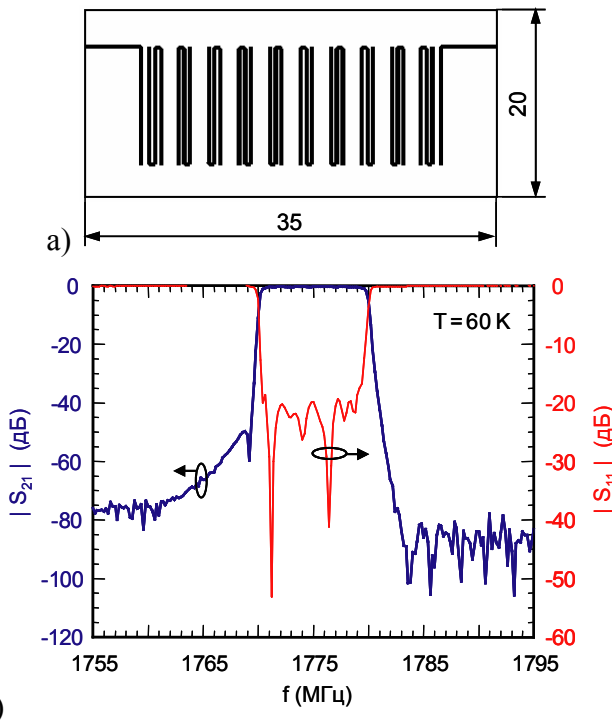


Рис. 4. Топология (а) и измеренные характеристики (б) 12-звенного полосно-пропускающего ВТСП-фильтра на подложке из LaAlO_3 .

шие габариты, либо сложны в реализации. Предложена оригинальная конструкция НО с переходным ослаблением 0 дБ типа "окно" (Рис. 5), рабочая полоса частот которого, по крайней мере, в 2 раза шире по сравнению с известными аналогами. Теоретически показано, что параметры рассеяния на центральной частоте не зависят от значения волнового сопротивления отрезков линий передачи (Z_0), входящих в состав НО. Свободный выбор волнового сопротивления Z_0 предоставляет дополнительную степень свободы для контроля характеристик НО в полосе частот. На Рис. 5 представлены характеристики НО, выполненного на подложке из поликора толщиной 0,5 мм с медными проводниками ($Z_0 = 80$ Ом).

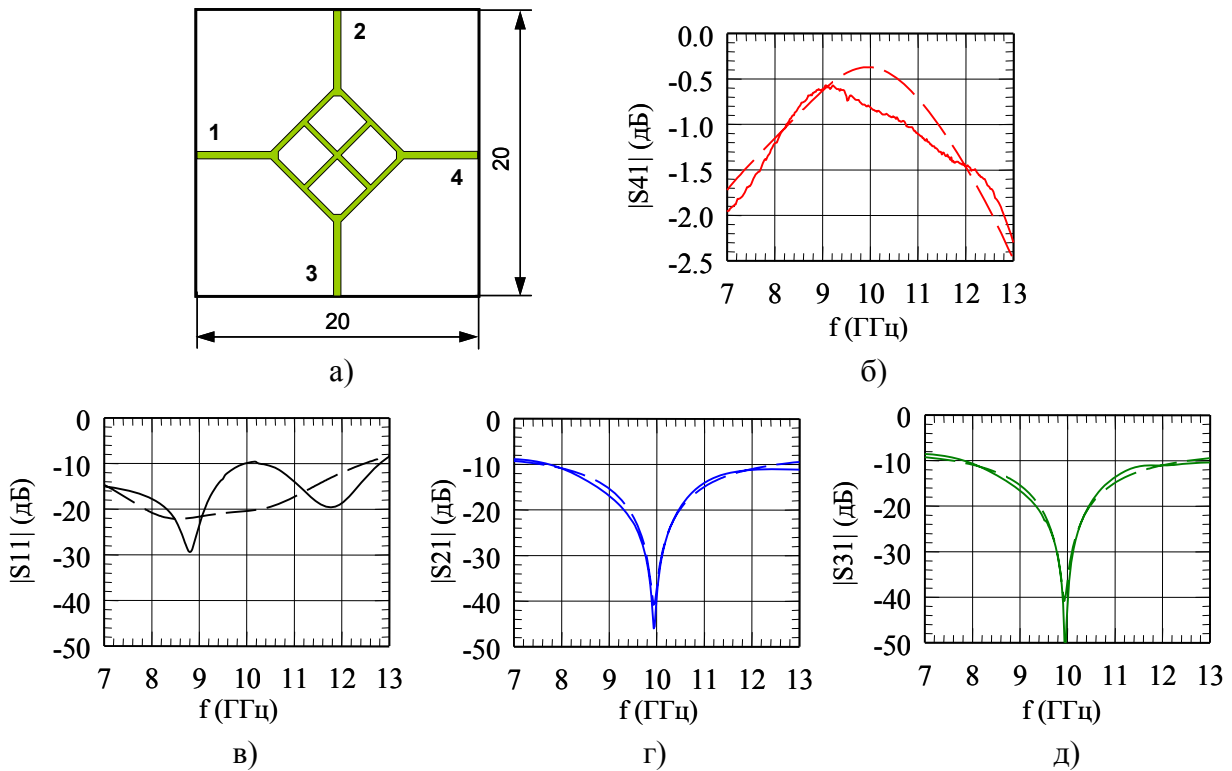


Рис. 5. Направленный ответвитель с переходным ослаблением 0 дБ типа "окно": (а) – топология; (б)-(д) – характеристики (электродинамическое моделирование – пунктир, эксперимент – сплошные линии).

В Главе 4 "Искусственные длинные линии с положительной и отрицательной дисперсией" представлено теоретическое описание характеристик ДЛОД и ДЛПД.

Поскольку ДЛОД являются разновидностью одномерных метаматериалов, такие линии по аналогии с объемными метаматериалами принято называть "левыми", в отличие от ДЛОД, которые именуют "правыми" линиями.

В разделе 4.1 рассматривается распространение электромагнитной волны вдоль однородных регулярных бесконечных длинных линий с разным законом дисперсии на основе решения телеграфных уравнений, для ДЛПД и ДЛОД приведены эквивалентные схемы и основные характеристики: постоянная распространения, характеристический импеданс и электрическая длина, выраженные через погонные параметры линий. В отличие от ДЛПД, которая может быть реализована в виде отрезка любой линии передачи, реализации ДЛОД с распределенными параметрами не существует. ДЛОД может быть выполнена только как ИДЛ на элементах с сосредоточенными параметрами.

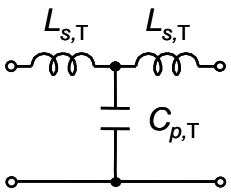
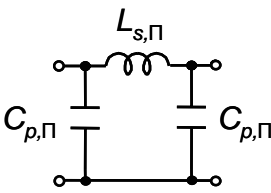
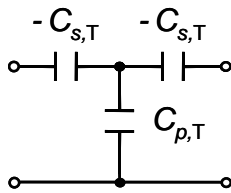
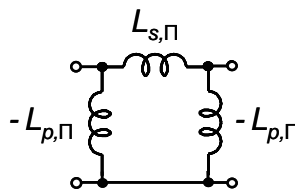
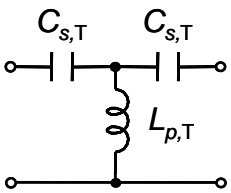
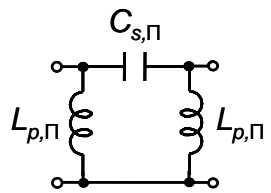
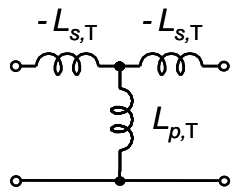
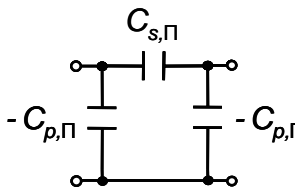
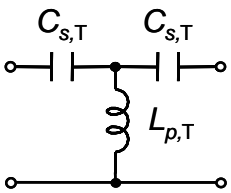
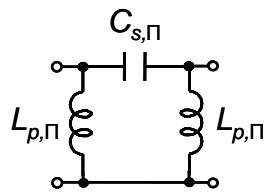
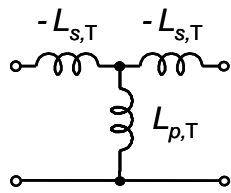
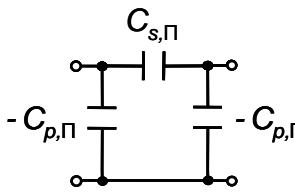
На практике искусственные ДЛОД и ДЛПД представляют собой периодические структуры с конечным размером элементарной ячейки, который обусловлен длиной реальных реактивных элементов. Такие периодические структуры характеризуются наличием частот отсечки, за которыми они теряют свои свойства. Рассмотрению свойств ИДЛ как периодических структур посвящен раздел 4.2.

Для разработки СВЧ-устройств с использованием искусственных ДЛОД и ДЛПД необходима процедура синтеза, которая позволяла бы находить параметры элементарной ячейки по требуемым значениям характеристического импеданса Z_0 и электрической длины θ отрезка линии. Задача решается в разделе 4.3 на основе эквивалентного представления отрезка ДЛ в виде реактивной Т- или П-образной схемы на элементах с сосредоточенными параметрами (Таблица 1).

Анализируются частотные характеристики отрезков ИДЛ, состоящих из разного числа элементарных ячеек. Показано, что выполнение ИДЛ из расчета одна элементарная ячейка на каждые 45° электрической длины обеспечивает приближение к характеристикам идеальной бесконечной ДОЛД или ДЛПД в полосе частот шириной более октавы. Так, для реализации четвертьволнового отрезка ИДЛ с рабочей полосой частот равной октаве необходимо и достаточно использовать две элементарные ячейки. В случаях, когда не требуется столь широкая полоса частот, количество элементарных ячеек может быть уменьшено, что позволяет сделать реализацию более компактной за счет меньшего числа используемых реактивных элементов.

Таблица 1

Эквивалентные представления отрезка длинной линии в виде Т- и П-образных схем на элементах с сосредоточенными параметрами

		$0 < \theta \leq 90^\circ$			
ДЛПД ($\theta > 0$)	 $L_{s,T} = \frac{Z_0 \operatorname{tg}(\theta/2)}{\omega}$ $C_{p,T} = \frac{\sin(\theta)}{\omega Z_0}$	 $L_{s,П} = \frac{Z_0 \sin(\theta)}{\omega}$ $C_{p,П} = \frac{\operatorname{tg}(\theta/2)}{\omega Z_0}$	 $C_{s,T} = \frac{-1}{\omega Z_0 \operatorname{tg}(\theta/2)}$ $C_{p,T} = \frac{\sin(\theta)}{\omega Z_0}$	 $L_{s,П} = \frac{Z_0 \sin(\theta)}{\omega}$ $L_{p,П} = \frac{-Z_0}{\omega \operatorname{tg}(\theta/2)}$	
	 $C_{s,T} = \frac{-1}{\omega Z_0 \operatorname{tg}(\theta/2)}$ $L_{p,T} = \frac{-Z_0}{\omega \sin(\theta)}$	 $C_{s,П} = \frac{-1}{\omega Z_0 \sin(\theta)}$ $L_{p,П} = \frac{-Z_0}{\omega \operatorname{tg}(\theta/2)}$	 $L_{s,T} = \frac{Z_0 \operatorname{tg}(\theta/2)}{\omega}$ $L_{p,T} = \frac{-Z_0}{\omega \sin(\theta)}$	 $C_{s,П} = \frac{-1}{\omega Z_0 \sin(\theta)}$ $C_{p,П} = \frac{\operatorname{tg}(\theta/2)}{\omega Z_0}$	
ДЛДОД ($\theta < 0$)	 $C_{s,T} = \frac{-1}{\omega Z_0 \operatorname{tg}(\theta/2)}$ $L_{p,T} = \frac{-Z_0}{\omega \sin(\theta)}$	 $C_{s,П} = \frac{-1}{\omega Z_0 \sin(\theta)}$ $L_{p,П} = \frac{-Z_0}{\omega \operatorname{tg}(\theta/2)}$	 $L_{s,T} = \frac{Z_0 \operatorname{tg}(\theta/2)}{\omega}$ $L_{p,T} = \frac{-Z_0}{\omega \sin(\theta)}$	 $C_{s,П} = \frac{-1}{\omega Z_0 \sin(\theta)}$ $C_{p,П} = \frac{\operatorname{tg}(\theta/2)}{\omega Z_0}$	

В Главе 5 "СВЧ-устройства на основе искусственных длинных линий с отрицательной частотной дисперсией" представлены результаты исследования и разработки СВЧ-устройств на комбинации ИДЛ с разным законом дисперсии: малогабаритных и широкополосных НО, а также широкополосных дискретных фазовращателей, выполненных с применением современных многослойных толсто пленочных технологий.

Возможности и преимущества технологии многослойных ИС СВЧ на основе керамики с низкой температурой обжига – КНТО (Low Temperature Co-fired

Ceramics – LTCC) для реализации отрезков искусственных ДЛОД и ДЛПД на квазисосредоточенных элементах обсуждаются в разделе 5.1.

Раздел 5.2 посвящен обоснованию выбора программных средств для моделирования характеристик СВЧ-устройств на отрезках ДЛОД и ДЛПД, выполняемых по технологии КНТО.

В разделе 5.3 представлены результаты исследования и разработки малогабаритных и широкополосных квадратурных и синфазно-противофазных НО на комбинации отрезков искусственных ДЛПД и ДЛОД.

Габариты НО могут быть уменьшены за счет перехода от отрезков ДЛ с распределенными параметрами к их эквивалентному представлению в виде реактивной Т- или П-образной схемы на элементах с сосредоточенными параметрами (Таблица 1).

На Рис. 6 показано эквивалентное представление двухшлейфного моста, в котором два четвертьволновых отрезка ДЛ заменены П-схемой ячейки ДЛПД, а два других – емкостной П-схемой инвертора сопротивления/проводимости (эквивалент ДЛОД). Отрицательные емкости схемы инвертора поглощаются большими по номиналу положительными емкостями ячеек ДЛПД. С применением КТНО DuPont Green Tape 951 на основе данной эквивалентной схемы были разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы малогабаритные квадратурные НО на квазисосредоточенных элементах с центральной частотой 2,45 ГГц и переходным ослаблением 3 дБ и 10 дБ.

Замена в составе кольцевого НО отрезка ДЛПД с электрической длиной 270° на элементарную ячейку ДЛОД с эквивалентной электрической длиной -90° , и выполнение четвертьволновых отрезков ДЛПД в виде ИДЛ позволяет реализовать малогабаритный синфазно-противофазный НО, который также был выполнен в виде многослойной ИС на КНТО.

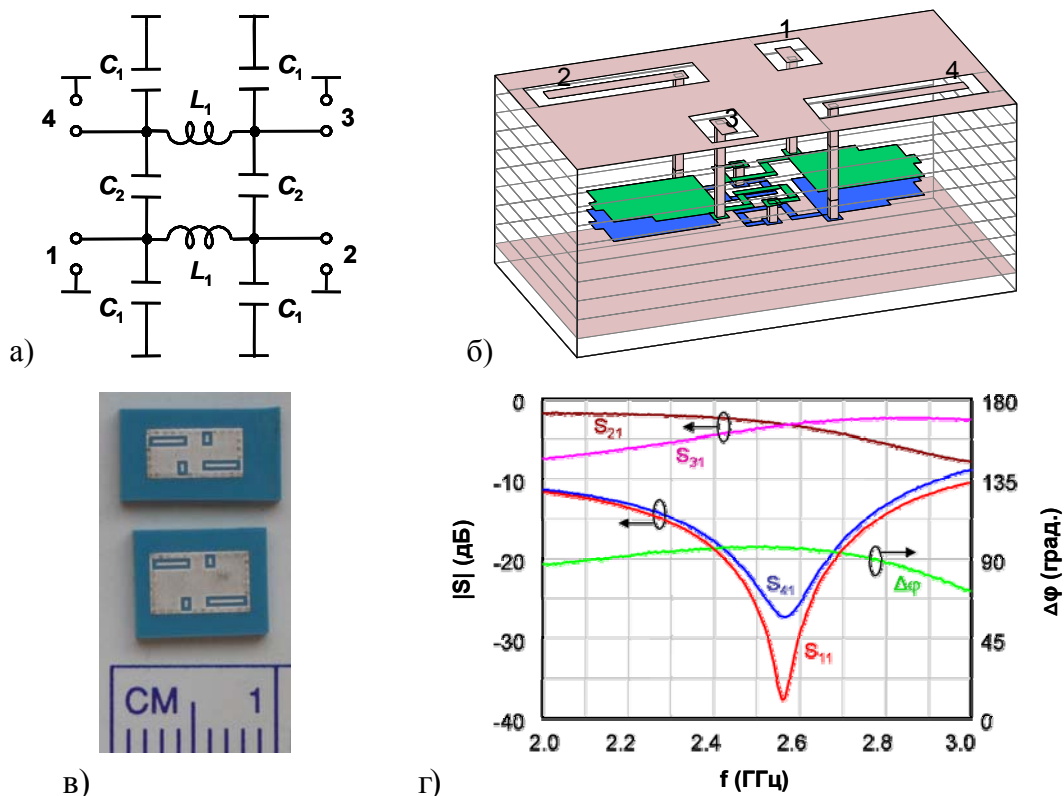


Рис. 6. Эквивалентная схема (а) многослойная ИС на КНТО (б), тестовые образцы (в) и измеренные характеристики (г) малогабаритного квадратурного НО.

Линейные размеры разработанных малогабаритных устройств сопоставимы с $1/8$ длины волны в линии передачи на центральной частоте, а занимаемая каждым устройством площадь, по крайней мере, в 7 раз меньше по сравнению с традиционным аналогом на элементах с распределенными параметрами, выполненным на такой же подложке.

Размеры НО на квазисосредоточенных элементах могут быть дополнительно уменьшены за счет уменьшения площади конденсаторов посредством локального применения диэлектрических паст с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости. Сверхмалогабаритный синфазно-противофазный НО, в котором пространство между электродами плоскопараллельных конденсаторов заполнено диэлектрической пастой NAMICs K30 ($\epsilon_r = 30$), имеет размеры $2,4 \times 2,4 \times 1,26 \text{ мм}^3$, что составляет менее $1/24$ длины волны в линии по каждому измерению. Выигрыш по занимаемой площади составляет 80 раз.

Частотные характеристики НО определяются дисперсионными свойствами используемых отрезков длинных линий. Изменение электрической длины отрезка длинной линии с изменением частоты происходит тем быстрее, чем больше абсолютное значение электрической длины на центральной частоте. Замена отрезка ДЛПД с электрической длиной 270° , отрезком искусственной ДЛОД с эквивалентной электрической длиной -90° теоретически позволяет расширить рабочую полосу частот кольцевого НО в два раза (с 28% до 56%). Расширение полосы такого НО может быть обеспечено применением ИДЛ на основе каскадного соединения двух элементарных ячеек (Рис. 7). Габариты многослойной ИС широкополосного син-

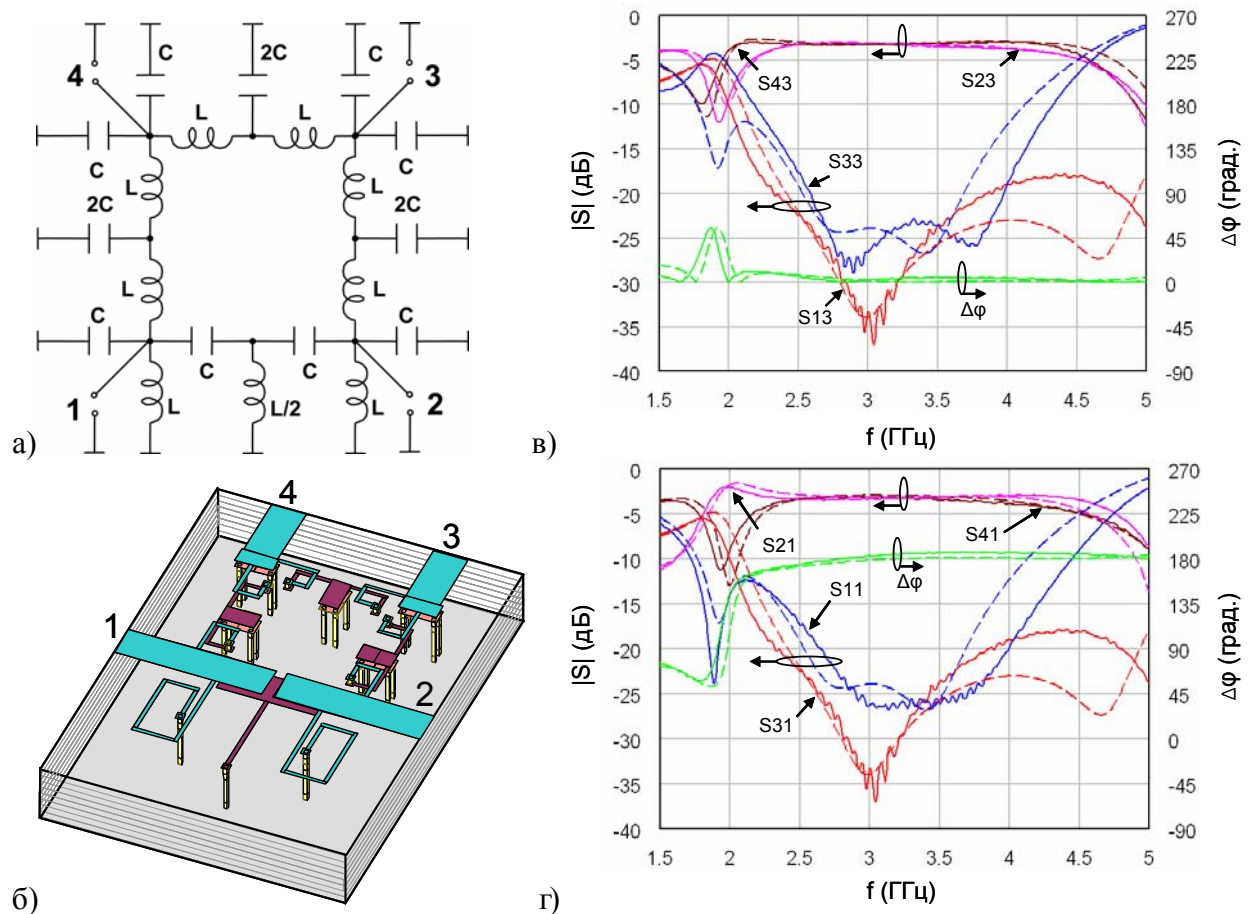


Рис. 7. Эквивалентная схема (а) многослойная ИС на КНТО (б), характеристики в синфазном (в) и противофазном состояниях (г) широкополосного синфазно-противофазного НО (электродинамическое моделирование – пунктир, эксперимент – сплошные линии).

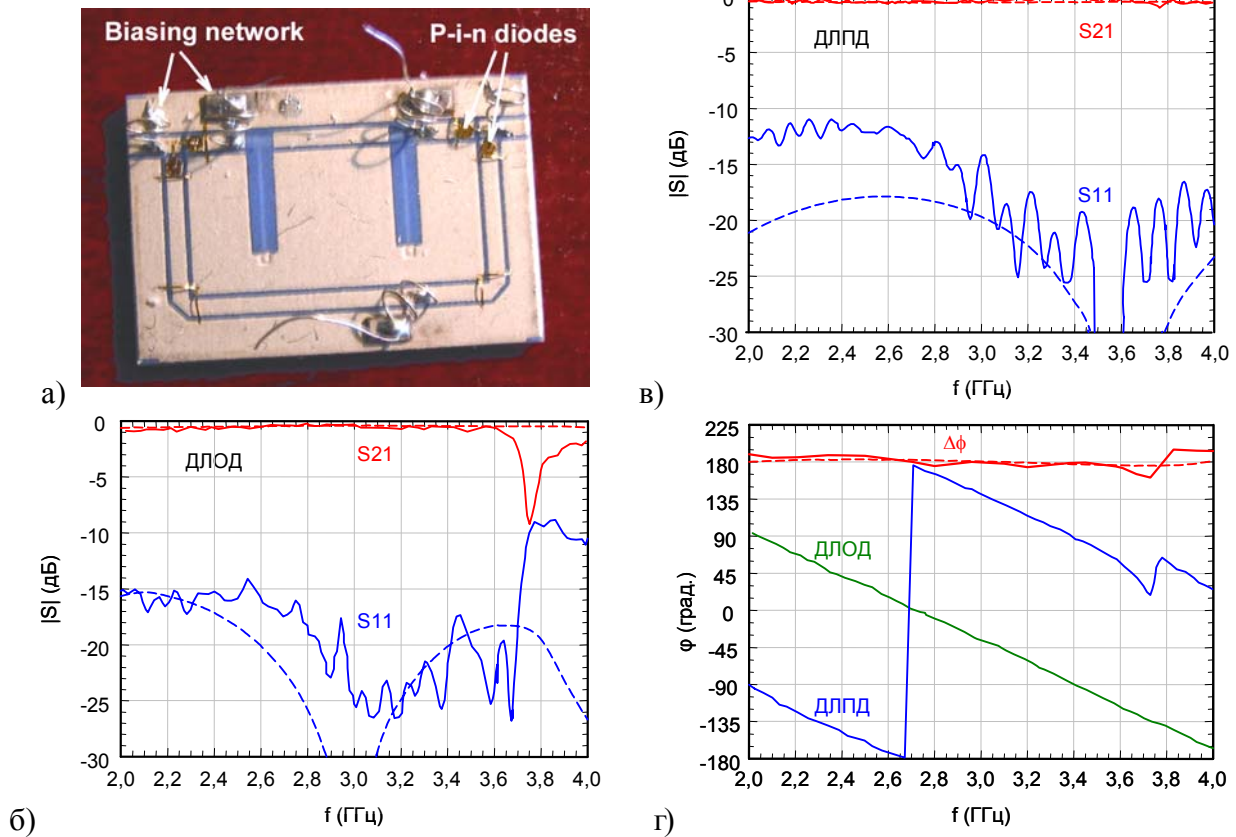


Рис. 8. Тестовый образец (а) АЧХ в двух состояниях (б), (в) и ФЧХ (г) широкополосного дискретного ФВ на переключаемых отрезках ДЛПД и ДЛОД (электродинамическое моделирование – пунктир, эксперимент – сплошные линии).

фазно-противофазного НО на КНТО не превышают $1/5$ длины волны в линии на центральной частоте и составляют $10 \times 8 \times 0.76 \text{ мм}^3$. Устройство занимает в 6 раз меньшую площадь по сравнению с традиционным кольцевым НО на элементах с распределенными параметрами и при этом обладает в 1,5 раза более широкой рабочей полосой частот.

В разделе 5.4 исследуются дискретные ФВ на переключаемых отрезках ДЛОД и ДЛПД, которые совмещают в себе преимущества ФВ на переключаемых фильтрах нижних и верхних частот и ФВ на переключаемых линиях с разной длиной. Поскольку эквивалентные схемы ДЛПД и ДЛОД соответственно имеют структуру фильтров нижних и верхних частот, обеспечивается ФЧХ, аналогичная случаю переключаемых фильтров, в то время как согласование по входу достигается путем выбора надлежащего волнового сопротивления отрезков ДЛПД и ДЛОД, как в случае переключаемых линий.

Теоретически показано, что ошибка фазового сдвига такого ФВ минимизируется при равенстве электрических длин отрезков ДЛПД и ДЛОД по абсолютной величине на центральной частоте, что обеспечивает равный наклон ФЧХ на этой частоте. Определен теоретический предел ошибки фазового сдвига такого ФВ, который составляет $\pm 2,9\%$ для полосы частот равной октаве и $\pm 11,1\%$ для полосы шириной в две октавы.

На переключаемых отрезках ДЛПД и ДЛОД был разработан, изготовлен и экспериментально исследован ФВ с фазовым сдвигом 180° для частотного диапазона 2,0–4,0 ГГц (Рис. 8). Устройство реализовано на подложке из поликора с применением толсто пленочной многослойной технологии. Четвертьволновый отрезок искусственной ДЛОД выполнен в виде каскадного соединения двух Т-образных яче-

ек. ДЛПД представляет собой отрезок копланарного волновода с распределенными параметрами. В качестве управляющих элементов в составе ФВ использовались навесные р-і-п диоды. Размеры устройства составляют $21 \times 14 \times 1,1$ мм³. Измеренный фазовый сдвиг в полосе частот 2,0–3,6 ГГц составил $180 \pm 7^\circ$. Вносимые потери составили около 0,7 дБ в канале ДЛПД и не более 0,9 дБ в канале ДЛОД.

Многоразрядные широкополосные ФВ на переключаемых отрезках ДЛПД и ДЛОД могут быть созданы путем каскадного соединения нескольких отдельных разрядов, построенных по такой схеме. Для частотного диапазона 2,0–4,0 ГГц был разработан трехразрядный ФВ на р-і-п диодах.

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

- [1] Вендик, И.Б. Распределение тока, поверхностный импеданс и затухание в сверхпроводниковых связанных микрополосковых линиях [Текст] / И.Б. Вендик, М.Н. Губина, А.Н. Деленив, Д.В. Холодняк // Журнал технической физики. – 1997. – Т. 67, Вып. 2. – С. 83-88.
- [2] Ситникова, М.Ф. 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] Vendik, O.G. Development of CAD tool for a design of microwave planar HTS filters [Text] (Разработка САПР для проектирования планарных СВЧ-фильтров на ВТСП) / O.G. Vendik, I.B. Vendik, A.N. Deleniv, V.V. Kondratiev, M.N. Goubina, D.V. Kholodniak // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2000. – V. 48, N. 7. – P. 1247-1255.
- [4] Vendik, I.B. The high-temperature superconductor filters: modeling and experimental investigations [Text] (Фильтры на высокотемпературных сверхпроводниках: моделирование и экспериментальные исследования) / I.B. Vendik, V.V. Kondratiev, D.V. Kholodniak, S.A. Gal'chenko, A.N. Deleniv, M.N. Goubina, A.A. Svishchev, S. Leppävuori, J. Hagberg, E. Jakku // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1999. – V. 9, N. 2. – P. 3577-3580.
- [5] Vendik, I.B. Narrow-band Y-B-Cu-O filter with quasi-elliptic characteristic [Text] (Узкополосный фильтр с квазиэллиптической характеристикой на пленке YBCO) / I.B. Vendik, A.N. Deleniv, V.O. Sherman, A.A. Svishchev, V.V. Kondratiev, D.V. Kholodniak, A.V. Lapshin, P.N. Yudin, B.-C. Min, Y.H. Choi, B. Oh // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2001. – V. 11, No. 1. – P. 477-480.
- [6] Kholodnyak, D.V. Broadband digital phase shifter based on switchable right- and left-handed transmission line sections [Text] (Широкополосный дискретный фазовращатель на переключаемых отрезках "правых" и "левых" длинных линий) / D.V. Kholodnyak, E.V. Serebryakova, I.B. Vendik, O.G. Vendik // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2006. – V. 16, N. 5. – P. 258-260.
- [7] Vendik, I. Modelling and investigation of HTS planar resonators and filters on sapphire substrate [Text] (Моделирование и исследование планарных ВТСП-резонаторов и фильтров на сапфировой подложке) / I. Vendik, M. Goubina, A. Deleniv, D. Kaparkov, D. Kholodniak, V. Kondratiev, S. Gevorgian, E. Kollberg, A. Zaitsev, R. Wördenweber // Superconductor Science and Technology. – 1999. – V. 12. – P. 394-399.
- [8] Deleniv, A. Extracting the model parameters of HTS film microwave surface impedance from the experimental characteristics of resonators and filters (Извлечение модельных параметров СВЧ поверхностного импеданса пленки ВТСП из экспериментальных характеристик резонаторов и фильтров) [Text] / A. Deleniv, D. Kholodniak, A. Lapshin, I. Vendik, P. Yudin, B.-C. Min, Y.H. Choi, B. Oh // Superconductor Science and Technology. – 2000. – V. 13. – P. 1419-1423.
- [9] Vendik, O.G. Design of trimmingless narrowband planar HTS filters (Проектирование узкополосных планарных ВТСП-фильтров, не требующих подстройки) [Text] / O.G. Vendik, I.B. Vendik, A.N. Deleniv, M.S. Gashinova, A.V. Lapshin, D.V. Kholodniak // Journal of Superconductivity. – 2001. – V. 14, N. 1. – P. 23-30.

- [10] Vendik, I. Miniature microwave devices based on a combination of natural right-handed and metamaterial left-handed transmission lines [Text] (Миниатюрные СВЧ-устройства на комбинации традиционной "правой" и метаматериальной "левой" длинных линий) / I. Vendik, D. Kholodnyak, E. Serebryakova, P. Kapitanova // *The European Physical Journal Applied Physics*. – 2009. – V. 46, N. 3. – P. 32610.
- [11] Vendik, I.B. Microwave devices based on transmission lines with positive/negative dispersion [Text] (СВЧ-устройства на длинных линиях с положительной/отрицательной дисперсией) / I.B. Vendik, D.V. Kholodnyak, I.V. Kolmakova, E.V. Serbryakova, P.V. Kapitanova // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 2006. – V. 48, N. 12. – P. 2632-2638.
- [12] Deleniv, A. Model of high-temperature superconducting coupled microstrip lines on anisotropic sapphire substrate [Text] (Модель ВТСП связанных микрополосковых линий на анизотропной сапфировой подложке) / A. Deleniv, M. Gubina, D. Kholodniak, I. Vendik // *International Journal RF and Microwave Computer Aided Engineering*. – 1998. – V. 8. – P. 375-385.
- [13] Vendik, O.G. Applications of high-temperature superconductors in microwave integrated circuits [Text] (Применения высокотемпературных сверхпроводников в СВЧ интегральных схемах) / O.G. Vendik, I.B. Vendik, D.V. Kholodnyak // *Materials Physics and Mechanics*. – 2000. – V. 2, N. 1. – P. 14-24.
- [14] Vendik, I.B. Digital phase shifters based on right- and left-handed transmission lines [Text] (Дискретные фазовращатели на "правых" и "левых" длинных линиях) / I.B. Vendik, O.G. Vendik, D.V. Kholodnyak, E.V. Serebryakova, P.V. Kapitanova // *Proceedings of the European Microwave Association*. – 2006. – V. 2, N. 2. – P. 30-37.
- [15] Kapitanova, P. Tuneable microwave devices based on left/right-handed transmission line sections in multilayer implementation [Text] (Перестраиваемые СВЧ-устройства на отрезках "правых"/"левых" длинных линий в многослойном исполнении) / P. Kapitanova, D. Kholodnyak, S. Humbla, R. Perrone, J. Mueller, M.A. Hein, I. Vendik // *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. – 2009. – V. 1, N. 4. – P. 323-329.
- [16] Piatnitsa, V. Miniature 90° and 180° directional couplers for Bluetooth and WLAN applications designed as multilayer microwave integrated circuits [Text] (Миниатюрные 90° и 180° направленные ответвители, выполненные в виде многослойных СВЧ интегральных схем) / V. Piatnitsa, D. Kholodnyak, I. Fischuk, M. Komulainen, H. Jantunen, I. Vendik // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. – 2011. – V. 25, N. 2/3. – P. 169-175.

Глава в монографии:

- [17] Vendik, I.B. Microwave phase shifters and filters based on a combination of left-handed and right-handed transmission lines [Text] (СВЧ-фазовращатели и фильтры на комбинации "левых" и "правых" длинных линий) / I.B. Vendik, D.V. Kholodnyak, P.V. Kapitanova // *Metamaterials Handbook. Applications of Metamaterials* / Ed. F. Capolino. – CRC Press. – 2009. – V. 2, Ch. 13. – P. 13-1–13-21. – ISBN 978-1-4200-5423-1.

Другие статьи и материалы конференций:

- [18] Туральчук, П.А. Многослойные интегральные схемы миниатюрных СВЧ-устройств для систем телекоммуникаций и связи / П.А. Туральчук, Я.А. Колмаков, А.В. Симин, Д.В. Холодняк, И.Б. Вендик [Текст] // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. – 2005. – Вып. 1. – С. 65-71.
- [19] Kholodniak, D. Wideband 0-dB branch-line directional couplers [Text] (Широкополосные 0-дБ шлейфные направленные ответвители) / D. Kholodniak, G. Kalinin, E. Vernoslova, I. Vendik // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Boston, MA, USA*. – 2000. – V. 3. – P. 1307-1310.
- [20] Deleniv, A. Modeling of high-T_c superconducting coupled microstrip lines on sapphire substrate [Text] (Моделирование ВТСП связанных микрополосковых линий на сапфировой подложке) / A. Deleniv, M. Gubina, D. Kholodniak, I. Vendik // *Proc. of 26th European Microwave Conference, Prague, Czech Republic*. – 1996. – V. 1. – P. 268-272.
- [21] Kholodniak, D.V. A novel type of 0-dB directional coupler for microwave integrated circuits [Text] (Новый тип 0-дБ направленного ответвителя для СВЧ интегральных схем) / D.V. Kholodniak, I.B. Vendik // *Proc. of 29th European Microwave Conference, Munich, Germany*. – 1999. – V. 2. – P. 341-344.
- [22] Vendik, O.G. Electronically controlled phase shifters based on right/left-handed transmission lines [Text] (Фазовращатели с электронным управлением на "правых"/"левых" длинных линиях) /

O.G. Vendik, I.B. Vendik, D.V. Kholodnyak, S.P. Zubko, E.V. Serebryakova // Proc. of 35th European Microwave Conference, Paris, France. – 2005. – P. 909-912.

[23] Vendik, I.B. Applications of right/left handed and resonant left handed transmission lines for microwave circuit design [Text] (Применения "правых"/"левых" и резонансных "левых" длинных линий в СВЧ-схемах) / I.B. Vendik, D.V. Kholodnyak, I.V. Kolmakova, E.V. Serbryakova, P.V. Kapitanova, F. Martin, J. Bonache, J. Garcia, I. Gil, M. Gil // Proc. of 36th European Microwave Conference, Manchester, UK. – 2006. – P. 955-958.

[24] Piatnitsa, V. Right/left-handed transmission line LTCC directional couplers [Text] (Направленные ответвители на "правых"/"левых" длинных линиях, выполненные по технологии LTCC) / V. Piatnitsa, D. Kholodnyak, P. Kapitanova, I. Fischuk, T. Tick, J. Jantti, H. Jantunen, I. Vendik // Proc. of 37th European Microwave Conference, Munich, Germany. – 2007. – P. 636-639.

[25] Vendik, I. Tunable dual-band microwave devices based on a combination of left/right-handed transmission lines [Text] (Перестраиваемые двухполосные СВЧ-устройства на комбинации "правых"/"левых" длинных линий) / I. Vendik, D. Kholodnyak, P. Kapitanova, M.A. Hein, S. Humbla, R. Perrone, J. Mueller // Proc. of 38th European Microwave Conference, Amsterdam, The Netherlands. – 2008. – P. 273-276.

[26] Kholodnyak, D. Novel Wilkinson-type power dividers based on metamaterial transmission lines [Text] (Новые делители мощности типа Уилкинсона на метаматериальных длинных линиях) / D. Kholodnyak, P. Kapitanova, I. Vendik, S. Humbla, R. Perrone, J. Müller, M.A. Hein // Proc. of 38th European Microwave Conference, Amsterdam, The Netherlands. – 2008. – P. 341-344.

[27] Turalchuk, P. Broadband small-size LTCC directional couplers [Text] (Широкополосные малогабаритные направленные ответвители на LTCC) / P. Turalchuk, I. Munina, P. Kapitanova, D. Kholodnyak, D. Stöpel, S. Humbla, J. Müller, M.A. Hein, I. Vendik // Proc. of 40th European Microwave Conference, Paris, France. – 2010. – P. 1162-1165.

[28] Vendik, I. Design of miniature microwave devices based on a combination of natural right-handed and metamaterial left-handed transmission lines [Text] (Разработка миниатюрных СВЧ-устройств на комбинации традиционной "правой" и метаматериальной "левой" длинных линий) / I. Vendik, O. Vendik, D. Kholodnyak, P. Kapitanova // Proc. of 1st International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Rome, Italy. – 2007. – P. 87-90.

[29] Kholodnyak, D. Design of directional couplers using fully-integrated left-handed transmission lines [Text] (Разработка направленных ответвителей с использованием "левых" длинных линий в полностью интегральном исполнении) / D. Kholodnyak, P. Kapitanova, I. Vendik // Proc. of 1st International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Rome, Italy. – 2007. – P. 91-94.

[30] Kapitanova, P. Application of right and left-handed transmission lines to design of highly integrated and tuneable directional couplers [Text] (Применение "правых" и "левых" длинных линий для разработки направленных ответвителей с высокой степенью интеграции и перестраиваемых направленных ответвителей) / P. Kapitanova, D. Kholodnyak, I. Vendik, R. Perrone, S. Humbla, J. Mueller, M.A. Hein // Proc. of 3rd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, London, UK. – 2009. – P. 193-195.

[31] Kholodnyak, D. Broadband directional couplers and power dividers based on metamaterial transmission lines [Text] (Широкополосные направленные ответвители и делители мощности на метаматериальных длинных линиях) / D. Kholodnyak, I. Munina, P. Kapitanova, V. Turgaliev, A. Rusakov, P. Turalchuk, I. Vendik, D. Stöpel, S. Humbla, J. Müller, M.A. Hein // Proc. of 4th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Karlsruhe, Germany. – 2010. – P. 591-593.

[32] Kholodnyak, D.V. Broadband microwave devices based on artificial transmission lines [Text] (Широкополосные СВЧ-устройства на искусственных длинных линиях) / D.V. Kholodnyak, I.B. Vendik, P.A. Turalchuk, E.Yu. Zameshaeva, I.V. Munina // Proc. of 5th European Conference on Antennas and Propagation, Rome, Italy. – 2011. – P. 2820-2824.