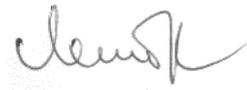


На правах рукописи



Лемберг Константин Вячеславович

**ИССЛЕДОВАНИЕ
МИКРОПОЛОСКОВЫХ СТРУКТУР
С АКТИВНЫМИ СРЕДАМИ
И СОЗДАНИЕ
УПРАВЛЯЕМЫХ СВЧ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ
НА ИХ ОСНОВЕ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск 2013

Работа выполнена в Учреждении Министерства образования и науки РФ
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,
Беляев Борис Афанасьевич
- Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, профессор,
Слабко Виталий Васильевич,
зав. кафедрой фотоники и лазерной техники
ФГАОУ ВПО
«Сибирский федеральный университет»
- кандидат технических наук, доцент,
Бутаков Сергей Владимирович,
проректор ФГБОУ ВПО
«Красноярский государственный педагогический
университет им. В. П. Астафьева»
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский
Томский Государственный Университет»

Защита состоится «___» _____ 2013 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 003.055.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт физики им. Л. В. Киренского» Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Втюрин А. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время происходит интенсивное развитие радиотехнических систем общего (связь, локация, навигация) и специального назначения. Одним из направлений развития таких систем является улучшение их характеристик за счет применения пространственной селекции сигналов, для чего используются различные виды фазированных антенных решеток (ФАР). Применение ФАР позволяет существенно увеличить информационную емкость телекоммуникационных, быстродействие радиолокационных и помехозащищенность радионавигационных систем, а также улучшить другие их характеристики.

Важнейшими элементами фазированных антенных решеток являются сверхвысокочастотные фазовращатели (СВЧ ФВ), к которым в связи с вышесказанным предъявляются все более высокие требования по электрическим характеристикам и другим параметрам – таким как габариты, технологичность изготовления и стоимость, что обуславливает актуальность исследований, направленных на улучшение параметров этих устройств.

На сегодняшний день разработано большое количество конструкций СВЧ фазовращателей, основанных на разных физических принципах построения и использующих для управления фазой электромагнитной волны различные активные материалы или элементы (такие материалы или элементы, параметры которых изменяются под воздействием управляющего электрического или магнитного поля, температуры, давления и т.д., в данной работе названы активными средами). Наиболее широкое распространение в фазированных антенных решетках получили ферритовые фазовращатели на основе волноводных линий передачи, однако в современной радиоаппаратуре они зачастую не удовлетворяют требованиям по массогабаритным и электрическим характеристикам. Именно поэтому в последние годы активно ведется поиск и исследование новых типов СВЧ фазовращателей, использующих новые активные среды и принципы построения. Один из таких принципов, названный резонансным, был предложен в Институте физики им. Л. В. Киренского СО РАН. Он заключается в использовании связанных микрополосковых резонаторов с активными средами для построения целого ряда управляемых устройств СВЧ техники: фильтров, устройств защиты от радиоимпульса и др.

В диссертационной работе проведено исследование микрополосковых резонансных конструкций фазовращателей, до сих пор систематически не исследованных, в качестве активных сред в которых используются жидкие кристаллы

(ЖК), планарные структуры на основе тонких магнитных пленок (ТМП) и ферриты. Применение ферритов в микрополосковых линиях (МПЛ) позволяет совместить преимущества феррита как активной среды и миниатюрность МПЛ. В свою очередь, тонкие ферромагнитные пленки на основе сплавов Fe, Ni, Co, по сравнению с массивными ферритами, требуют меньшей напряженности управляющего поля вследствие большего значения намагниченности насыщения и малости полей анизотропии, а планарные устройства на их основе лучше совместимы с интегральной технологией изготовления СВЧ схем. Интерес к жидким кристаллам связан с тем, что они являются перспективной активной средой для фазовращателей миллиметрового диапазона длин волн, благодаря сравнительно низким потерям и высокому значению анизотропии диэлектрической проницаемости в этом диапазоне.

В связи с этим резонансные конструкции фазовращателей на основе указанных активных сред представляют большой интерес для технических приложений радиофизики, а исследования таких конструкций являются весьма актуальными.

Целью работы являлось исследование резонансных конструкций СВЧ фазовращателей с использованием в качестве активных сред жидких кристаллов, тонких магнитных пленок и ферритов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- исследование особенностей распространения электромагнитных волн в микрополосковых структурах, содержащих активные среды;
- исследование основных характеристик различных конструкций резонансных фазовращателей на микрополосковых структурах с активными средами;
- разработка и создание действующих макетов резонансных фазовращателей на основе микрополосковых структур, содержащих жидкие кристаллы, магнитные пленки, ферриты, а также исследование их характеристик.

Научная новизна работы

- Изучены закономерности поведения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик резонансных микрополосковых структур с активными средами, позволившие выявить их особенности, важные для улучшения параметров электрически управляемых фазовращателей;
- показана возможность создания электрически управляемых резонансных фазовращателей с жидкокристаллической активной средой, перспективных для применения в миллиметровом диапазоне длин волн;
- разработаны новые, перспективные для применения в сантиметровом и

дециметровом диапазоне длин волн конструкции резонансных СВЧ фазовращателей на основе микрополосковых структур, содержащих в качестве активных сред ферриты и тонкие магнитные пленки.

Практическая значимость работы

– Результаты исследований позволяют определить необходимые конструктивные параметры резонансных фазовращателей для реализации устройств с заданными основными характеристиками;

– сформулированы рекомендации, позволяющие при проектировании резонансных фазовращателей улучшить их основные характеристики;

– показано, что на основе исследованных конструкций фазовращателей могут быть реализованы устройства дециметрового, сантиметрового и даже миллиметрового диапазонов длин волн, имеющие управляемый фазовый сдвиг до 360° и высокий фактор качества – до $150^\circ/\text{дБ}$;

– выявлены достоинства и недостатки разработанных конструкций фазовращателей, предложены пути улучшения их характеристик, а также обозначены перспективы их применения.

Методы исследования

В работе были использованы: феноменологическое описание зависимостей характеристик резонансных микрополосковых структур от их основных параметров, численный расчет параметров микрополосковых структур на основе квазистатического приближения, метода моментов и метода конечных элементов. Проверка теоретических положений и расчетов выполнялась экспериментально посредством измерения частотных зависимостей элементов матрицы рассеяния изготавливаемых макетов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Для фильтров, имеющих чебышевскую характеристику, отношение величины набега фазы в полосе пропускания к количеству звеньев фильтра может изменяться от 90° до 180° , возрастая с увеличением коэффициента отражения в полосе пропускания фильтра и количества его звеньев.

2. Характер зависимости величины управляемого фазового сдвига резонансного фазовращателя на основе полосно-пропускающего фильтра от его основных конструктивных параметров определяется формулой $\Delta\varphi = \frac{\Phi}{\frac{\delta f/f_0}{\delta\epsilon} + 1}$, где

Φ – величина набега фазы в полосе пропускания фильтра, $\delta f/f_0$ – относительная полоса рабочих частот фазовращателя, и $\delta\epsilon$ – величина, характеризующая

анизотропию эффективной диэлектрической (или магнитной) проницаемости подложки устройства.

3. На основе связанных микрополосковых резонаторов на подложке с управляемой диэлектрической или магнитной проницаемостью возможно создание электрически управляемого СВЧ фазовращателя с габаритами существенно меньшими, чем у фазовращателя на основе согласованной линии передачи на той же подложке с тем же значением управляемого фазового сдвига.

Степень достоверности полученных результатов

Обоснованием достоверности полученных теоретических выводов является их согласие с результатами экспериментальных исследований. Достоверность результатов измерений подтверждается использованием оборудования, обеспечивающего необходимую точность эксперимента. Достоверность результатов использованных в работе численных расчетов подтверждается применением адекватных решаемым задачам современных методов расчета.

Апробация результатов исследования

По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК, получен 1 патент на изобретение.

Результаты работы докладывались на Всероссийских с международным участием научно-технических конференциях «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2009, 2010 и 2011 гг.), на Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 2010), на Международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2010 и 2012 гг.), на Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2010), и на Всероссийской конференции по жидким кристаллам (Иваново, 2012).

Результаты, полученные в процессе работы над диссертацией, явились основой для участия автора в НИР «Разработка основанных на новых физических принципах управляемых частотно-селективных устройств для систем радиолокации, радионавигации и связи» (2010-2012 гг.) и НИР «Создание управляемых СВЧ фазовращателей на новых физических принципах» (2010-2011 гг.), проводимых в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», в качестве исполнителя и руководителя, соответственно.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 108 страницах, включает 69 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 83 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость результатов работы, перечислены положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения об апробации материалов диссертации.

В первой главе рассмотрена классификация СВЧ фазовращателей, их основные характеристики, а также проведен обзор современных исследований по данной тематике, на основе которого сформулированы достоинства и недостатки существующих устройств. В качестве основного признака, по которому проведена классификация, принят тип используемой активной среды. По этому признаку можно выделить ферритовые, полупроводниковые, сегнетоэлектрические и микроэлектромеханические (МЭМС) фазовращатели. В результате анализа литературы установлено, что основными недостатками ферритовых ФВ являются большие габариты и масса, а также большая величина управляющих полей. Полупроводниковые и сегнетоэлектрические ФВ имеют высокие потери в верхней части сантиметрового и миллиметрового диапазонах длин волн, кроме того, для последних необходимы большие управляющие напряжения. МЭМС фазовращатели весьма сложны в производстве и имеют ограниченное количество переключений. Сделан вывод о том, что разработка и исследование новых устройств, способных преодолеть указанные недостатки, является актуальной задачей. При этом особое внимание следует уделить устройствам на основе активных сред, способных работать в миллиметровом диапазоне длин волн, устройствам на основе миниатюрных и технологичных в производстве микрополосковых линий, а также устройствам на основе новых физических принципов построения, позволяющих улучшить характеристики управляемых ФВ. В связи с этим представляют интерес миниатюрные резонансные конструкции микрополосковых фазовращателей, одна из которых была впервые предложена в [1].

В качестве важного параметра, характеризующего конструкцию фазовращателя, выделен фактор качества (ФК) – отношение максимального управляемого сдвига фазы к средним потерям в рабочей полосе частот [2]. ФК исследуемых в различных работах фазовращателей лежит в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен градусов на децибел, а у применяемых на практике ФВ он составляет не менее $100^\circ/\text{дБ}$.

Во второй главе описывается резонансный принцип построения управляемых СВЧ фазовращателей, рассматриваются типы микрополосковых струк-

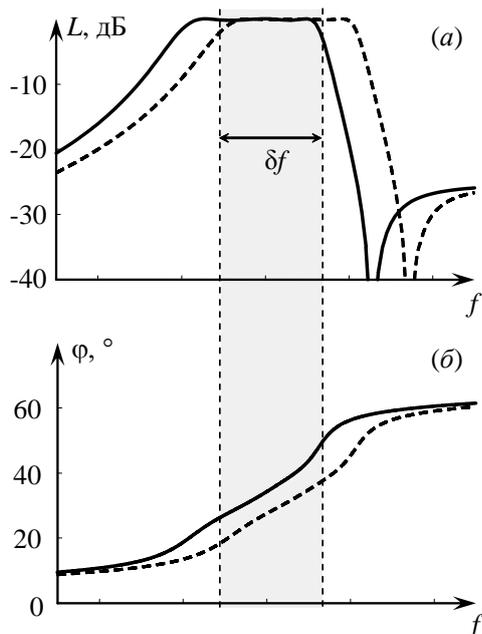


Рисунок 1 – АЧХ (а) и ФЧХ (б) резонансного фазовращателя при изменении диэлектрической или магнитной проницаемости подложки

амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристик микрополоскового полосно-пропускающего фильтра по оси частот при изменении параметров подложки. Как видно, существует область частот δf , в которой прямые потери прошедшего сигнала практически не изменяются, а его фаза изменяется существенно. Эта область называется полосой рабочих частот резонансного фазовращателя. Управляемый фазовый сдвиг сигнала при изменении параметров подложки в резонансном фазовращателе оказывается существенно большим, чем у известной конструкции на основе согласованной линии передачи [3], имеющей длину, равную сумме длин резонаторов в рассматриваемой структуре. Резонансный фазовращатель по сравнению с упомянутой конструкцией обладает не только увеличенным фазовым сдвигом, но и частотной избирательностью, что может исключить применение дополнительных частотно-селективных цепей в некоторых устройствах.

Для создания резонансных фазовращателей могут использоваться большинство микрополосковых структур, применяемых для создания микрополосковых фильтров. Это структуры на основе гальванически связанных полуволновых резонаторов (рис. 2, а), электромагнитно связанных полуволновых резонаторов (рис. 2, б), электромагнитно связанных четвертьволновых резонаторов (рис. 2, в), и другие.

Резонансный фазовращатель, в зависимости от ширины полосы рабочих частот, анизотропии активной среды, количества резонаторов (звеньев) используемой микрополосковой структуры, может иметь различную величину

тур, которые могут использоваться для создания резонансных фазовращателей, а также приводятся результаты теоретического исследования зависимостей их основных характеристик – управляемого фазового сдвига и полосы рабочих частот, от конструктивных параметров.

Принцип работы резонансного фазовращателя наиболее удобно пояснить, если представить его как микрополосковый фильтр, выполненный на подложке с управляемой диэлектрической или магнитной проницаемостью, параметры которого специальным образом оптимизированы для использования в качестве управляемого фазовращателя. На рис. 1 изображен сдвиг

управляемого сдвига фазы. Характер перечисленных зависимостей не является очевидным и был установлен в диссертационной работе, для чего, в первую очередь, были исследованы особенности ФЧХ полосно-пропускающих фильтров. Исследования проводились на моделях с сосредоточенными элементами без потерь, однако их результаты обобщены на любые фильтры, имеющие чебышевскую характеристику, в том числе и микрополосковые, так как их частотные характеристики вблизи полосы пропускания описываются одной и той же комплексной функцией.

В результате установлено, что величина набега фазы в полосе пропускания по уровню -3 дБ чебышевского фильтра, отнесенная к количеству звеньев фильтра (набег фазы на одно звено, обозначенный в работе как Φ_1), может изменяться от 90° до 180° и зависит только от количества звеньев и максимальной величины коэффициента отражения в полосе пропускания R_{\max} , на которую фильтр настроен. Зависимости для количества звеньев $n = 1 \dots 12$ при различных значениях коэффициента отражения приведены на рис. 3.

С использованием полученной зависимости, для $R_{\max} = -14$ дБ была получена аппроксимация ФЧХ полосно-пропускающего фильтра и формула

$$\Delta\varphi = \frac{\Phi}{\frac{\delta f / f_0}{\delta\epsilon} + 1}, \quad (1)$$

где $\Phi = n \times (-0,34n^2 + 9,2n + 81,2)$, а

$$\delta\epsilon = \frac{\sqrt{\epsilon}}{\sqrt{\epsilon - \Delta\epsilon/2}} - \frac{\sqrt{\epsilon}}{\sqrt{\epsilon + \Delta\epsilon/2}}.$$

Она описывает зависимость величины управляемого фазового сдвига в рабочей полосе частот резонансного фазовращателя $\Delta\varphi$ от количества резонаторов в нем n , относительной ширины полосы его рабочих частот δf , величины ϵ и ани-

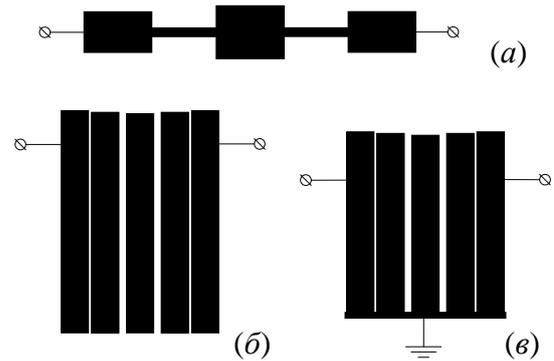


Рисунок 2 – Примеры микрополосковых структур, которые могут быть использованы для создания резонансных фазовращателей

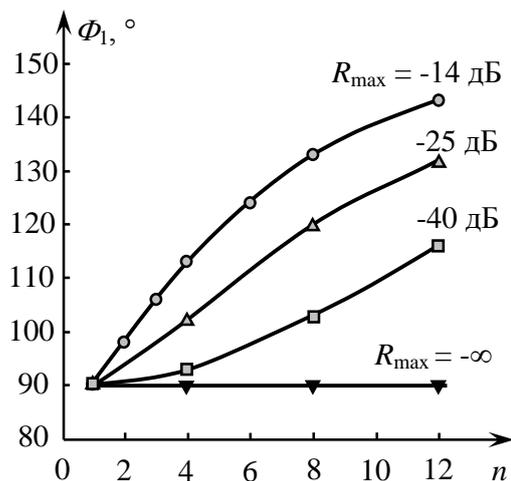


Рисунок 3 – Зависимости набега фазы на одно звено от числа звеньев в ППФ, построенные для различных уровней коэффициента отражения в полосе пропускания

зотропии $\Delta\epsilon$ диэлектрической проницаемости подложки. Фазовращатель на магнитной подложке будет описываться теми же формулами с заменой ϵ на μ .

Полученная формула позволила выявить следующие закономерности поведения управляемого сдвига фазы резонансного фазовращателя:

- при фиксированной анизотропии активной среды и увеличении полосы рабочих частот $\Delta\varphi$ уменьшается по закону, близкому к гиперболическому. При этом полоса фильтра, необходимая для обеспечения заданной ширины полосы рабочих частот линейно растет (рис. 4, а);

- при фиксированной ширине полосы рабочих частот увеличение анизотропии активной среды будет приводить к росту величины $\Delta\varphi$ по закону, близкому к логарифмическому, с одновременным линейным увеличением необходимой ширины полосы устройства как фильтра (рис. 4, б);

- при увеличении количества звеньев и неизменности остальных параметров $\Delta\varphi$ растет практически линейно (рис. 4, в).

Получаемые по формуле (1) значения фазового сдвига носят характер предельно достижимых. Они будут иметь место при бесконечной собственной добротности резонаторов фазовращателя. Управляемый фазовый сдвиг реальных устройств, имеющих потери в проводниках и диэлектриках, будет ниже. Тем не менее, на качественном уровне полученная формула адекватно описывает поведение основных характеристик управляемого резонансного фазовращателя, что подтверждается сравнением получаемых с ее помощью зависимостей с таковыми, рассчитанными в квазистатическом приближении. Также она позволяет в первом приближении оценить необходимые параметры конструкции для достижения заданного фазового сдвига и ширины полосы устройства.

В заключении второй главы сформулированы рекомендации по проектированию резонансных ФВ, заключающиеся в необходимости использования для получения максимального управляемого сдвига фазы как можно более широко-

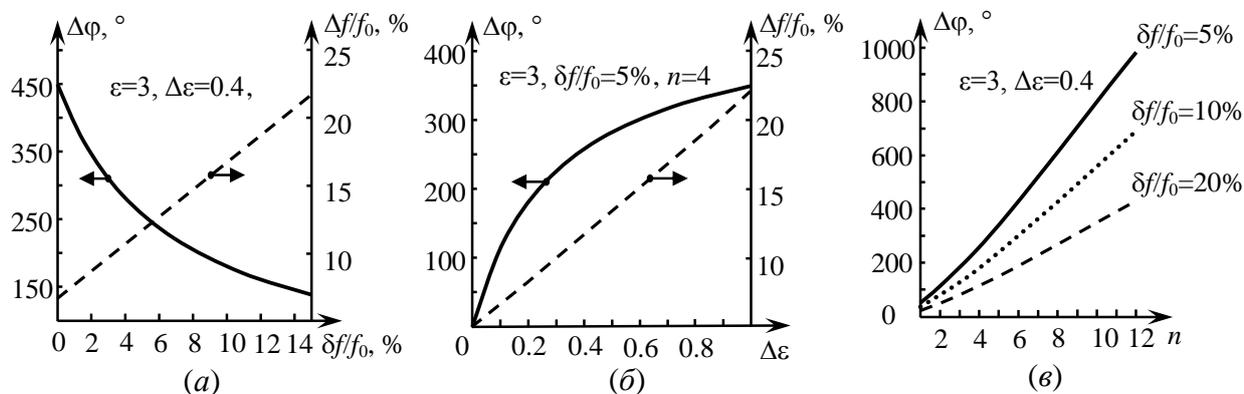


Рисунок 4 – Зависимости управляемого сдвига фазы резонансного фазовращателя и требуемой ширины полосы пропускания фильтра, на котором он построен, от различных параметров

полосных фильтров, позволяющих реализовать заданную ширину рабочей полосы частот устройства, и фильтров, настроенных на максимально возможный уровень коэффициента отражения.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований микрополосковых структур с жидкими кристаллами и резонансных фазовращателей на их основе.

Молекулы ЖК способны ориентироваться по направлению внешнего электрического или магнитного поля, благодаря чему жидкие кристаллы в СВЧ диапазоне обладают анизотропией диэлектрической проницаемости. Кроме того, в этом диапазоне они характеризуются сравнительно низкими потерями, что позволяет использовать их в качестве активных сред для создания резонансных фазовращателей.

Резонансный ЖК фазовращатель может быть изготовлен на основе инвертированной микрополосковой линии передачи, у которой подложкой служит, например, кварцевое стекло, а пространство между подложкой и экраном заполняется жидким кристаллом (рис. 5, а). Управление при этом возможно осуществлять напряжением, прикладываемым между микрополосковым проводником и экраном линии (рис. 5, б). При этом должна быть обеспечена гальваническая связь между резонаторами устройства и развязка между управляющим и СВЧ сигналами. Для задания ориентации молекул жидкого кристалла в отсутствие управляющего поля на поверхностях, контактирующих с ЖК, путем специальной обработки создается микрорельеф. Также для этих целей может быть использовано постоянное магнитное поле.

На основе описанной линии передачи был изготовлен макет девятизвенного резонансного фазовращателя (рис. 6) с центральной частотой рабочей полосы 25.5 ГГц, у которого активной средой служил нематический жидкий кристалл 5СВ, имеющий параметры $\epsilon \approx 2.9$, $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp} \approx 0.3$ и $\text{tg}\delta \approx 0.02$. Топология микрополосковых проводников фазовращателя была синтезирована с помощью расчета в квазистатическом приближении в программе AWR Microwave Office, а

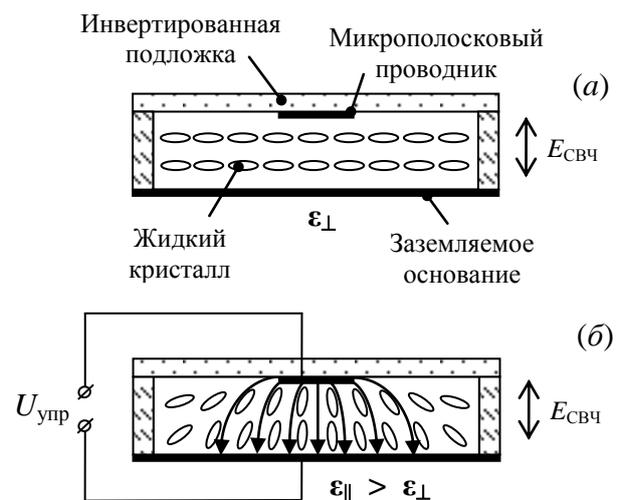


Рисунок 5 – Поперечный разрез микрополосковой линии с ЖК в качестве управляемой среды

затем уточнена с помощью расчета методом конечных элементов в программе CST Microwave Studio. Микрополосковые проводники изготавливались методом гравировки по лаку на автоматизированном координатографе Скальпель-07. Измерения макета проводились с помощью векторного анализатора цепей Rhode&Schwarz ZVK. При этом для подачи управляющего напряжения использовался специальный вход анализатора, т.е. развязка между управляющим и СВЧ сигналами обеспечивалась внутренними цепями прибора, а для задания ориентации молекул ЖК в отсутствие управляющего электрического поля использовалось поле постоянного магнита напряженностью 3 кЭ.

Фазовращатель был настроен на вторую полосу пропускания полуволновых резонаторов. При этом площадь подложки составила $58.6 \times 4.2 \text{ мм}^2$, а габариты корпуса устройства (с разъемами) $90 \times 15 \times 5 \text{ мм}^3$. На рис. 7 приведены амплитудно-частотные характеристики изготовленного макета для минимального, максимального (прямые потери) и среднего (обратные потери) значений управляющего напряжения. Серым цветом на рисунке показана рабочая полоса частот фазовращателя δf , которая составила 9% относительно центральной частоты. В этой полосе частот фазовый сдвиг является равномерным (рис. 8) и плавно

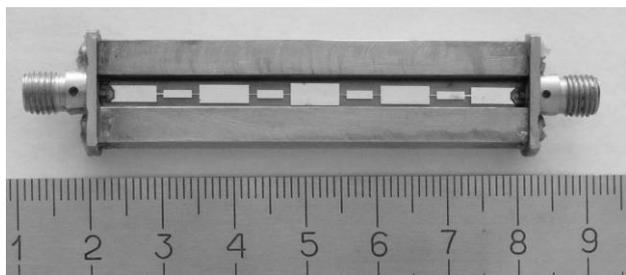


Рисунок 6 – Макет девятизвенного резонансного жидкокристаллического фазовращателя

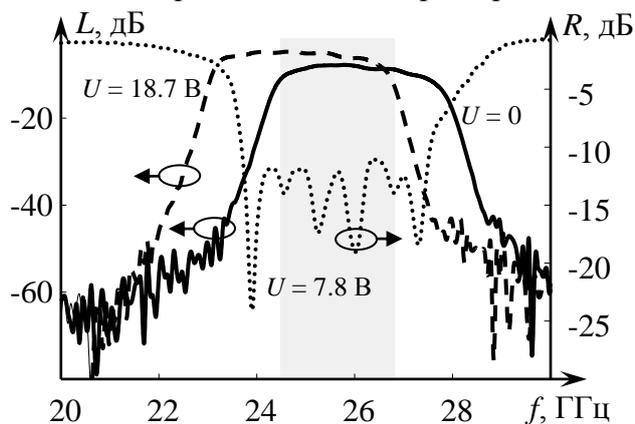


Рисунок 7 – Прямые и обратные потери девятизвенного жидкокристаллического фазовращателя при перестройке электрическим полем

растет при увеличении управляющего напряжения (рис. 9, кривая 1).

Зависимость фазового сдвига от напряжения является нелинейной. Она имеет участок насыщения, обусловленный практически полной переориентацией молекул ЖК вдоль управляющего поля, который начинается при напряжении выше 10 В, или напряженности поля около 20 В/мм. Следует отметить, что такая напряженность управляющего поля является весьма низкой для управляемых устройств. Для сравнения на рис. 9 приведена аналогичная зависимость для фазовращателя на согласованной линии передачи (кривая 2) тех же габаритов, который также был исследован экспериментально. Величина фазового сдвига на частоте 25.5 ГГц для

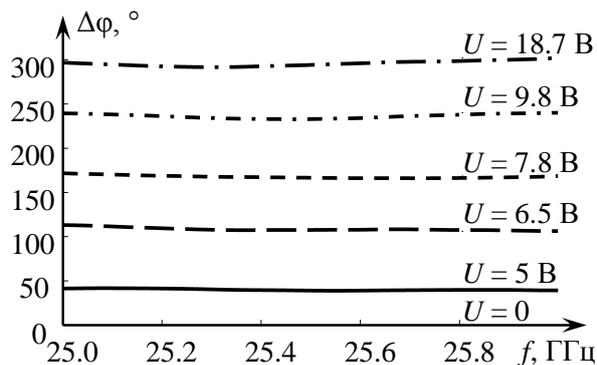


Рисунок 8 – Частотные зависимости управляемого фазового сдвига девятизвенного жидкокристаллического фазовращателя при различных управляющих напряжениях

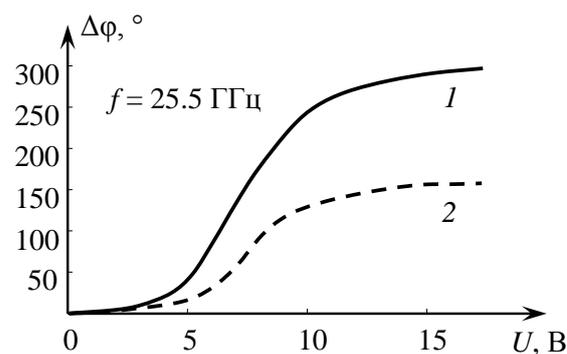


Рисунок 9 – Зависимость управляемого фазового сдвига жидкокристаллических фазовращателей от напряжения (1 – резонансный, 2 – на согласованной линии)

него оказалась вдвое ниже, что соответствует в два раза меньшим габаритам резонансного ФВ при одинаковом фазовом сдвиге. Характеристики исследованного макета резонансного ЖК фазовращателя приведены в табл. 1.

Таким образом, в третьей главе диссертации продемонстрирована работоспособность предложенной конструкции ЖК фазовращателя на частотах верхней части сантиметрового диапазона длин волн и ее высокая миниатюрность. Из других работ известно [4], что анизотропия жидких кристаллов сохраняется вплоть до частот в сотни гигагерц, поэтому сделан вывод о применимости данной конструкции и для миллиметрового диапазона длин волн. Вместе с тем, выявлены некоторые недостатки устройства – это низкая скорость переключения и невысокий по сравнению с микроэлектромеханическими и ферритовыми ФВ фактор качества. Последний недостаток, однако, обусловлен невысокими характеристиками использованного ЖК, и может быть устранен. Электродинамическим расчетом показано, что при уменьшении тангенса угла диэлектрических потерь ЖК до 0.002 фактор качества исследованного ФВ возрастает до 140 °/дБ. Для увеличения скорости переключения фазовращателя предложено капсулировать жидкие кристаллы в матрицу, так как известно, что время переориентации ЖК слоя пропорционально квадрату его толщины. При преодолении указанных недостатков исследованная конструкция является весьма перспективной для применения в миллиметровом диапазоне длин волн, где традиционные ферритовые фазовращатели требуют больших управ-

Таблица 1

Характеристики макета ЖК резонансного фазовращателя

Центральная частота	25.5 ГГц
Полоса рабочих частот	9%
КСВн в полосе	<2
Макс. управл. сдвиг фазы	300°
Средние потери	6.5 дБ
Фактор качества	46 °/дБ
Время переключения	~3 с
Габариты	90×15×5 мм ³
Управляющее напряжение	15 В

ляющих полей, а полупроводниковые имеют недопустимо высокие потери.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований микрополосковых структур с магнитными активными средами и резонансных фазовращателей на их основе.

К магнитным активным средам относятся ферриты и тонкие магнитные пленки. Ферритовая пластина, являясь диэлектриком, может быть использована в качестве подложки микрополосковой линии (рис. 10, *а*), что позволяет управлять параметрами МПЛ. Ферромагнитная пленка, лежащая в плоскости, перпендикулярной линиям электрического поля в микрополосковой структуре, и имеющая толщину меньше глубины скин-слоя на рабочей частоте, практически не будет проявлять своих проводящих свойств и может быть использована как среда с высоким значением магнитной проницаемости, зависящим от внешнего магнитного поля. Из-за малой толщины такой пленки (сотни нанометров в сантиметровом диапазоне), коэффициент заполнения линии активным материалом оказывается небольшим, и для его увеличения используют многослойные структуры из ферромагнитных пленок, разделенных слоями диэлектрика (рис. 10, *б*).

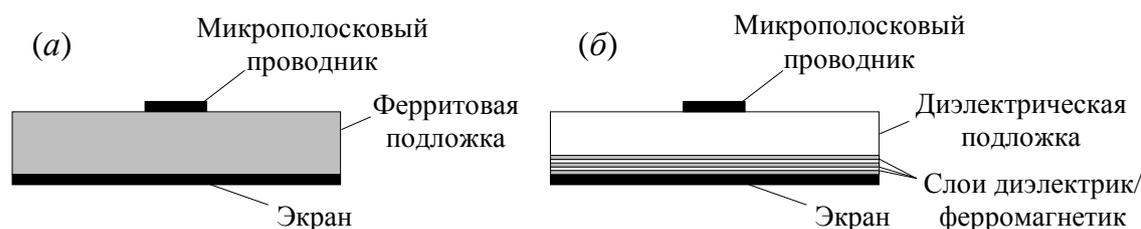


Рисунок 10 – Поперечные сечения микрополосковых линий с активными средами в виде феррита (*а*) и многослойной ТМП (*б*)

Поведение характеристик таких линий передачи из-за явления ферромагнитного резонанса (ФМР) оказывается сложно зависящим от напряженности внешнего магнитного поля и его ориентации относительно магнитного поля СВЧ. Для более полного понимания этих зависимостей была разработана методика измерения характеристик микрополосковых структур с пленками, изготавливаемыми в Институте физики им. Л. В. Киренского СО РАН, в которой исследуемыми параметрами являлись частотные зависимости потерь и эффективной магнитной проницаемости микрополосковой структуры от управляющего поля. Измерительная ячейка представляла собой согласованный с трактом отрезок микрополосковой линии передачи, диэлектрик в центральной части которой был удален, а микрополосковый проводник выполнен на инвертированной керамической подложке (рис. 11). Вместо удаленного участка могла вставляться подложка с напыленной на нее ТМП. Искажения, вносимые пленкой в АЧХ и

ФЧХ линии, пересчитывались в ее эффективные параметры – частотно-зависимые магнитную проницаемость и магнитные потери. Методика позволяла исследовать поведение параметров микрополосковой линии в зависимости от материала пленки, количества ее слоев, направления оси легкого намагничивания (ОЛН), и внешнего магнитного поля.

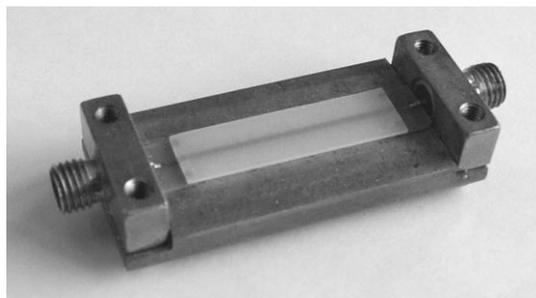


Рисунок 11 – Измерительная ячейка

Были измерены зависимости частоты ФМР, модуля эффективной магнитной проницаемости линии, и магнитных потерь от управляющего поля для нескольких пленок – 1 и 7 -слойных пленок пермаллоя (FeNi) с толщиной слоя 500 \AA , полученных вакуумным напылением, и 2 и 8 -слойных пленок кобальта (Co) с толщиной слоя 300 \AA , полученных химическим осаждением. ОЛН пленок была направлена параллельно СВЧ магнитному полю в линии $H_{\text{СВЧ}}$. При этом управляющее поле H было направлено перпендикулярно $H_{\text{СВЧ}}$ и лежало в плоскости подложки. Полученные зависимости частоты ФМР и модуля эффективной магнитной проницаемости линии показаны на рис. 12 и 13, соответственно. На рис. 12 хорошо видно значение собственного поля анизотропии, которое для пермалловых пленок составило около 15 Э, а для пленок кобальта около 25 Э. Также видно, что увеличение эффективной магнитной проницаемости МПЛ практически пропорционально количеству слоев пленки (рис. 13).

Для экспериментального исследования возможности применения ТМП в резонансных фазовращателях была использована семислойная пермалловая пленка, обладающая наибольшей эффективной магнитной проницаемостью. Эксперимент проводился на частоте около 0.5 ГГц, так как естественный ФМР

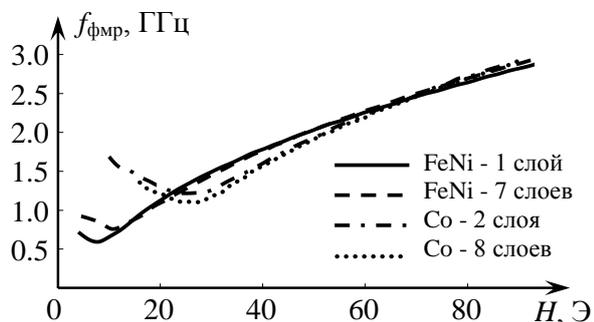


Рисунок 12 – Зависимости частоты ФМР от поля подмагничивания для пленок с различным количеством слоев

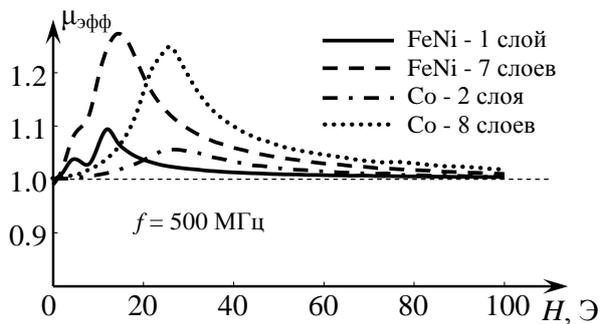


Рисунок 13 – Зависимость эффективной магнитной проницаемости микрополосковой линии с различными магнитными пленками от поля подмагничивания на частоте 0.5 ГГц

пленки расположен выше этой частоты, и для управления параметрами линии при этом требуется наименьшая напряженность магнитного поля.

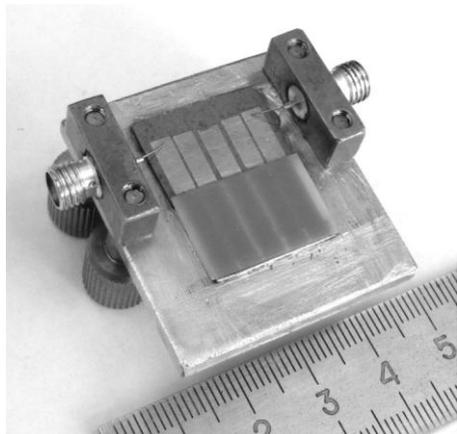


Рисунок 14 – Макет пятирезонансного резонансного фазовращателя на магнитодиэлектрической подложке

Часть подложки микрополосковой структуры, расположенная в пучности электрического поля резонаторов, была выполнена из керамики ТБНС с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$, а другая ее часть, расположенная в пучности магнитного поля, выполнена воздушной, причем проводники резонаторов располагались на инвертированной подвешенной подложке из керамики. Воздушная часть могла замещаться ферритовой вставкой или стеклянной подложкой с напыленной на нее магнитной пленкой.

Методика расчета и изготовления микрополосковых конструкций с магнитными активными средами была аналогична методике для жидкокристаллических фазовращателей. Для экспериментальных исследований изготовленных макетов была использована установка, состоящая из двух ортогональных пар колец Гельмгольца, в которые могло помещаться исследуемое устройство, источника питания, и векторного анализатора цепей Микран Р4М-18.

Исследовались характеристики описанного макета с двумя типами активной магнитной среды: восьмислойной пермаллоевой пленкой на стеклянной подложке и ферритом марки 30СЧ. Амплитудные и фазовые характеристики устройства с ТМП при различных управляющих полях приведены на рис. 15. Для пленки управляющее поле изменялось в пределах 0–20 Э, при этом эффективная магнитная проницаемость активной части подложки изменялась от 1 до 1.3 (см. рис. 13). Следует отметить, что коэффициент заполнения пленкой микрополосковой структуры был крайне низок – порядка 10^{-3} . При увеличении коэффициента заполнения, то есть с увеличением количества слоев пленки, пропорционально будет расти эффективная магнитная проницаемость подложки и фазовый сдвиг в устройстве. Характеристики устройства с ферритом приведены на рис. 16.

Для феррита 30СЧ создавалось поле подмагничивания 400 Э, направленное параллельно СВЧ магнитному полю в устройстве. Перпендикулярное ему управляющее поле изменялось в пределах 75–325 Э, при этом магнитная прони-

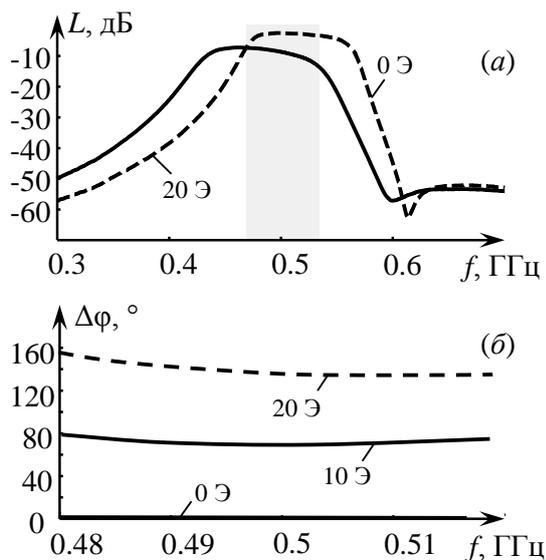


Рисунок 15 – Частотные характеристики пятизвенного фазовращателя с многослойной пермаллоевой ТМП (*a* – АЧХ, *б* – управляемый фазовый сдвиг)

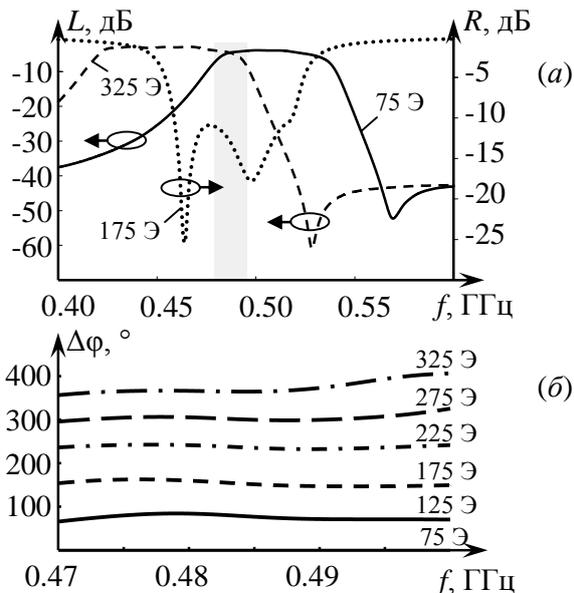


Рисунок 16 – Частотные характеристики пятизвенного фазовращателя с ферритом 30СЧ (*a* – АЧХ, *б* – управляемый фазовый сдвиг)

цаемость феррита для СВЧ волны изменялась в пределах 1.1-1.7. Фактор качества макета с ферритом составил 103 °/дБ при управляемом фазовом сдвиге 360°. Было показано, что на том же макете может быть получен ФК 150 °/дБ, для чего управляющее поле должно изменять ориентацию от 0 до 35° по отношению к направлению СВЧ магнитного поля при неизменной напряженности 500 Э. Характеристики макетов фазовращателей приведены в табл. 2.

Электродинамическое моделирование показало, что исследованный фазовращатель обладает в семь раз большим фазовым сдвигом, чем ФВ на согласованной линии передачи длиной, равной сумме длин резонаторов в исследованной конструкции, или в

семь раз меньшими габаритами при одинаковом фазовом сдвиге. Такое существенное уменьшение габаритов достигается благодаря применению четвертьволновых резонаторов и составной подложки с использованием диэлектрика с высокой

Таблица 2
Характеристики макетов резонансных фазовращателей с магнитными средами

	С 8-слойной пленкой FeNi	С ферритом 30СЧ
Центральная частота	500 МГц	490 МГц
Полоса рабочих частот	12%	4%
КСВн в полосе	<2	<2
Макс. управл. сдвиг фазы	140°	360°
Средние потери	6 дБ	3.5 дБ
Фактор качества	23 °/дБ	103 °/дБ
Время переключения	десятки мкс (определяется системой подмагничивания)	
Габариты	40×35×8 мм ³	
Управляющее поле	20 Э	250 Э

диэлектрической проницаемостью.

Таким образом, в четвертой главе диссертации показана возможность создания миниатюрных резонансных фазовращателей с магнитными активными средами. При этом установлено, что ферритовые ФВ могут отличаться высоким фактором качества, но для них необходимы большие управляющие поля (сотни Э). Тонкие магнитные пленки как активная среда требуют на порядок меньших управляющих полей (десятки Э), однако имеют высокие магнитные потери, и, как следствие, фазовращатели с ними обладают низким фактором качества. При этом следует отметить, что, также как и жидкие кристаллы, ТМП являются сравнительно новой активной средой и потенциальные возможности уменьшения поглощения СВЧ энергии в них изучены пока недостаточно.

Исследованные конструкции ФВ с магнитными активными средами могут быть перспективны для применения в дециметровом диапазоне длин волн в целях существенного уменьшения габаритов блоков фазовращателей ФАР, а также в сантиметровом и дециметровом диапазонах для замены полупроводниковых фазовращателей в применениях, где требуется высокая стойкость к излучениям.

В заключении приведены основные результаты работы, проведено сравнение разработанных резонансных фазовращателей с существующими аналогами, сделаны выводы о перспективах применения исследованных конструкций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследовано поведение ФЧХ полосно-пропускающих фильтров с чебышевской характеристикой. Показано, что величина набега фазы в полосе пропускания таких фильтров, приходящаяся на одно звено, может изменяться от 90° до 180° в зависимости от величины коэффициента отражения в полосе фильтра и количества звеньев в нем.

2. Установлен характер зависимости величины управляемого фазового сдвига резонансных фазовращателей от их основных конструктивных параметров, что позволяет проводить оценку предельно достижимых характеристик таких устройств, а также рассчитывать параметры конструкции, необходимые для достижения заданных фазового сдвига и ширины полосы устройства.

3. Экспериментально исследованы макеты резонансных СВЧ фазовращателей с использованием в качестве активных сред жидких кристаллов в верхней части сантиметрового диапазона. Показана перспективность их применения в миллиметровом диапазоне.

4. Разработана методика исследования зависимостей характеристик микрополосковых структур с тонкими ферромагнитными пленками от управляющего магнитного поля. С ее помощью исследованы МПЛ с тонкими пленками FeNi и Co, оценены возможности их применения в качестве активных сред для резонансных ФВ.

5. Экспериментально исследованы макеты резонансных СВЧ фазовращателей с использованием в качестве активных сред ферритов и тонких магнитных пленок в дециметровом диапазоне длин волн. Продемонстрирована возможность получения в резонансных конструкциях фазовращателей значений управляемого фазового сдвига до 360° и высокого фактора качества – до $150^\circ/\text{дБ}$.

6. На основании экспериментальных исследований выявлены достоинства и недостатки разработанных конструкций фазовращателей, предложены пути улучшения их характеристик, а также обозначены перспективы их применения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах по списку ВАК:

1. Лемберг К. В., Сержантов А. М. Исследование управляемого микрополоскового жидкокристаллического фазовращателя // Изв. вузов. Физика. – Томск: Томский Государственный Университет. – 2010. – Том 53. – №9(2). – С. 224-225.
2. Лемберг К. В., Сержантов А. М. Исследование управляемого сверхвысокочастотного жидкокристаллического фазовращателя // Журнал СФУ. Техника и технологии. – Красноярск: ИПК СФУ. – 2011. – № 2. – С. 185-192.
3. Лемберг К. В., Сержантов А. М. Управляемый резонансный микрополосковый фазовращатель на магнитодиэлектрической подложке // Изв. вузов. Физика. – Томск: Томский Государственный Университет. – 2012. – Том 55. – № 8/3. – С. 106-107.

Патенты:

4. Управляемый фазовращатель // Патент РФ №2431221. – Оpubл. 10.10.2011. – Бюл. № 28.

Статьи и тезисы в материалах конференций:

5. Лемберг К. В., Сержантов А. М. Исследование управляемого микрополоскового жидкокристаллического фазовращателя // Современные проблемы радиоэлектроники. Сборник научных статей – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – С. 130-133.
6. Лемберг К. В., Сержантов А. М. Электрически управляемый микрополосковый жидкокристаллический фазовращатель // Современные проблемы радиоэлектроники. Сборник научных статей – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – С. 111-114.
7. Лемберг К. В., Сержантов А. М. Электрически управляемый жидкокристаллический фазовращатель // Материалы 5-ой международной молодежной научно-технической конференции РТ-2009 – Севастополь: «Вебер», 2009. – С. 140.
8. Лемберг К. В., Сержантов А. М. Исследование величины управляемого фазового сдвига в конструкции микрополоскового жидкокристаллического фазовращателя // Современные проблемы радиоэлектроники. Сборник научных статей – Красноярск: ИПК СФУ, 2010. – С. 137-141.
9. Лемберг К. В., Сержантов А. М. Исследование управляемого жидкокристаллического фазовращателя // 20-я Международная Крымская конференция

«СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: Материалы конференции. – Украина, Крым, Севастополь: «Вебер». – 2010.

10. Лемберг К. В., Сержантов А. М. Управляемый резонансный микрополосковый фазовращатель на магнитной подложке // Современные проблемы радиоэлектроники. Сборник научных статей. – Красноярск: ИПК СФУ. – 2011. – С. 125-127.

11. Lemberg K. V., Serzhantov A. M. Tunable resonant microstrip phase shifter with the magnetodielectric substrate // Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON. – Russia, Krasnoyarsk. – 2011. – P. 212-214.

12. Лемберг К. В. Сверхвысокочастотный микрополосковый жидкокристаллический фазовращатель // Сборник тезисов докладов конференции РКЖК-2012. – Иваново: Ивановский Государственный Университет. – 2012. – С. 182.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев Б. А., Лексиков А. А., Сержантов А. М., Шабанов В. Ф. Управляемый сверхвысокочастотный жидкокристаллический фазовращатель // Письма в ЖТФ. – 2008. – №11. – С. 19-28.

2. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием [Текст]: науч. изд. / Под ред. Л. Д. Бахраха. – М.: САЙНС. – 2002. – 250 с.

3. Romanofsky, R. R. Array Phase Shifters: Theory and Technology. – 2007. – 32 p.

4. Mueller, S., Goelden, F., Schelle, P., *et all.* Passive Phase Shifter for W-Band Applications using Liquid Crystals // Proceedings of the 36th European Microwave Conference. – 2006. – P. 306–309.

Подписано в печать 24.07.2013. Печать плоская. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ 2793

Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел./факс: 8(391)206-26-67, 206-26-49
E-mail: print_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>