

На правах рукописи

Волошин Александр Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ МОДЕЛЕЙ
ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ
НА ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ**

01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск — 2006

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
заслуженный изобретатель РФ **Беляев Б. А.**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Ветров С. Я.**

кандидат физико-математических наук,
Владимиров В. М.

Ведущая организация: Томский государственный университет
им. В.В. Куйбышева (г. Томск)

Защита состоится “22” декабря 2006 г. в 14.30 часов на заседании специализированного диссертационного совета Д 003.055.01 в Институте Физики им. Л.В. Киренского СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок.

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

Автореферат разослан “17” ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Втюрин А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Интенсивное развитие нанотехнологий стимулировало разработку оригинальных конструкций оптических устройств и обусловило появление в конце XX века нового класса упорядоченных структур, которые получили название фотонных кристаллов [1]. Фотонными кристаллами (ФК) называются естественные и искусственные структуры с периодическими неоднородностями, размеры которых сравнимы с длинами электромагнитных волн оптического диапазона.

По существу фотонные кристаллы представляют собой систему связанных резонаторов, именно поэтому они обладают окнами прозрачности и полосами заграждения – фотонными запрещенными зонами (ФЗЗ). ФК вызывают большой интерес у исследователей не только как элементы для создания перспективных устройств радио- и оптоэлектроники, в частности, полосно-пропускающих фильтров и зеркал, но и как модельные объекты для изучения особенностей распространения и локализации электромагнитных волн в пространстве взаимодействующих резонаторов.

В зависимости от размерности периодичности различают одномерные (1D), двумерные (2D), и трехмерные (3D) фотонные кристаллы. Одномерные ФК, представляющие собой мультислойные структуры из чередующихся слоев различных материалов, являются наиболее простыми и удобными объектами для исследования. Изучив их свойства, несложно перейти к исследованию фотонных кристаллов большей размерности. Однако изготовление даже одномерных ФК требует уникального оборудования и обходится слишком дорого. Поэтому предварительные теоретические и экспериментальные исследования свойств фотонных кристаллов с целью получения необходимых рекомендаций по изготовлению различных устройств на их основе целесообразно проводить на “массивных” аналогах, работающих на частотах значительно ниже оптических. Как показали исследования, в СВЧ диапазоне наиболее удачными аналогами одномерных диэлектрических ФК, представляющих собой чередующиеся слои с различным показателем преломления, являются микрополосковые структуры, численный расчет которых в квазистатическом приближении хорошо согласуется с экспериментом. Стоит отметить, что помимо вышеуказанных качеств микрополосковые модели отличаются простотой и технологичностью в изготовлении, а главное, по своей природе они ближе к реальным структурам диэлектрических одномерных ФК, чем волноводные аналоги. Тем не менее, даже, несмотря на простоту и доступность такого моделирования, многие вопросы относительно свойств одномерных диэлектрических ФК еще не освещены в литературе.

Таким образом, исследование микрополосковых моделей одномерных фотонных кристаллов и разработка частотно-селективных устройств на их основе является важной и актуальной задачей. Эти исследования непосредственно связаны как с теоретическим изучением свойств микрополосковых конст-

рукций, аналогичных одномерным ФК-структурам, так и с созданием на их основе новых микрополосковых устройств, работающих в СВЧ-диапазоне.

Цель работы и задачи исследований. Целью работы являлось теоретическое и экспериментальное исследование свойств микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров (ППФ) на одномерных фотонных кристаллах (ОФК), представляющих собой нерегулярные микрополосковые линии передач.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) Изучить основные свойства микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах, получить рекомендации для создания аналогичных устройств оптического диапазона.

2) Теоретически исследовать зависимости селективных свойств узкополосных полосно-пропускающих фильтров на одномерных ФК с дефектами, от конструктивных параметров резонаторов и от количества дефектов в структуре.

3) Исследовать влияние характера и размеров переходной области (интерфейса) между слоями ФК на их частотно-селективные свойства.

4) Создать микрополосковые конструкции исследуемых устройств на одномерных ФК, работающих в СВЧ-диапазоне, и сравнить результаты расчета с экспериментом.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Изучено влияние конструктивных параметров микрополосковых аналогов одномерных фотонных кристаллов на свойства полосно-пропускающих фильтров на их основе, получены основные рекомендации для создания оптических устройств. Показано, что для достижения высоких характеристик необходима определенная оптимизация слоев одномерного ФК.

2) Впервые исследован спектр собственных колебаний двухподрешеточного ФК, показана возможность реализации полосно-пропускающих фильтров с большой шириной высокочастотной полосы заграждения.

3) Показано, что влияние переходной области (интерфейса) между слоями одномерного фотонного кристалла не существенно, если длина интерфейса не превышает $1/4$ размеров его периода. Впервые для моделирования микрополосковой линии с плавным изменением волнового сопротивления использовались нерегулярные микрополосковые отрезки.

4) На микрополосковых аналогах фотонного кристалла с дефектами показана возможность увеличения нагруженной добротности резонанса примесной моды не только добавлением слоев, но и изменением самой конструкции ФК.

5) Предложены конструкции узкополосных фильтров на фотонных кристаллах и жидкокристаллического управляемого СВЧ фазовращателя с высокими характеристиками.

Практическая значимость. Созданы микрополосковые аналоги фильтров и зеркал на одномерных фотонных кристаллах с высокими характеристиками. Получены патенты РФ на изобретения «Отражающее покрытие» (№ 2256942, БИ №20, 2005) и «Управляемый фазовращатель» (№ 2257648, БИ №21, 2005).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Для создания полосно-пропускающего фильтра с высокими характеристиками на одномерном фотонном кристалле необходимо выполнение трех основных условий. Во-первых, обеспечить требуемые скачки показателей преломления между материалами наружных слоев структуры и средами на входе и выходе устройства. Во-вторых, обеспечить требуемые скачки показателей преломления между материалами всех слоев в структуре, в-третьих, подобрать оптические длины слоев так, чтобы их резонансные частоты совпадали с центральной частотой полосы пропускания.

2. Фотонный кристалл с двумя подрешетками имеет неэквидистантный спектр собственных колебаний, что позволяет значительно расширить высокочастотную полосу заграждения полосно-пропускающего фильтра на его основе.

3. Характер переходной области (интерфейса) между слоями одномерного ФК не существенно влияет на амплитудно-частотные характеристики, если его длина меньше $1/4$ периода фотонного кристалла.

4. Добавление слоев в структуру ФК с дефектом – не единственный способ увеличения нагруженной добротности резонанса примесной моды. Использование двух подрешеток в конструкции ФК, а также изменение характеристик дефекта так, чтобы его нижайший резонанс участвовал в формировании первой полосы пропускания, позволяет существенно увеличить значение нагруженной добротности примесной моды.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы докладывались на Всероссийской научно-практической конференции «*Электронные средства и системы управления*» (Томск, 2003), Всероссийской научно-технической конференции «*Современные проблемы радиоэлектроники*» (Красноярск, 2004, 2005, 2006), Десятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых «*ВНКСФ-10*» (Москва, 2004), VII-ой Международной конференции «*Актуальные проблемы электронного приборостроения*» (Новосибирск, 2004), конференции молодых ученых КНЦ СО РАН (Красноярск, 2005), Международной молодежной научно-технической конференции студентов, аспирантов и ученых «*РТ-2006*» (Севастополь, 2006).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, из которых: 4 статьи в периодических изданиях по списку ВАК, 6 статей в сборниках научных трудов, 4 работы в трудах всероссийских научно-технических конференций, 2 патента.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитированной литературы и приложений. Общий объем диссертации – 134 страницы, включая 51 рисунок, 4 таблицы и 2 страницы приложений. Библиографический список содержит 117 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа начинается с введения, где дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, перечислены основные полученные результаты с указанием их практической значимости.

Первая глава является обзорной и посвящена одномерным фотонным кристаллам и методам их расчета и моделирования. В первой части главы дано определение фотонных кристаллов, описаны возможности использования ФК различной размерности в устройствах радио- и оптоэлектроники. Кроме того, в начале первой главы коротко описаны теоретические методы исследований фотонных кристаллов, а также возможности их экспериментального моделирования в радио- и СВЧ-диапазонах.

Во второй части главы по результатам обзора приводятся данные и характеристики радио- и СВЧ устройств, а также искусственно созданных структур, обладающих фотонной запрещенной зоной в радио- и СВЧ диапазонах. В таких структурах созданные специальным образом неоднородности (высверленные в подложке отверстия, вытравленные участки в плоскости заземления) располагаются в плоскости или в объеме структуры так, чтобы получить фотонную запрещенную зону на заданной частоте. При этом центральная частота ФЗЗ в них определяется характером расположения неоднородностей относительно друг друга, а ширина – их размерами [2]. Одну из разновидностей СВЧ-структур, обладающих фотонной запрещенной зоной, представляют одномерные и двумерные нерегулярные микрополосковые структуры, где одинаковые регулярные участки чередуются вдоль всей длины или по всей площади полоскового проводника соответственно. Как показал обзор работ, такие структуры имеют мало отношения непосредственно к практике.

В третьей части главы описаны микрополосковые модели одномерных ФК. Приведены модели с различными конфигурациями полоскового проводника и модификациями в плоскости заземления. Описаны имеющиеся на сегодняшний день принципы и методы оптимизации микрополосковых моделей полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров на основе одномерных диэлектрических фотонных кристаллов с целью получения рекомендаций для изготовления реальных устройств в оптическом диапазоне.

Во второй главе показан принцип построения и особенности конструирования микрополосковых моделей одномерных диэлектрических фотонных кристаллов, используемые в настоящей работе. В заключение главы проведена аналогия между одномерными фотонными кристаллами и нерегулярными микрополосковыми структурами.

В первой части главы описан принцип создания микрополосковых моделей, которые являются объектами исследования в данной работе. Скорость распространения и, следовательно, длина электромагнитной волны в микрополосковой линии передач (МПЛ) определяются эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ_{ef} , которую можно вычислить, зная ее конструктивные параметры: ширину полоскового проводника w , толщину подложки h и ее диэлектриче-

скую проницаемость ε . В работе показано, что с увеличением ширины полоскового проводника при постоянной толщине подложки значение ε_{ef} монотонно возрастает. Возможность изменения эффективной диэлектрической проницаемости МПЛ путем изменения ширины полоскового проводника позволяет создавать микрополосковые аналоги одномерных диэлектрических мультислойных структур, как показано на рис. 1.

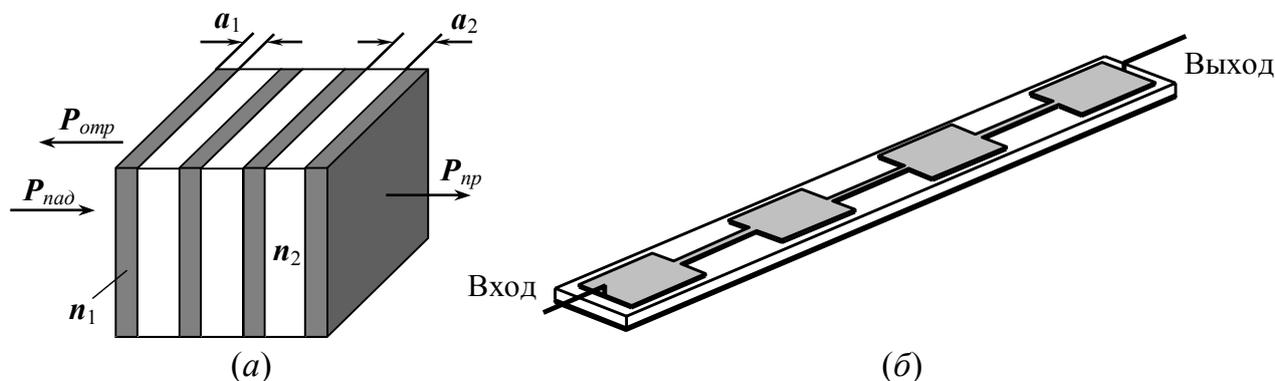


Рис. 1. Одномерный фотонный кристалл (а) и его микрополосковая модель (б).

Микрополосковые модели одномерных фотонных кристаллов представляют собой последовательно соединенные регулярные отрезки МПЛ с различной шириной полоскового проводника. Такие модели просты и технологичны в изготовлении, а их расчет, проведенный в квазистатическом приближении, хорошо согласуется с экспериментом [3]. Каждый отрезок в микрополосковой модели диэлектрического одномерного фотонного кристалла является резонатором и имитирует соответствующий слой в его структуре. Возможность моделировать слои одномерного ФК с различными показателями преломления на одной и той же подложке лишь изменением ширины полоскового проводника обуславливает технологичность и простоту изготовления микрополосковых моделей (рис.1 б). Использование в микрополосковой модели ОФК подложек с разными значениями диэлектрической проницаемости позволяет значительно увеличить скачок показателя преломления n между слоями-резонаторами.

Для описания селективных свойств микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах в настоящей работе были использованы функции определения прямых и обратных потерь, определяемые соответственно выражениями:

$$L(f) = 10 \cdot \lg \left| P_{пр} / P_{пад} \right|, \quad R(f) = 10 \cdot \lg \left| P_{отр} / P_{пад} \right|, \quad (1)$$

где $P_{пр}$, $P_{отр}$ и $P_{пад}$ – уровни прошедшей, отраженной и падающей нормально на фотонный кристалл мощности, f – частота. Таким образом, по поведению зависимостей $L(f)$ и $R(f)$ можно контролировать уровень прошедшей $P_{пр}$ и отраженной $P_{отр}$ мощностей относительно падающей $P_{пад}$ (рис. 1 а). Зависимости $L(f)$ и $R(f)$, обычно используемые в СВЧ-технике, называются амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) прямых и обратных потерь соответственно. В оптическом диапазоне им можно сопоставить коэффициенты прохождения и отражения соответственно.

Как отмечается во второй части главы, на резонансных частотах в микрополосковом резонаторе (МПР) по его длине l укладывается целое число полу-волн, то есть:

$$l = m\lambda / 2, \quad (2)$$

где m – номер продольной моды; $\lambda = 2\pi c / (\omega \sqrt{\epsilon_{ef}})$ – длина волны в МПЛ.

Отсюда резонансная частота m -ой продольной моды резонатора:

$$f_m = \frac{mc}{2l \sqrt{\epsilon_{ef}}}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что резонансные частоты высших продольных мод МПР кратны нижней резонансной частоте, т.е. спектр резонансных частот регулярных МПР – почти эквидистантный.

В третьей части главы отмечено, что нагруженная добротность Q микрополоскового резонатора, определяемая собственной добротностью Q_0 резонатора и добротностью его связи $Q_{св}$ с соседними линиями передачи, определяется по формуле [4]:

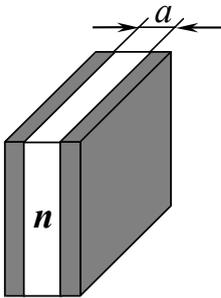
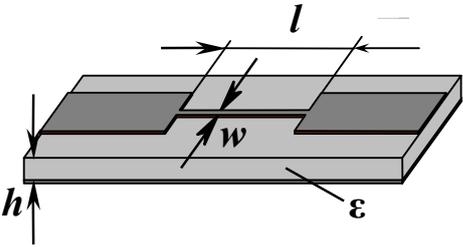
$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{св}}. \quad (4)$$

При этом, как видно из формулы (4), в материале с бесконечной собственной добротностью нагруженная добротность определяется исключительно добротностью связи. В работе отмечается, что в оптическом диапазоне нагруженная добротность резонатора может быть посчитана через отношение показателей преломления, или, иначе говоря, через контраст показателей преломления между соседними слоями.

В четвертой части главы описаны приемы проектирования микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных ФК в пакете программ для анализа СВЧ-схем “Microwave Office” версии 5.52. При этом ввиду одномерности микрополосковых моделей одномерных ФК (рис. 1 б), а также большого числа исследуемых микрополосковых структур, их численный расчет производился в квазистатическом приближении. В качестве подложек в исследуемых микрополосковых моделях полосно-пропускающих фильтров (ППФ) на одномерных фотонных кристаллах использовались широко распространенные в СВЧ-технике материалы: флан ($\epsilon = 2.8$), поликор ($\epsilon = 9.8$), керамики В-20, В-40, ТБНС и Т-150, имеющие относительную диэлектрическую проницаемость 20, 40, 80 и 150 соответственно.

Как видно из принципа создания микрополосковых моделей одномерных диэлектрических фотонных кристаллов, между одномерными ФК и нерегулярными микрополосковыми структурами прослеживается аналогия. В таблице 1 отображены основные параметры одномерного ФК и соответствующие им параметры и характеристики его микрополосковой модели.

Таблица 1. Аналогия параметров и характеристик одномерного фотонного кристалла и его микрополосковой модели.

1D ФК	МПЛ
	
a – толщина слоя	l – физическая длина микрополоскового резонатора
n – показатель преломления	$Z = f(w/h, \epsilon_{ef})$ – волновое сопротивление
$d = a \cdot n$ – оптическая толщина	$\theta = k \cdot l$ – электрическая длина
окна прозрачности	полосы пропускания
фотонные запрещенные зоны	полосы заграждения
контраст по показателю преломления	скачок волнового сопротивления
коэффициент прохождения	прямые потери (потери на прохождение)
коэффициент отражения	обратные потери (потери на отражение)

В третьей главе освещены микрополосковые модели различных полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах, показан механизм увеличения высокочастотной полосы заграждения в них. Описана конструкция микрополоскового фазовращателя, в качестве подложки которого используется жидкий кристалл. Отдельный параграф посвящен исследованию влияния области интерфейса на амплитудно-частотные характеристики полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах.

В первой части главы в квазистатическом приближении на микрополосковых моделях исследованы свойства полосно-пропускающих фильтров на одномерных ФК. На рис. 2 а слева представлены амплитудно-частотные характеристики конструкции, представленной на рис. 1 б, после ее настройки как полосно-пропускающего фильтра. Зависимости верхней части рисунка построены для фильтра на подложке из поликора ($\epsilon = 9.8$) толщиной $h=1$ мм, имеющего центральную частоту полосы пропускания $f_0 = 3$ ГГц и относительную ширину полосы пропускания $\Delta f_3/f_0 = 40\%$, измеренную по уровню -3 дБ от уровня минимума потерь. При этом при параметрическом синтезе рассмотренной семи-звенной конструкции кроме заданной центральной частоты и ширины полосы пропускания, задавался максимальный уровень отражений в ней $L_r = -14$ дБ.

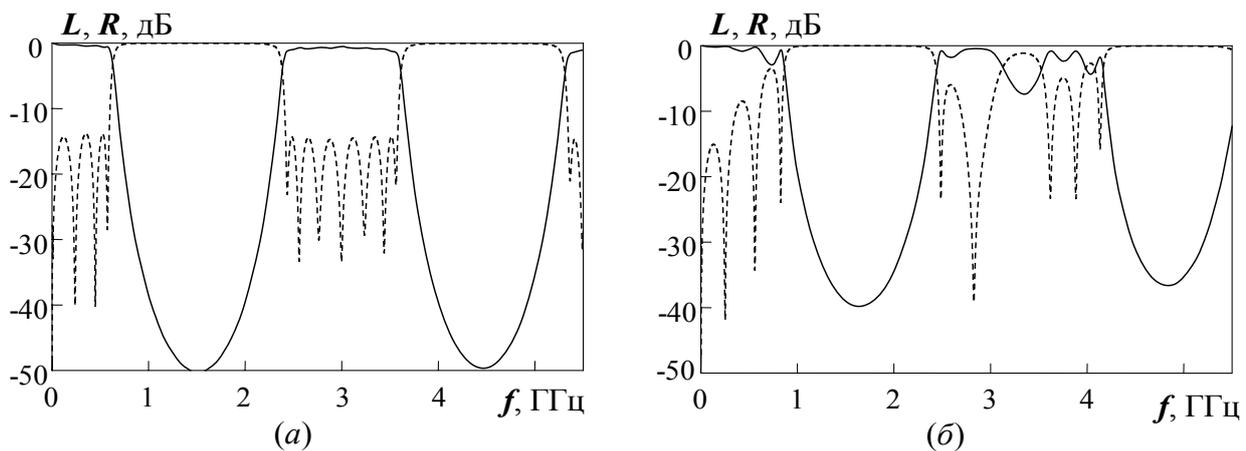


Рис. 2. АЧХ прямых (сплошные линии) и обратных (штриховые линии) потерь в микрополосковой модели одномерного ФК с оптимизированными параметрами слоев (а) и с одинаковой толщиной чередующихся слоев (б).

На рис. 2 б приведены амплитудно-частотные характеристики микрополосковой модели одномерного фотонного кристалла, где два слоя с одинаковой толщиной и диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_1 = 7.58$ и $\epsilon_2 = 5.94$ чередуются на протяжении всей структуры. Как видно из АЧХ такой структуры, на таком ФК невозможно создать полосно-пропускающий фильтр с хорошими характеристиками.

Как показал параметрический синтез, проведенный для этих структур путем коррекции длины и ширины полосковых проводников каждого из семи микрополосковых резонаторов, в настроенной структуре ширины и длины соседних высокоомных и низкоомных микрополосковых резонаторов несколько отличаются друг от друга. Отсюда был сделан вывод, что для того, чтобы одномерный ФК работал как хороший ППФ, необходима оптимизация параметров его слоев. Таким образом, было показано, что одномерный фотонный кристалл может служить хорошим полосно-пропускающим фильтром даже при сравнительно небольшом количестве слоев. Для этого необходимо обеспечить требуемый скачок по показателю преломления между материалами наружных слоев структуры и средами на входе и выходе устройства, обеспечить требуемый контраст по показателю преломления между материалами всех слоев в структуре и, наконец, подобрать оптические длины слоев так, чтобы их резонансные частоты совпадали с центральной частотой полосы пропускания.

Теоретические исследования, проведенные для ряда микрополосковых моделей ППФ на одномерных ФК также показали, что с увеличением количества звеньев-резонаторов растет не только крутизна склонов АЧХ фильтров, но и увеличиваются уровни затухания в полосах заграждения слева и справа от полосы пропускания. Важно отметить, что величина затухания в полосах заграждения существенно увеличивается также и с уменьшением ширины полосы пропускания устройства.

Экспериментальная проверка обнаруженных закономерностей показала хорошее согласие с расчетом. Для этого методом гравировки по лаку [5] было изготовлено несколько микрополосковых моделей ППФ на одномерных ФК, настроенных на различную центральную частоту полосы пропускания и

различающихся относительной шириной полосы пропускания. В качестве примера на рис. 3. показаны результаты измерений прямых и обратных потерь для семислойного фильтра с относительной шириной полосы пропускания $\Delta f_3/f_0 = 60\%$, полученного параметрическим синтезом на подложке из поликора толщиной $h = 1$ мм и центральной частотой $f_0 = 3$ ГГц. Линиями на рисунке показаны соответствующие рассчитанные кривые для модели, в которой использовались реальные конструктивные параметры микрополосковой структуры, измеренные в миллиметрах после ее изготовления.

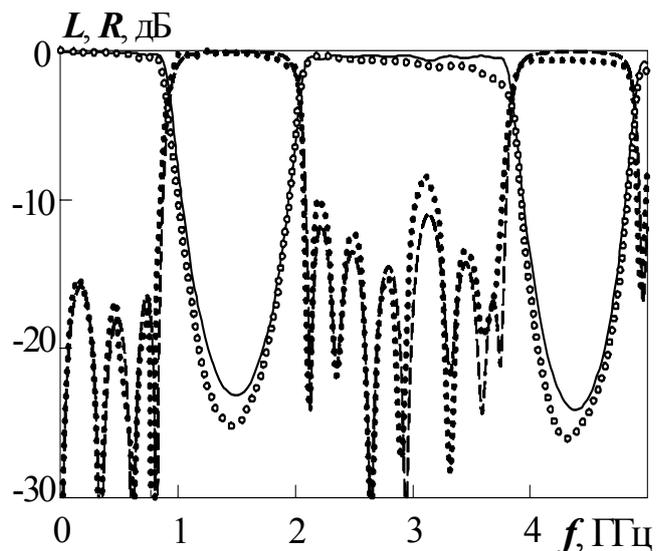


Рис. 3. Измеренные АЧХ прямых (белые точки) и обратных (черные точки) потерь в микрополосковой модели 7-слойного ФК.

Как показал обзор работ, различные устройства радио- и СВЧ диапазона сегодня также называют фотонными кристаллами, обозначая их принадлежность к своему диапазону. Во второй части главы настоящей работы представлена конструкция управляемого СВЧ фазовращателя (ФВ) на жидких кристаллах (ЖК), где за основу взят микрополосковый фотонный кристалл. В качестве подложки в нем, как показано на рис. 4, использован нематический ЖК.

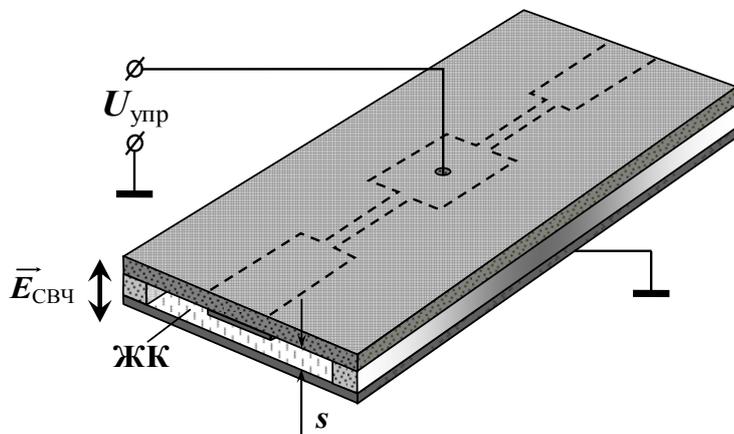


Рис. 4. Микрополосковый управляемый фазовращатель на жидких кристаллах.

На рис. 5 показаны амплитудно-частотные характеристики и фазовый сдвиг исследуемого устройства на жидкокристаллической подложке, рассчитанные для двух значений ее диэлектрической проницаемости 2.8 и 2.6. Толщина слоя ЖК 0.1 мм, общая длина нерегулярного проводника в микрополосковой структуре, образованного одиннадцатью регулярными отрезками 24 мм, а их ширина меняется от 0.1 мм до 2.2 мм. Фильтр настроен на центральную частоту полосы пропускания $f_0 = 50$ ГГц и относительную ширину полосы пропускания $\Delta f_3/f_0 = 40\%$. Видно, что в рабочем диапазоне частот фазовращателя,

Принцип действия такого фазовращателя заключается в изменении ориентации молекул жидкого кристалла управляющим электрическим полем, возникающим при подаче управляющего напряжения $U_{упр}$ непосредственно на полосковый проводник. Это позволяет плавно увеличивать диэлектрическую проницаемость ЖК от ϵ_{\perp} до ϵ_{\parallel} и, следовательно, управлять набегом фазы прошедшей волны.

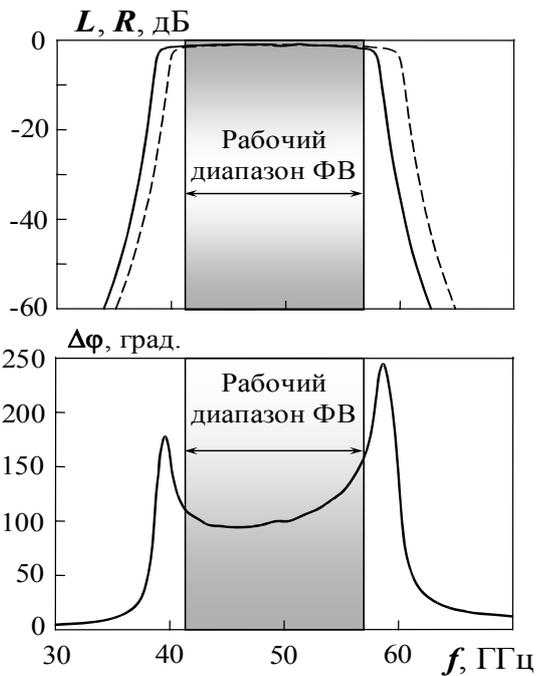


Рис. 5. АЧХ и фазовый сдвиг микрополоскового управляемого ФВ. Сплошная линия соответствует $\epsilon_{\parallel} = 2.8$, штриховая – $\epsilon_{\perp} = 2.6$.

где прямые потери практически не изменяются, набег фазы при 11 звеньях в структуре ФВ составил $100^{\circ} - 150^{\circ}$. Сравнение предложенной конструкции фазовращателя, которая является резонансной, с фазовращателями, построенными на линиях передачи, работающих в согласованном с подводящими линиями режиме, показало, что вблизи резонансной частоты управляемый сдвиг фазы прошедшей волны в резонансном ФВ примерно в Q раз больше (Q – нагруженная добротность резонатора). В третьей части главы описаны принципы создания полосно-пропускающих фильтров с широкой высокочастотной полосой заграждения. Как можно заметить, центральные частоты всех полос пропускания рассмотренных ранее фильтров равноотстоят друг от друга, а ширина полос заграждения между ними значительно меньше октавы (см. рис. 2 а). Однако нередко требуются фильтры с широкими полосами заграждения, когда ближайшая паразитная полоса пропускания должна находиться на расстоянии больше октавы. С этой целью в данной работе было предложено все полуволновые резонаторы, резонансы которых формируют полосы пропускания, сделать составными, как показано на рис. 6. В первом случае (рис. 6 а), помещая в пучности поля **E** для первой моды колебаний резонаторов подложки с высокой диэлектрической проницаемостью (ϵ_1), а в узлы этого поля подложки с низкой диэлектрической проницаемостью (ϵ_2), можно «отодвинуть» паразитную полосу пропускания почти на 2 октавы.

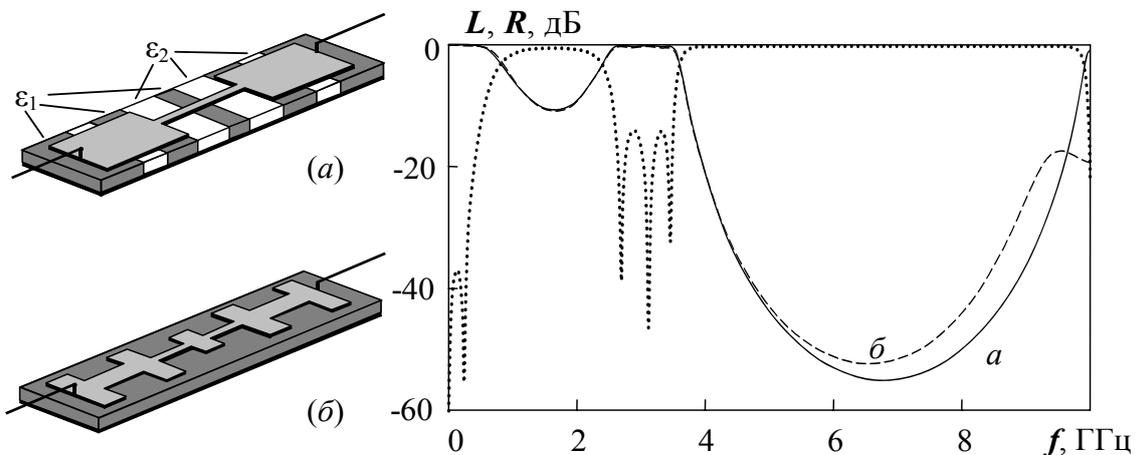


Рис. 6. Микрополосковые конструкции полосно-пропускающих фильтров с широкой высокочастотной полосой заграждения и их АЧХ. Точками показана частотная зависимость обратных потерь для конструкции (а).

Другой способ увеличения высокочастотной полосы заграждения заключается в сужении полоскового проводника в пучностях поля \mathbf{H} и увеличения ширины полоскового проводника в узлах этого же поля на частоте первой моды колебания в резонаторах, как показано на рис. 6 б. Другими словами, здесь в структуру фотонного кристалла добавляется вторая подрешетка с периодом в 3 раза меньшим основного периода ФК. В работе показано, что чем больше контраст по показателю преломления между слоями, составляющими каждый полуволновой слой в ФК, тем шире можно сделать его высокочастотную полосу заграждения.

На примере микрополосковых моделей ППФ на одномерных фотонных кристаллах в работе также показано, что при одинаковом скачке волновых сопротивлений регулярных отрезков, составляющих каждый полуволновой резонатор и отличающихся волновым сопротивлением, максимальное значение ширины высокочастотной полосы заграждения наблюдается в случае, когда электрические длины всех трех составляющих регулярных отрезков равны. При этом, как показали исследования, с увеличением количества полуволновых звеньев, каждое из которых является составным, значительно увеличивается крутизна склонов фильтра, а также уровни затухания в низкочастотной и расширенной высокочастотной полосах заграждения. Экспериментальная проверка обнаруженных закономерностей показала хорошее согласие с расчетом.

В четвертой части главы описаны микрополосковые модели полосно-пропускающих фильтров на одномерных ФК с плавным изменением свойств между слоями. В рассмотренных выше мультислойных структурах на границе раздела слоев показатель преломления изменяется скачком. Однако в реальных фотонных кристаллах границы между слоями в той или иной мере всегда "размыты". То есть изменение показателя преломления n от слоя к слою происходит не ступенчато, а плавно на некоторой толщине δ , которая зависит от материала и качества подложки, а также от материалов слоев и технологических условий их получения (рис. 7).

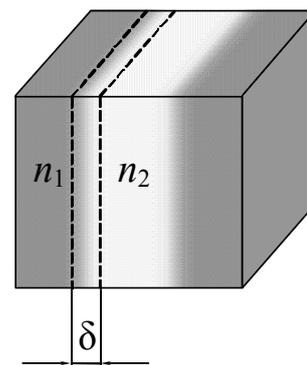


Рис. 7. Трехслойный ОФК с плавным изменением показателя преломления на границах между слоями.

Очевидно, что на характеристики устройств, в частности ППФ, построенных на одномерных ФК, области изменения диэлектрических свойств, называемые интерфейсом, в зависимости от своей протяженности и характера изменения n могут оказывать существенное влияние. Исследования влияния размеров и характера интерфейса на амплитудно-частотные характеристики ППФ, построенных на таких фотонных кристаллах, показали, что когда протяженность интерфейса меньше $1/4$ периода фотонного кристалла, независимо от характера интерфейса его влияние на АЧХ фильтра незначительное (рис. 8 а, б). При дальнейшем увеличении области интерфейса наблюдается значительное

увеличение уровня затухания в низкочастотной полосе заграждения и уменьшение в высокочастотной (рис. 8 в).

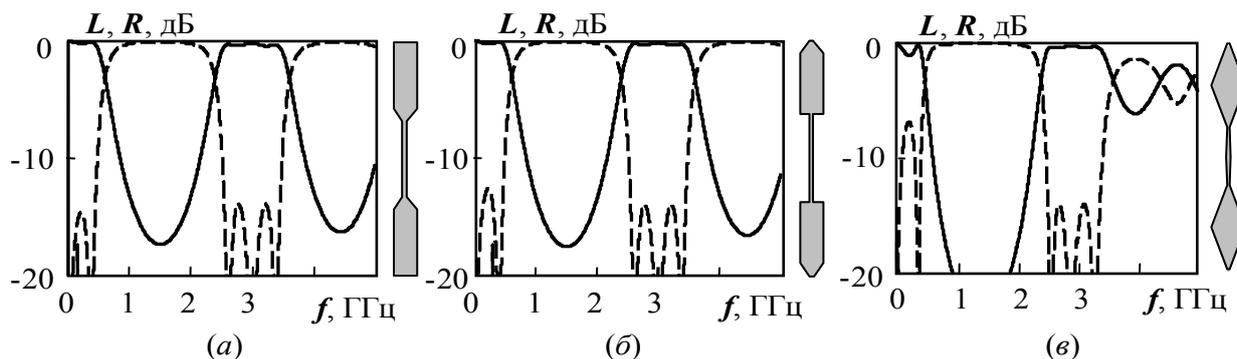


Рис. 8. АЧХ микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на ФК с различным интерфейсом.

Экспериментальная проверка закономерностей, теоретически обнаруженных в микрополосковых моделях ППФ на одномерных ФК с "размытыми" границами между слоями, показала хорошее согласие с расчетом. Для этого на подложке из поликора ($\epsilon = 9.8$) толщиной $h = 1$ мм был изготовлен полосно-пропускающий фильтр, в котором линии, ограничивающие полосковый проводник, описывались функцией эллиптического синуса.

В четвертой главе приведены исследования нагруженной добротности резонанса примесной моды в микрополосковой модели одномерного ФК, показаны принципы создания узкополосных полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах с дефектами.

Введение дефекта в структуру фотонного кристалла, например, слоя, отличающегося толщиной или показателем преломления от основной периодической структуры, приводит к искажению АЧХ за счет проявления резонансов в этом слое-дефекте. Такие дефекты еще называют примесью, а их спектр частот – примесными модами колебаний [6]. Известно, что резонанс примесной моды обладает высокой нагруженной добротностью, если он попадает в центр фотонной запрещенной зоны [7, 8].

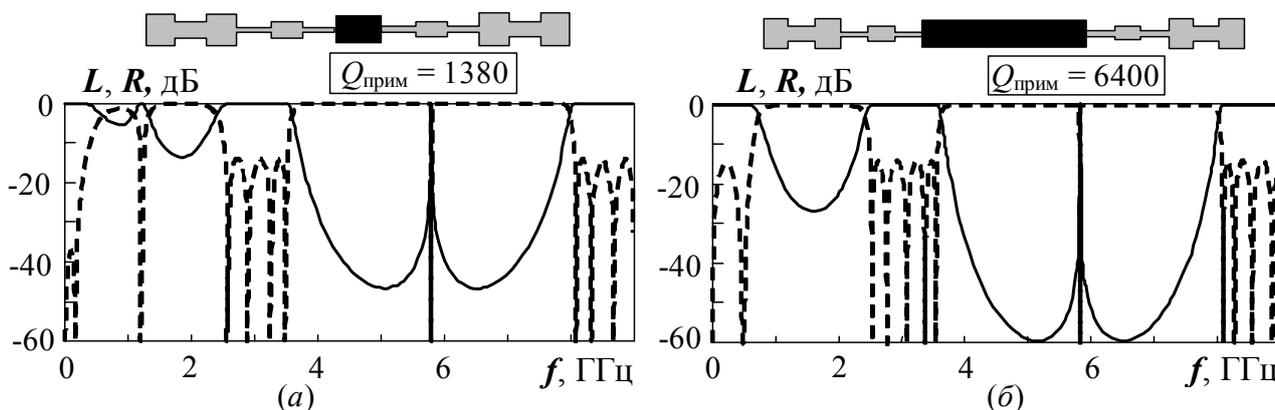


Рис. 9. Микрополосковые конструкции двухподрешеточных одномерных ФК с различными дефектами решетки и их АЧХ.

В настоящей работе были рассмотрены различные ФК с дефектами, отдельные резонансы примесных мод которых также попадают в центры фотонных запрещенных зон. В качестве примера на рис. 9 приведены топологии и

АЧХ микрополосковых моделей двухподрешеточных фотонных кристаллов. В первом случае (рис. 9 а) электрическая длина дефекта ровно в полтора раза меньше электрических длин остальных участков структуры. В связи с этим первый резонанс дефекта попадает сразу во вторую запрещенную зону.

Во втором случае (рис. 9 б) электрическая длина дефекта вдвое больше электрических длин остальных участков структуры. Поэтому первый резонанс дефекта попадает в первую фотонную запрещенную зону, второй резонанс примесной моды участвует в формировании первой полосы пропускания, а третий резонанс дефекта попадает во вторую ФЗЗ. Как показано на рис. 9, во втором случае нагруженная добротность в несколько раз больше, чем в первом.

Проведенные исследования показали, что нагруженная добротность резонанса примесной моды примерно на порядок выше у двухподрешеточных фотонных кристаллов. При этом нагруженная добротность дефекта в ФК значительно выше, если его резонансы участвуют в формировании первой полосы пропускания.

В работе также показано, что с увеличением числа ячеек (звеньев) N в структуре ФК величина нагруженной добротности примесной моды $Q_{\text{прим}}$ неограниченно растет и в реальном случае при определенном количестве звеньев в фотонном кристалле достигает значения собственной добротности материала, из которого изготовлен дефект (рис. 10). Экспериментальная проверка обнаруженных закономерностей показала хорошее согласие с численным расчетом.

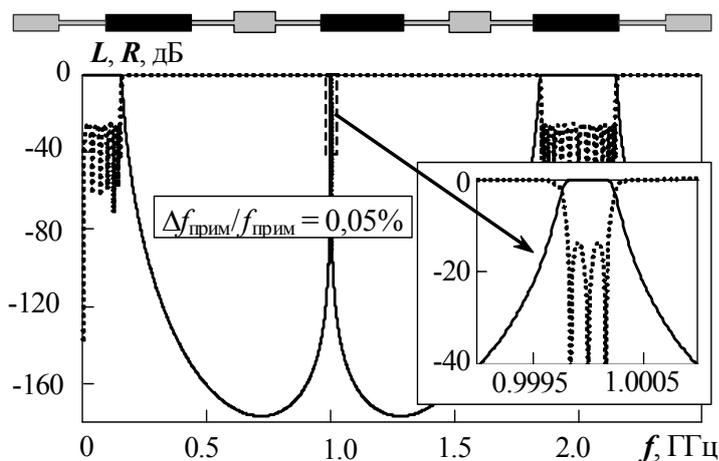


Рис. 11. Топология микрополосковой модели одномерного ФК тремя дефектами решетки и ее АЧХ. Сплошные линии – прямые потери, штриховые – обратные.

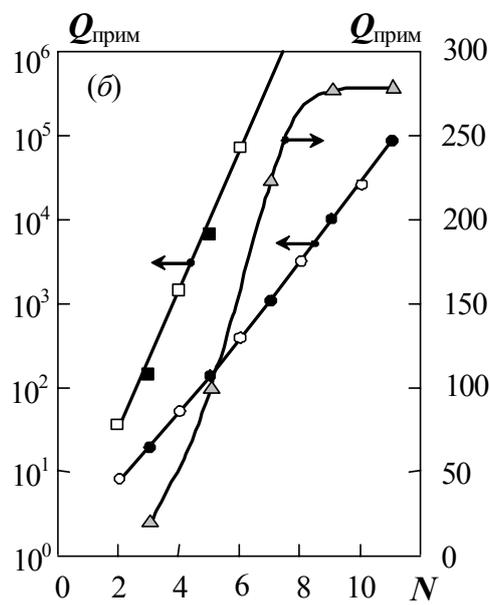


Рис. 10. Зависимости добротности резонанса примесной моды от количества звеньев в структуре одномерного ФК.

В заключение четвертой главы описана возможность создания узкополосных ($\Delta f_3/f_0 \leq 1\%$) полосно-пропускающих фильтров на одномерных ФК с дефектами. В настоящей работе показано, что добротность примесной моды в ФК существенно больше, если электрическая длина дефекта вдвое превышает электрические длины остальных звеньев структуры фотонного кристалла.

На рис. 11 представлена топология модели узкополосного ППФ на одномерном ФК с тремя дефектами, показанными на топологии черными прямоугольниками. При этом все дефекты в структуре ФК равноотстоят друг от друга, а их электрические длины равны и вдвое превышают электрические длины основных звеньев фотонного кристалла. Этот фильтр был настроен таким образом, чтобы полуволновые резонансы дефектов попали точно в центр первой ФЗЗ. Как видно из рисунка, такая организация структуры ФК позволила сформировать хороший узкополосный полосно-пропускающий фильтр с относительной шириной полосы пропускания всего 0.05%. На вставке показана область полосы пропускания в более крупном масштабе, чем на основной АЧХ. Можно заметить, что количество пиков обратных потерь в этой полосе пропускания точно равно количеству дефектов-резонаторов, резонансы которых и формируют “примесную” полосу пропускания в центре первой ФЗЗ.

Исследования, проведенные в настоящей работе, также показали, что с увеличением числа дефектов в ФК растет крутизна склонов узкополосных фильтров и величина затухания в полосах заграждения возле полосы пропускания. Также увеличение числа дефектов приводит к улучшению избирательности фильтра и увеличению равномерности в его полосе пропускания.

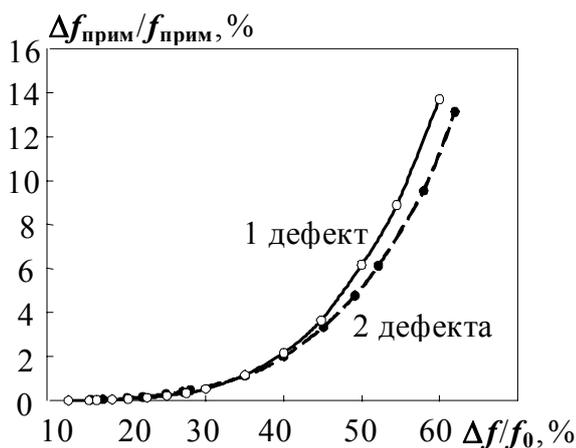


Рис. 12. Зависимости относительной ширины примесной полосы пропускания от относительной ширины основной полосы в ОФК с одним и двумя дефектами.

монотонно уменьшается. Это подтверждает тот факт, что связь дефектов друг с другом зависит от их связи с основной структурой фотонного кристалла. При этом, как видно из рис. 12, с увеличением числа дефектов эта зависимость становится меньше.

Также в работе показано, что при волновом сопротивлении внешних трактов 50 Ом нижний предел “примесной” полосы пропускания в конструкции узкополосного фильтра, построенного на одном резонансе, составляет 0,0065%, в фильтрах, построенных на резонансах двух и трех дефектов – 0.04% и 0.05% соответственно.

Стоит отметить, что в исследуемых структурах одномерных фотонных кристаллов дефекты располагались таким образом, чтобы на частоте полуволновых резонансов, формирующих “примесную” полосу пропускания, обеспечить баланс их связей как друг с другом, так и со средами на входе и выходе. При этом важно отметить, что на центральной частоте фотонной запрещенной зоны связь дефектов с основной структурой наименьшая, в то время как на частоте первой полосы пропускания эта связь максимальная. Исследования показали, что с уменьшением ширины основной полосы пропускания ширина “примесной” полосы пропускания

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

В приложении приводится распечатка текстов программ, написанных для расчета волнового сопротивления и эффективной диэлектрической проницаемости микрополосковых резонаторов и для разложения функции эллиптического синуса в ряд Фурье.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Показано, что одномерный диэлектрический фотонный кристалл может служить хорошим полосно-пропускающим фильтром даже при сравнительно небольшом количестве слоев. Для достижения высоких характеристик устройства необходим требуемый контраст по показателю преломления между материалами наружных слоев структуры и средами на входе и выходе, а также определенная оптимизация характеристик всех слоев.

2) Разработана конструкция двухподрешеточного одномерного фотонного кристалла и исследован спектр его собственных колебаний. Показана возможность значительного увеличения ширины высокочастотной полосы заграждения в полосно-пропускающих фильтрах на двухподрешеточном ФК.

3) Исследовано влияние характера и размера переходной области (интерфейса) между слоями фотонного кристалла на его амплитудно-частотные характеристики. Показано, что интерфейс практически не отражается на селективности полосно-пропускающих фильтров, если его протяженность меньше $1/4$ периода фотонного кристалла.

4) Исследования нагруженной добротности примесной моды в различных микрополосковых аналогах одномерных фотонных кристаллов с дефектом показали, что в двухподрешеточных ФК эта величина на порядок выше, чем в фотонных кристаллах с одной подрешеткой. Кроме того, нагруженная добротность дефекта увеличивается, если его резонансы участвуют в формировании первой полосы пропускания.

5) Предложена миниатюрная конструкция микрополоскового электрически перестраиваемого фазовращателя на жидких кристаллах с улучшенными характеристиками, у которого управляемый сдвиг фазы значительно превосходит известные аналоги.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Волошин, А.С. Исследование микрополосковых моделей сверхрешеток / А.С. Волошин, Б.А. Беляев // Электронные средства и системы управления: материалы всероссийской науч.-практ. конференции, 21—24.10.2003, г. Томск. — Томск: Изд-во ТУСУР, 2003. — С. 75—78.
2. Волошин, А.С. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на сверхрешетках / А.С. Волошин, Б.А. Беляев, В.Ф. Шабанов // Доклады академии наук. — 2004. — Т. 395, № 6. — С. 756-760.
3. Волошин, А.С. Исследование микрополосковых моделей фильтров на сверхрешетках с плавным изменением диэлектрических свойств / А.С. Волошин, Б.А. Беляев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. всероссийской научно-техн. конференции, 5-7.05.2004, г. Красноярск. — Красноярск: Изд-во КГТУ, 2004. — С. 313 – 317.
4. Волошин, А.С. Микрополосковый электрически управляемый СВЧ фазовращатель на жидких кристаллах / А.С. Волошин, Б.А. Беляев, А.А. Лексиков // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы VII международной конференции, 21-23.09.2004, г. Новосибирск. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. — С. 265—270.
5. Волошин, А.С. Микрополосковые модели фильтров на диэлектрических сверхрешетках с «размытыми» границами между слоями / А.С. Волошин, Б.А. Беляев // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: сб. материалов XIV международной конф., 11-14.09.2004, г. Севастополь. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2004. — С. 435-436.
6. Волошин, А. С. Исследование микрополосковых моделей фильтров на одномерных фотонных кристаллах / А.С. Волошин, Б.А. Беляев, В.Ф. Шабанов // Электронные средства и системы управления: материалы всероссийской науч.-практ. конференции, 23—25.10.2004, г. Томск. — Томск: Изд-во ТУСУР, 2004. — С. 3-6.
7. Пат. 2256942 Российская Федерация, МПК⁷ G 02 В 5/08, 5/28, 5/26. Отражающее покрытие / А.С. Волошин, Б.А. Беляев, А.А. Лексиков, В.Ф. Шабанов; заявитель и патентообладатель ин-т физики им. Л.В. Киренского СО РАН. — № 2004124592/28; заявл. 12.08.04; опубл. 20.07.05, Бюл. № 20 — 5 с.
8. Волошин, А.С. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах / А.С. Волошин, Б.А. Беляев, В.Ф. Шабанов // Доклады академии наук. — 2005. — Т. 400, № 2. — С. 181-185.
9. Волошин, А.С. Исследование добротности резонанса примесной моды в микрополосковой модели фотонного кристалла / А.С. Волошин, Б.А. Беляев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. всероссийской научно-техн. конференции, 4-6.05.2005, г. Красноярск. — Красноярск: Изд-во КГТУ, 2005. — С. 217 – 220.
10. Волошин, А.С. Исследование добротности резонанса примесной моды в микрополосковой модели одномерного фотонного кристалла / А.С. Волошин,

Б.А. Беляев, В.Ф. Шабанов // Доклады академии наук. – 2005. – Т. 403, № 3. – С. 319-324.

11. Пат. 2257648 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 Р 1/18. Управляемый фазовращатель / А.С. Волошин, Б.А. Беляев, А.А. Лексиков, В.Ф. Шабанов; заявитель и патентообладатель ин-т физики им. Л.В. Киренского СО РАН. — № 2004101602/09; заявл. 19.01.04; опубл. 27.07.05, Бюл. № 21 — 7 с.

12. Волошин, А.С. Микрополосковый фазовращатель на жидком кристалле, перестраиваемый электрическим полем / А.С. Волошин, Б.А. Беляев, А.А. Лексиков, В.Ф. Шабанов // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: сб. материалов XIV международной конф., 11-14.09.2005, г. Севастополь. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005. – С. 494-496.

13. Волошин, А.С. Микрополосковые аналоги полосно-пропускающих фильтров и зеркал на фотонных кристаллах / А.С. Волошин, Б.А. Беляев, В.Ф. Шабанов // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: сб. материалов XIV международной конф., 11-14.09.2005, г. Севастополь. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005. – С. 497-499.

14. Волошин, А. С. Исследование микрополосковых моделей фильтров на дефектах одномерных фотонных кристаллов / А.С. Волошин, Б.А. Беляев, В.Ф. Шабанов // Электронные средства и системы управления: материалы всероссийской науч.-практ. конференции, 22—24.10.2005, г. Томск. — Томск: Изд-во ТУСУР, 2005. — С. 77-80.

15. Волошин, А.С. Исследование микрополосковых аналогов полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах / А.С. Волошин, Б.А. Беляев, В.Ф. Шабанов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 6. – С. 694-701.

16. Волошин, А.С. Исследование узкополосных фильтров на микрополосковых фотонных кристаллах с дефектами / А.С. Волошин, Б.А. Беляев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. всероссийской научно-техн. конференции, 4-6.05.2006, г. Красноярск. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2006. – С. 147 – 150.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 58. – P. 2059-2062.
2. Hong J.S., Lancaster M.J. Microstrip filters for RF/Microwave Applications // John Wiley&Sons. – 2001. – 476 p.
3. Тюрнев В.В. Квазистатическая теория связанных микрополосковых линий. – Красноярск: ИФ. 1989. – 19 с. (Препринт № 557Ф РАН. Сиб. отд-ие, Ин-т физики им. Л.В. Киренского)
4. Беляев Б.А., Тюрнев В.В., Елисеев А.К. и др. Исследование микрополосковых резонаторов и устройств на их основе. – Красноярск: ИФ. 1987. – 55 с. (Препринт № 415Ф АН СССР, часть I. Сиб. отд-ие, Ин-т физики им. Л.В. Киренского)
5. Беляев Б.А., Казаков А.В., Лексиков А.А., Макиевский И.Я. Установка для изготовления рисунков металлических полосок микрополосковых СВЧ-устройств // ПТЭ. – 1998, №1. – С. 167-168.
6. Kitahara H., Kawaguchi T., Miyashita J. and Wada Takeda M. Impurity mode in line photonic crystal in millimeter wave region // *J. Phys. Soc. of Japan.* – 2003. – Vol. 72, № 4. – P. 951-955.
7. Ветров С.Я., Шабанов А.В. Локализованные электромагнитные моды и спектр пропускания одномерного фотонного кристалла с дефектами решетки // ЖЭТФ. – 2001. – Т. 120, вып. 5(11) – С. 1126-1134.
8. Kramper P., Birner A. et al. Direct spectroscopy of a deep two-dimensional photonic crystal microresonator // *Phys. Rev. B.* – 2001. – Vol. 64. – P. 233102 (4).

Подписано в печать 17.11.2006.

Формат 60×85/16

Усл. печ. л. 1. Тираж 70. Заказ № 42.

Отпечатано в типографии Института Физики СО РАН

660036 Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН