

На правах рукописи

ХОДЕНКОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФОТОННЫХ  
КРИСТАЛЛОВ И УСТРОЙСТВ ЧАСТОТНОЙ СЕЛЕКЦИИ  
НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность 01.04.03 – радиоп физика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2009

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г. Красноярск) и Сибирском государственном аэрокосмическом университете им. академика М.Ф. Решетнева (г. Красноярск)

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Беляев Б.А.

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

кандидат физико-математических наук,  
профессор Владимиров В.М.

Ведущая организация: ОАО «Информационные спутниковые  
системы» им. академика М.Ф. Решетнева  
(Красноярский край, г. Железногорск)

Защита диссертации состоится 1 октября 2009 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д212.099.04 при Сибирском федеральном университете по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Б-418.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО СФУ по адресу: Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Г-274.

Автореферат разослан «\_\_\_» августа 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Ю.П. Саломатов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Фотонные кристаллы (ФК) представляют собой особый тип естественных и искусственных структурноорганизованных сред, неоднородности в которых меняются периодически в одном, двух или трех направлениях с характерным пространственным масштабом периодичности порядка оптической длины волны [1].

К настоящему времени сформировалась новая область науки по изучению свойств искусственных ФК, а также устройств, базирующихся на их основе [2]. Эти устройства, использующие в своей основе идею периодичности неоднородностей в структуре и представляющие собой систему электромагнитно связанных резонаторов, вышли далеко за оптический диапазон [3]. С практической точки зрения интерес к ним обусловлен наличием окон прозрачности и полос заграждения – фотонных запрещенных зон.

Одномерные фотонные кристаллы (ОФК) в общем случае представляют собой тонкопленочные покрытия из чередующихся диэлектрических слоев, различающихся показателем преломления [4]. Величина связи смежных слоев-резонаторов друг с другом, а наружных – еще и со свободным пространством определяется контрастом показателей преломления. Очевидно, что такие одномерные структуры могут представлять собой устройства частотной селекции – фильтры и зеркала. Одномерные микрополосковые фотонные кристаллы (МФК) являются наиболее удачными аналогами диэлектрических ОФК. В общем случае МФК представляют собой последовательно соединенные чередующиеся отрезки линий с «большой» шириной полоскового проводника, имитирующие слои с высокими показателями преломления, и с «малой» шириной проводника, имитирующие слои с низкими показателями преломления. Кроме того, в микрополосковых линиях передачи основными распространяющимися модами колебаний являются квази-Т-волны [5], структура высокочастотных полей которых близка к поперечным волнам, распространяющимся в ОФК.

Несмотря на простоту и доступность моделирования этих структур оптического и СВЧ диапазонов, к настоящему времени далеко не все селективные возможности одномерных электромагнитных кристаллов изучены исследователями. Исследования двумерных микрополосковых фотонных кристаллов, представляющих собой периодические по двум направлениям системы взаимодействующих резонаторов находятся только на начальной стадии. На сегодняшний день не существует четких рекомендаций ни в выборе геометрии резонаторов, ни в их размещении внутри микрополоскового фотонного кристалла, при котором возможно реализовать баланс пространственных связей резонаторов друг с другом, а крайних – еще и с входной и выходной линией передачи. Поэтому большинство вопросов, связанных с возможностями реализации на их основе различных полосно-пропускающих устройств, остаются открытыми.

Таким образом, исследование микрополосковых структур на основе ФК различных размерностей, а также проектирование на их основе частотно-селективных устройств СВЧ диапазона – важная и актуальная задача, решение которой носит как фундаментальный характер – изучение особенностей распространения и локализации электромагнитных волн (ЭМВ) в пространстве взаимодействующих резонаторов, так и прикладной характер – разработка новых конструкций полосно-пропускающих фильтров.

**Цель работы и задачи исследований.** Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование свойств одномерных и двумерных микрополосковых фотонных кристаллов и устройств частотной селекции на их основе.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1) Изучить основные свойства фотоннокристаллических структур, представляющих собой чередующиеся слои с высокими и низкими показателями преломления.

2) Изучить основные свойства одномерных и двумерных микрополосковых фотонных кристаллов с резонаторами в форме прямоугольных рамок. Исследовать возможности создания полосно-пропускающих фильтров на основе таких конструкций.

3) Изучить особенности резонансов Брэгга-Вульфа в двумерной микрополосковой конструкции.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1) Изучены основные свойства различных фотоннокристаллических структур, даны рекомендации для проектирования частотно-селективных устройств на их основе. Показано, что микрополосковая конструкция с четвертьволновыми резонаторами по краям и полуволновыми резонаторами внутри обладает более высокими частотно-селективными свойствами по сравнению с конструкцией, реализованной полностью на полуволновых резонаторах. Изучено поведение коэффициентов связи смежных резонаторов в таких электромагнитных кристаллах, и показаны возможности реализации многосвязных фильтров с трансляцией пары различающихся полуволновых резонаторов внутри структуры.

2) Исследованы основные свойства одномерных и двумерных микрополосковых фотонных кристаллов с резонаторами в форме прямоугольных рамок. На их основе предложены конструкции одномодовых и двумодовых полосно-пропускающих фильтров с высокими селективными характеристиками. Показано, что для достижения высоких характеристик в моделях полосно-пропускающих фильтров необходима определенная оптимизация параметров резонаторов.

3) Исследованы особенности резонансов Брэгга-Вульфа, обнаруженных в двумерных микрополосковых фотонных кристаллах. Показаны возможности построения электрически перенастраиваемых фильтров на их основе.

**Практическая значимость.** Предложены и созданы новые конструкции микрополосковых фильтров на основе одномерных и двумерных фотонных кристаллов. Многозвенный одномерный МФК может иметь высокие частотно-селективные свойства при использовании в нем пары различных резонаторов, транслируемых внутри конструкции. Оригинальный двумодовый фильтр на основе ОФК с резонаторами в форме прямоугольных микрополосковых рамок обладает высокой крутизной склонов полосы пропускания (ПП) и широкой полосой заграждения. Предложена конструкция электрически перенастраиваемого фильтра на резонансах Брэгга-Вульфа с высокой крутизной склонов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1) Структура с четвертьволновыми резонаторами по краям и полуволновыми внутри обладает более высокими частотно-селективными свойствами по сравнению со структурой, реализованной полностью на полуволновых резонаторах. Значительное уменьшение отражения электромагнитных волн на частотах полосы пропускания сопровождается сильным ослаблением подавления мощности в полосах заграждения и снижением крутизны склонов полосы пропускания.

2) При проектировании полосно-пропускающих фильтров на основе двумерных микрополосковых фотонных кристаллов необходимо оптимизировать все конструктивные параметры изначально строго периодической структуры.

3) В двумерных микрополосковых фотонных кристаллах обнаружены резонансы Брэгга-Вульфа, на основе которых предложена конструкция электрически перенастраиваемого полосно-пропускающего фильтра.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты работы докладывались на X Международной научной конференции «*Решетневские чтения*» (Красноярск, 2006), Всероссийской научно-технической конференции «*Современные проблемы радиоэлектроники*» (Красноярск, 2007), 3-ей Международной молодежной научно-технической конференции «*Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций*» (Севастополь, 2007), 17-ой Международной Крымской конференции «*СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*» (Севастополь, 2007), 4-ой Международной научно-практической конференции «*Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития*» (Томск, 2007), 4-ой Международной молодежной научно-технической конференции «*Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций*» (Севастополь, 2008), Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «*Современные проблемы радиоэлектроники*» (Красноярск, 2008).

**Личный вклад автора** заключается в получении всех теоретических результатов исследований, в изготовлении действующих макетов микрополосковых структур и их экспериментального исследования. Автор

принимал непосредственное участие в анализе и интерпретации полученных результатов.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, из которых одна статья в периодическом издании по списку ВАК, две – в сборниках научных трудов, три – в сборниках докладов научно-практических конференций, три – в трудах Всероссийских научно-технических конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитированной литературы и приложений. Общий объем диссертации – 160 страниц, включая 88 рисунков, 16 таблиц и 6 страниц приложений. Библиографический список содержит 153 наименования.

## 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 фотонным кристаллам и конструкциям СВЧ диапазона, базирующихся на их основе – микрополосковым фотонным кристаллам. Даны основные определения, рассмотрены свойства этих электромагнитных кристаллов, описаны методы расчета и особенности моделирования. В первой и второй части главы описаны возможности практического применения одно- и двумерных фотонных кристаллов соответственно. Для одномерных ФК приведена модель характеристических матриц [6], позволяющая рассчитывать коэффициенты прохождения и отражения мощности электромагнитных волн. Подробно рассмотрены возможности проектирования устройств частотной селекции на основе одно- и двумерных ФК.

В третьей части главы проведено сравнение между ФК и их микрополосковыми аналогами, показаны преимущества и недостатки моделирования в оптическом и СВЧ диапазонах.

В четвертой и пятой части главы описаны одно- и двумерные микрополосковые фотонные кристаллы соответственно. Рассмотрены имеющиеся к настоящему времени принципы и методы оптимизации моделей полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров на их основе. Как показал обзор работ, проектирование фильтров на основе одномерных структур достаточно хорошо развито, однако до сих пор вопрос о повышении их селективных характеристик остается актуальным. В литературе по микрополосковым полосно-пропускающим фильтрам на основе двумерных ФК не найдено никаких четких рекомендаций по проектированию последних с высокими частотно-селективными свойствами.

**Во второй главе** приведены результаты исследования конструкций полосно-пропускающих фильтров на основе диэлектрических ОФК с полностью полуволновыми слоями-резонаторами и с использованием по краям

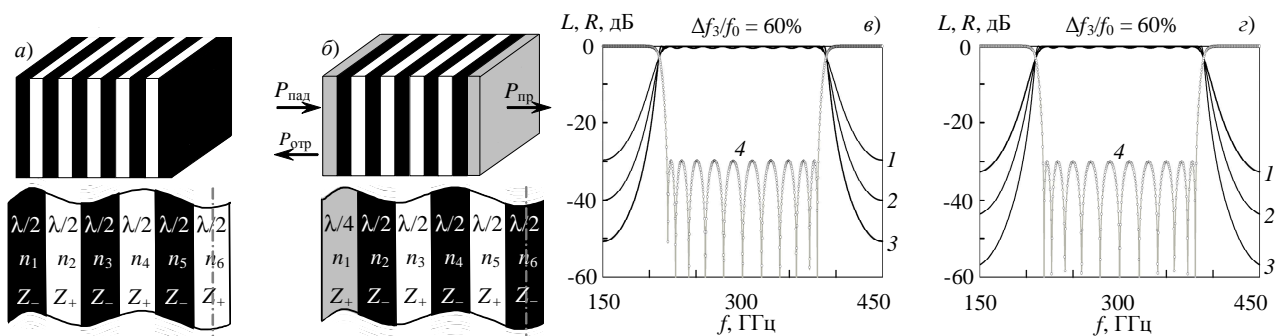
четвертьволновых просветляющих слоев. Отдельная часть главы посвящена исследованию коэффициентов связи в этих структурах между смежными резонаторами.

В первой части этой главы так же, как и во всех последующих главах, приводится модель и методика расчета исследуемых электромагнитных кристаллов.

Для описания АЧХ фотонных кристаллов так же, как и в последующем микрополосковых фотонных кристаллов, в работе были использованы функции прямых и обратных потерь мощности электромагнитных волн:

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

Результаты исследований двух фотоннокристаллических структур с осевой симметрией сечения (рис. 1 а, б) показали, что при достижении оптимального значения всех показателей преломлений и физических толщин слоев наблюдается баланс связей всех резонаторов друг с другом, а крайних – еще и со свободным пространством, имеющим волновое сопротивление  $Z = 376.7 \Omega$ . Потери на отражение в первой полосе пропускания фильтров с центральной частотой  $f_0 = 300$  ГГц можно контролировать, настраивая максимумы обратных потерь  $L_R$  на заданный уровень.



**Рис. 1.** Схематическое изображение одиннадцатислойных структур (а, б) и их АЧХ (в, г), для уровней максимумов обратных потерь, 1 -60 дБ, 2 -30 дБ, 3 -10 дБ соответственно. 4 – частотная зависимость обратных потерь для уровня  $L_R = -30$  дБ

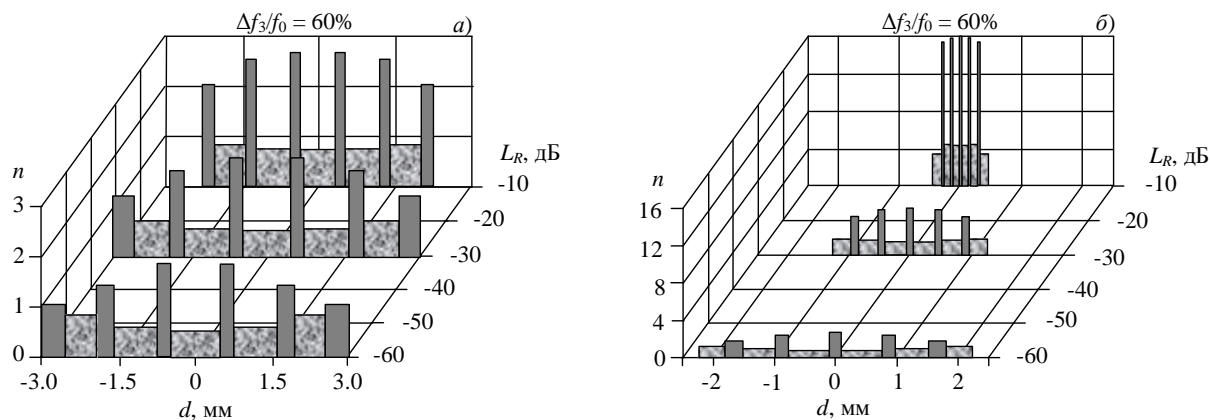
Как и следовало ожидать, с увеличением числа слоев в структурах значительно увеличивается крутизна склонов АЧХ и существенно растет величина затухания мощности электромагнитных волн в фотонной запрещенной зоне для обеих конструкций при фиксированном значении ширины ПП и уровня максимумов обратных потерь.

При фиксированном значении ширины ПП и числа слоев в структурах с увеличением отражения мощности в полосе пропускания значительно увеличивается крутизна склонов АЧХ и существенно растет величина затухания в фотонной запрещенной зоне (рис. 1 в, г).

Для конструкции с четвертьволновыми резонаторами по краям, при прочих равных условиях, во всех проведенных исследованиях крутизна склонов АЧХ была заметно выше и затухание мощности ЭМВ в фотонной запрещенной зоне существенно больше (рис. 1 в, г).

Также было изучено поведение конструктивных параметров (физических толщин пленок  $d$  и их показателей преломления  $n$ ) этих одномерных структур в

зависимости от уровня максимумов обратных потерь  $L_R$  и ширины полосы пропускания  $\Delta f_3/f_0$ , измеренной по уровню -3 дБ. На рисунке 2 приведены конструктивные параметры одиннадцатислойных одномерных ФК, реализованных полностью на полуволновых слоях (рис. 2 а) и при использовании по краям четвертьволновых (рис. 2 б).



**Рис. 2.** Сравнение конструктивных параметров одиннадцатислойных ФК. а) – все слои полуволновые, б) – крайние слои четвертьволновые

Расчеты показали, что в структуре с полуволновыми слоями слои с высоким волновым сопротивлением  $Z_+$  должны быть выполнены из материала с показателем преломления меньше единицы. Исключение составляют случаи, когда ширина полосы пропускания имеет достаточно большое значение ( $\Delta f_3/f_0 \sim 100\%$ ), при наличии достаточного отражения энергии ЭМВ в полосе пропускания (не менее 3%), то есть в случае сильной связи крайних резонаторов с внутренними.

Конструкция с просветляющими четвертьволновыми слоями по краям в большинстве случаев менее требовательна к диэлектрическим свойствам материалам слоев и позволяет применять большую контрастность последних.

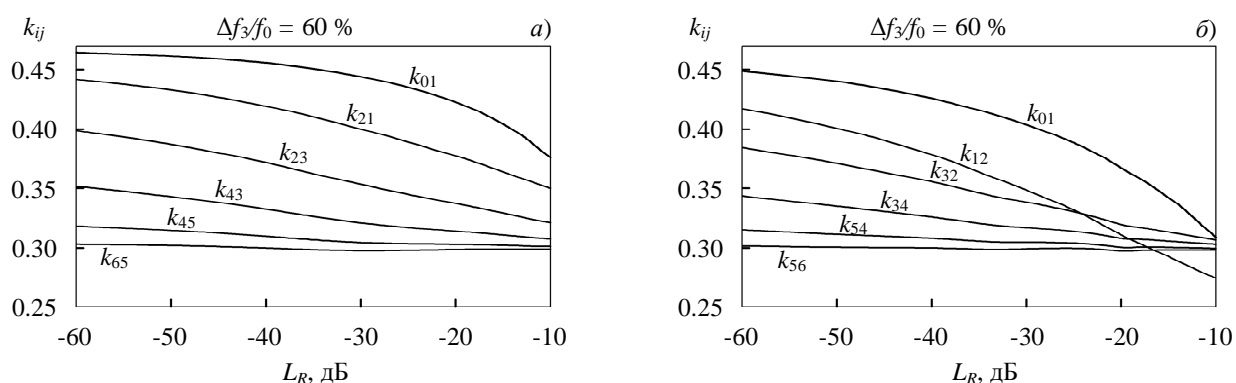
Для вычисления коэффициентов связи между парами смежных резонаторов с «низкими»  $Z_-$  и «высокими»  $Z_+$  волновыми сопротивлениями была использована следующая формула [7]:

$$|k_{+-}| = \frac{2\pi \arctg \sqrt{Z_-/Z_+}}{\pi^2 + \arctg^2 \sqrt{Z_-/Z_+}}.$$

Для первой и второй конструкции (см. рис. 1 а и рис 1 б) были рассчитаны трехмерные зависимости коэффициентов связи смежных резонаторов от уровня максимумов обратных потерь  $L_R$  и ширины полосы пропускания  $\Delta f_3/f_0$ .

На основании этих исследований было показано, что при приближении к центральному слою, различие между коэффициентами связи внутренних смежных слоев значительно уменьшается (рис. 3). Фактически это означает, что при значительном увеличении количества слоев в структурах все внутренние слои в них можно реализовать трансляцией всего двух высококонтрастных слоев, и при этом отражения в полосе пропускания останутся на низком уровне.

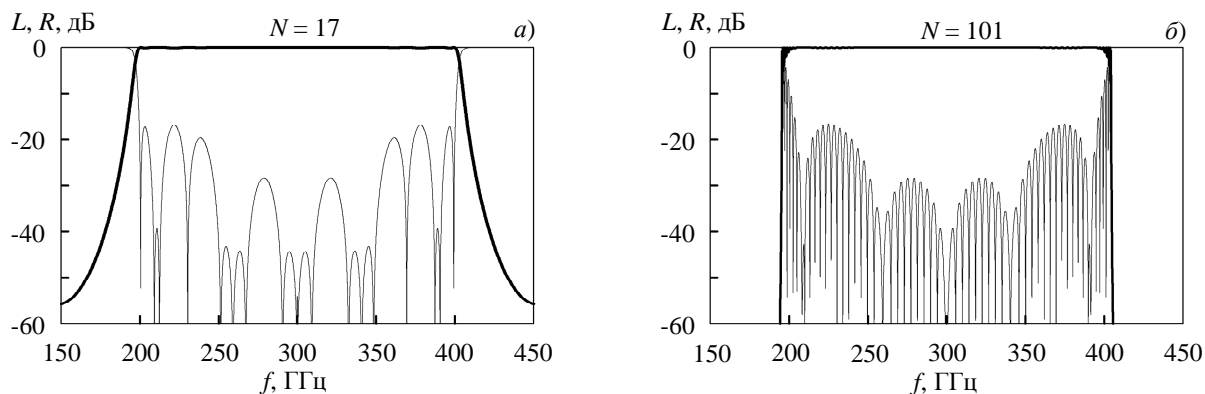




**Рис. 3.** Сравнение коэффициентов связи резонаторов одиннадцатислойных структур. *а)* – все слои конструкции – полуволновые. *б)* – слои по краям – четвертьволновые

Значение коэффициентов преломления слоев фотоннокристаллической структуры с крайними четвертьволновыми слоями и внутренними полуволновыми, могут быть следующие:  $n_1 = 1.46$ ,  $n_2 = 2.91$ ,  $n_3 = 1.44$ ,  $n_4 = 3.17$ ,  $n_5 = 1.30$ ,  $n_6 = 3.50$ . При этом при расчетах АЧХ (рис. 4 *а, б*) все последующие внутренние слои семнадцатислойной ( $N = 17$ ) и стооднослойной ( $N = 101$ ) структуры имеют физические параметры материалов пятого и шестого слоев.

Очевидно, что подход с применением нескольких крайних согласующих слоев для реализации многорезонаторных фильтров на основе диэлектрического ОФК, гораздо привлекательнее, чем традиционные способы построения структуры, например с использованием чередования всего двух высококонтрастных слоев или с изменением параметров слоев по результатам аналитических приближений.



**Рис. 4.** АЧХ многослойных фотоннокристаллических структур. *а)* – число слоев – 17, *б)* – число слоев – 101

В заключительной части этой главы так же, как и во всех последующих главах, приводятся результаты экспериментального подтверждения полученных данных.

По результатам исследований ОФК даны рекомендации для проектирования микрополосковых фотонных кристаллов, представляющих собой последовательно соединенные отрезки микрополосковых линий с высокими и низкими волновыми сопротивлениями.

**В третьей главе** приведены результаты исследований, проведенные в квазистатическом приближении для конструкций на основе одномерных микрополосковых фотонных кристаллов с резонаторами в форме рамок.

Изучены топологии для реализации одномодовых и двумодовых полосно-пропускающих фильтров с высокими селективными характеристиками. Исследованы конструктивные параметры резонаторов в микрополосковых фильтрах и рассчитаны их амплитудно-частотные характеристики.

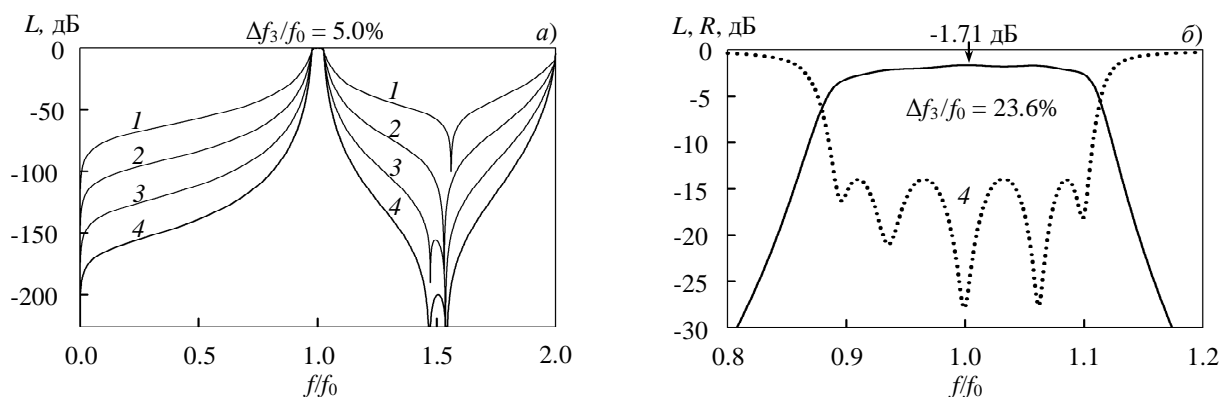
В общем случае результаты исследований показали, что для согласования структуры с внешним 50-Ω трактом СВЧ через емкостные элементы  $C$  необходимо, чтобы размеры ширины (или длины) внутренних резонаторов были больше, чем размеры ширины (или длины) крайних резонаторов в конструкции (рис. 5). Зазоры между резонаторами должны иметь определенные оптимальные значения. В этом случае можно реализовать полосно-пропускающие фильтры с высокими характеристиками (рис. 6 а).



**Рис. 5.** Схематическое изображение топологий одномерных МФК для реализации полосно-пропускающих фильтров

При фиксированном числе звеньев  $N$  в структурах и фиксированной ширине полосы пропускания кривые прямых потерь (рис. 6 а) практически совпадали для двух исследуемых топологий 1 и 2. Очевидно, что это свидетельствует о равноценных возможностях подстройки размеров внутренних резонаторов как изменением ширины, так и изменением длины последних.

Для значительного увеличения ширины полосы пропускания емкостную связь крайних резонаторов с трактом СВЧ необходимо заменить на кондуктивную (рис. 6 б).

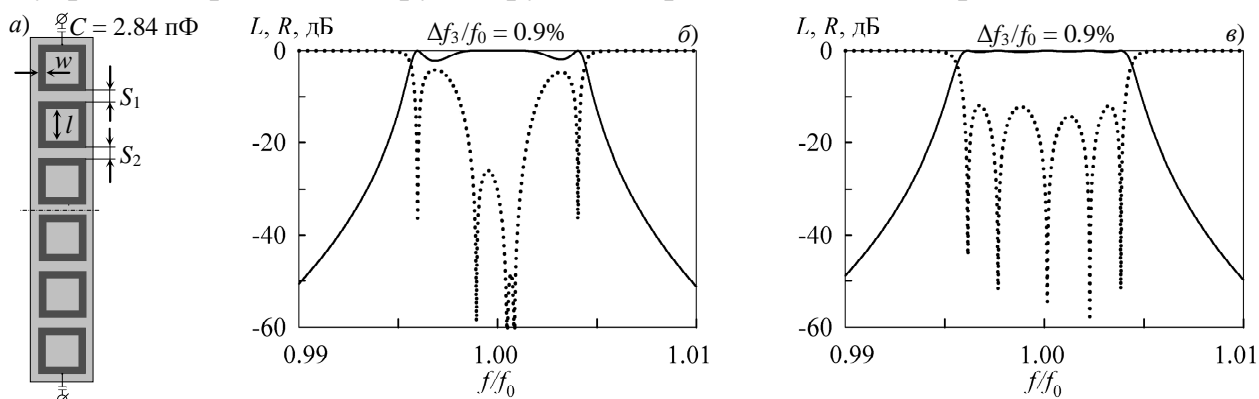


**Рис. 6.** АЧХ одномерных МФК. 1 – число звеньев  $N = 2$ ; 2 –  $N = 3$ ; 3 –  $N = 4$ ; 4 –  $N = 5$ . а) – значение  $C = 4$  пФ, собственная добротность резонаторов  $Q_0 = \infty$ . б) –  $C = \infty$ ,  $Q_0 = 400$

Интересно отметить, что при достаточно большом количестве звеньев в структуре, по аналогии с ОФК, в связи с уменьшением различия между коэффициентами связи внутренних резонаторов, размеры центральных резонаторов практически не отличаются от размеров соседних резонаторов.

Первая конструкция (схема на рис. 7 а) представляла собой реальный микрополосковый фотонный кристалл с равными размерами всех звеньев ( $l = 15.00$  мм,  $w = 5.00$  мм) и зазорами между ними ( $S_1 = S_2 = 0.60$  мм).

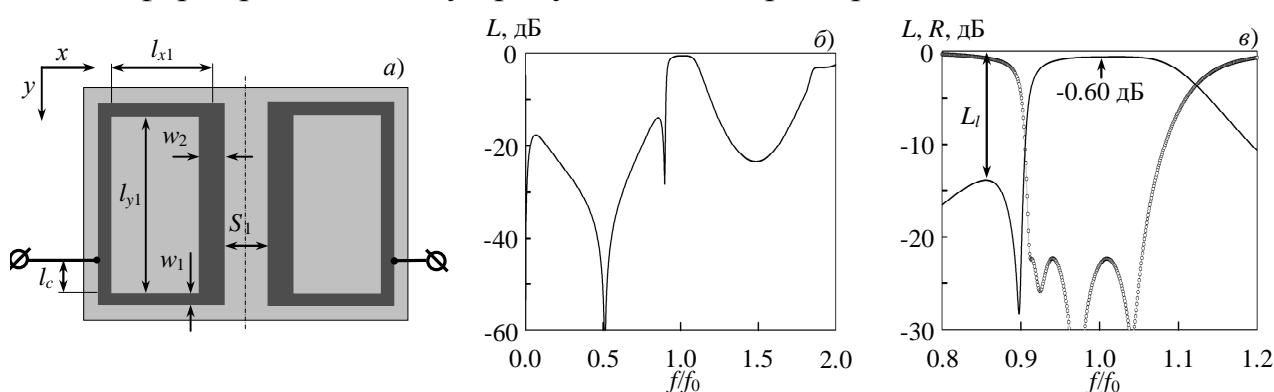
Диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon$  была выбрана равной 80. Видно, что в этом случае в ПП наблюдается достаточно большая неравномерность прохождения ЭМВ (рис. 7 б), вследствие разбалансирования взаимодействия внутренних кристаллов друг с другом, а крайних – еще и с трактом СВЧ.



**Рис. 7.** Схематическое изображение (а) и АЧХ (б, в) узкополосных пятизвенных конструкций. б) – АЧХ реального МФК, в) – АЧХ МФК с равными размерами звеньев и различными зазорами

Вторая конструкция была реализована с этими же размерами резонаторов, но с использованием двух различных зазоров между последними ( $S_1 = 0.55$  мм,  $S_2 = 0.62$  мм). Как видно из рисунка (рис. 7 в), в этом случае в ПП наблюдается лишь незначительная неравномерность прохождения ЭМВ.

Исследования конструкций двумодовых полосно-пропускающих фильтров на основе одномерных микрополосковых фотонных кристаллов показали, что для реализации высоких селективных характеристик необходимо выбрать расположение точек кондуктивного подключения (ТКП), близкое к краям резонаторов (рис. 8 а). Собственные частоты резонансов в отрезках микрополосковых линий, расположенных параллельно оси  $x$  и оси  $y$ , будут несколько отличаться. Так, для двухзвенного фильтра, одновременно подобрав определенные значения длин отрезков микрополосковых линий, ширину последних и величину зазора между ними, при правильном расположении ТКП можно сформировать полосу пропускания четырьмя резонансами.



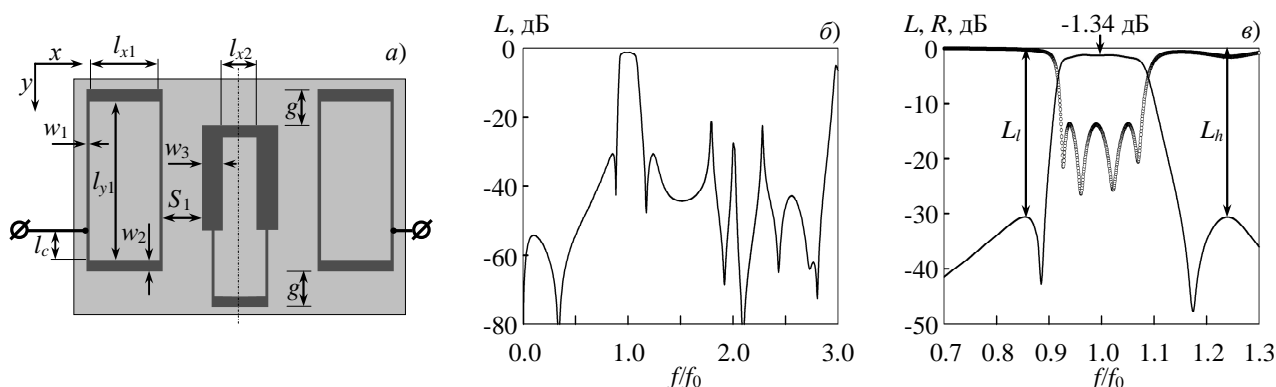
**Рис. 8.** Схематическое изображение (а) и АЧХ (б, в) двумодового фильтра на основе одномерного МФК. Собственная добротность резонаторов  $Q_0 = 400$

Однако вследствие наличия в структуре резонансов бегущей волны и соответственно диссипации энергии, на частотах ПП наблюдаются

значительные потери при прохождении мощности ЭМВ. Поэтому конструкция была незначительно модифицирована (см. рис. 8 а) путем увеличения ширины двух противоположных внутренних отрезков микрополосковых линий. Ее размеры составили следующие значения в мм:  $l_{x1} = 9.94$ ,  $l_{y1} = 38.00$ ,  $w_1 = 0.20$ ,  $w_2 = 1.16$ ,  $S_1 = 0.30$ ,  $l_c = 0$ . При этом существенно улучшились селективные характеристики фильтра (см. рис. 8 б, в). Видно, что потери на прохождение в ПП составляют достаточно небольшую величину, а полюс затухания, подобранный так, чтобы его уровень  $L_l$  был равен -14 дБ, значительно улучшает крутизну низкочастотного склона. Очевидно, что в этом случае связь между вышеупомянутыми отрезками микрополосковых линий устанавливается преимущественно емкостная, а взаимная индуктивность уменьшается.

При увеличении числа звеньев до трех необходимо несколько изменить расположение резонаторов в пространстве. Так, проведенные исследования показали, что реализовать полосу пропускания со всеми шестью резонансами можно, если несколько сдвинуть внутреннее звено относительно крайних.

Значительно улучшить селективные характеристики можно, применив нерегулярность микрополосковой линии в центральном звене (скачок ширины резонаторов расположен на одном уровне с ТКП), а также различное значение ширины отрезков микрополосковых линий в резонаторах (рис. 9 а).



**Рис. 9.** Схематическое изображение (а) и АЧХ (б, в) оригинального двумодового фильтра на основе одномерного МФК. Собственная добротность резонаторов  $Q_0 = 400$

Конструктивные параметры фильтра составили следующие значения в мм:  $l_{x1} = 3.00$ ;  $l_{x2} = 1.37$ ;  $l_{y1} = 18.14$ ;  $w_1 = 0.10$ ;  $w_2 = 0.72$ ;  $w_3 = 2.47$ ;  $S_1 = 0.49$ ;  $l_c = 3.40$ ;  $g = 3.68$ . Видно (рис. 9 в), что полоса пропускания сформирована всего четырьмя резонансами, однако наличие одновременно двух полюсов затухания, с уровнями  $L_l$  и  $L_h$ , настроенными на значение -30 дБ, существенно увеличивает крутизну обоих склонов, а невысокие потери в ПП и значительная ширина высокочастотной полосы заграждения (рис. 9 б) позволяют назвать характеристики такого фильтра экстремальными.

**В четвертой главе** приведены результаты исследования конструкций на основе двумерных микрополосковых фотонных кристаллов с резонаторами в форме рамок. В квазистатическом приближении были изучены конструктивные параметры резонаторов в микрополосковых фильтрах и рассчитаны их амплитудно-частотные характеристики. Отдельная часть главы посвящена

исследованию возможностей для реализации перенастраиваемых полосно-пропускающих фильтров на резонансах Брэгга-Вульфа.

Результаты исследований показали, что для конструкции МФК с четырьмя квадратными резонаторами равных размеров (рис. 10), размещенных на подложке с высокой диэлектрической проницаемостью, можно так одновременно подобрать параметры конструкции (внутренние длины резонаторов  $l_{x1}$ , ширины резонаторов  $w_1$  и величины зазоров между ними  $S_{x1}$  и  $S_{y1}$ ) и расположение ТКП, что три максимума обратных потерь в ПП с определенной частотой, могут быть настроены на требуемый уровень. При этом в большинстве случаев величина связи резонаторов в цепочках должна быть значительно больше, чем величина связей между цепочками резонаторов, которая в предельном случае при приближении ТКП к центру звеньев должна стремиться к нулю, в связи с чем в ПП пропадают некоторые максимумы  $L_R$ .

В процессе изучения возможностей уменьшения потерь в ПП были получены данные, позволяющие утверждать, что существенно повлиять на потери, связанные с наличием в конструкции резонансов бегущей волны, можно с помощью изменения размеров резонаторов (изменением центральной частоты полосы пропускания  $f_0$ ), с помощью подбора уровня максимумов обратных потерь  $L_R$  и варьированием значения диэлектрической проницаемости материала подложки.

Как видно из рисунков 11, увеличение центральной частоты ПП  $f_0$  и соответственно сокращение размеров резонаторов и размеров подводящих линий приводит к существенному уменьшению потерь мощности в полосе пропускания.

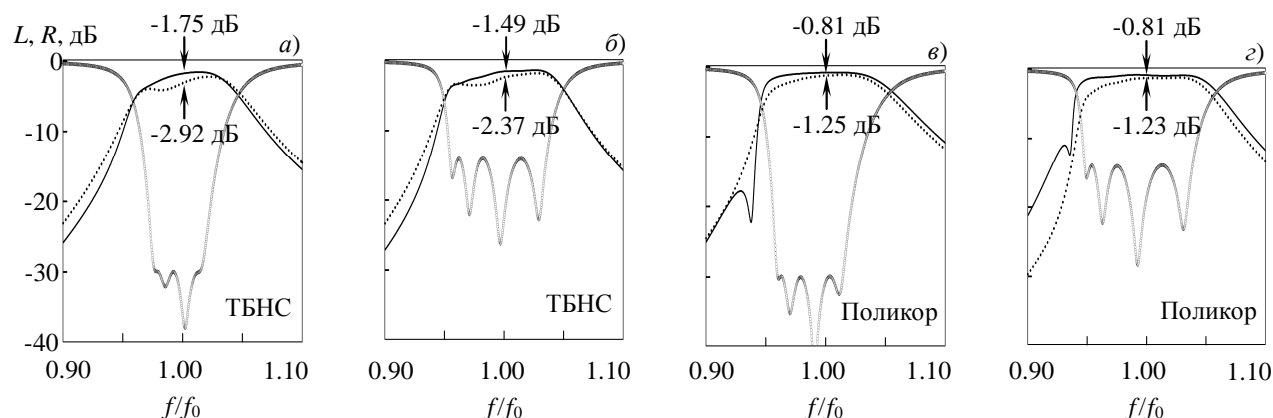


Рис. 10. Схематическое изображение двумерного МФК

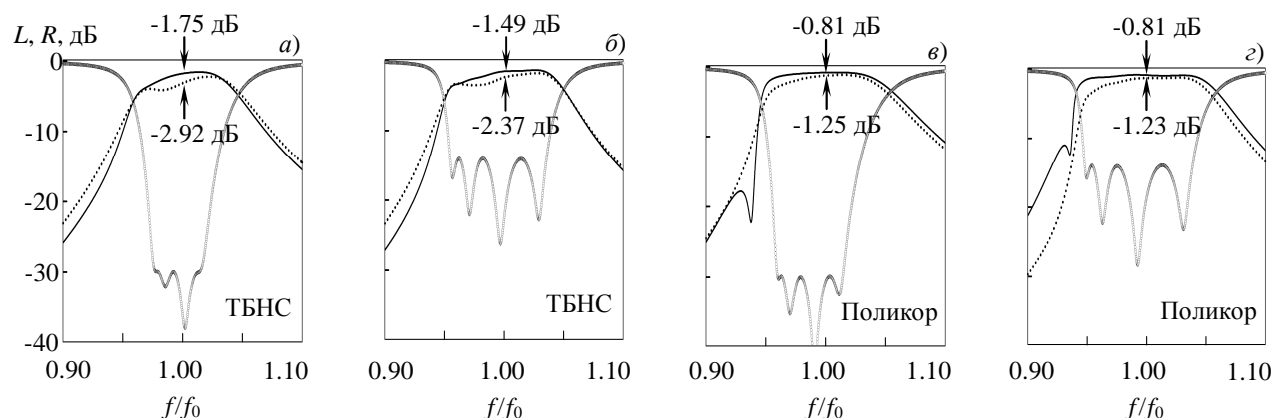


Рис.11. Фрагменты АЧХ двумерного МФК с четырьмя резонаторами равных размеров. Точки (линии)– расчет на центральной частоте ПП  $f_0 = 0.5$  ГГц ( $f_0 = 1$  ГГц). Собственная добротность резонаторов  $Q_0 = 400$

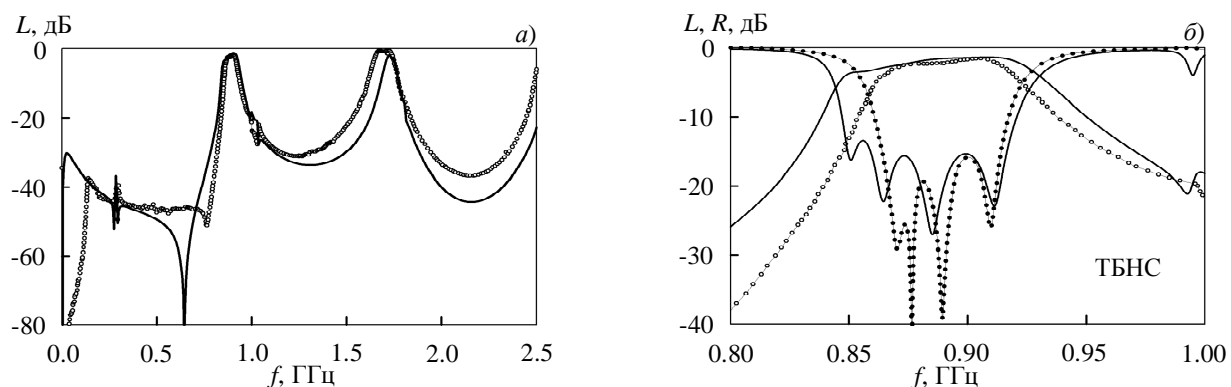
С целью уменьшения потерь в полосе пропускания настраивать АЧХ конструкции предпочтительнее так, чтобы в ПП наблюдались максимумы

обратных потерь на уровне  $L_R \sim -14$  дБ. Очевидно, что последнее подтверждает наличие резонансов бегущей волны в структуре, иначе бы уменьшение уровня максимумов обратных потерь ( $L_R \rightarrow -30$  дБ) сопровождалось бы уменьшением прямых потерь в полосе пропускания.

Очевидно, что и в случае применения подложек с низкими диэлектрическими проницаемостями потери в ПП будут уменьшаться, так как увеличивается волновое сопротивление резонаторов конструкции и соответственно уменьшаются плотности протекающих токов.

Стоит также отметить, что значительное увеличение размеров подводящих линий в таких структурах может приводить к возникновению дополнительных резонансов бегущей волны, когда в качестве резонаторов выступают не только одиночные звенья, но и несколько связанных вместе звеньев, поэтому значение параметра  $l_c$  предпочтительнее выбирать минимальное.

Для экспериментальной проверки микрополосковые фильтры изготавливались с помощью автоматизированного координатографа, сконструированного в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г. Красноярск). Эта установка позволяет заменить фотолитографию при изготовлении многих микрополосковых структур, не требующих очень высокого разрешения. Для корректности сравнения теории и эксперимента в программу анализа подставлялись реальные размеры структуры, измеренные после ее изготовления с помощью микроскопа. Измерения АЧХ изготовленных макетов микрополосковых фильтров (рис. 12) проводились на измерителях комплексных коэффициентов передачи P4-37, P4-38 и векторном анализаторе цепей «ROHDE&SCHWARZ».

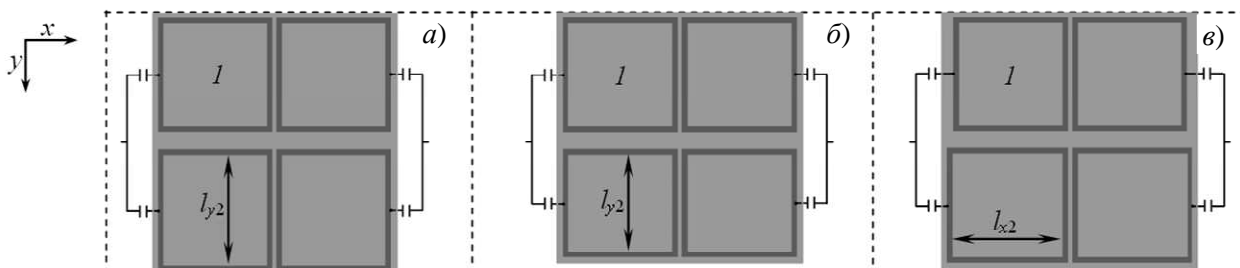


**Рис.12.** АЧХ (а) и полоса пропускания (б) двумерного МФК с четырьмя резонаторами равных размеров. Линии – расчет, точки – эксперимент

Для выяснения возможностей реализации фильтров с высокими селективными свойствами при подключении подводящих линий к центрам резонаторов конструкции были проведены исследования, результаты которых показали, что замена кондуктивной связи резонаторов с трактом СВЧ на емкостную, как это показано на рисунке 13, повышает частоты резонансов, расположенных на низкочастотной полосе заграждения, а при значении

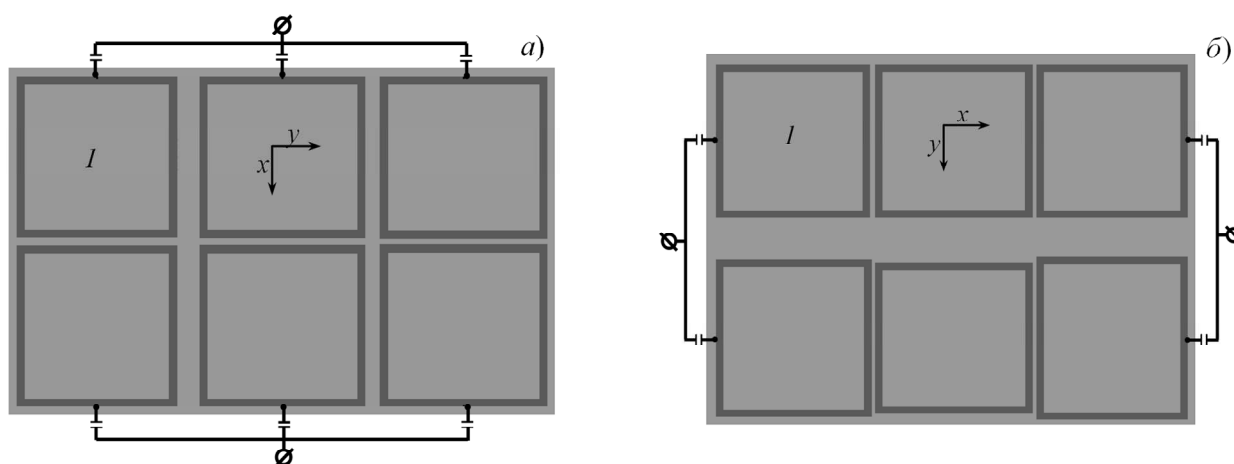
величины сосредоточенной емкости  $C = 4$  пФ в полосе пропускания можно наблюдать все четыре резонанса.

Отметим, что при фиксированном значении ширины полосы пропускания для настройки максимумов обратных потерь по определенному уровню  $L_R$  необходимо однозначно подобрать значение подстроечных параметров конструкций:  $l_{x1}$ ,  $l_{y2}$  (или  $l_{x2}$ ),  $w_1$ ,  $S_{x1}$  и  $S_{y1}$ , то есть необходимо или незначительно удлинить (рис. 13 а), или укоротить (рис. 13 б) внутреннюю длину  $l_{y2}$  резонаторов второго ряда, также можно незначительно вытянуть внутреннюю длину резонаторов  $l_{x2}$  второго ряда по оси  $x$  (рис. 13 в).



**Рис. 13.** Топологии для реализации фильтров на основе двумерных МФК с подключением по центру звеньев. Масштаб выдержан, внутренняя длина 1-го звена  $l_{x1} = l_{y1} = 20$  мм

Далее были исследованы двумерные МФК с шестью резонаторами в форме рамок, расположенных на подложках с высокой диэлектрической проницаемостью. Были изучены два варианта расположения резонаторов в конструкции. Первый, когда структура имеет размерность  $[2 \times 3]$  (рис. 14 а) и второй –  $[3 \times 2]$  (рис. 14 б) соответственно. Было показано, что для реализации фильтров на их основе необходимо выбрать расположение ТКП, близкое к центрам резонаторов, а СВЧ-мощность подводить через сосредоточенные емкостные элементы  $C$ , равные, например, 4 пФ каждый. При этом можно отбалансировать пространственные связи всех шести резонаторов и сформировать полосу пропускания.



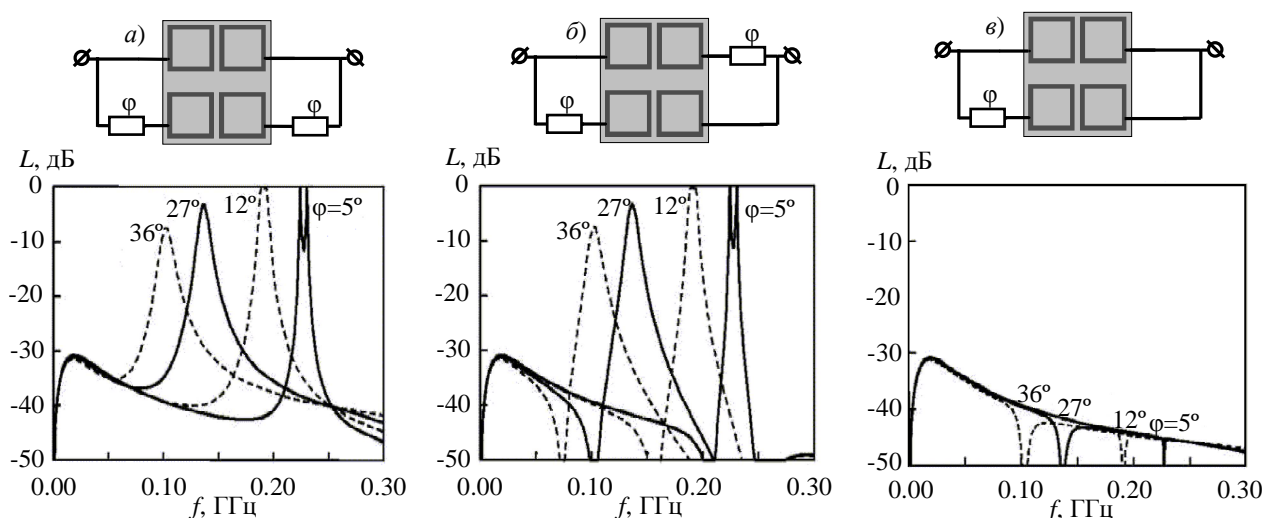
**Рис. 14.** Топологии для реализации фильтров на основе двумерных МФК с шестью резонаторами. Масштаб выдержан, длина 1-го звена 22 мм

Важно отметить, что при значительном увеличении числа резонаторов в структурах двумерных МФК с резонаторами в форме рамок для балансировки

всех максимумов обратных потерь необходимо подбирать размер каждого резонатора и величину каждого зазора между резонаторами.

Серьезными недостатками данных конструкций (рис. 13, 14) вследствие наличия резонансов бегущей волны, являются достаточно существенные потери мощности в полосе пропускания, а также паразитные полосы частичного пропускания мощности, возникающие за счет резонансов, устанавливающихся непосредственно в подводящих линиях конструкции.

В завершающем исследовании сигнал на каждую последующую цепочку резонаторов подавался и снимался с нее со сдвигом фазы  $\varphi$ , набегаемой на отрезках линий передачи с  $50 \Omega$ -ым волновым сопротивлением. По сути, такие фазовые сдвиги в рассматриваемой конструкции являются аналогами наклонного падения электромагнитной волны на реальный двумерный фотонный кристалл и ее регистрации под заданным углом.



**Рис. 15.** Схематические изображения двумерных МФК и их АЧХ, при смежным (а), диагональным (б), и одностороннем (в) подключении фазовращателей. Центральная частота основной полосы пропускания  $f_0 = 0.5$  ГГц

При  $\varphi \neq 0$ , что соответствует наклонному падению волны на фотонный кристалл, возникают новые резонансы, положение которых зависит от угла  $\varphi$ . Эти резонансы являются аналогами максимумов дифракции Брэгга-Вульфа на реальном фотонном кристалле. При этом в первой полосе загораживания возникает узкая полоса пропускания, которая с увеличением  $\varphi$  монотонно понижается (рис. 15 а, б), при этом основная ПП «разрушается». То есть такое устройство может служить перестраиваемым фильтром.

При диагональном подключении фазовращателей в конструкции (рис. 15 б), в отличие от смежного (рис. 15 а), на АЧХ рядом с ПП наблюдаются полюса затухания. Если фазовращатель включен лишь с одной стороны микрополосковой конструкции (рис. 15 в), то на месте полосы пропускания возникает полюс затухания. При этом смещение всех точек кондуктивного подключения практически не отражается на АЧХ узких перенастраиваемых полос пропускания.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

**В приложении** приводятся графики зависимостей поверхностей конструктивных параметров ОФК, зависимость поверхности коэффициентов связей между резонаторами фотоннокристаллических структур, их АЧХ. Также приведены таблица подстроечных параметров одномерных МФК и схема разбиения двумерного МФК на отрезки микрополосковых линий.



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Показано, что при использовании четвертьволновых резонаторов по краям и полуволновых внутри микрополосковая конструкция на основе одномерного фотонного кристалла обладает более высокими частотно-селективными свойствами, по сравнению с конструкцией, реализованной полностью на полуволновых резонаторах. При этом уменьшение отражения электромагнитных волн на частотах полосы пропускания сопровождается сильным ослаблением подавления мощности в полосах заграждения и заметным снижением крутизны склонов полосы пропускания.

2) Для достижения высоких частотно-селективных свойств в конструкциях полосно-пропускающих фильтров на основе одномерных и двумерных микрополосковых фотонных кристаллов необходимо оптимизировать все конструктивные параметры изначально строго периодической структуры.

3) Показаны возможности реализации электрически перенастраиваемых фильтров на резонансах Брэгга-Вульфа. Для структуры с диагональным подключением фазовращателей получены высокие селективные характеристики, которые обусловлены полюсами затухания, расположенными рядом со склонами полосы пропускания.

## **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. Беляев, Б. А. Конструирование полосно-пропускающих фильтров на одномерном диэлектрическом фотонном кристалле [Текст] / Б. А. Беляев, С. А. Ходенков, В. Ф. Шабанов // Решетневские чтения: материалы X Междунар. науч. конф. – Красноярск, 2006. – С. 156 - 158.

2. Ходенков, С.А. Полосно-пропускающие фильтры на одномерном диэлектрическом фотонном кристалле [Текст] / С. А. Ходенков, Б. А. Беляев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. ст. – Красноярск, 2007. – С. 260 - 263.

3. Ходенков, С. А. Полосно-пропускающий фильтр на одномерном диэлектрическом фотонном кристалле [Текст] / С. А. Ходенков, Б. А. Беляев // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2007»: материалы 3 междунар. молодеж. науч. - техн. конф. – Севастополь, 2007. – С. 109.

4. Беляев, Б. А. Исследование полосно-пропускающих фильтров на микрополосковом двумерном фотонном кристалле [Текст] / Б. А. Беляев, А. А. Лексиков, С. А. Ходенков, В. Ф. Шабанов // 17 Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: материалы конф. – Севастополь, 2007. – С. 469 - 470.

5. Беляев, Б. А. Исследование полосно-пропускающих фильтров на одномерных диэлектрических фотонных кристаллах [Текст] / Б. А. Беляев, С. А. Ходенков, В. Ф. Шабанов // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития: докл. Междунар. науч. - практ. конф.: Ч. 1. – Томск, 2007. – С. 63 – 66.

6. Беляев, Б. А. Полосно-пропускающие фильтры на двумерных микрополосковых фотонных кристаллах [Текст] / Б. А. Беляев, А. А. Лексиков, С. А. Ходенков, В. Ф. Шабанов // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития: докл. Междунар. науч. - практ. конф.: Ч. 1. – Томск, 2007. – С. 66 - 69.

7. Ходенков, С. А. Исследование коэффициентов связи резонаторов в фильтре на одномерном фотонном кристалле [Текст] / С. А. Ходенков, Б. А. Беляев // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2008»: материалы 4-ой междунар. молодежной науч. - техн. конф. – Севастополь, 2008. – С. 87.

8. Ходенков, С. А. Исследование коэффициентов связи резонаторов в полосно-пропускающем фильтре на фотонном кристалле [Текст] / С. А. Ходенков, Б. А. Беляев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск, 2008. – С. 301 - 304.

9. Беляев, Б. А. Исследование полосно-пропускающих фильтров на одномерных диэлектрических фотонных кристаллах [Текст] / Б. А. Беляев, С. А. Ходенков, В. Ф. Шабанов // Известия высш. учеб. заведений. Физика. – 2008. – Т. 51 – С. 150 - 153.

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Шабанов, В. Ф. Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности [Текст] / В. Ф. Шабанов, С. Я. Ветров, А. В. Шабанов. – Новосибирск: Изд - во СО РАН, 2005. – 240 с.
2. A side - coupled photonic crystal filter with sidelobe suppression [Text] / X. C. Li [et. al.] // Appl. Phys. A 89. – 2007. – P. 327 – 332.
3. Phase-reconstruction in photonic crystals from S-parameter magnitude in microstrip technology [Text] / M. J. Erro [et. al.] // Opt Quant Electron. – 2007. – P. 321 – 331.
4. Одномерные фотонные кристаллы с планарно-ориентированным слоем нематика: температурные и угловые зависимости спектров дефектных мод [Текст] / В. Г. Архипкин [и др.] // ЖЭТФ. – 2008. – Т. 133, вып. 2. – С. 447 -459.
5. Волошин, А. С. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физико – мат. наук / А. С. Волошин // Красноярск : Ин - т физики им Л. В. Киренского СО РАН. – 2006. – 20 с.
6. Борн, М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Мир. – 1973. – 720 с.
7. Тюрнев, В. В. Уточнение обобщенных формул для коэффициентов связи резонаторов в фильтре СВЧ [Текст] / В. В. Тюрнев // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития: докл. Междунар. науч. - практ. конф.: Ч. 1. – Томск , 2007. – С. 88 - 92.

Подписано к печати 20.08.2009

Формат 60×84/16. Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 289

Отпечатано в отделе копировально-множительной техники СибГАУ  
660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31