

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**СОЗДАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ  
ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВОРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса

направления 11.03.04 "Электроника и наноэлектроника"

факультета нано- и биомедицинских технологий

Головешко Олега Владимировича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

А.В.Скрипаль

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

Д.А.Усанов

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов 2017

**Введение.** Быстрое развитие в сфере нанотехнологий привело к получению нового класса периодических структур, под названием фотонные кристаллы. Их структуры состоят из периодически расположенных компонентов, соизмеримы с длиной волны электромагнитного излучения способного распространяться внутри них. В спектре пропускания такой структуры имеется частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны которая является аналогом запрещенной зоны в кристаллах. С появлением нарушений периодичности в слоях структуры в запрещенной зоне такого фотонного кристалла могут возникать так называемые "окна прозрачности".

Таким образом в СВЧ- диапазоне одномерный фотонный кристалл может быть создан с помощью планарных линий передач с периодически изменяющейся структурой. На основе таких СВЧ - фотонных кристаллов создаются полосовые фильтры, перестраиваемые резонаторы, антенны миниатюрных размеров. У СВЧ - фотонных кристаллов имеется высокая чувствительность к частотной зависимости "окна прозрачности" в запрещенной зоне к нарушению периодичности в слоистой структуре

Такого рода структуры используются в акустоэлектронике при создании линий задержки, в микро- и нанoeлектронике и других областях.

Цель данной работы: Исследование свойств периодических структур на примере фотонного кристалла. Провести анализ амплитудно-частотных характеристик фотонного кристалла, в виде волноводно-щелевой линии передачи, при изменении особенностей конструкции, параметров диэлектрической подложки, а также провести исследование СВЧ фотонного кристалла с нарушением в виде изменённого расстояния между центральными отрезками щелевых линий, образующих фотонный кристалл.

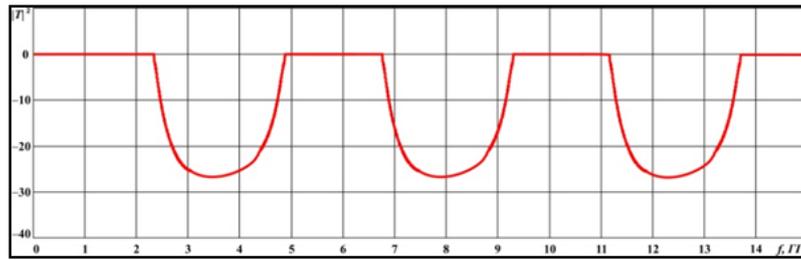
## Основное содержание работы

**Фотонные кристаллы в СВЧ-диапазоне.** Все больше растет интерес к фотонным кристаллам СВЧ-диапазона. Основным преимуществом является то, что их модель можно собрать из макроскопических материалов. Такой одномерный фотонный кристалл в СВЧ-диапазоне может быть создан при помощи волноводов, заполненных диэлектриком, так и планарных линий передачи с периодически изменяющейся структурой (рис.2.1). В реальных кристаллах в периодичности структуры могут возникать нарушения, следовательно в запрещенной зоне такого кристалла возникают "окна прозрачности"(2.2). Это позволяет использовать микрополосковые фотонные кристаллы для определения параметров материалов СВЧ-диапазона. К примеру исследовать взаимодействия электромагнитного излучения в сверхвысокочастотном диапазоне с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащие неоднородности в виде металлических плёнок наноразмеров, диэлектрических слоев и полупроводниковых материалов. Или, например, для определения электрофизических параметров как неполярных, так и полярных жидкостей, обладающих значительной величиной действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости в СВЧ-диапазоне.

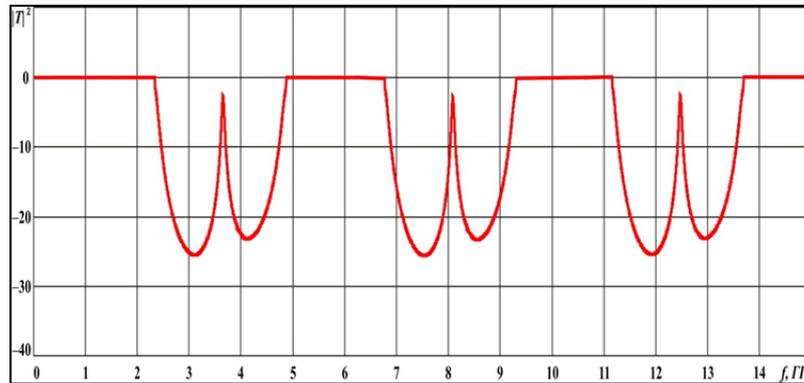


Рисунок 2.1 - Примеры фотонных кристаллов СВЧ –диапазона:

а) микрополосковая линия; б) одномерный волноводный фотонный кристалл.



а)



б)

Рисунок 2.2 - Примеры спектров пропускания фотонного кристалла: а) без наличия нарушений в структуре; б) с наличием нарушений

На данный момент времени появилась новая область науки по изучению свойств искусственно созданных ФК, а также устройств, работающих на их основе. Такие устройства, выполнены на основе идеи периодичности неоднородностей в структуре и представляют собой систему электромагнитно связанных резонаторов, превосходящие пределы оптического диапазона. С точки зрения практического использования к ним обусловлен интерес наличием окон прозрачности и полос заграждений а именно фотонных запрещенных зон (ФЗЗ).

Одномерные микрополосковые фотонные кристаллы (МФК) являются наиболее удачными аналогами диэлектрических одномерных фотонных кристаллов (ОФК) в оптическом диапазоне. Диэлектрические одномерные фотонные кристаллы представляют собой тонкопленочные покрытия из чередующихся немагнитных слоев, различающихся показателем преломления.

Величина связи смежных слоев-резонаторов друг с другом, а наружных еще и со свободным пространством определяется различием диэлектрических проницаемостей. Очевидно, что такие одномерные структуры могут представлять собой устройства частотной селекции — фильтры и отражатели.

МФК в общем случае, выглядят как 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. По мимо этого, в микрополосовых линиях передачи основными распространяющимися модами колебаний являются квази-Т-волны, структура высокочастотных полей которых близка к поперечным волнам, распространяющимся в оптических ОК.

**Теоретическое исследование СВЧ фотонных кристаллов на основе волноводно-щелевых линий передачи.** Модель СВЧ фотонных кристаллов на основе волноводно-щелевых линий передачи

Исследования были проведены при помощи системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS. На (рис 2.1) приведена общая модель фотонного кристалла СВЧ-диапазона на основе волноводно-щелевых линий передачи.

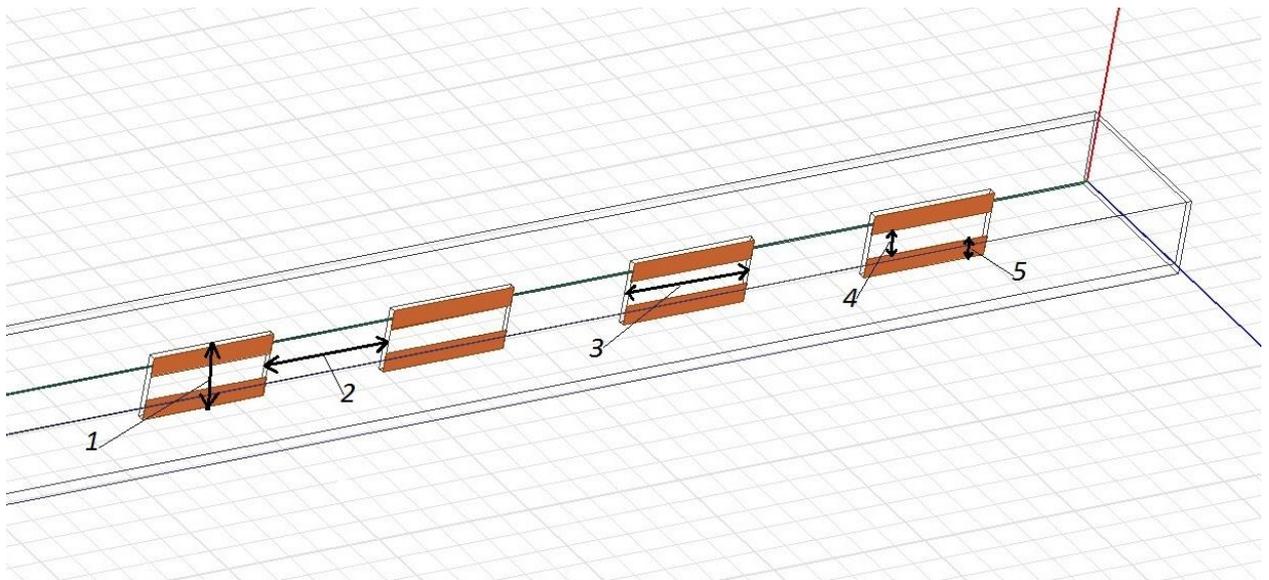


Рисунок 2.1 – Модель фотонного кристалла на основе волноводно-щелевой линии передачи. 1 – ширина поликоровой подложки 10 мм; 2 – длина поликоровой подложки 13 мм; 3 – промежуток между пластинами 20 мм; 4 – ширина щели 4 мм; 5 – ширина алюминиевой пленки 3 мм

**Исследование амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла при изменении особенностей конструкции.** Исследовалась зависимость коэффициентов отражения и прохождения для структуры, состоящей из 4 пластин длиной 13 мм, алюминиевым покрытием, толщиной 0.012 мм, ширина щели 4 мм, толщина подложки из поликора 1 мм, при изменении промежутка между пластинами от 19 мм до 21 мм с шагом 1 мм. (Рис. 2.2)

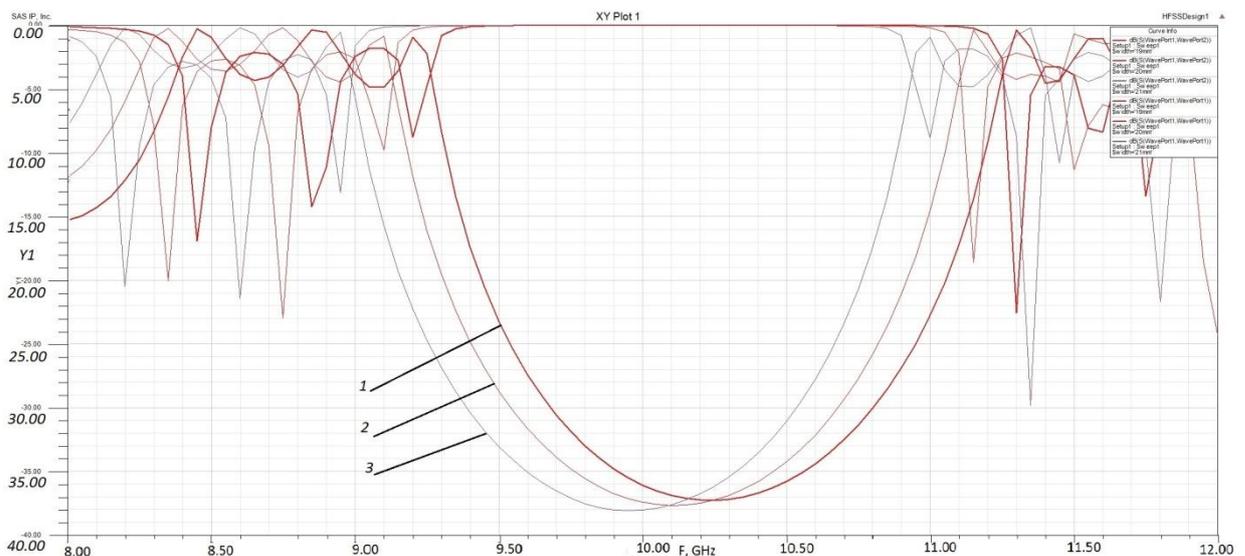


Рисунок 2.2 – Зависимости коэффициентов отражения и прохождения фотонного кристалла при различной величине промежутка между пластинами  $W$ , мм: 1 – 19; 2 – 20; 3 – 21;

Из результатов, представленных на рисунке 2.2, следует, что при увеличении длины промежутка между поликоровыми пластинами с алюминиевым покрытием АЧХ фотонного кристалла смещается в низкочастотную область, а также углубляется запрещенная зона.

Рассматривалась зависимость коэффициентов пропускания и отражения фотонного кристалла, состоящего из 4 при изменении длины пластин 12-14 мм с шагом 1 мм, алюминиевым покрытием, толщиной 0.012 мм, с промежутком 20 мм, толщина подложки из поликора 1 мм, при ширине щели от 4 мм. (Рис.2.3)

Из результатов, представленных на рисунке 2.3 следует, что при увеличение длины поликора АЧХ фотонного кристалла смещается в низкочастотную область, уменьшается глубина запрещенных зон.

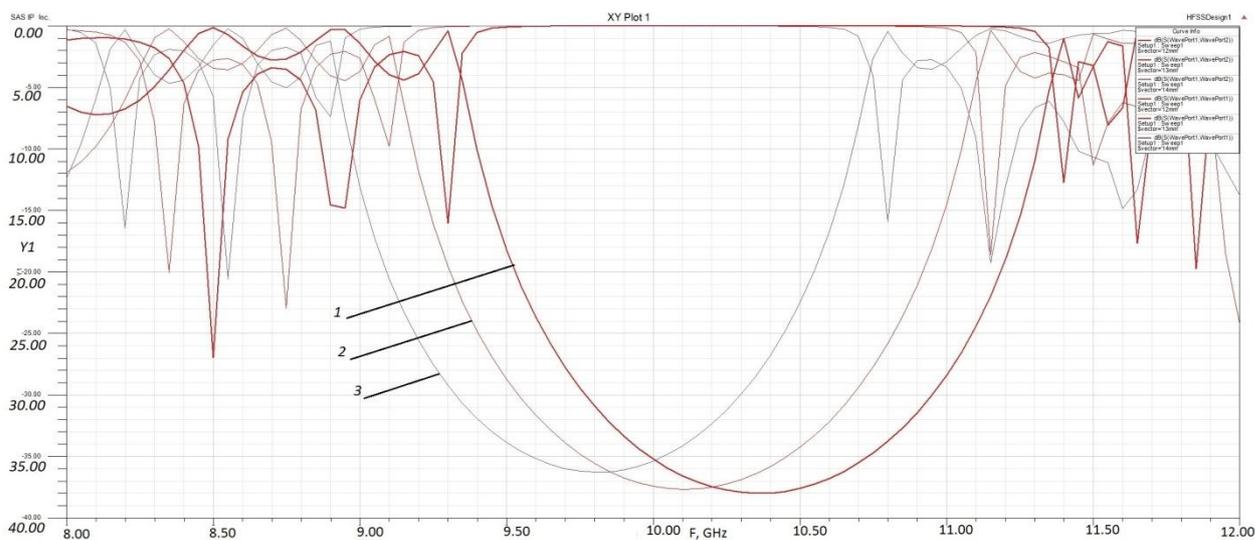


Рисунок 2.3 – Зависимости коэффициентов отражения и прохождения фотонного кристалла при различной длине поликора, мм: 1 – 12; 2 – 13; 3 – 14. Исследование амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла в зависимости от параметров диэлектрической подложки. Исследовалась частотная зависимость коэффициентов отражения и прохождения для структуры, состоящей из 4 пластин длиной 13 мм, с промежутком 21 мм, покрытием из алюминия, толщиной 0.012 мм, ширина щели 4 мм, при

изменении толщины подложки из поликора с диэлектрической проницаемостью от 0.8 мм до 1.2 мм с шагом 0.1 мм. (Рис. 2.4)

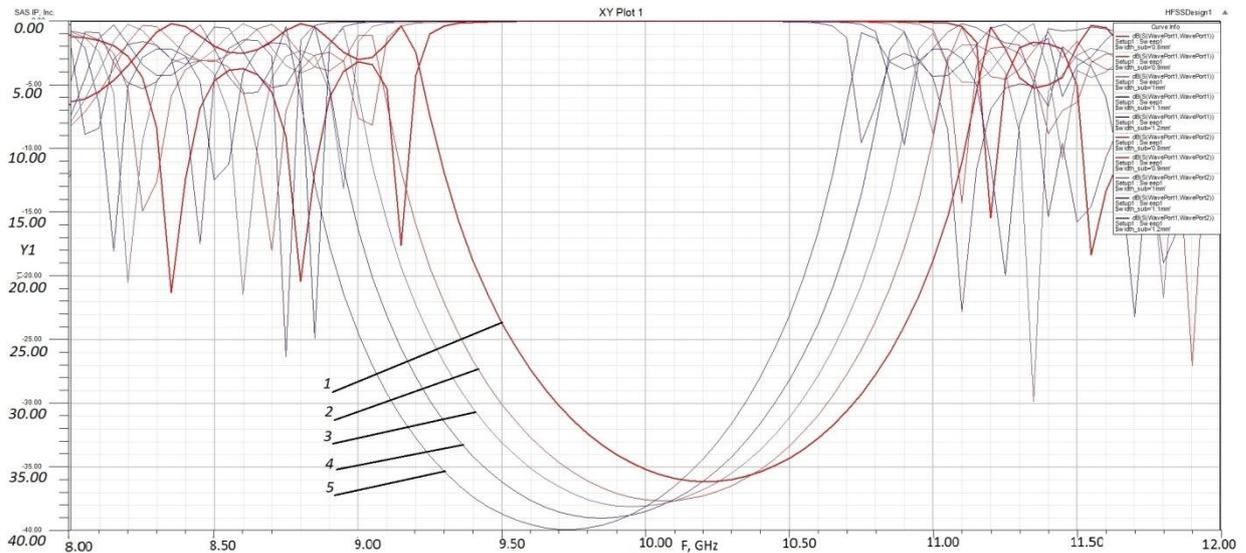


Рисунок 2.4 – Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения фотонного кристалла при различной толщине подложки  $h$ , мм: 1– 0.8; 2–0.9; 3 – 1.0; 4 – 1.1; 5 – 1.2

Из результатов, представленных на рисунке 2.4, следует, что увеличение толщины подложки приводит к смещению АЧХ в область низких частот и углублению запрещенной зоны.

Рассматривалась зависимость коэффициентов пропускания и отражения фотонного кристалла, состоящего из 4 пластин длиной 13 мм, алюминиевым покрытием, толщиной 0.012 мм, с промежутком 21 мм, толщина подложки из поликора 1 мм, при изменении ширине щели от 1 мм до 5 мм с шагом 1 мм. (Рис. 2.5)

Из результатов, представленных на рисунке 2.5 следует, что при уменьшении ширины щели АЧХ фотонного кристалла смещается в низкочастотную область, увеличивается глубина запрещенных зон, а также изменяется их количество.

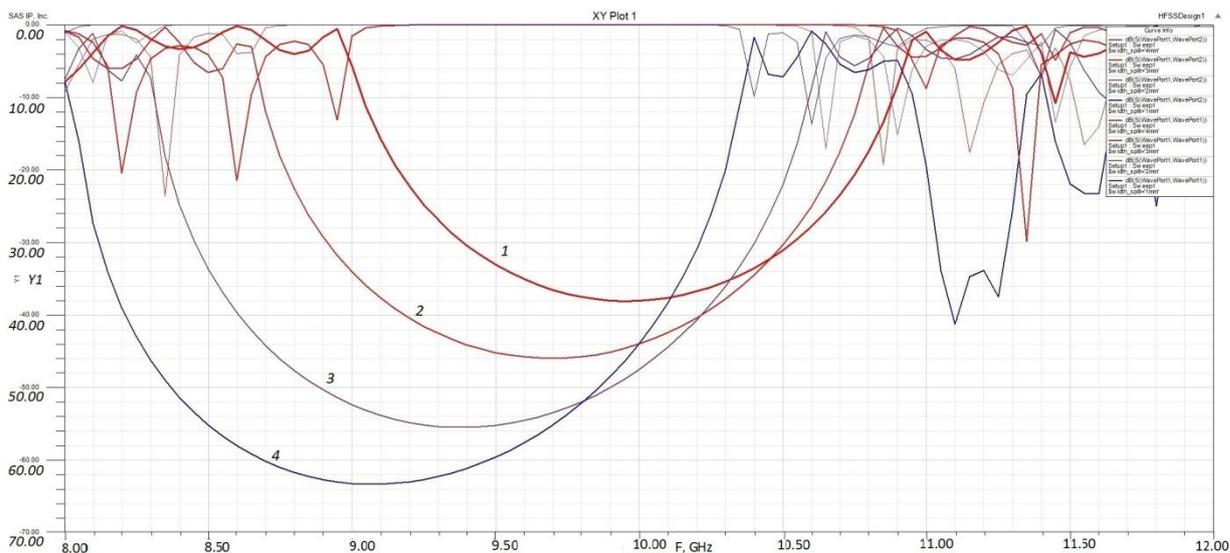


Рисунок 2.5 – Зависимости коэффициентов отражения и прохождения фотонного кристалла при различной ширине щели  $d$ , мм: 1 – 4; 2 – 3; 3 – 2; 4 – 1.

**Исследование амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла с нарушением в виде изменённого расстояния между центральными отрезками щелевых линий, образующих фотонный кристалл.** При внесении нарушения в виде изменения расстояния между центральными отрезками щелевых линий в структуру кристалла в запрещенной зоне появляется пик, называемый “окно прозрачности”.

Исследовалась зависимость коэффициентов отражения и прохождения для структуры, состоящей из 4 пластин длиной 13 мм, алюминиевым покрытием, толщиной 0.012 мм, промежутком между пластинами 21 мм, ширина щели 4 мм, толщина подложки из поликора 1 мм, при изменении ширины нарушенного слоя в диапазоне от 25 мм до 29 мм с шагом 2мм. (Рис.2.6)

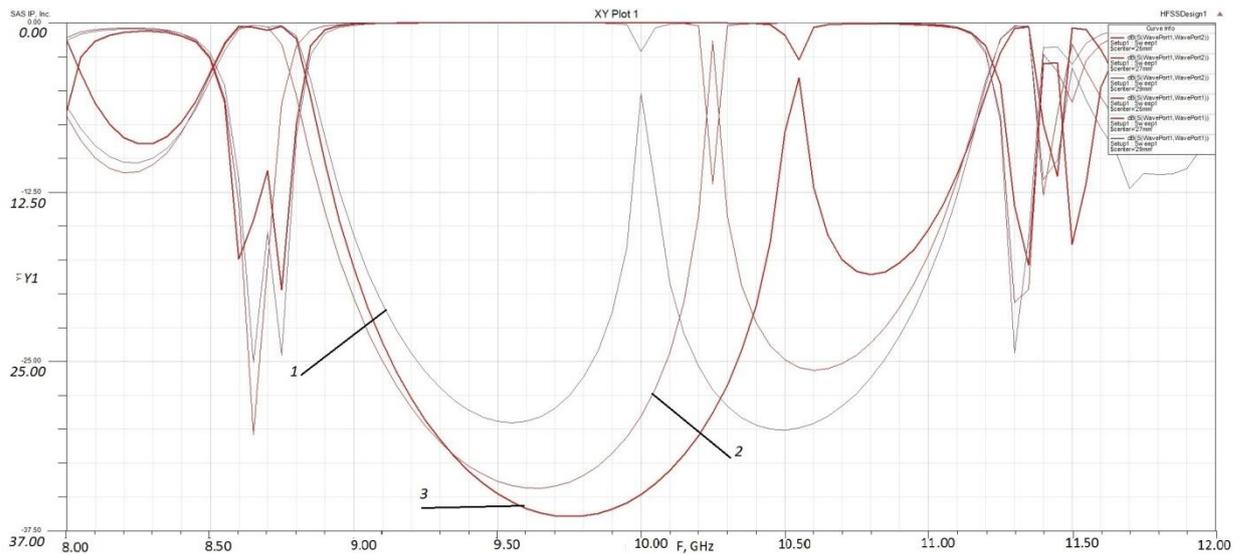


Рисунок 2.6 – Зависимости коэффициентов отражения и прохождения фотонного кристалла при различной величине нарушения  $t$ , мм: 1 – 29; 2 – 27; 3 – 25.

Из результатов, представленных на рисунке 2.6 можно видеть, что с увеличением ширины нарушенного слоя окно прозрачности смещается в низкочастотную область, а при уменьшении – в высокочастотную.

**Экспериментальное исследование СВЧ фотонных кристаллов на основе волноводно-щелевых линий передачи.** В ходе эксперимента была создана модель фотонный кристалл, состоящий из отрезков волноводно-щелевых линий передачи, имеющих следующие параметры: толщина поликоровой подложки 1 мм, диэлектрическая проницаемость поликора 9.6, длина пластин поликора 23 мм, толщина алюминиевого слоя 0.012 мм, ширина щели 4 мм.

Частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения получены при помощи векторного анализатора цепей *N5230A Agilent PNA-L Network Analyzer* (рис.3.1).

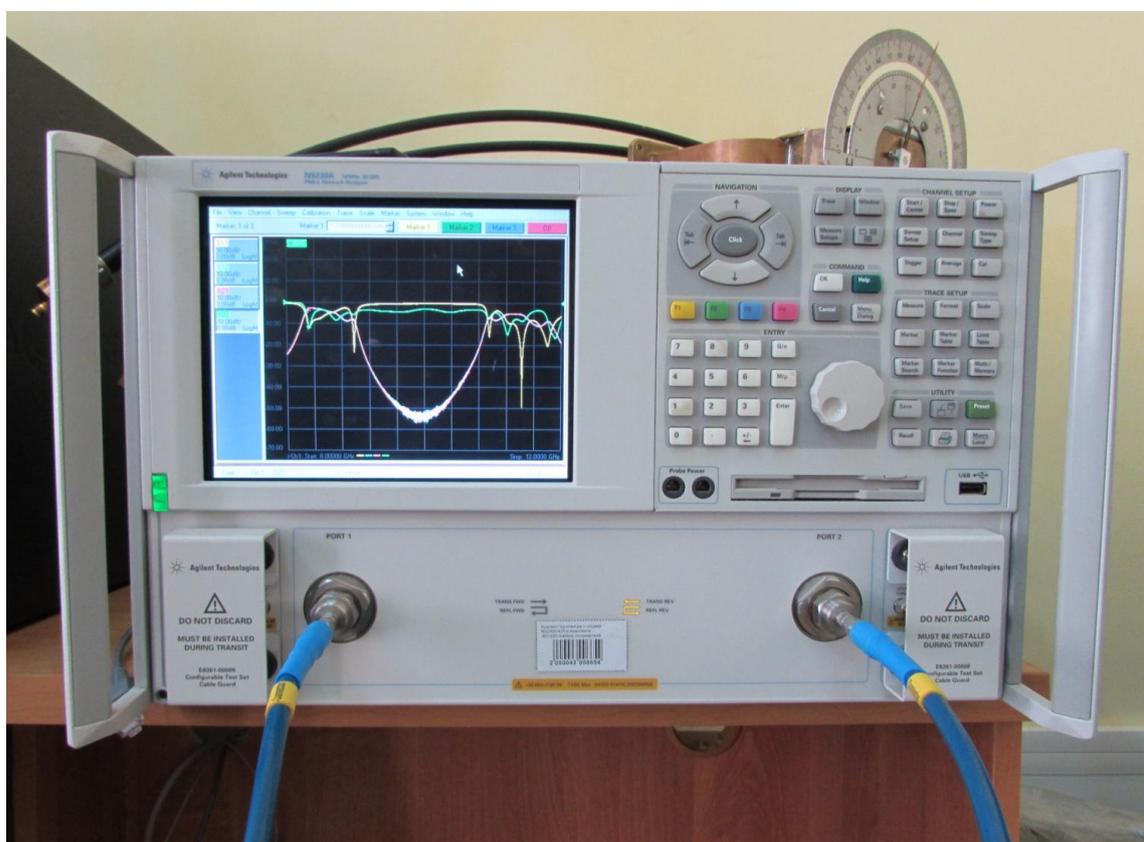


Рисунок 3.1 – Векторный анализатор цепей *N5230A Agilent PNA-L Network Analyzer* Исследование амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла в зависимости от расстояния между отрезками волноводно-щелевых линий передачи

Исследовалась зависимость АЧХ для различных расстояний  $W$  между отрезками щелевых линий передачи ( рис.3.2; 3.3; 3.4; 3.5); 1–8 мм, 2–10мм, 3–12 мм и 4–20 мм)).

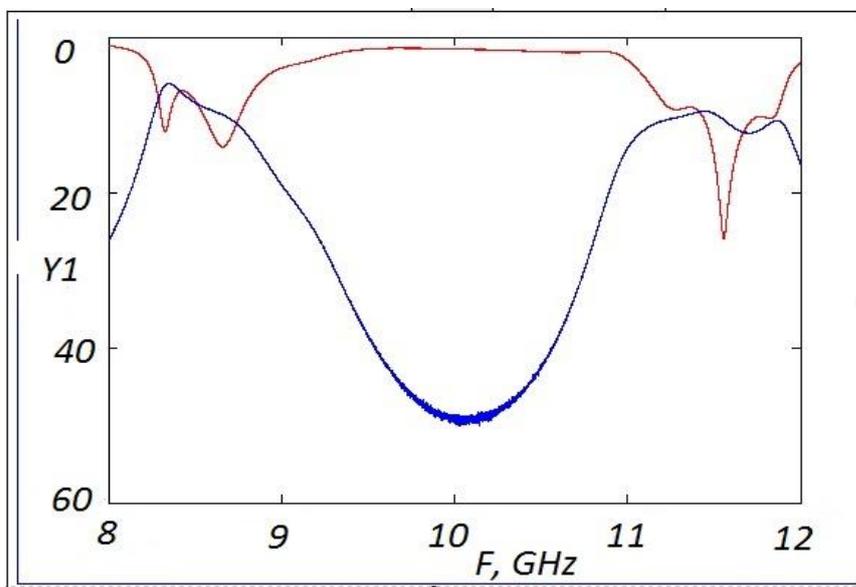


Рисунок 3.2 Теоретическая зависимость АЧХ СВЧ-фотонного кристалла от расстояния между отрезками полосковых линий передачи  $W$ , 8

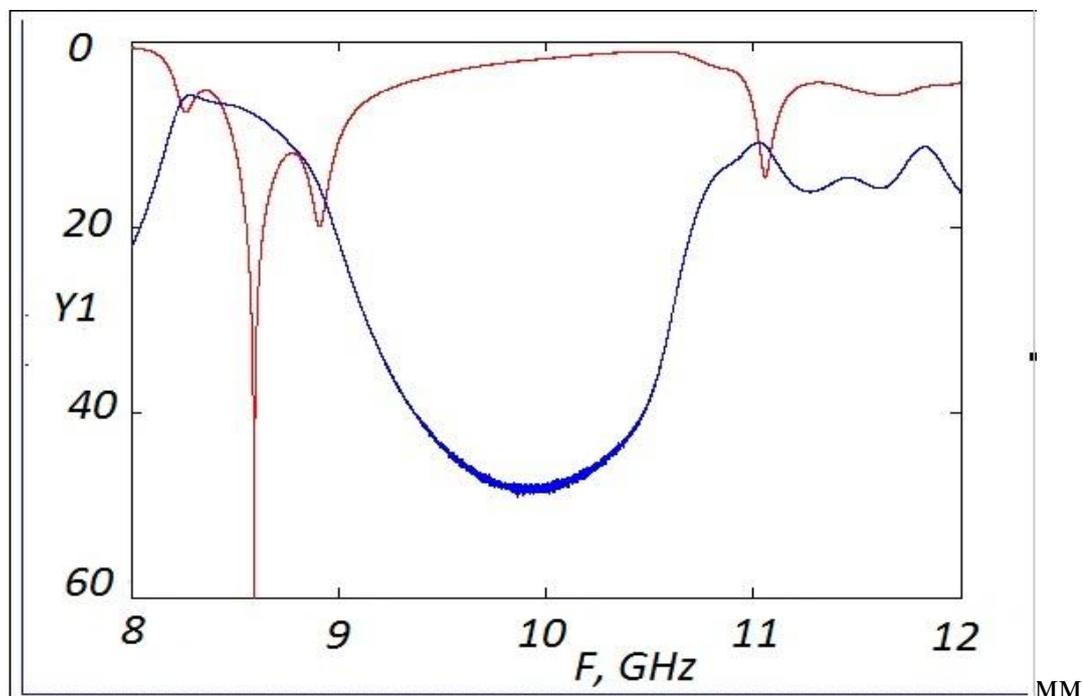


Рисунок 3.3 Теоретическая зависимость АЧХ СВЧ-фотонного кристалла от расстояния между отрезками полосковых линий передачи  $W$ , 10 мм

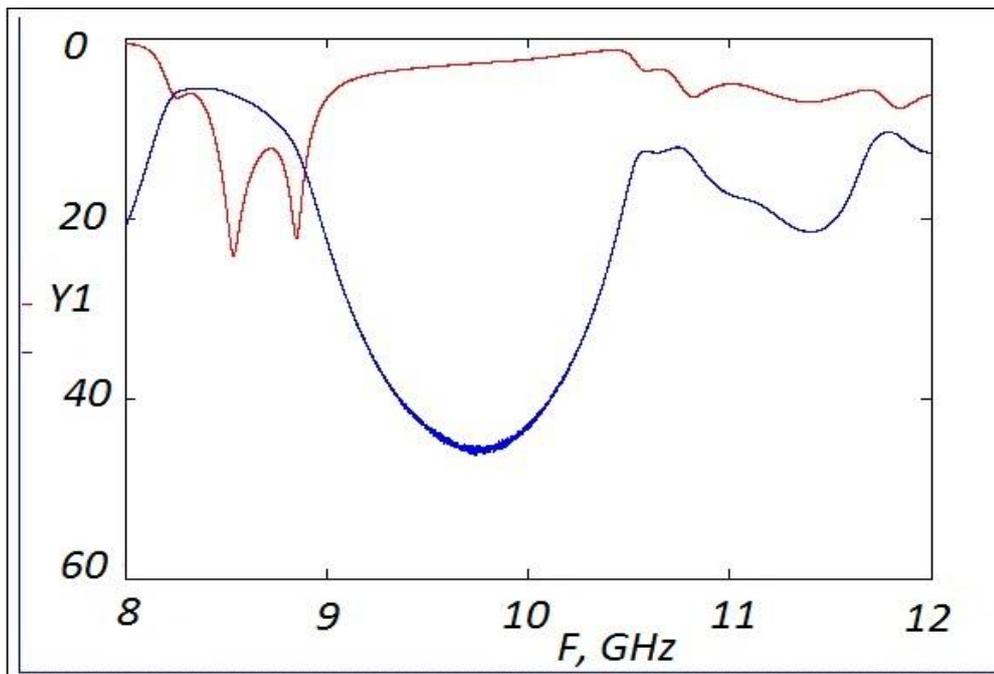


Рисунок 3.4 Теоретическая зависимость АЧХ СВЧ-фотонного кристалла от расстояния между отрезками полосковых линий передачи  $W$ , 12 мм

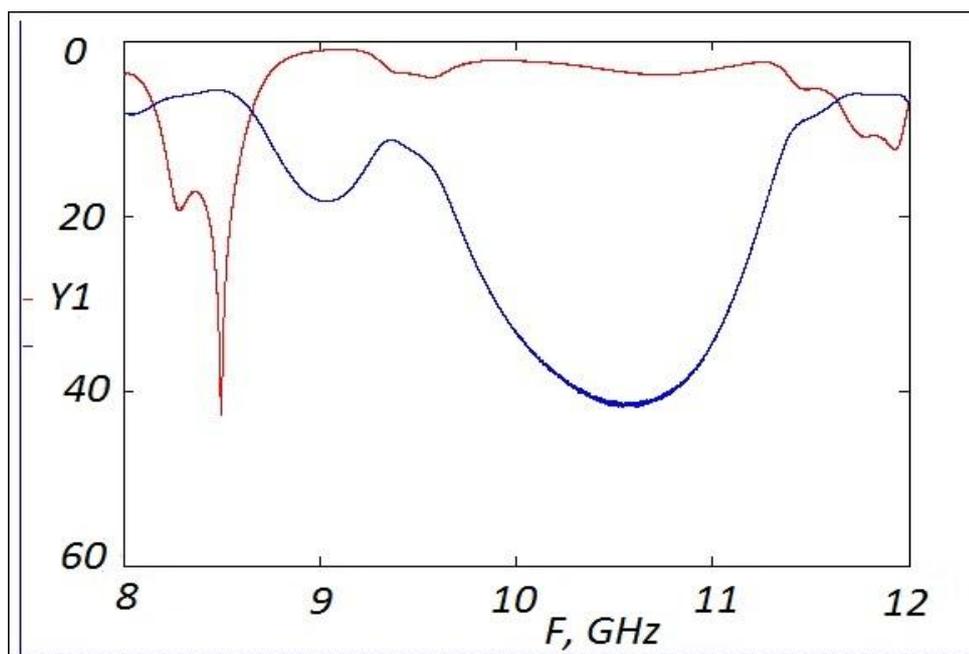


Рисунок 3.5 Теоретическая зависимость АЧХ СВЧ-фотонного кристалла от расстояния между отрезками полосковых линий передачи  $W$ , 20 мм

Из результатов эксперимента, представленных на рисунках (3.2; 3.3; 3.4; 3.5) следует, что созданный фотонный кристалл на основе волноводно-

щелевых линий передачи образует разрешенные и запрещенные зоны в диапазоне частот 8–12 ГГц.

Подтверждены выявленные в теоретическом исследовании закономерности изменения АЧХ в зависимости от расстояния между отрезками, а именно: с увеличением длины промежутка между поликоровыми пластинами с алюминиевым покрытием АЧХ фотонного кристалла смещается в низкочастотную область, а также углубляется запрещенная зона.

Отличие количественных значений полученных АЧХ обусловлено неидеальностью созданной структуры, выражающейся в отличии параметров экспериментальной структуры от принятых в теоретической модели.

**Исследование амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла с нарушением в виде изменённого расстояния между центральными отрезками щелевых линий, образующих фотонный кристалл.** Исследовалась амплитудно-частотная характеристика фотонного кристалла для различных размеров нарушения, представляющего собой отрезок волновода между центральными отрезками щелевых линий передачи (рис.3.6; 3.7; 3.8) 1–5 мм, 2–17мм и 3–20 мм).

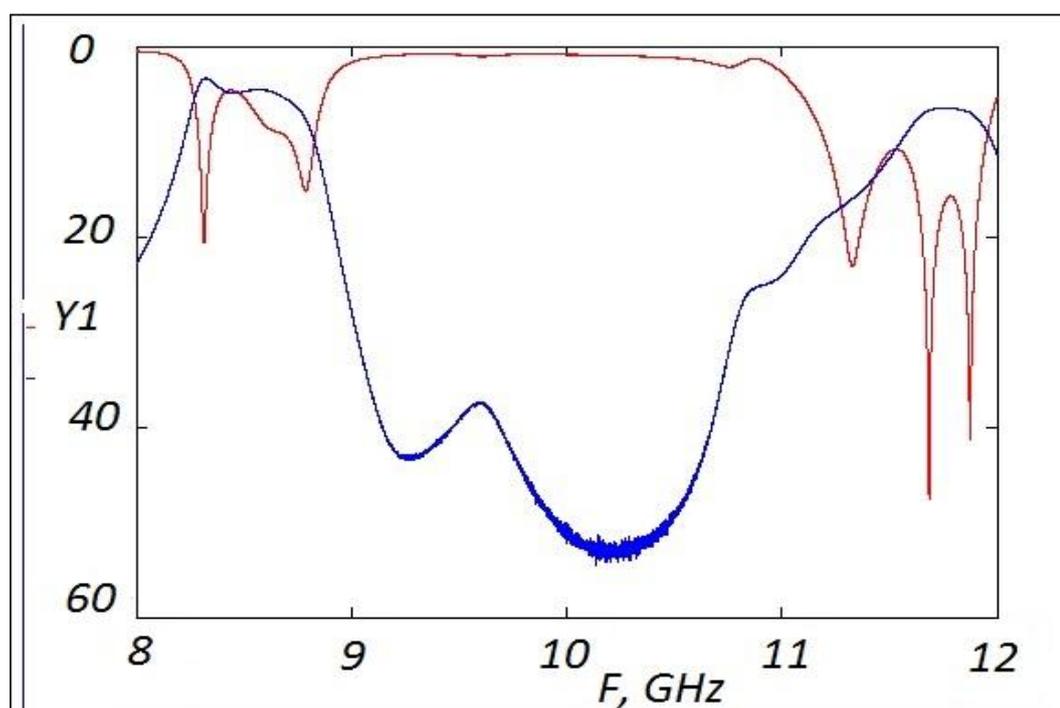


Рисунок 3.6 Экспериментальная АЧХ СВЧ фотонного кристалла при размере нарушения  $t$ , 5 мм

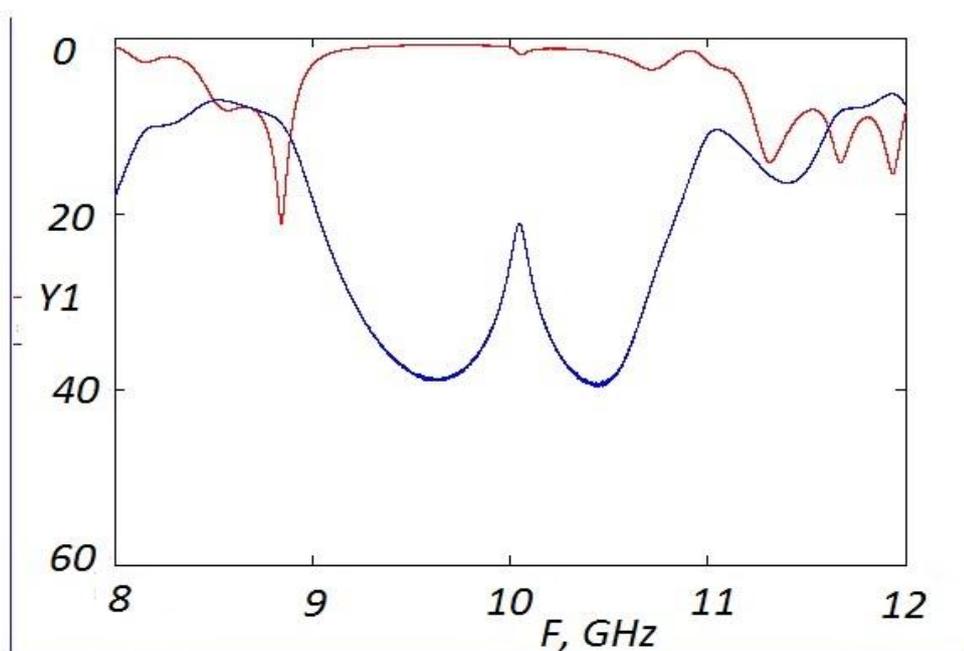


Рисунок 3.7 Экспериментальная АЧХ СВЧ фотонного кристалла при размере нарушения  $t$ , 17 мм

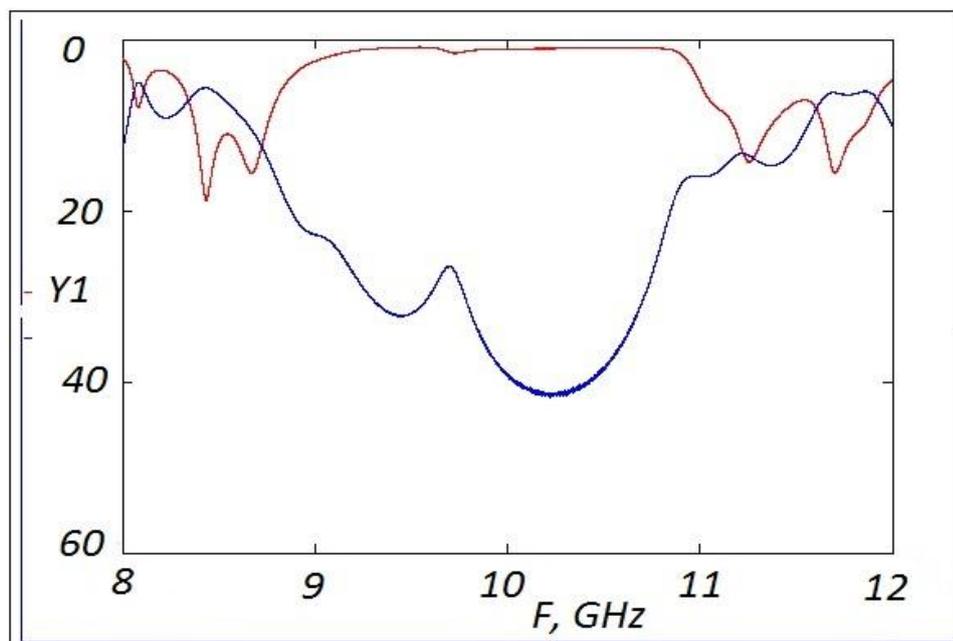


Рисунок 3.8 Экспериментальная АЧХ СВЧ фотонного кристалла при размере нарушения  $t$ , 20 мм

Из результатов, представленных на рисунках 3.6; 3.7; 3.8, следует, что созданный фотонный кристалл на основе волноводно-щелевых линий передачи образует разрешенные и запрещенные зоны в диапазоне частот 8-12 ГГц. При создании нарушения в виде изменённого расстояния между

центральными отрезками щелевых линий, образующих фотонный кристалл, в запрещенной зоне образуется пик пропускания – «окно прозрачности».

Подтверждены выявленные в теоретическом исследовании закономерности изменения АЧХ в зависимости от длины нарушенного слоя, а именно: с увеличением ширины нарушенного слоя окно прозрачности смещается в низкочастотную область, а при уменьшении – в высокочастотную.

Отличие количественных значений полученных АЧХ обусловлено неидеальностью созданной структуры, выражающейся в отличии параметров экспериментальной структуры от принятых в теоретической модели.

**Заключение.** Был проведен анализ электродинамических характеристик соответствующих для щелевых линий передачи, применяемых в СВЧ-диапазоне.

При помощи системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS, была построена модель фотонного кристалла в виде волноводно-щелевой линии.

Исследованы амплитудно-частотные характеристики структуры при различном расстоянии между отрезками волноводно-щелевых линий передачи, а также при различной длине нарушенного слоя между центральными отрезками волноводно-щелевых линий передачи.

Проведен анализ амплитудно-частотных характеристик фотонного кристалла в виде волноводно-щелевой линии передачи при различных параметрах диэлектрической подложки, а именно, разных длинах и различной ширине щели отрезков волноводно-щелевых линий передачи.

Был создан макет фотонного кристалла на основе волноводно-щелевой линии передачи.

Проведено экспериментальное исследование созданного фотонного кристалла в виде волноводно-щелевой линии передачи.

Установлено, что увеличение толщины подложки приводит к смещению АЧХ в область низких частот, глубина запрещенной зоны уменьшается, при увеличении длины промежутка между поликоровыми пластинами с алюминиевым покрытием АЧХ фотонного кристалла смещается в низкочастотную область, а также углубляется запрещенная зона, при уменьшении ширины щели АЧХ фотонного кристалла смещается в низкочастотную область, увеличивается глубина запрещенных зон, с увеличением ширины нарушенного слоя окно прозрачности смещается в низкочастотную область, а при уменьшении – в высокочастотную.