

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

**Влияние параметров элементов структуры фотонного кристалла
на амплитудно-частотные характеристики коэффициентов прохождения
и отражения СВЧ-излучения**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ
студента 4 курса
по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
факультета нано- и биомедицинских технологий

Сафронова Александра Викторовича

Научные руководители

профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

подпись, дата

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

подпись, дата

Саратов 2018

Введение

В настоящее время интенсивно исследуются свойства, так называемых, фотонных кристаллов, амплитудно-частотные характеристики которых обладают разрешенными и запрещенными зонами [1–6]. В области частот, соответствующих разрешенным зонам, фотонные кристаллы прозрачны для распространяющегося электромагнитного излучения, а в области частот, соответствующих запрещенным зонам, фотонные кристаллы отражают электромагнитное излучение. Аналогичная ситуация, наблюдается в полупроводниковых кристаллах, в которых вследствие периодического расположения атомов возникают разрешенные и запрещенные зоны для энергетических состояний электронов.

Фотонные кристаллы созданы в СВЧ-, оптическом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах. В сверхвысокочастотном диапазоне фотонный кристалл может быть изготовлен как с помощью волноводов с диэлектрическим заполнением [7, 8], так и с использованием плоских линий передачи с периодически изменяющейся структурой полоска [9]. Для СВЧ-диапазона создать фотонный кристалл технологически достаточно просто.

СВЧ фотонные кристаллы были использованы для разработки высоконаправленных антенн, СВЧ-фильтров, улучшения характеристик СВЧ-детекторов, усилителей измерительного оборудования и различного рода датчиков и т.д. [10–13]. Характеристики СВЧ фотонных кристаллов могут быть рассчитаны с точностью, позволяющей обеспечить хорошее совпадение с экспериментом, и так же возможность модифицировать структуры Поэтому

Целью настоящей работы являлось теоретическое и экспериментальное исследование влияния параметров элементов структуры фотонного кристалла на амплитудно-частотные характеристики коэффициентов прохождения и отражения СВЧ-излучения.

1.1 Структура фотонных кристаллов

Фотонные кристаллы – это «диэлектрические или полупроводниковые наноразмерные структуры с периодически чередующимися областями с различными свойствами материалов – так называемые фотонные кристаллы или материалы с фотонными запрещенными зонами (PBG), в которых за счет синфазного послойного отражения (брэгговского отражения) возникают запрещенные зоны, то есть диапазоны частот, в которых электромагнитное, в частности оптическое излучение, не может распространяться»

Таким образом, условие брэгговского отражения в структурах с периодической неоднородностью является определяющей характеристикой фотонных кристаллов[2]. Наличие запрещенной зоны в фотонных кристаллах в оптическом диапазоне длин волн позволило Э. Яблоновичу обосновать возможность подавления спонтанной эмиссии в лазерах при их помещении в резонатор на основе трехмерной фотонной структуры [8], то есть фотонный кристалл выполнял функцию оптического фильтра, препятствующего возникновению спонтанной эмиссии в лазерах. . Можно сказать, что фотонный кристалл является сверхрешеткой, в которой создается дополнительное поле с периодом, превышающий период основной решетки. И именно из-за этого для фотонов такое поле будет подвергаться периодическим изменением коэффициента преломления среды в одном, двух или трех измерениях (1D-, 2D-, 3D-фотонные структуры соответственно). Если период фотонной сверхрешетки сравним с длиной электромагнитной волны, то поведение фотонов будет в значительной степени отличается от их поведения в решетке обычного кристалла, узлы которого находятся друг от друга на расстоянии, гораздо меньшем, чем длины волны электромагнитного излучения. Поэтому такие решетки и получили название – фотонные кристаллы. Создавая структурные дефекты в таком кристалле, можно локализовать кванты электромагнитного излучения в запрещенной зоны, а затем особым способом использовать свойства таких квантов. Частотный диапазон и другие параметры такого структурного дефекта можно задавать достаточно просто.

Фотонные кристаллы по типу пространственной структуры делятся на одномерные, двумерные и трехмерные.

1.1 Одномерные фотонные кристаллы

1D фотонного кристалла, в которой диэлектрическая структура будет периодически изменяться по диэлектрической проницаемости в одном направлении наглядно продемонстрирована на Рис. 1. В этом рисунке символом Λ будет означать период изменения коэффициента преломления, n_1 и n_2 - показатели преломления двух материалов (но их может присутствовать любое число материалов если рассматривать общий случай).[8] Фотонный кристалл при этом представлялся в виде чередующихся однородных слоёв с различными диэлектрическими проницаемостями и свои свойства они проявляют в одном пространственном направлении, перпендикулярном слоям[28]

1.2. Двумерные фотонные кристаллы

2D-фотонные кристаллы, в которых диэлектрическая структура, будет периодически изменяться по диэлектрической проницаемости в двух пространственных направлениях наглядно продемонстрирована на Рис. 2. Смотря на этот рисунок мы можем увидеть, что фотонный кристалл был создан прямоугольными областями с коэффициентом преломления n_1 , которые находятся непосредственно в среде с коэффициентом преломления n_2 . Области с коэффициентом преломления n_1 при этом будут упорядочены в двумерной кубической решетке. [26] Данные ФК(Фотонные кристаллы) могут проявлять свои свойства в двух разных пространственных направлениях, и форма областей с коэффициентом преломления n_1 может быть любой формы (окружность, эллипс, произвольная и т.д.). То же самое относится к кристаллической решётке, она может быть другой, не только кубической, как показан на рисунке приведенном ниже. а например прямоугольной

1.1.3 Трехмерные фотонные кристаллы

Трехмерность фотонного кристалла, означает, что диэлектрическая структура, будет периодически изменяться по диэлектрической проницаемости трех пространственных направлениях. Если фотонные кристаллы распространяются в трех направления пространства, то фотонные кристаллы мы можем представить, как некий массив объемных областей (сфер, кубов и т.д.), упорядоченных в трехмерной кристаллической решётке. Распространение излучения в фотонных кристаллах различной размерности будет определяется условием максимума интерференции света, рассеянного на узлах, и зависит от угла между направлением волнового вектора и осями дифракционной решетки - фотонного кристалла.

2 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

2.1 Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик слоистой структуры двухкомпонентного фотонного кристалла

Как известно при создании нарушения в фотонном кристалле в виде измененной толщины или диэлектрической проницаемости одного из слоев фотонного кристалла в запрещенной зоне на АЧХ фотонного кристалла появляется резонансная особенность, называемая дефектной модой.

Представляет интерес исследовать влияние местоположения нарушения в волноводном двухкомпонентном фотонном кристалле на вид АЧХ фотонного кристалла с дефектной модой.

При помощи программного обеспечения Mathcad с использованием метода матриц передачи было проведено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик исследуемой слоистой структуры. Первый и последний слои для 15-слойного фотонного кристалла выполнены из поликора (толщиной 1 мм, $\epsilon = 9.6$), центральный слой представляет собой фторопласт (толщиной 4.2 мм, $\epsilon = 2.0$).

Были выполнены расчеты АЧХ волноводного двухкомпонентного фотонного кристалла при различном положении нарушения в фотонном кристалле. На рис. 2.1–2.3 представлены АЧХ волноводного двухкомпонентного фотонного кристалла с различным местоположением нарушения в фотонном кристалле.

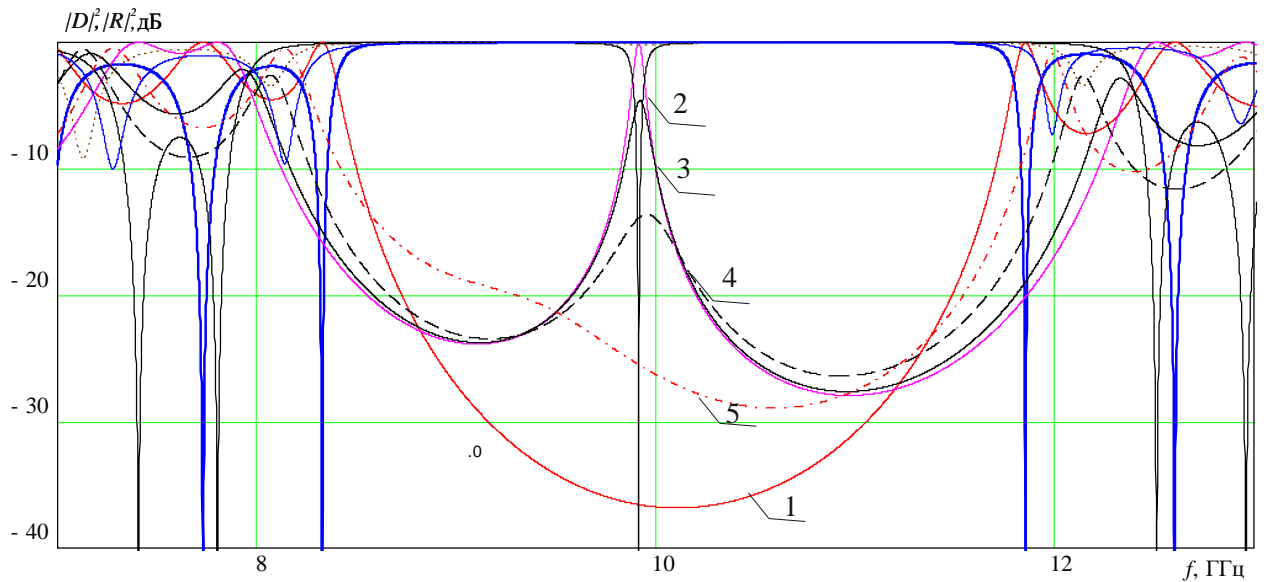


Рисунок 2.1 Теоретически рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента прохождения и отражения исследуемой 15-слойной структуры 1–без нарушений, при нарушении равном 3 мм: 2– в 8 слое, 3– в 6 слое, 4 – в 4 слое, 5– в 2 слое

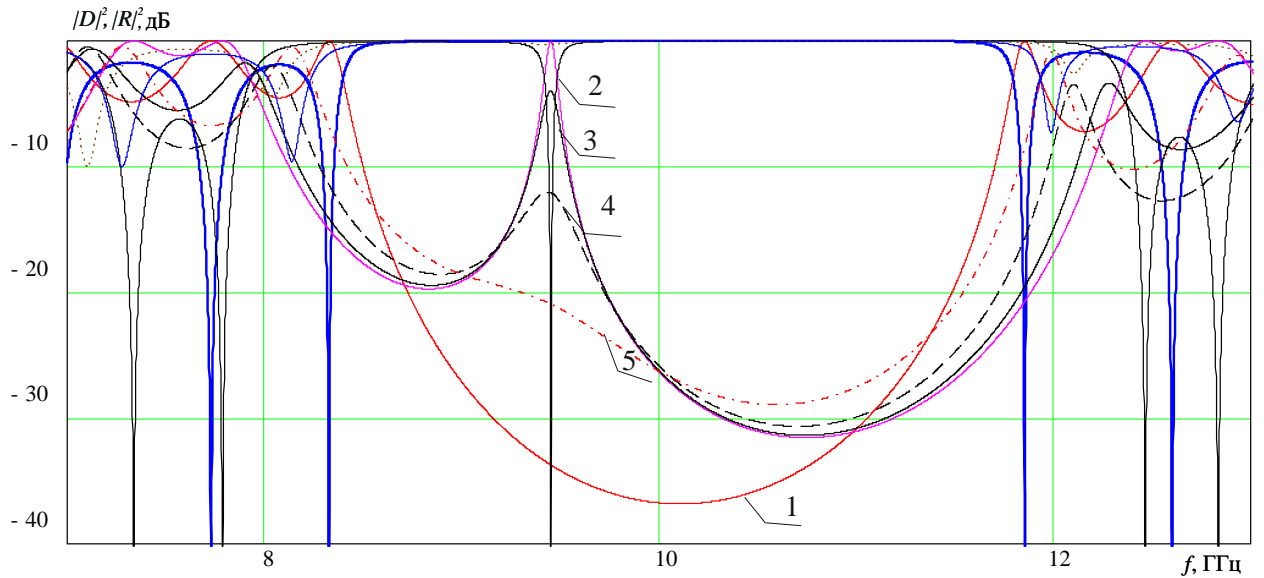


Рисунок 2.2 Теоретически рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента прохождения и отражения исследуемой 15-слойной структуры 1–без нарушений, при нарушении равном 4 мм: 2– в 8 слое, 3– в 6 слое, 4 – в 4 слое, 5– в 2 слое

.2 Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик слоистой структуры трехкомпонентного фотонного кристалла

Представляет интерес исследовать влияние местоположения нарушения в волноводном трехкомпонентном фотонном кристалле на вид АЧХ фотонного кристалла с дефектной модой.

При помощи программного обеспечения Mathcad с использованием метода матриц передачи было проведено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик исследуемой слоистой структуры состоящей из трех компонент. поликора (толщиной 2мм, $\epsilon = 9.6$), фторопласта 4.2 мм , $\epsilon = 2$) и воздуха (толщиной 20мм , $\epsilon = 1$). Первый и последний слои фотонного кристалла выполнены из поликора. Количество слоев фотонного кристалла варьировалось от 7 до 13.

На рис. 2.6- 2.7 представлены АЧХ волноводного трехкомпонентного фотонного кристалла с различным числом слоев. Представленные трехкомпонентные фотонные кристаллы, состоящие из 7-ми, 9-ти и 13-ти слоев, обладали центрами инверсии, которые находились в центральном слое.

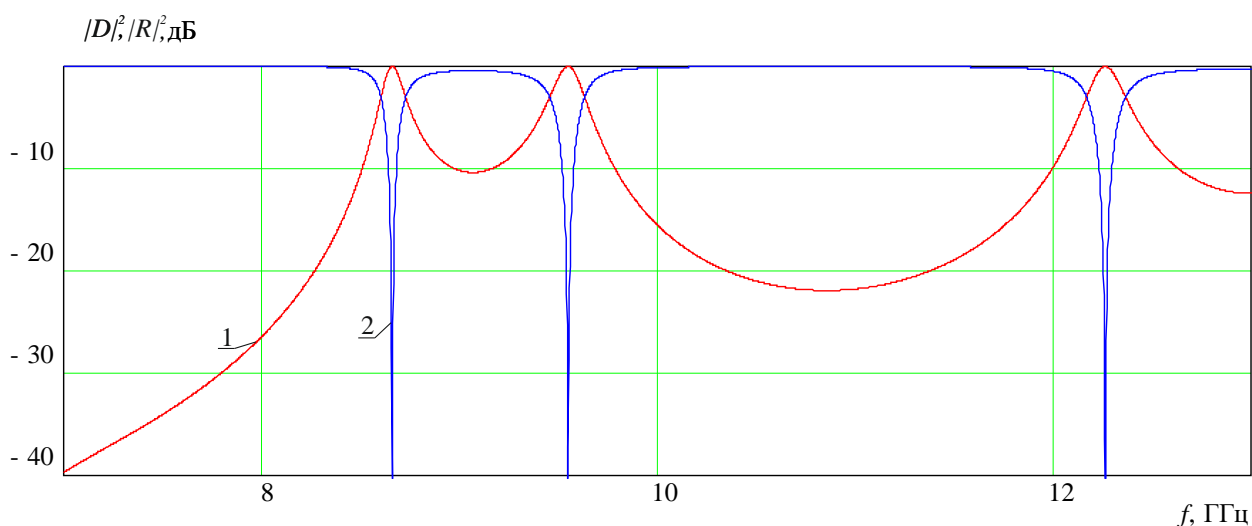


Рисунок 2.6 Теоретически рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента (1) прохождения и (2) отражения исследуемой 7-слойной структуры без нарушений

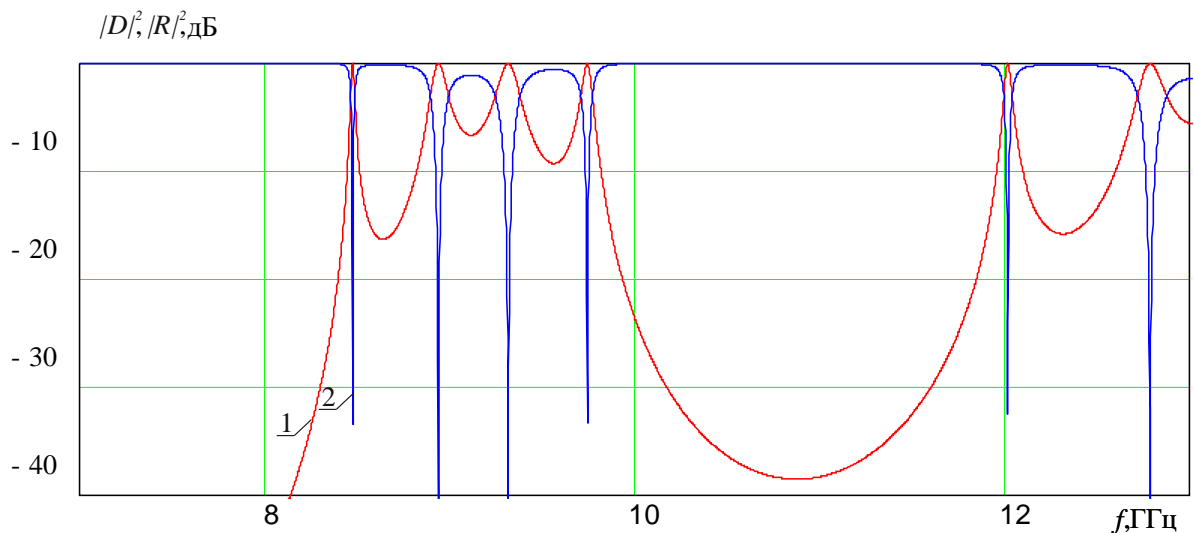


Рисунок 2.8 Теоретически рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента (1)прохождения и (2)отражения исследуемой 13-слойной структуры без нарушений.

На рис. 2.9 представлены АЧХ 13-ти слойного трехкомпонентного волноводного фотонного кристалла с нарушением в 7-м центральном слое.

Как следует из результатов расчета наличие нарушения в центральном слое приводит к возникновению дефектной моды в запрещенной зоне фотонного кристалла.

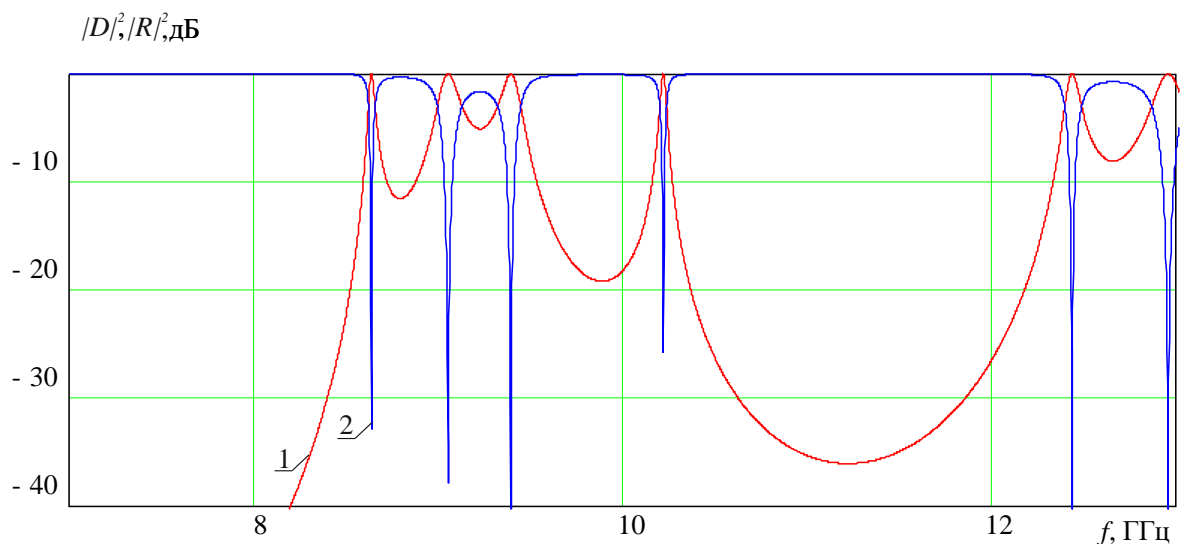


Рисунок 2.9 Теоретически рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента (1)прохождения и (2)отражения исследуемой 13-слойной структуры при нарушении равном 5 мм: в 7 слое

Были выполнены расчеты АЧХ 13-ти слойного трехкомпонентного фотонного кристалла при различном положении нарушения в фотонном кристалле. На рис. 2.10–2.12 представлены АЧХ волноводного фотонного кристалла с различным местоположением нарушения в фотонном кристалле при разных толщинах нарушенного слоя.

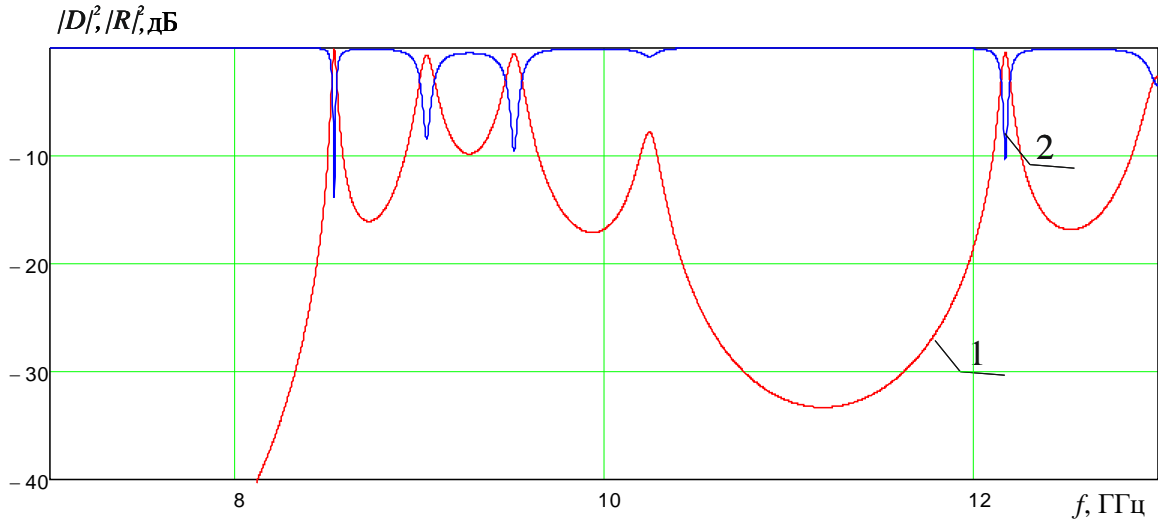


Рис. 2.10 Теоретически рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента прохождения(1) и отражения (2) исследуемой 13-слойной структуры при нарушении равном 5 мм: в 10 слое,

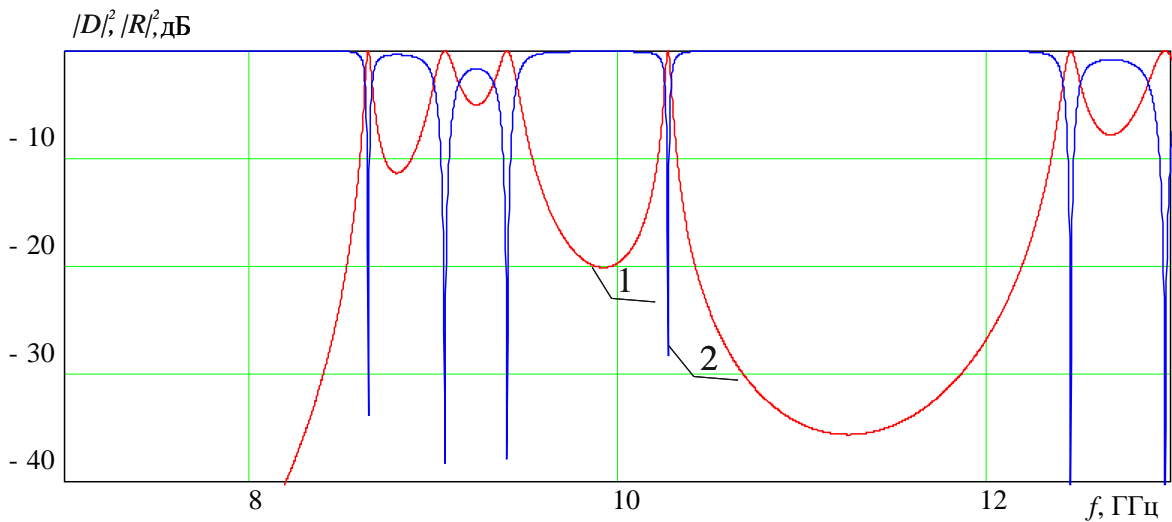


Рис.2.11 Теоретически рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента прохождения(1) и отражения(2) исследуемой 13-слойной структуры , при нарушении равном 4 мм в 7 слое

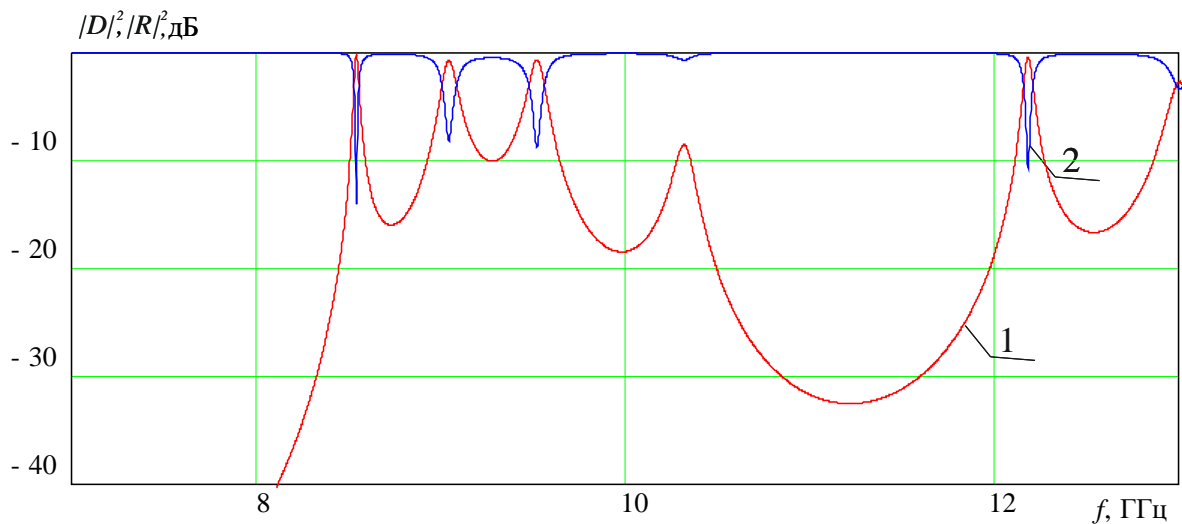


Рис.2.12 Теоретически рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента прохождения(1) и отражения (2) исследуемой 13-слойной структуры , при нарушении равном 4 мм в 10 слое

Как следует из результатов расчета при наличии нарушения периодичности фотонной структуры в виде изменения толщины d центрального (седьмого) слоя поликора приводит к появлению в запрещённой зоне фотонного кристалла пика пропускания, положение которого определяется размером этого нарушения.

При смещении нарушения из центрального слоя наблюдается значительное уменьшение коэффициента пропускания на частоте дефектной моды. При этом наблюдается смещение дефектной моды в высокочастотную область.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно результатам, проведенной оптимизации и компьютерного моделирования, были собраны трехкомпонентные слоистые структуры без нарушения и с нарушением в виде измененной толщины одного из слоев фотонного кристалла в запрещенной зоне.

На рис. 3.2 показаны амплитудно-частотная характеристика 13-слойного фотонного кристалла состоящего из фторопласта (толщиной 4.2 мм, $\epsilon = 2$), воздуха (толщиной 20 мм, $\epsilon = 1$) и поликора (толщиной 2 мм, $\epsilon = 9.6$). Первый и последний слой для 13-слойника выполнены из поликора, центральный слой представляет собой поликор.

Результаты эксперимента хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования.

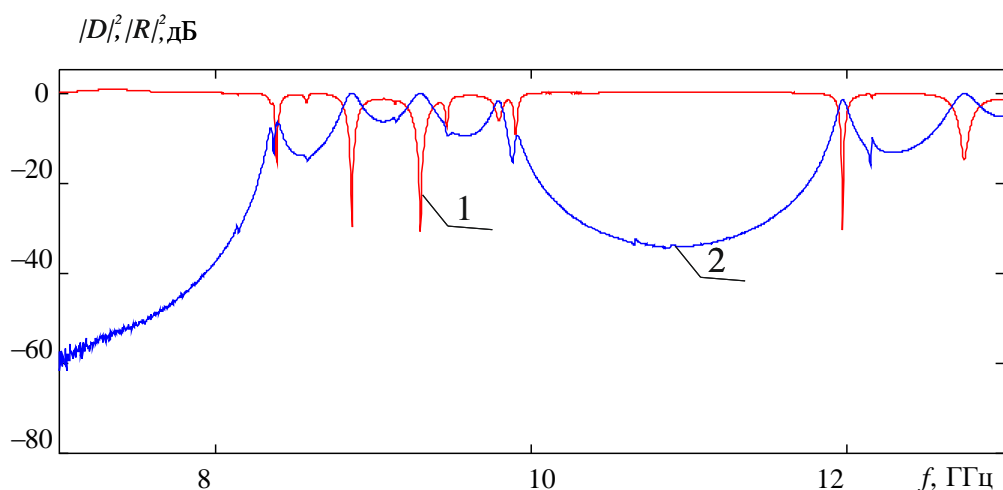


Рис. 3.2 Экспериментально измеренные амплитудно-частотные зависимости коэффициента прохождения(1) и отражения(2) исследуемой 13-слойной структуры без нарушений.

При создании нарушения в фотонном кристалле в виде измененной толщины поликора (толщина 5 мм) в центральном слое на АЧХ фотонного кристалла в запрещенной зоне наблюдается возникновение дефектной моды (см. рис. 3.3).

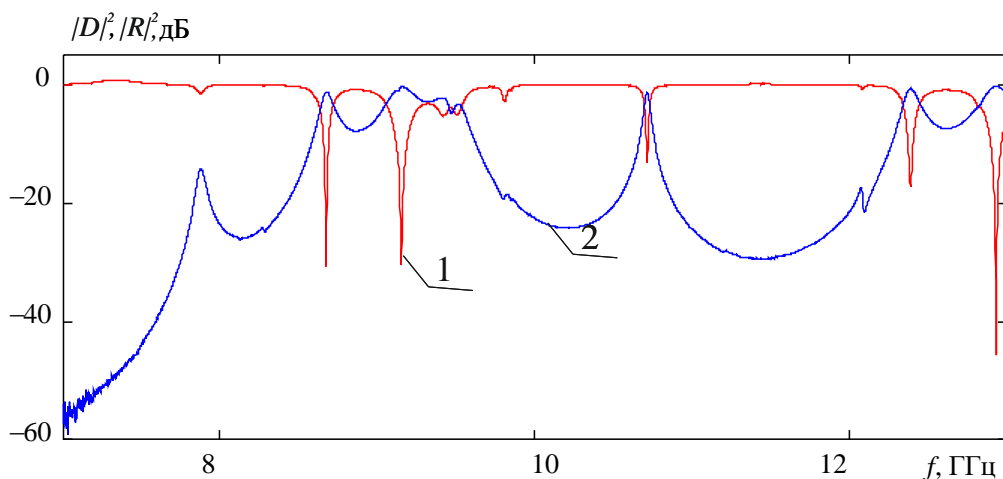


Рис. 3.3 Экспериментально измеренные амплитудно-частотные зависимости коэффициента (1) прохождения и (2) отражения исследуемой 13-слойной структуры с нарушением в 7-м слое

При изменении местоположения нарушения в волноводном фотонном кристалле АЧХ фотонного кристалла принимает вид, представленный на рис. 3.3.

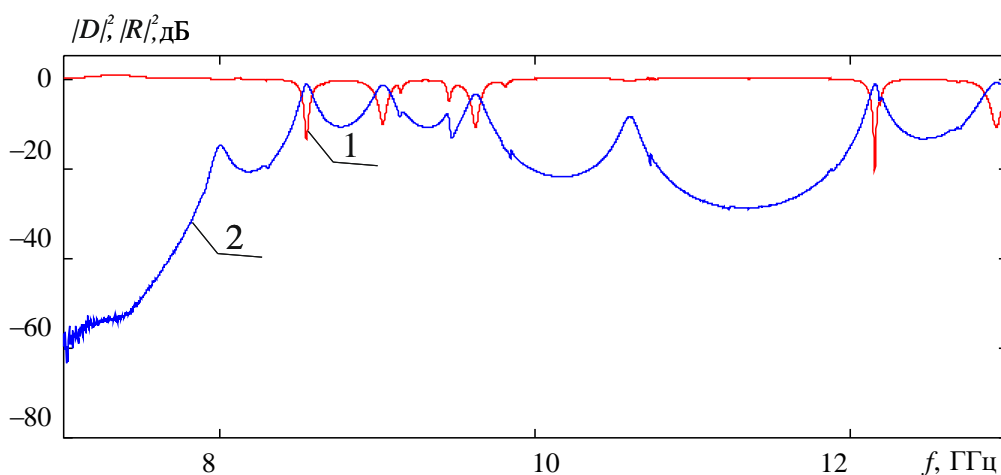


Рис. 3.4 Экспериментально измеренные амплитудно-частотные зависимости коэффициента (1)прохождения и (2)отражения исследуемой 13-слойной структуры при нарушении равном 5 мм в 10м слое

Как следует из результатов эксперимента (рис. 3.3, 3.4), при нарушении в центральном слое наблюдается уменьшение коэффициента пропускания на частоте дефектной моды. При смещении нарушения из центрального слоя наблюдается значительное уменьшение коэффициента пропускания на частоте дефектной моды. При этом наблюдается смещение дефектной моды в высокочастотную область.

Заключение

В ходе выполнения бакалаврской работы были получены следующие результаты

1 Выполнено компьютерное моделирование АЧХ коэффициентов прохождения и отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с двухкомпонентными фотонными кристаллами с нарушением периодичности структуры.

2 Исследовано влияние местоположения нарушения в виде слоя измененной толщины одного из слоёв волноводного фотонного кристалла на вид АЧХ двухкомпонентного фотонного кристалла с дефектной модой.

3 Установлено, что при смещении нарушения из центрального слоя наблюдается значительное уменьшение коэффициента пропускания на частоте дефектной моды. При этом наблюдается смещение дефектной моды в высокочастотную область.

4 Выполнено компьютерное моделирование АЧХ коэффициентов прохождения и отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с трехкомпонентными фотонными кристаллами с нарушением периодичности структуры.

5 Исследовано влияние местоположения нарушения в виде слоя измененной толщины одного из слоёв волноводного фотонного кристалла на вид АЧХ трехкомпонентного фотонного кристалла с дефектной модой.

6 Установлено, что при смещении нарушения из центрального слоя наблюдается значительное уменьшение коэффициента пропускания на частоте дефектной моды трехкомпонентного фотонного кристалла. При этом наблюдается смещение дефектной моды в высокочастотную область.