

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра физики твердого тела

**Особенности АЧХ волноводного фотонного  
кристалла в СВЧ-диапазоне с несколькими типами  
примесных состояний**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 201 группы

направления 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Сафронова Александра Викторовича

Научный руководитель

профессор, д.т.н.

А. В. Скрипаль

\_\_\_\_\_

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

А. В. Скрипаль

\_\_\_\_\_

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Саратов 2020

## Введение

СВЧ периодические структуры, называемые СВЧ брэгговскими структурами или СВЧ фотонными кристаллами, привлекают интерес исследователей в связи с перспективой создания устройств с уникальными характеристиками в СВЧ диапазоне: измерительных устройств, согласованных нагрузок, различного типа фильтров и других [1–9].

В качестве периодических элементов в брэгговских структурах различными авторами использовались, в частности, диэлектрические слои, отрезки микрополосковых, копланарных, щелевых и волноводно-щелевых линии с изменяющимися геометрическими размерами [1, 5, 10–16].

При наличии дефекта в брэгговской структуре в её запрещенной зоне может возникать примесная мода колебаний [17–19]. При изменении параметров нарушений изменяется частотное положение примесной моды [13, 15, 17, 20–25].

Наличие явно выраженных запрещенных зон на характеристиках СВЧ фотонных кристаллов позволяет использовать их в качестве полосовых фильтров заграждения, однако вне полосы заграждения, то есть в области разрешенных зон, коэффициент прохождения имеет «изрезанную», то есть частотно зависимую характеристику. Фотонные кристаллы с нарушением периодичности структуры позволяют реализовать узкополосные фильтры пропускания [21], однако при реализации узкополосных фильтров заграждения на основе фотонных кристаллов с малой шириной запрещенной зоны коэффициент ослабления в полосе заграждения незначителен.

Поскольку отличительной особенностью фотонных кристаллов СВЧ-диапазона является высокая технологичность их производства, макроскопичность элементов, составляющих их конструкцию, возможность реализации фотонных кристаллов на основе упорядоченных массивов элементов различной формы и конфигурации [6, 9, 10–16], то реализация

системы на основе фотонных кристаллов с примесной модой затухания колебаний в разрешенной зоне фотонного кристалла, обеспечивающей создание как широкополосных, так и узкополосных фильтров заграждения с электрически управляемыми в широком диапазоне значений амплитудно-частотными характеристиками, представляет несомненный научный и практический интерес.

Среди современных электродинамических систем, обеспечивающих реализацию СВЧ-методов измерения параметров материалов и структур, можно выделить одномерные СВЧ фотонные кристаллы.

Методы, основанные на использовании одномерных фотонных кристаллов, позволяют определять комплексную диэлектрическую проницаемость твердых и жидких диэлектриков, толщину и удельную электропроводность полупроводниковых слоев и нанометровых металлических пленок, параметров композитов с включениями из углеродных нанотрубок [14].

Целью работы являлось исследование особенностей амплитудно-частотных характеристик волноводного фотонного кристалла в СВЧ-диапазоне с несколькими типами примесных состояний.

Магистерская работа содержит 5 глав:

- 1 Резонансные особенности АЧХ фотонных кристаллов в СВЧ-диапазоне
- 2 Теоретическая модель волноводного СВЧ фотонного кристалла
- 3 Результаты компьютерного моделирования АЧХ волноводного фотонного кристалла в СВЧ-диапазоне
- 3.1 Результаты компьютерного моделирования АЧХ волноводного фотонного кристалла в СВЧ-диапазоне с одним типом примесных состояний
- 4 Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона
- 4.1 Амплитудно-частотные характеристики волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона без нарушения периодичности структуры
- 4.2 Амплитудно-частотные характеристики волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона с нарушением периодичности структуры
- 5 Результаты компьютерного моделирования АЧХ волноводного фотонного кристалла в СВЧ-диапазоне с несколькими типами примесных состояний

## **1 Резонансные особенности АЧХ фотонных кристаллов в СВЧ-диапазоне**

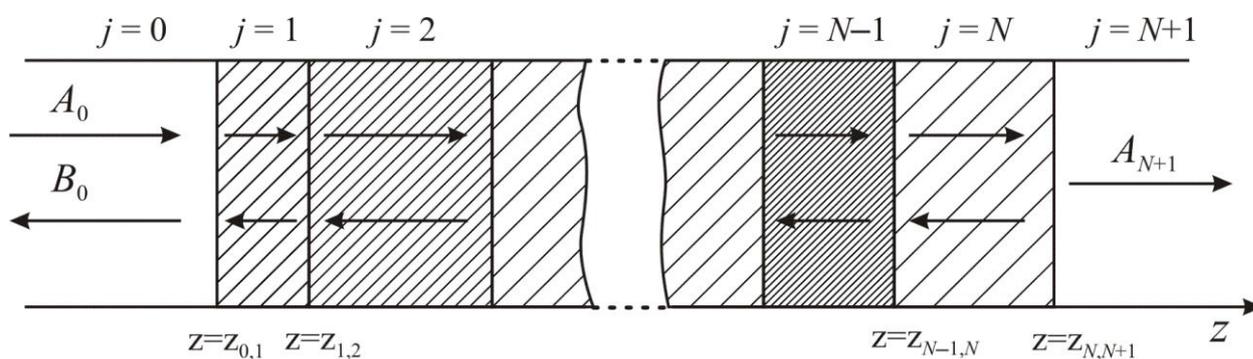
В СВЧ-диапазоне брэгговские структуры создаются на основе прямоугольных волноводов, микрополосковых, копланарных, щелевых и волноводно-щелевых линий передачи [26–35].

Волноводная конфигурация (см. рис. 1.1) обладает достаточно узким рабочим диапазоном частот в сантиметровом диапазоне и длинноволновой части миллиметрового диапазона, поэтому для реализации резонансных свойств брэгговских структур в разрешенных и запрещенных зонах высокого порядка необходимо значительно увеличить электрический размер брэгговской ячейки. В случае использования одномерных структур это может быть достигнуто двумя способами: во-первых, увеличением её геометрической длины, что приводит как к увеличению общей длины брэгговской структуры, так и возрастанию потерь, во-вторых, значительным

увеличением диэлектрической проницаемости элементов, образующих брэгговскую ячейку, что резко повышает требования к контролю их геометрических размеров и электрофизических характеристик.

## 2 Теоретическая модель волноводного СВЧ фотонного кристалла

Для расчета частотной зависимости коэффициентов отражения  $R(\omega)$  и прохождения  $D(\omega)$  электромагнитной волны при её нормальном падении на многослойную структуру, полностью заполняющую волновод по поперечному сечению и имеющую плоскости слоев, перпендикулярные направлению распространения излучения (рис.2.1), воспользуемся матрицей передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны  $\gamma_j$  и  $\gamma_{j+1}$ .



## 3 Результаты компьютерного моделирования АЧХ волноводного фотонного кристалла в СВЧ-диапазоне

### 3.1 Результаты компьютерного моделирования АЧХ волноводного фотонного кристалла в СВЧ-диапазоне с одним типом примесных состояний

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 слой 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. 3.1 представлены АЧХ волноводного двухкомпонентного фотонного кристалла с различным местоположением нарушения в фотонном кристалле.

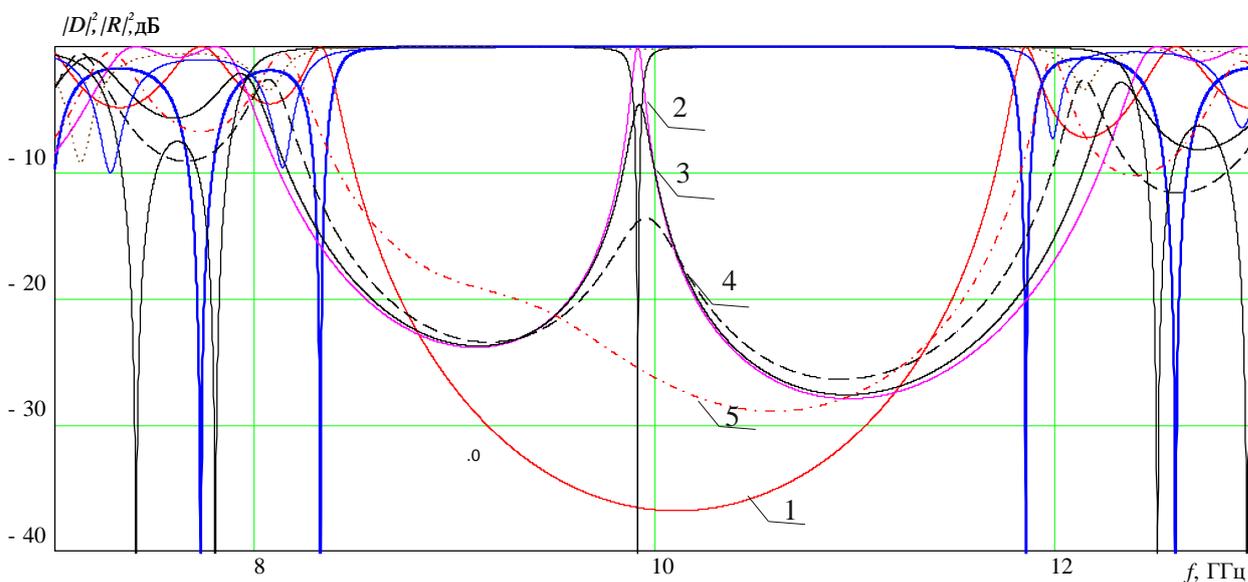


Рисунок 3.1 Теоретически рассчитанные амплитудно-частотные зависимости для коэффициента прохождения и отражения исследуемой 15-слойной структуры 1–без нарушений, при нарушении равном 3 мм: 2– в 8 слое, 3– в 6 слое, 4 – в 4 слое, 5– в 2 слое

## 4 Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона

### 4.1 Амплитудно-частотные характеристики волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона без нарушения периодичности структуры

На рис. 4.2 представлены АЧХ 11-и слойного, 15-и слойного и 19-и слойного фотонного кристалла без нарушений.

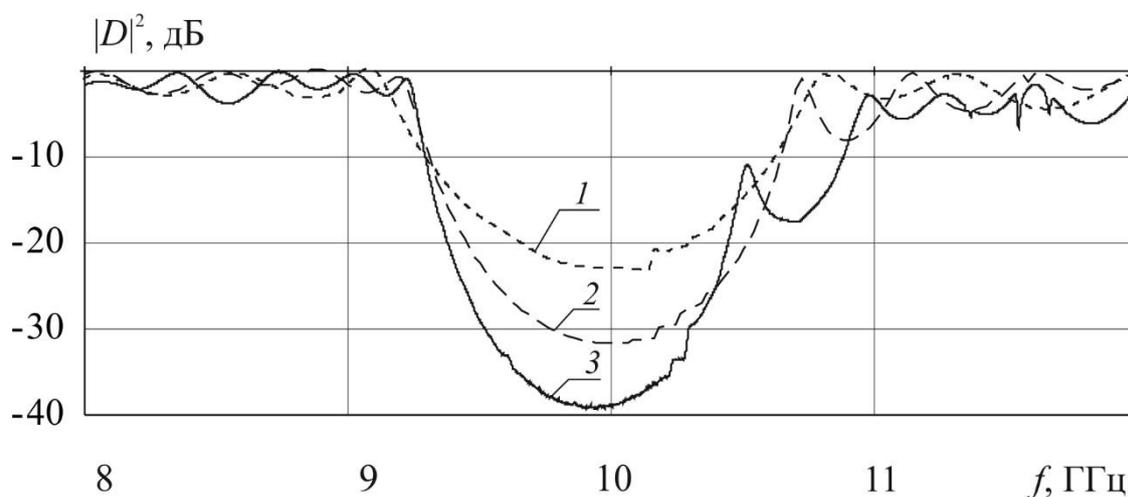


Рис. 4.2 АЧХ 11-и слойного (кривая 1), 15-и слойного (кривая 2) и 19-и слойного (кривая 3) фотонного кристалла без нарушений

Как следует из результатов эксперимента при увеличении числа слоев фотонного кристалла, составленного из периодически чередующихся слоёв поликора и фторопласта, от 11 слоёв до 19 слоёв ширина запрещенной зоны уменьшилась от 1.743 ГГц до 1.294 ГГц, а её глубина увеличилась от  $-22.8$  дБ до  $-39.3$  дБ.

### 4.2 Амплитудно-частотные характеристики волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона с нарушением периодичности структуры

Было экспериментально исследовано влияние местоположения нарушения в фотонном кристалле на вид АЧХ фотонного кристалла с дефектной модой.

На рис. 4.3 представлены АЧХ 11-и слойного фотонного кристалла с различным местоположением нарушения в фотонном кристалле.

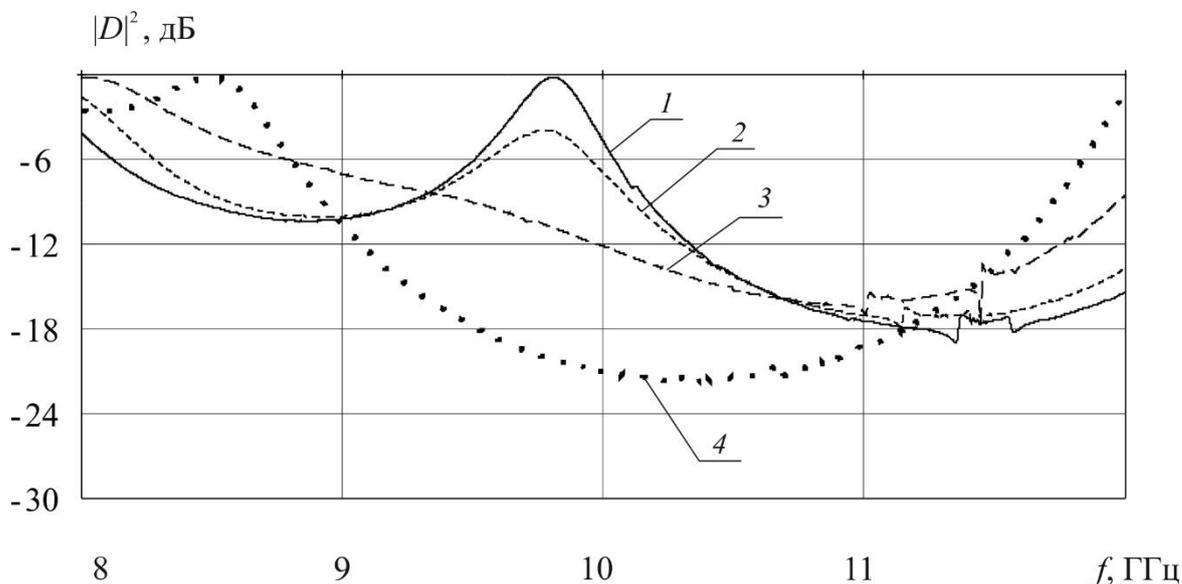


Рис. 4.3 АЧХ фотонного кристалла с различным местоположением нарушения в 11-и слойном фотонном кристалле: 1–6-й слой, 2–4-й слой, 3–2-й слой, 4– без нарушения

## 5 Результаты компьютерного моделирования АЧХ волноводного фотонного кристалла в СВЧ-диапазоне с несколькими типами примесных состояний

Нами исследовалось введение в волноводный фотонный кристалл с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением одновременно двух нарушений периодичности, расположенных симметрично относительно центрального отрезка фотонного кристалла

Результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения 19-ти слойного фотонного кристалла в случае введения в периодическую структуру одновременно двух нарушений представлены на рис. 3.6–3.10.

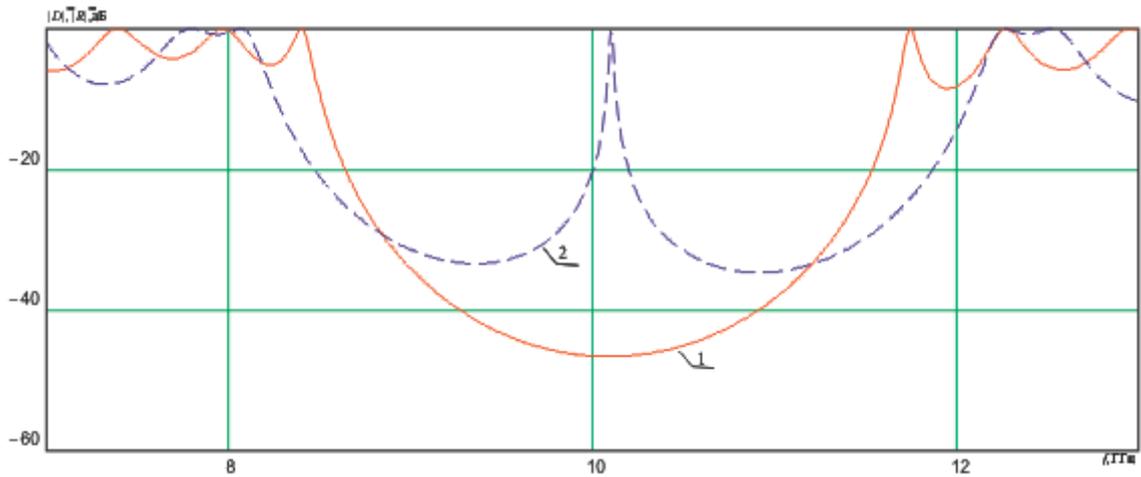


Рисунок 3.6 Частотные зависимости коэффициента прохождения фотонного кристалла (1) без нарушения и (2) с нарушением в 10 слое исследуемой 19-слойной структуры.

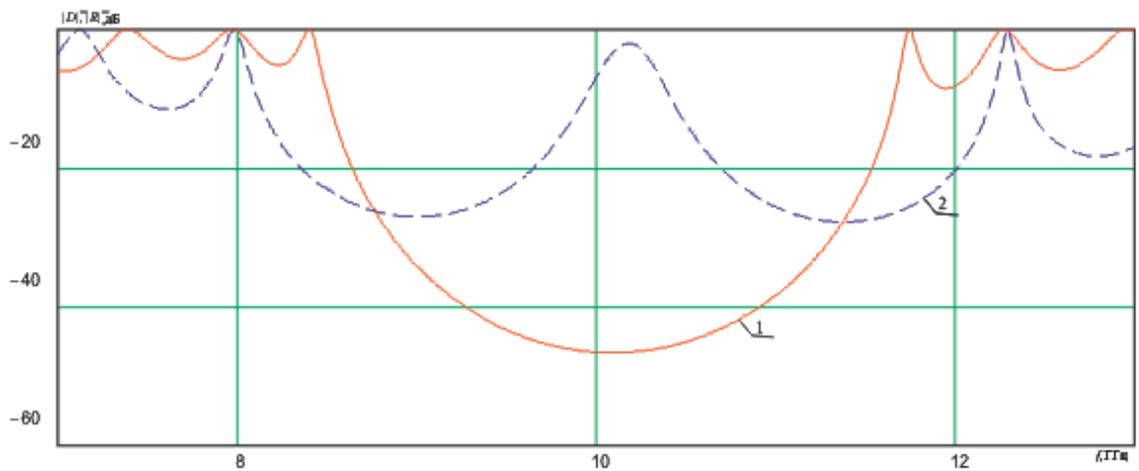


Рисунок 3.9 Частотные зависимости коэффициента прохождения фотонного кристалла (1) без нарушения и (2) с нарушением в 4-ом и 16-ом слое исследуемой 19-слойной структуры

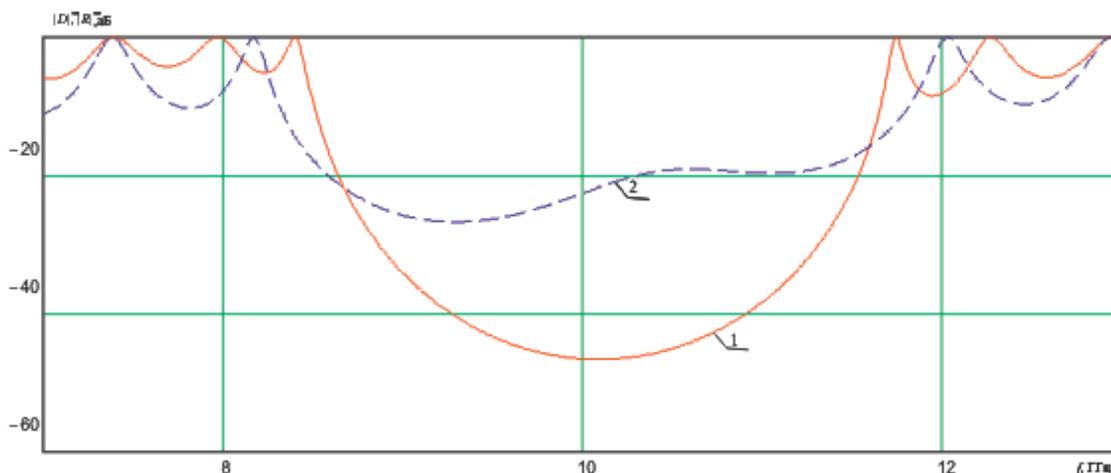


Рисунок 3.10 Частотные зависимости коэффициента прохождения фотонного кристалла (1) без нарушения и (2) с нарушением в 2-ом и 18-ом слое исследуемой 19-слойной структуры

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской 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. Экспериментально исследованы АЧХ фотонных кристаллов при смещении нарушения из центрального слоя. Подтверждено значительное уменьшение коэффициента пропускания на частоте дефектной моды.

5. Установлено, что одновременное введение двух одинаковых нарушений, расположенных симметрично относительно центрального слоя фотонного кристалла с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением приводит, вследствие взаимодействия двух резонансов, частоты которых близки друг к другу, к расщеплению дефектной моды на два отдельных резонанса.

6. Показано, что увеличение расстояния между симметрично расположенными нарушениями вызывает уменьшение частотного интервала между примесными модами, приводящее к объединению дефектных мод и возникновению низкодобротного резонанса с меньшей амплитудой

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopolos N.G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2001. – Vol. 49, N 2. – P. 297–306.

2. Ozbay E., Temelkuran B., and Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals // Progress In Electromagnetics Research, 2003. Vol. 41, pp. 185–209.

3. Gomez A., Vegas A., Solano M.A. & Lakhtakia A. On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides at Microwave Frequencies // Electromagnetics. 2005. Vol. 25, issue 5. pp. 437–460.

4. Gerard W. Burns, I. G. Thayne, J. M. Arnold “Improvement of Planar Antenna Efficiency When Integrated With a Millimetre-Wave Photonic,” in Proc. of European Conference on Wireless Technology, Amsterdam, Netherlands, 11–12th October 2004, P. 229-232.

5. Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах// Доклады Академии Наук. 2005. Т. 400, № 2. С. 181–185.
6. Усанов Д.А., Мещанов В.П., Скрипаль А.В., Попова Н.Ф., Пономарев Д.В., Мерданов М.К. Согласованные нагрузки сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн на СВЧ фотонных кристаллах// Журнал технической физики, 2017, том 87, вып. 2. С. 216–220.
7. Fernandes H.C.C., Medeiros J.L.G., Junior I.M.A. et al. Photonic Crystal at Millimeter Waves Applications// PIER Online. 2007. Vol. 3, no. 5. pp. 689–694.
8. Saib A., Huynen I. Periodic Metamaterials Combining Ferromagnetic Nanowires and Dielectric Structures for Planar Circuits Applications// Electromagnetics. 2006. Vol. 26, issue 3–4, pp. 261–277.
9. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. 184 с.
10. Schneider G. J., Hanna S., Davis J. L., Watson G. H. Defect modes in coaxial photonic crystals// Journal of Applied Physics, 2001. V. 90, N 6. September. P. 2642–2649