

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

**Измерение параметров диэлектриков с использованием коаксиальных  
фотонных кристаллов СВЧ-диапазона**

**АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ  
МАГИСТРА**

студента 2 курса 201 группы направления «Электроника и нанoeлектроника»  
факультета nano - и биомедицинских технологий

Тимофеева Анастасия Игоревна

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.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

## Актуальность проблемы

В настоящее время одной из наиболее интенсивно развивающихся областей науки является направление по созданию и исследованию свойств метаматериалов. Метаматериалы – композитные материалы, состоящие из нескольких компонентов, электромагнитные и акустические свойства которых не встречаются в природе, так же метаматериалы сложноизготовимы.

Класс фотонных кристаллов относится к одному из видов метаматериалов. Большим интересом обладает применение и реализация фотонных кристаллов в СВЧ-диапазоне [1–7]. Взаимосвязь между оптическими и СВЧ – фотонными кристаллами можно проследить в их подчинении одной и той же электромагнитной теории. В СВЧ-диапазоне фотонные кристаллы создаются на основе упорядоченных массивов элементов различной формы и конфигурации, волноводов с диэлектрическим заполнением и планарных линий передачи.

Магистерская работа заключается в изучении нарушения периодичности фотонного кристалла, в виде изменения электрофизических параметров одного из слоев, приводящих к возникновению в запрещенной зоне ФК узкого «окна прозрачности» – частотной области с минимальным значением коэффициента отражения электромагнитной волны. При изменении электрофизических параметров нарушения периодичности происходит частотный сдвиг и изменение формы «окна прозрачности» в фотонной запрещенной зоне фотонного кристалла.

Модификация электрофизических свойств фотонных кристаллов предоставляет огромные возможности по созданию новых материалов с заранее заданными свойствами и устройств с управляемыми характеристиками, функционирующими в различных частотных диапазонах электромагнитного спектра. Если сравнить ФК оптического диапазона, производить которые очень дорого и трудоемко, и ФК в СВЧ-диапазоне, то

последние имеют ряд преимуществ: обладают высокой технологичностью производства, конструктивно состоят из макроскопических объектов и могут быть реализованы на основе стандартных элементов СВЧ схем. ФК в СВЧ-диапазоне применяются в качестве структурных и управляющих элементов различного рода фильтров, усилителей, антенн и резонаторов.

В рамках работы рассмотрим виды фотонных кристаллов СВЧ-диапазона и изучим ФК на основе отрезков коаксиальных линий. В частности, будут рассмотрены особенности многослойной структуры в коаксиальной линии, зависимости коэффициента прохождения от периодичности, толщины и диэлектрической проницаемости слоев многослойника, промоделированы зависимости коэффициента прохождения в структурах от положения неоднородностей в слоях кристалла, а также исследована зависимость АЧХ ФК от вида неоднородности.

#### **Цель магистерской работы:**

Исследование электродинамических характеристик коаксиальных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона и разработка метода измерения параметров диэлектриков с использованием коаксиальных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона.

**Новизна исследований**, проведенных в ходе магистерской работы, состоит в следующем:

Определена зависимость влияния положения слоя нарушения в одномерном коаксиальном ФК на определение параметров диэлектрических материалов.

#### *СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ*

*Во введении* описана актуальность выбранной темы бакалаврской работы, поставлена цель работы.

*В первом разделе* проведено теоретическое исследование коаксиальных фотонных кристаллов с различными видами нарушений, построены спектры прохождения данных структур. Установлено, что при увеличении числа нарушений, в запрещенной зоне фотонного кристалла возникает дополнительный пик окна прозрачности.

*Во втором разделе* проведено компьютерное моделирование коаксиальных фотонных кристаллов для изучения зависимости положения запрещенных зон от расположения нарушения в слоях коаксиальной линии.

В рамках данной работы было решено построить фотонный кристалл на основе коаксиальной линии передачи (Рисунок 2). Периодическая структура полностью заполняет коаксиальную линию по поперечному сечению, плоскости слоёв структуры перпендикулярны направлению распространения электромагнитного излучения в коаксиале.

Для исследования выбрана 15ти слойная фотонная структура (длиной 151 мм) на основе ФЛАНа и фторопласта, представляющая собой периодически чередующиеся слои двух типов диэлектриков с различными значениями толщины и диэлектрической проницаемости. Внутренний диаметр внешнего проводника  $d_{\text{внеш}}$  составлял 7 мм, внешний диаметр внутреннего проводника  $d_{\text{внут}} = 3\text{мм}$ .

Структура в начале и конце коаксиала имеет воздушные зазоры  $l=20$  мм. Далее представлены чередующиеся слои фторопласта  $l = 15$  мм с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2,1$  и ФЛАНа длиной  $l=2$  мм с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 8,8$ . Нечетные отрезки реализованы слоями фторопласта (1,3,5,7,9,11,13,15), а четные ФЛАНа (2,4,6,8,10,12,14).

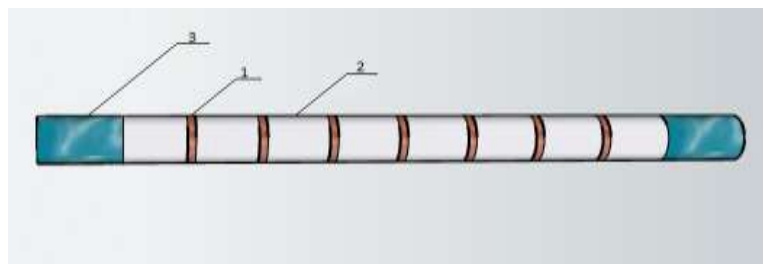


Рисунок 2.1 Фотонный кристалл на основе коаксиальной линии, состоящей из периодически чередующихся слоёв двух типов диэлектриков с различными значениями толщины и диэлектрической проницаемости: 1 – ФЛАН, 2 – фторопласт, 3 – воздух

Проведено теоретическое и компьютерное моделирование, проведение эксперимента временно не представляется возможным.

Для расчета коэффициента прохождения и отражения электромагнитной волны в коаксиальном фотонном кристалле использовалась матрица передачи четырехполюсника сложной структуры, представляющего собой каскадное соединение элементарных четырехполюсников с известными матрицами передачи. Результаты расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения 15-ти слойного СВЧ коаксиального ФК без нарушения периодичности и с нарушением периодичности в виде центрального (8-го слоя) с различными значениями комплексной диэлектрической проницаемости.

Для выяснения причин различной чувствительности дефектных мод к изменению диэлектрической проницаемости были выполнены расчеты распределения напряженности электрического поля  $E(z)$  электромагнитной волны вдоль структуры фотонного кристалла на резонансных частотах  $f_1$  и  $f_2$  дефектных мод с использованием программы трехмерного электродинамического моделирования.

Как и следовало из результатов компьютерного моделирования, изменение резонансной частоты дефектной моды в первой запрещенной зоне

при изменении действительной части комплексной диэлектрической проницаемости нарушенного слоя является незначительным по сравнению с изменением дефектной моды во второй запрещенной зоне.

На основе решения обратной задачи методом наименьших квадратов при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды во второй запрещенной зоне были определены значения мнимой и действительной частей комплексной диэлектрической проницаемости образцов из

### *Результаты теоретического моделирования СВЧ-фотонной структуры*

Проведено теоретическое компьютерное моделирование одномерного коаксиального 15-ти слойного фотонного кристалла СВЧ-диапазона без нарушения периодичности в пакете моделирования MatCad.

На графике (Рисунок 2.2) представлена расчетная частотная зависимость коэффициента пропускания  $D$  для коаксиального фотонного кристалла без нарушения периодичности:

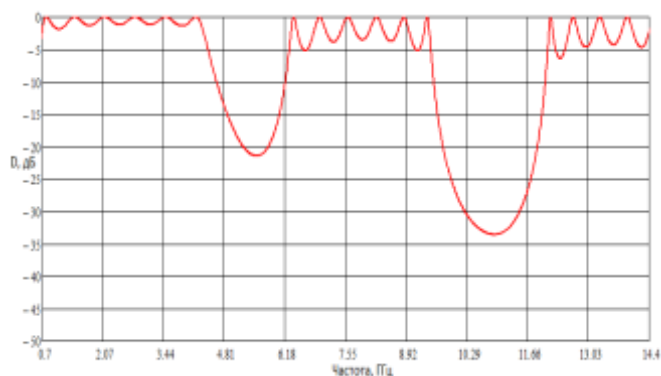


Рисунок 2.2 Теоретически построенная 15-ти слойная структура без нарушений

На данном графике мы наблюдаем фотонную запрещенную зону нашей 15-слойной структуры. Как известно положения фотонных запрещенных зон в

частотном диапазоне зависит от параметров внутреннего диэлектрического заполнения: толщина и диэлектрическая проницаемость слоев.

Данная модель коаксиального фотонного кристалла имела все оригинальные параметры из начала главы. Моделирование проходило в диапазоне частот от  $100 \text{ МГц}$  до  $13 \text{ ГГц}$ . Далее в модели изменялась величина зазора между ФК и проводниками.

Далее исследуем, как поведет себя окно прозрачности, если поместить неоднородность в разные слои структуры. Для этого необходимо ввести нарушение периодичности структуры в виде воздушного зазора с длиной  $l=7 \text{ мм}$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 1$ . Нарушение периодичности было создано посредством поочередного изменения слоев чётных ФЛАНа (2, 4, 6, 8, 10, 12, 14). Варьируя замену слоёв от центрального (8го слоя) в правую и левую сторону, получим зависимости (Рисунок 2.3):

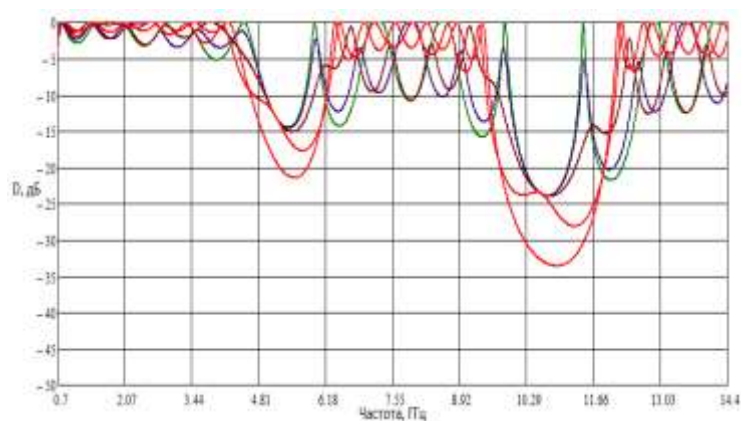


Рисунок 2.3 АЧХ КФКс нарушениями в 2,4,6,8,9,10,12,14 слоях полученная путем теоретического расчета

На графике показано, что с появлением воздушного слоя возникает «окно прозрачности» в запрещенной зоне фотонного кристалла. Как видно из построенной зависимости при смещении «окна прозрачности» в зависимости от перемещения нарушения по четным слоям, положение окна прозрачности в высокочастотную область, а глубина монотонно уменьшается. Заметим, что из

построенных зависимостей, самым оптимальным является центральный 8-й слой.

Результаты расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения 15-ти слойного СВЧ коаксиального ФК без нарушения периодичности и с нарушением периодичности в виде центрального (8-го слоя) с различными значениями комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне 100 МГц – 13 ГГц приведены на рисунке 2.4:

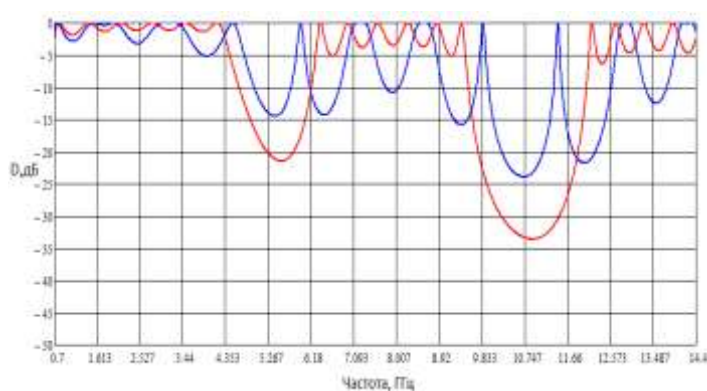


Рисунок 2.4 АЧХ коэффициентов прохождения КФК без нарушения периодичности и с нарушением периодичности в виде центрального (8-го слоя)

#### *Результаты компьютерного моделирования СВЧ-фотонной структуры*

Проведено компьютерное моделирование одномерного волноводного 15-ти слойного фотонного кристалла СВЧ-диапазона в пакете моделирования CST MICROWAVE STUDIO.

Это программа трехмерного моделирования электромагнитного поля. Программа использует различные методы расчета (расчет переходного процесса во временной области, анализ в частотной области, метод нахождения собственных частот) для моделирования сложных СВЧ структур: фильтров, антенн, циркуляторов, аттенюаторов и т.д.



Построим частотные зависимости коэффициента пропускания  $D$  для коаксиального фотонного кристалла без нарушения периодичности (рисунок 2.5):

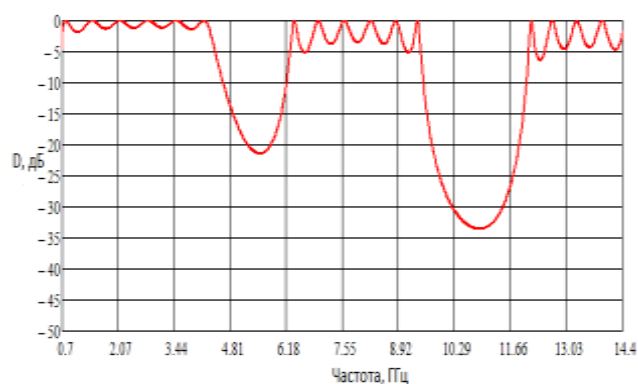


Рис 2.5 15-ти слойная структура без нарушений, построенная посредством компьютерного моделирования

Можно увидеть небольшое смещение относительно теоретической части расчетов на рисунке 2.6. Это вероятно, вызвано тем, что в теоретических расчетах мы моделируем идеальную структуру, но в реальности это трудноосуществимо. В любом случае этот сдвиг является несущественным.

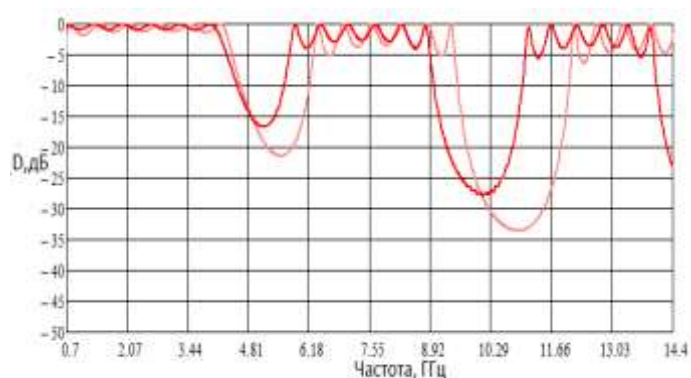


Рисунок 2.6 Сравнение центральных нарушений при теоретическом расчете и компьютерном моделировании

В результате построены спектры прохождения электромагнитного излучения через структуру с нарушениями в виде воздуха в разных слоях

ФЛАН, самой эффективной диэлектрической проницаемостью полученной при расчете является структура с нарушением в центральном слое. Пример такой зависимости представлен на рисунке 2.7.

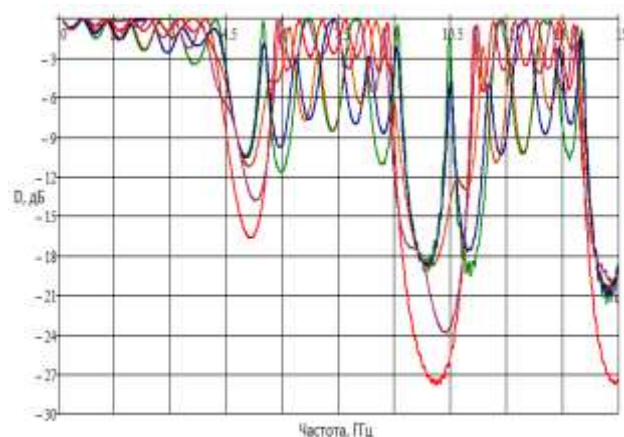


Рис 2.7 АЧХ КФКс нарушениями в 2,4,6,8,9,10,12,14 слоях полученная путем компьютерного моделирования

*Компьютерное моделирование пятнадцатислойного коаксиального фотонного кристалла на основе слоя фторопласта и ФЛАН с нарушением в четных слоях кристалла*

В программе трехмерного моделирования электромагнитного поля CST MICROWAVE STUDIO, была разработана модель пятнадцатислойного коаксиального фотонного кристалла. Параметры внешнего и внутреннего проводника были заданы такие же, как и в предыдущем разделе: диаметр внешнего проводника — 7мм, диаметр внутреннего — 3мм, материал — алюминий. В качестве материала для слоев первого типа внутреннего диэлектрического заполнения был выбран фторопласт с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon=2.1$ . Для слоев второго типа использовались параметры листового диэлектрического материала, изготавливаемого на основе наполненных простых полиэфиров и используемый для изготовления печатных и полосковых плат микроволнового диапазона, ФЛАН с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon=8.8$ . Моделирование проходила в

частотном диапазоне от 0.1 до 14 ГГц. В качестве значений тангенса угла диэлектрических потерь для слоев первого и второго типа были выбраны табличные значения для данных материалов: фторопласт — 0.0015, ФЛАН — 0.0002. Материалом слоя нарушения является стеклотекстолит с параметрами: диэлектрическая проницаемость — 4.0, длина слоя — 7мм, тангенс угла диэлектрических потерь — 0.01.

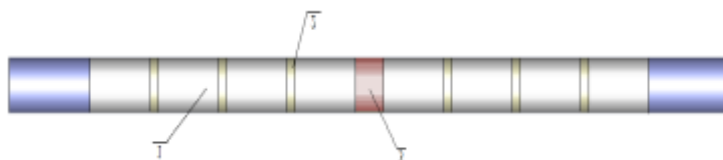


Рисунок 2.8 Модель коаксиального одномерного фотонного кристалла на основе фторопласта и ФЛАНа с нарушением в центральном слое в виде слоя текстолита: 1— фторопласт, 2— ФЛАН, 3 — текстолит

Далее были получены амплитудно — частотные характеристики спектра пропускания данной структуры без нарушения и с нарушением в центральном 8-ом слое.

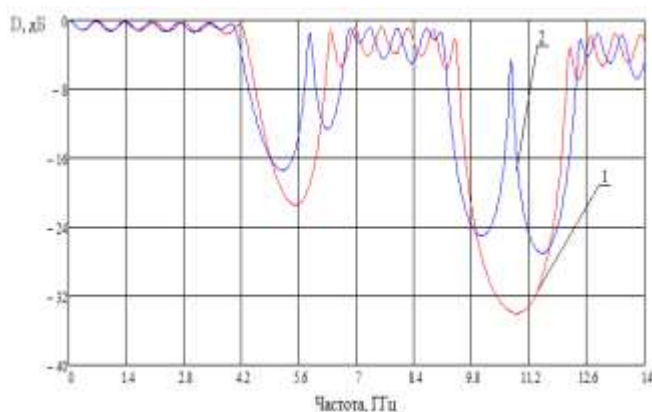


Рисунок 2.9 АЧХ пятнадцатислоного коаксиального фотонного кристалла ФЛАН-фторопласт: 1— без нарушения периодичности, 2 — с нарушением периодичности в виде слоя текстолита в 8 слое

Как видно из построенной зависимости при помещении нарушения в 8-й слой фотонного кристалла в его запрещенной зоне возникает разрешенная

область для распространения электромагнитного излучения, так называемое «окно прозрачности».

Далее для того чтобы понять насколько влияет перемещение слоя нарушения по длине фотонного кристалла на измерение параметров диэлектриков, слой текстолита помещался поочередно во все четные слои фотонного кристалла. Для каждого из кристаллов были получены АЧХ спектра пропускания представленные на рисунке 2.10.

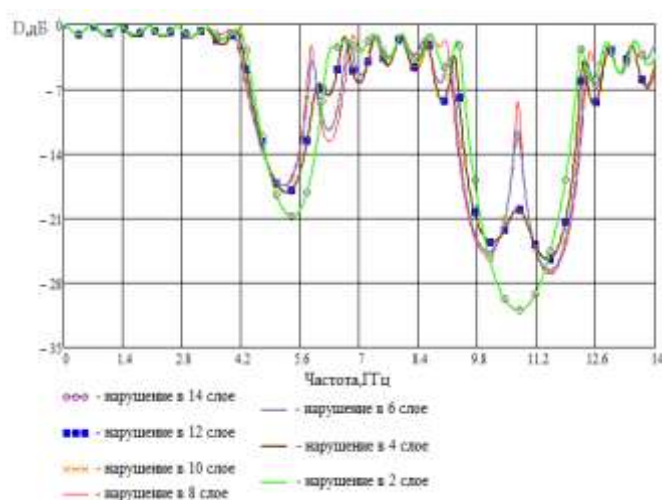


Рисунок 2.10 АЧХ коаксиальных фотонных кристаллов с нарушениями периодичности во 2-м, 4-м, 6-м, 8-м,10-м, 12-м и 14-м слоях

Как видно из построенной зависимости при поочередной замене четного слоя фотонного кристалла слоем текстолита, играющего роль слоя нарушения, «окно прозрачности» в первой фотонной запрещенной зоне изменяется по амплитуде и не значительно двигается по частотному диапазону, в случае же со второй запрещенной зоной изменяется только амплитуда. Это связано с тем что параметры фотонного кристалла подобраны таким образом, что в частотном диапазоне, в котором находится первая запрещённая зона во всех случаях слой нарушения попадает в максимум или пучность электромагнитного поля, а в случае со второй запрещенной зоной в минимум или узел электромагнитного поля.

Так же стоит отметить, что АЧХ коаксиальных фотонных кристаллов со слоем текстолита во 2-м, 4-м, 6-м слое, идентичны АЧХ с текстолитом в 14-м, 12-м и 10-м слое соответственно.

*Решение обратной задачи для определения влияния положения слоя нарушения в фотонном кристалле на найденное значение диэлектрической проницаемости*

На основании данных полученных в результате моделирования из предыдущего раздела, была решена обратная задача для нахождения диэлектрической проницаемости слоя нарушения и определения влияния положения нарушения в структуре фотонного кристалла.

Обратная задача решалась методом наименьших квадратов в инженерно-математическом программном обеспечении Mathcad. Для нахождения искомых значений действительной части диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  исследуемого образца по частотным зависимостям  $D(f)$  и  $R(f)$  был использован метод наименьших квадратов, при реализации которого находится такое значение параметров  $\epsilon$  при котором сумма  $S(\epsilon_{иск})$  квадратов разностей расчетных,  $D(f, \epsilon_{иск})$  и  $R(f, \epsilon_{иск})$ , и экспериментальных,  $D_{эксп}$  и  $R_{эксп}$ , значений коэффициентов пропускания и отражения,

$$S(\epsilon) = \sum ((D(f, \epsilon) - D_{эксп}) + (R(f, \epsilon) - R_{эксп}))^2$$

становится минимальной.

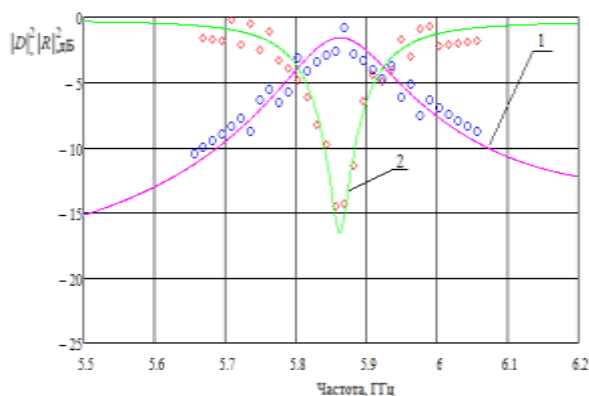


Рисунок 3.1 Исходные тестовые ( $\diamond\diamond\diamond$  и  $\circ\circ\circ$ ) и рассчитанные (линии) с использованием результатов решения обратной задачи частотные зависимости  $|D|^2$  (кривые 1) и  $|R|^2$  (кривые 2) на резонансной частоте  $f_1=5.886$  ГГц, соответствующей дефектной моде в первой запрещенной зоне КФК с нарушением в 8-м слое

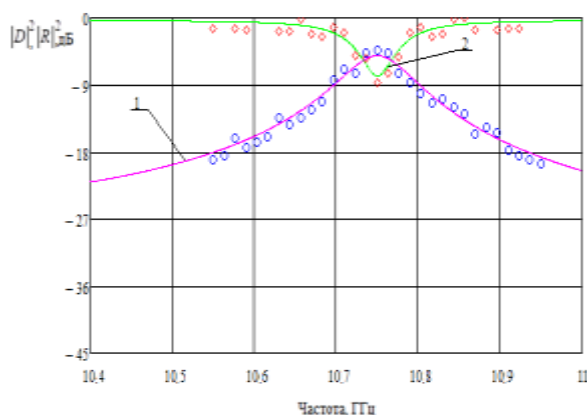


Рисунок 3.2 Исходные тестовые ( $\diamond\diamond\diamond$  и  $\circ\circ\circ$ ) и рассчитанные (линии) с использованием результатов решения обратной задачи частотные зависимости  $|D|^2$  (кривые 1) и  $|R|^2$  (кривые 2) на резонансной частоте  $f_1=10.750$  ГГц, соответствующей дефектной моде во второй запрещенной зоне КФК с нарушением в 8-м слое

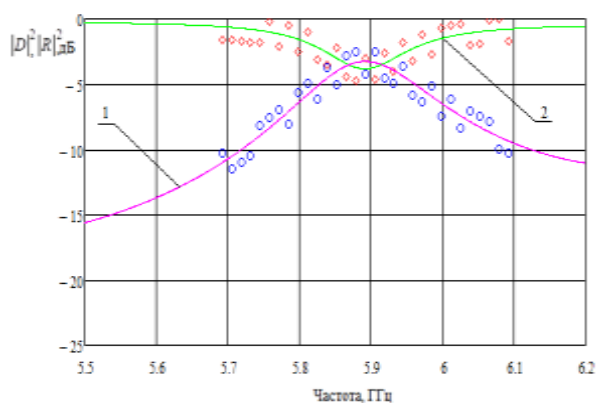


Рисунок 3.3 Исходные тестовые ( $\diamond\diamond\diamond$  и  $\circ\circ\circ$ ) и рассчитанные (линии) с использованием результатов решения обратной задачи частотные зависимости  $|D|^2$  (кривые 1) и  $|R|^2$  (кривые 2) на резонансной частоте  $f_1=5.8927$  ГГц, соответствующей дефектной моде в первой запрещенной зоне КФК с нарушением в 6-м и 10-м слоях

Стоит отметить что данного вида зависимости не рассматриваются для второй запрещенной зоны фотонного кристалла из-за того, что положение окна прозрачности во второй зоне по частоте не изменяется.

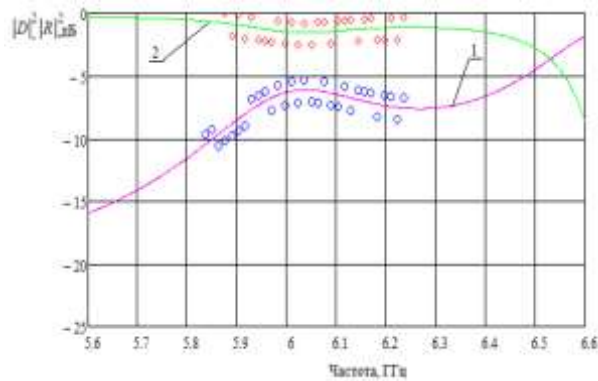


Рисунок 3.4 Исходные тестовые ( $\diamond\diamond\diamond$  и  $\circ\circ\circ$ ) и рассчитанные (линии) с использованием результатов решения обратной задачи частотные зависимости  $|D|^2$  (кривые 1) и  $|R|^2$  (кривые 2) на резонансной частоте  $f_1=6.0367$  ГГц, соответствующей дефектной моде в первой запрещенной зоне КФК с нарушением в 4-м и 12-м слоях

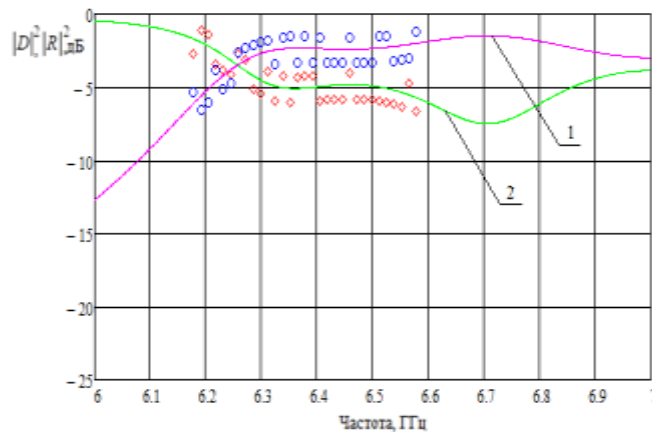


Рисунок 3.5 Исходные тестовые ( $\diamond\diamond\diamond$  и  $\circ\circ\circ$ ) и рассчитанные (линии) с использованием результатов решения обратной задачи частотные зависимости  $|D|^2$  (кривые 1) и  $|R|^2$  (кривые 2) на резонансной частоте  $f_1=6.378$  ГГц, соответствующей дефектной моде в первой запрещенной зоне КФК с нарушением во 2-м и 14-м слоях

Результаты решения обратной задачи представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Номер слоя нарушения в коаксиальном фотонном кристалле	Значение действительной части диэлектрической проницаемости слоя $\epsilon$ нарушения
8 слой	3.98
6 и 10 слой	3.95
4 и 12 слой	3.87
2 и 14 слой	3.74

Как видно из полученных данных по мере удаления от центра фотонного кристалла значение определяемой действительной части диэлектрической проницаемости становится менее точным.

*В заключении* приведены основные результаты и сформулированы выводы выпускной квалификационной работы магистра.

### *ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ*

Таким образом, в ходе выполнения выпускной квалификационной работы магистра:

1. Произведен теоретический обзор слоистых структур СВЧ – диапазона. Рассмотрены особенности взаимодействия электромагнитного излучения: волноводный ФК, микрополосковый ФК, коаксиальный ФК и Брегговские СВЧ – решетки.
2. Проведено теоретическое исследование коаксиальных фотонных кристаллов с нарушением и без нарушений. Произведен теоретический расчет для пятнадцатислойного фотонного кристалла фторопласт – ФЛАН, построены спектры прохождения электромагнитного излучения для структур: без нарушения, с одним нарушением периодичности в разных слоях структуры.



3. Произведено компьютерное моделирование одномерного пятнадцатислойного ФК на основе фторопласта и ФЛАН, построены спектры прохождения электромагнитного излучения для структур: без нарушения, с одним нарушением периодичности в разных слоях структуры.
4. Также проведено сравнение теоретического расчета с компьютерным моделированием, в результате которого расхождение между полученными результатами является незначительным.
5. Была разработана компьютерная модель одномерного пятнадцатислойного ФК на основе фторопласта и ФЛАН, с нарушением в виде слоя текстолита, помещенного в различные слои структуры.
6. В результате компьютерного моделирования, было установлено, что при удалении слоя нарушения от середины коаксиального фотонного кристалла, окно прозрачности в первой запрещенной зоне незначительно сдвигается по частоте и уменьшается по амплитуде.
7. На основании данных полученных при компьютерном моделировании, была решена обратная задача методом наименьших квадратов, в результате которой для коаксиальных ФК, с нарушением в 6, 8, 10, 12, 14 слоях, была определена действительная часть диэлектрической проницаемости.
8. Установлено, что при удалении слоя нарушения от центра фотонного кристалла, определяемое с использованием предложенного метода значение действительной части диэлектрической проницаемости несколько отклоняется от истинного значения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Usanov D.A., Nikitov S.A., Skripal A.V., Ponomarev D.V. One-Dimensional Microwave Photonic Crystals: New Applications. Taylor Francis Group. Boca Raton London New York CRC Press, 2019. 154 p.
2. Belyaev B.A., Khodenkov S.A., Shabanov V.F. Investigation of frequency-selective devices based on a microstrip 2D photonic crystal // Doklady Physics. 2016, vol. 61, iss. 4, pp 155–159.
3. 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, № 2, pp. 297–306.
4. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals // Progress In Electromagnetics Research, 2003. vol. 41, pp. 185–209.
5. Burns Gerard W., Thayne I. G., Arnold J. M. Improvement of Planar Antenna Efficiency When Integrated With a Millimetre-Wave Photonic// Proc. of European Conference on Wireless Technology, Amsterdam, Netherlands, 11–12th October 2004, pp. 229-232.
6. Fernandes H.C.C., Medeiros J.L.G., Junior I.M.A., Brito D.B. Photonic Crystal at Millimeter Waves Applications// PIERS Online. 2007. vol. 3, №. 5. pp. 689–694.
7. Usanov D.A., Skripal A.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S., Kulikov M.Yu., Ponomarev D.V. Microstrip Photonic Crystals Used for Measuring Parameters of Liquids // Technical Physics, 2010, vol. 55, № 8, pp. 1216–1221.
8. Пономарев Д. В. Особенности взаимодействия СВЧ-излучения с фотонными кристаллами, содержащими в качестве неоднородностей диэлектрические, полупроводниковые и металлические включения. Саратов, 2012.–139с.
9. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов. Саратов, 2014. –32 с.

- 10.Щемеров И. В. Разработка и создание аппаратуры для бесконтактного измерения электрофизических параметров полупроводниковых материалов. Москва, 2015. –128 с.
- 11.Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Вениг С.Б. Измерение параметров полупроводников и диэлектриков на СВЧ. Саратов, 2010. –91 с.
- 12.Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения.// Журнал технической физики, 2006, том 76, вып. 5. 6 с.
- 13.Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей. Саратов, 2014.–.38с.
- 14.. Jie Huang, Tao Weia, Xinwei Lana, Jun Fanb, Hai Xiao. Coaxial cable Bragg grating sensors for large strain measurement with high accuracy. Proc. of SPIE Vol. 8345 83452Z-1 (2012).
- 15.Tao Wei, Songping Wu, Jie Huang, Hai Xiao, and Jun Fan. Coaxial cable Bragg grating. Appl. Phys. Lett. 99, 113517 (2011).
- 16.Насыбуллин А. Р., Морозов О. Г., Севастьянов А. А. Брэгговские сенсорные СВЧ-структуры на коаксиальном кабеле.// Журнал радиэлектроники. 2014. вып.3.–17с.
- 17.Севастьянов А. А. Брэгговские СВЧ-структуры в коаксиальном кабеле для систем контроля уровня жидких сред. Самара, 2014. 136 с.
18. Гроднев И. И., Фролов П. А. Коаксиальные кабели связи. — 2-е изд., перераб. доп. — М.: Радио и связь, 1983. — 208 с.
- 19.. Белоруссов Н.И., Гроднев И.И. Радиочастотные кабели. Учебное пособие для техникумов. Изд. 3-е, перераб. М., «Энергия», 1973.

20. Тимофеев И.О. СВЧ фотонные кристаллы на основе отрезков коаксиальной линии передачи. Саратов, 2016. 35 с.
21. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Пономарев Д. В. СВЧ фотонные кристаллы. Новые сферы применения.//Физика, 2015, том 15, вып. 1. 17с.
22. Ветров С.Я., Тимофеев И.В., Рудакова Н.В. Зонная структура резонансного двумерного фотонного кристалла// ФТТ. 2010. Т. 52, вып. 3. С. 489–494.
23. Арапов Ю.Г., Давыдов А.Б. Волноводные методы измерения электрофизических параметров полупроводников на СВЧ// Дефектоскопия. 1978. №11. С. 63–87.
24. Беляев Б.А., Ходенков С.А., Шабанов В.Ф. Исследование полосно-пропускающих фильтров на одномерных диэлектрических фотонных кристаллах// Известия высш. учеб. заведений. Физика. 2008. Т. 51, С. 150—153.
25. Бахарев С.И., Вольман В.И., Либ Ю.Н. и др. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств, Изд-во: М: Радио и связь, 1982, С. 32- 77.
26. Беспярых Ю.И., Дикштейн И.Е., Мальцев В.П., Никитов С.А., Василевский В. Особенности распространения электромагнитных волн в слоистых магнитных фотонных кристаллах// ФТТ. 2003. Т. 45, вып. 11. С. 2056–2061.
27. Е.Л. Ивченко, А.Н. Поддубный, "Резонансные трехмерные фотонные кристаллы" Физика твердого тела, 2006, том 48, вып. 3, стр. 540-547.
28. Бритун Н.В., Данилов В.В. Электронное управление параметрами структур с фотонной запрещенной зоной// ПЖТФ. 2003. Т. 29, вып. 7. С. 27–32.
29. Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. Исследование микрополосковых аналогов полосно-пропускающих фильтров на

одномерных фотонных кристаллах// Радиотехника и электроника. 2006.  
Т. 51, № 6. С. 694—701.

30. Yang F.-R., Ma K.-P., Qian Y., and Itoh T. Uniplanar Compact Photonic-Bandgap (UC-PBG) Structure and Its Applications for Microwave Circuits// IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 47, issue 8. pp. 1509–1514.