

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 вида неоднородностей на амплитудно-частотные  
характеристики коаксиальных фотонных кристаллов**

**АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ  
МАГИСТРА**

студента 2 курса 201 группы направления «Электроника и наноэлектроника»  
факультета нано - и биомедицинских технологий

Тимофеев Илья Олегович

Научные руководители

профессор, д.ф.-м.н.

А. В. Скрипаль

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

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-м.н.

Д. В. Пономарев

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

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

Д. А. Усанов

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

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов 2018

## **Актуальность проблемы**

Фотонными кристаллами называются периодические многослойные структуры позволяющие проводить какие либо манипуляции (изменять направление излучения и выделять (пропускать или поглощать) излучение с определенной частотой) с электромагнитным излучением. Важным условием является то, что размеры слоев ФК должны быть сравнимы с длинами электромагнитных волн оптического и СВЧ-диапазонов. Физические свойства таких многослойных структур определяются как параметрами материалов, так и конструктивными особенностями неоднородностей, параметры которых можно изменять в широких пределах технологическими условиями их изготовления.

По существу фотонные кристаллы представляют собой систему связанных резонаторов, именно поэтому они обладают окнами прозрачности и полосами заграждения

По своей конфигурации СВЧ фотонные кристаллы могут быть реализованы в виде прямоугольного волновода со слоистым заполнением, микрополосковой линией с изменяющейся шириной полоска или переменной диэлектрической проницаемостью подложки и на основе отрезков коаксиальной линии с периодическим диэлектрическим заполнением[1].

Многослойные фотонные структуры СВЧ-диапазона зарекомендовали себя не только как лабораторные образцы, предназначенные для исследований физических свойств метаматериаллов и физики ФК, но и как различные изобретения, широко применяемые на практике. К примеру, изобретения на основе периодически слоистых структур могут быть реализованы в современных системах связи и телекоммуникации, антеннах и радарной техники, измерительном оборудовании и различного рода датчиках.

Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона имеют множество преимуществ, по сравнению с их аналогами в других частотных диапазонах, а именно:

1. технологичность изготовления периодических структур;
2. хорошее совпадение численного расчета с экспериментом;
3. возможность модификации структуры фотонного кристалла в силу того, что его составные части имеют макроскопические размеры;
4. конструктивно фотонный кристалл может быть создан на основе стандартных элементов СВЧ-схем;
5. результаты исследований особенностей взаимодействия СВЧ-излучения с фотонным кристаллом могут быть использованы для создания структур, работающих в более высокочастотных диапазонах[2].

Исследование периодических СВЧ фотонных кристаллов представляет также особый интерес в связи с перспективой их использования при создании различных устройств, материалов и композитов, изначально предназначенных для работы в СВЧ-диапазоне.

### **Цель выпускной квалификационной работы магистра:**

Выявление особенностей влияния вида неоднородностей на амплитудно-частотные характеристики коаксиальных фотонных кристаллов.

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

Установлено что при увеличении воздушного зазора между диэлектрическим заполнением с большей диэлектрической проницаемостью, ширина и глубина запрещенной зоны фотонного кристалла уменьшается, а при увеличении воздушного зазора между внешней металлизацией и слоями с меньшей диэлектрической проницаемостью, глубина и ширина запрещенной зоны увеличивается. Также установлено, что нахождение

эффективной диэлектрической проницаемости для коаксиальных фотонных кристаллов лучше всего производить решением электродинамической задачи или с помощью формулы Брауна, из за того что данные методы дают наименьшую погрешность.

Также в ходе компьютерного моделирования было установлено что при увеличении количества нарушений в коаксиальной фотонной структуре, в запрещенной зоне прямо пропорционально возникает дополнительный пик окна прозрачности.

Экспериментально реализован коаксиальный фотонный кристалл СВЧ–диапазона на основе фторопласта и воздушных зазоров, а также экспериментально исследовано возникновении дополнительных пиков окна прозрачности при увеличении количества нарушений периодичности.

## *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 величины воздушного зазора между внутренним заполнением и проводниками коаксиальной линии.

В первом расчете внешний диаметр слоев и первого и второго типа не изменялся и был равен  $7.05\text{мм}$ . Во втором и последующих расчетах диаметр слоев первого типа уменьшался от  $7.05\text{мм}$  до  $6,55\text{мм}$  с шагом в  $100\text{ мкм}$ ,

внешний диаметр слоев второго типа оставался неизменным. В результате моделирования были получены АЧХ фотонных структур представленные на рисунке 1.1.

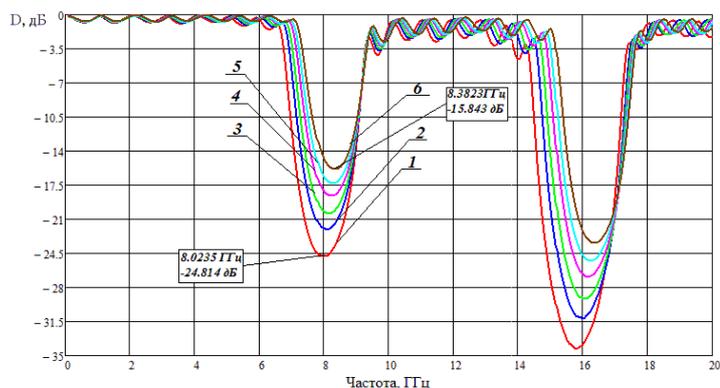


Рисунок 1.1 Спектр прохождения электромагнитного излучения через коаксиальную фотонную структуру при изменении внешнего диаметра диэлектрических слоев первого типа с  $\epsilon=9,6$ : 1–без изменения внешнего диаметра (воздушный зазор между слоем и внешним проводником равен  $0 \text{ мкм}$ ); 2– воздушный зазор  $100 \text{ мкм}$ , 3–воздушный зазор  $200 \text{ мкм}$ ; 4– воздушный зазор  $300 \text{ мкм}$ ; 5– воздушный зазор  $400 \text{ мкм}$ ; 6– воздушный зазор  $500 \text{ мкм}$

Как видно из полученных зависимостей при увеличении воздушного зазора между слоями первого типа и внешним проводником коаксиальной линии, глубина и ширина запрещенных зон ФК уменьшается.

То же самое было проделано со слоями второго типа, при этом диаметр слоев первого типа оставался равным  $7.05 \text{ мм}$ . В результате были также получены спектры прохождения электромагнитного излучения, через данные структуры представленные на рисунке 1.2.

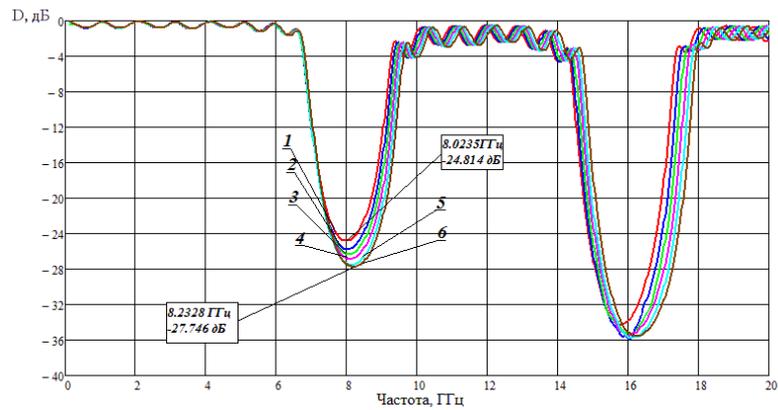


Рисунок 1.2 Спектр прохождения электромагнитного излучения через коаксиальную фотонную структуру при изменении внешнего диаметра диэлектрических слоев второго типа с  $\epsilon=2,1$ : 1–без изменения внешнего диаметра (воздушный зазор между слоем и внешним проводником равен 0 мкм); 2– воздушный зазор 100 мкм, 3–воздушный зазор 200 мкм; 4– воздушный зазор 300 мкм; 5– воздушный зазор 400 мкм; 6– воздушный зазор 500 мкм

Стоит отметить, что результаты для первого и второго случая имеют кардинальные различия. По сравнению с предыдущим исследованием, во втором случае глубина и ширина запрещенных зон коаксиального ФК не уменьшилась с увеличением воздушного зазора как в первом случае, а наоборот увеличилась. Это связано с тем, что основным условием ФК СВЧ – диапазона является большой перепад между величинами диэлектрической проницаемости слоев. При увеличении воздушного зазора на слоях с большей диэлектрической проницаемостью, перепад между  $\epsilon$  уменьшается и из-за этого запрещенные зоны ФК уменьшаются, в обратном случае запрещенные зоны увеличатся по ширине и глубине.

Также на основании данных полученных в результате предыдущего моделирования было принято решение, смоделировать коаксиальную структуру, диэлектрическое заполнение которого будет состоять не из двух видов диэлектрика, как это было в предыдущих исследованиях, а из одного,

но разного внешнего диаметра. Схематичное изображение данного фотонного кристалла представлено на рисунке 1.3

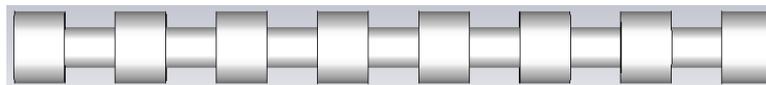


Рисунок 1.3 Коаксиальный фотонный кристалл из одного материала диэлектрического заполнения разного диаметра

По параметрам каждой из фотонных структур была посчитана эффективная диэлектрическая проницаемость по формуле Брауна (1.1) и по формуле для структур, в которых вектор напряженности электрического поля перпендикулярен слоям (1.2), характеризующая общую  $\epsilon$  для слоев, состоящих из воздуха и фторопласта

$$\epsilon_{eff} = x_1 * \epsilon_1 + x_2 * \epsilon_2, \quad (1.1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_1 * \epsilon_2}{x_1 * \epsilon_2 + x_2 * \epsilon_1} \quad (1.2)$$

где  $x_1$  – доля заполнения коаксиальной линии первым материалом,  $\epsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость первого материала,  $x_2$  – доля заполнения коаксиальной линии вторым материалом,  $\epsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость второго материала. Помимо расчетных значений  $\epsilon_{eff}$ , также была найдена эффективная диэлектрическая проницаемость при решении электродинамической задачи. Все результаты представлены в таблице 1.

Далее была разработана компьютерная модель коаксиального фотонного кристалла в котором первым типом слоев так же остаются фторопластовые втулки с внешним и внутренним диаметрами соответствующими диаметрам коаксиальной линии. А вторым типом слоев являются втулки с  $\epsilon$  полученной из расчетов (рисунок .14).

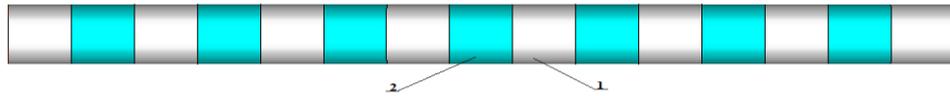


Рисунок 1.4 Коаксиальный фотонный кристалл: 1 – фторопластовые втулки, 2 – втулки из материала с  $\epsilon_{eff}$

В результате были построены спектры прохождения электромагнитного излучения через структуру с разными внешними диаметрами фторопласта и относящимися к этому диаметру эффективными диэлектрическими проницаемостями полученные при расчете. Пример такой зависимости представлен на рисунке 1.5.

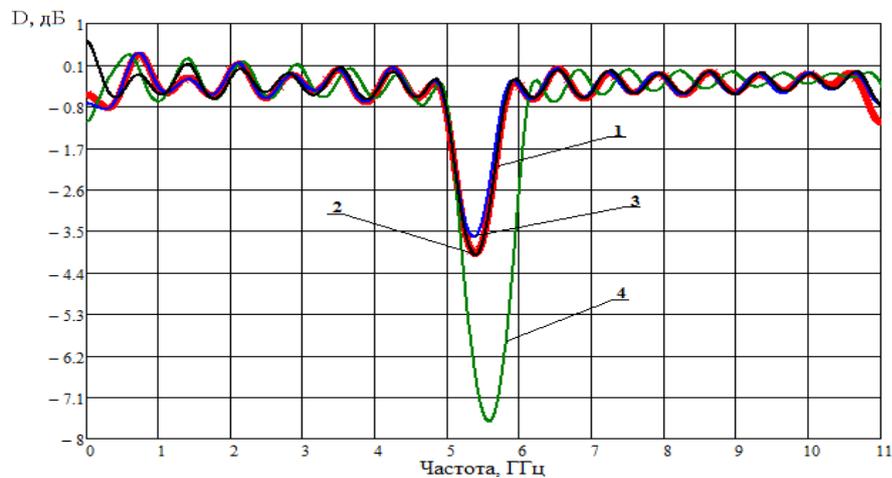


Рисунок 1.5 1–спектр прохождения электромагнитного излучения через ФК из фторопластовых втулок разного диаметра(6мм-10мм), 2– спектр прохождения электромагнитного излучения через ФК из фторопласта и материала с эффективной диэлектрической проницаемостью посчитанной при решении электродинамической задачи, 3– спектр прохождения электромагнитного излучения через ФК из фторопласта и материала с расчетной эффективной диэлектрической проницаемостью по формуле Брауна, 4– спектр прохождения электромагнитного излучения через ФК из фторопласта и материала с расчетной эффективной диэлектрической проницаемостью по формуле (1.2).

Также были построены зависимости эффективной диэлектрической проницаемости, найденной разными способами от внешнего диаметра слоев второго типа коаксиальной фотонной структуры (рисунок 1.6).

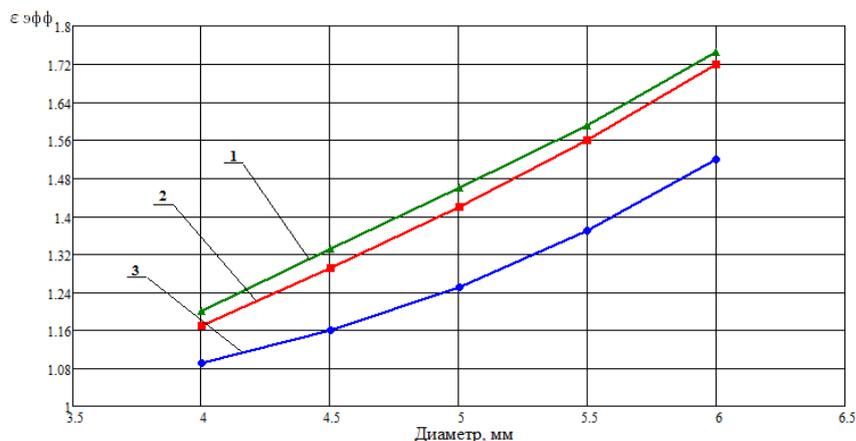


Рисунок 1.7 Зависимость  $\epsilon_{\text{eff}}$ , найденной: 1– из решения электродинамической задачи, 2 – по формуле Брауна, 3– по формуле (2.2), от внешнего диаметра слоев второго типа

Как видно из рисунков 1.6 и 1.7 применение метода эффективной диэлектрической проницаемости при использовании структур, не полностью заполняющих поперечное сечение коаксиала, возможно, при этом использование выражений для расчета эффективной диэлектрической проницаемости с использованием формулы Брауна позволяет получить искомые результаты с погрешностью 2%, а с использованием соотношения для слоистых структур в которых вектор напряженности электрического поля перпендикулярен слоям диэлектрика с погрешностью 12,4%.

Далее было проведено компьютерное моделирование пятнадцатислойного фотонного кристалла на основе фторопласт –воздух, для определения влияния вида неоднородностей на амплитудно-частотную и рассчитаны спектры отражения и прохождения электромагнитного излучения.

Схема фотонного кристалла представлена на рисунке

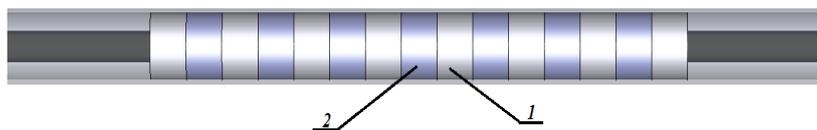


Рисунок 1.8 Пятнадцатислойный коаксиальный фотонный кристалл: 1 – слой первого типа, 2 – слой второго типа

В результате компьютерного моделирования были получены спектры прохождения  $D$  и отражения  $R$  (см. рисунок 1.9). Как видно из полученной частотной зависимости, в спектрах прохождения и отражения данной одномерной слоистой структуры имеется чередование разрешенных и запрещенных фотонных зон.

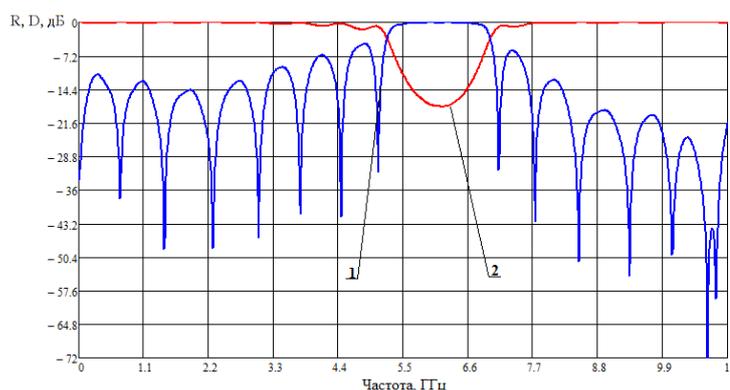


Рисунок 1.9 Спектры 1 – отражения  $R$  и 2–прохождения  $D$  коаксиальной пятнадцатислойной фотонной структуры

При внесении в данную структуру одного, двух, трех нарушений в запрещенной зоне фотонного кристалла возникает один (рисунок 1.10), два (рисунок 1.11) и три пика (рисунок 1.12) окна прозрачности соответственно

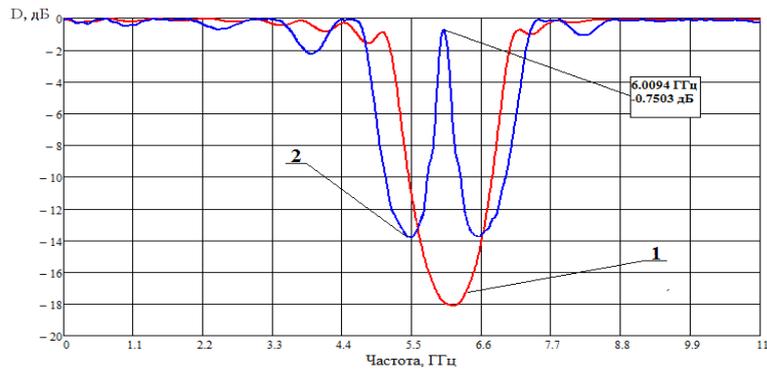


Рисунок 1.10 Спектр 1– прохождения коаксиального ФК без нарушения и спектр 2- прохождения коаксиального ФК с нарушением

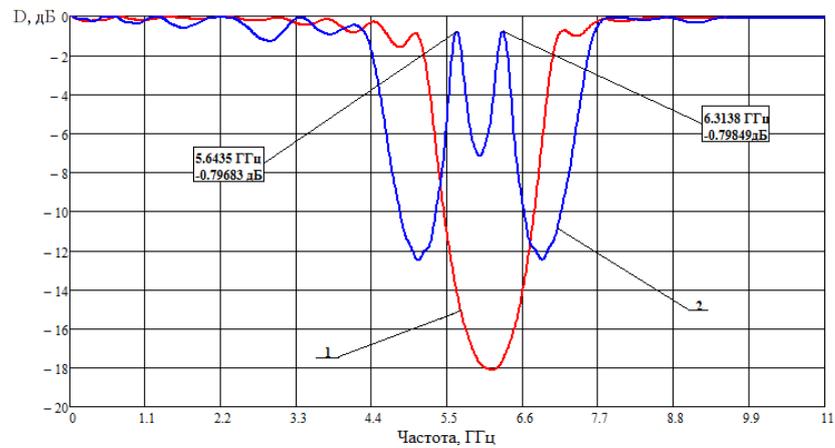


Рисунок 1.11 Спектр 1- прохождения коаксиального ФК без нарушения и спектр 2- прохождения коаксиального ФК с двумя нарушениями

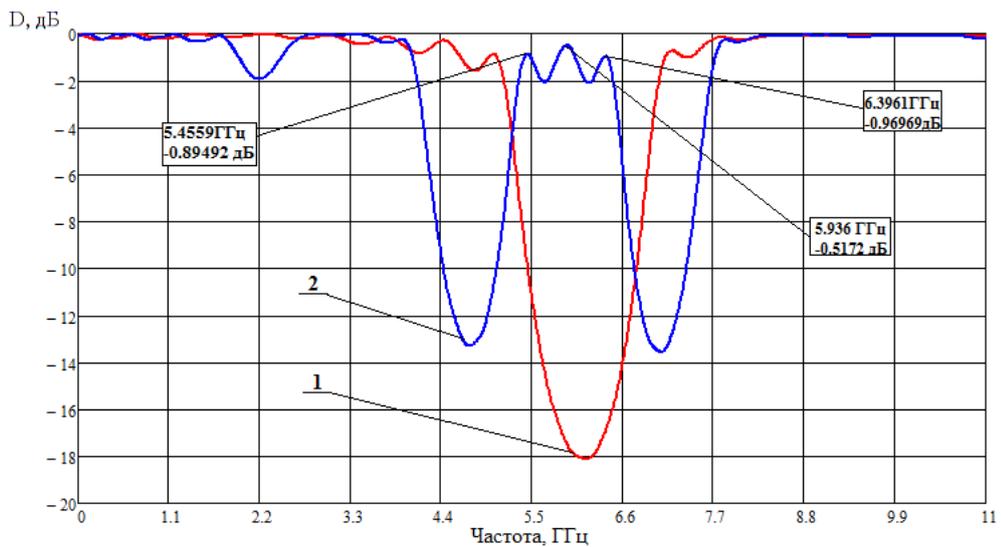


Рисунок 2.12 Спектр 1- прохождения коаксиального ФК без нарушения и спектр 2- прохождения коаксиального ФК с тремя нарушениями

В третьем разделе было проведено экспериментальное исследование коаксиального фотонного кристалла на основе фторопласта и воздуха, а также получены спектры прохождения для структуру с одним, двумя и тремя нарушениями. Изображение данного фотонного кристалла без нарушения периодичности представлено на рисунке 1.13



Рисунок 1.13 Пятнадцатислойный коаксиальный фотонный кристалл без нарушения вид сверху

Спектр фотонного кристалла представленного на рисунке 1.13 представлен на рисунке 1.14

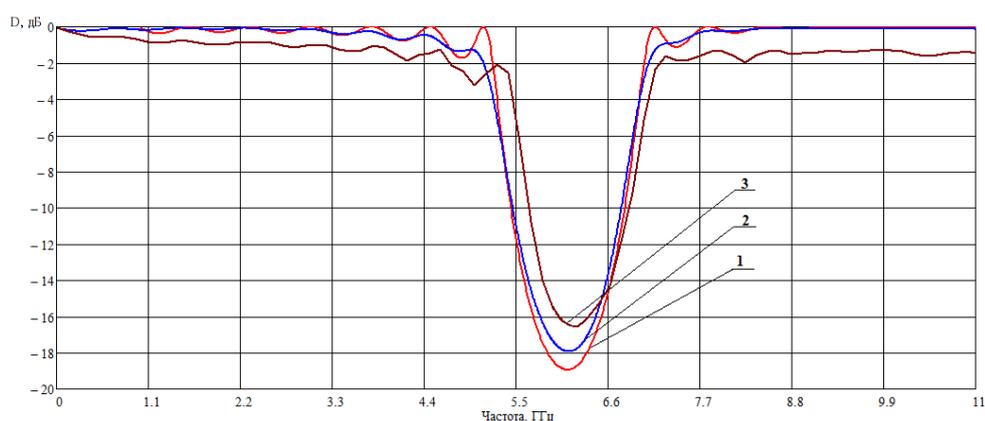


Рисунок 1.14 Спектры пропускания пятнадцатислойной структуры на основе фторопласта и воздуха, без нарушения периодичности, полученные путем: 1– теоретического расчета, 2– компьютерного моделирования, 3–экспериментального исследования

При введении в данного рода структуру одного двух и трех нарушений периодичности привело к тому что в запрещенной зоне фотонного кристалла возникает один(рисунок 1.15), два (рисунок 1.16) и три(рисунок 1.17) пика окна прозрачности . а так же проведено сравнение экспериментальных

результатов с результатами полученными в результате теоретического исследования и компьютерного моделирования.

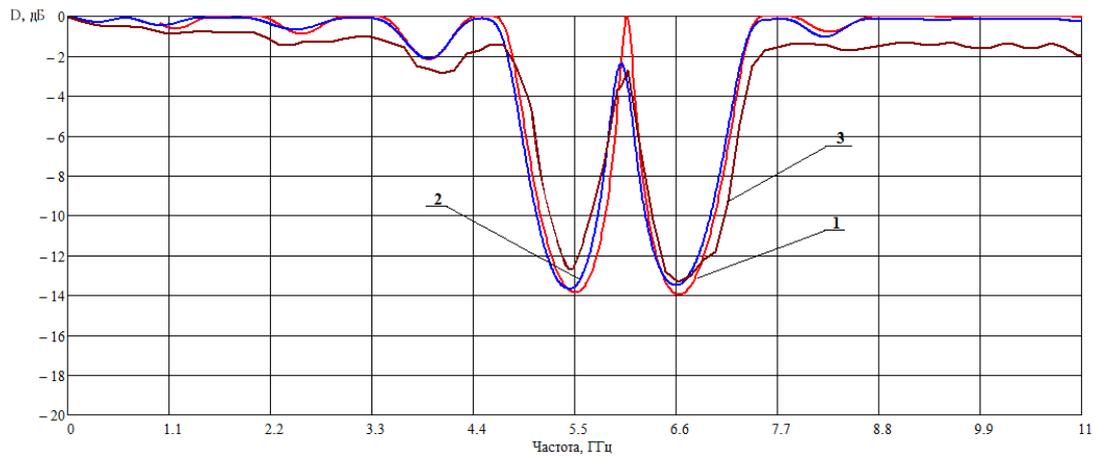
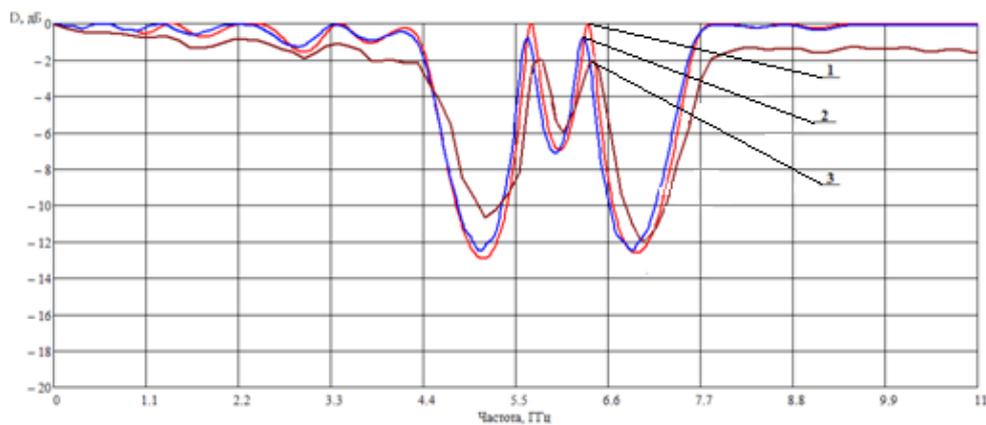
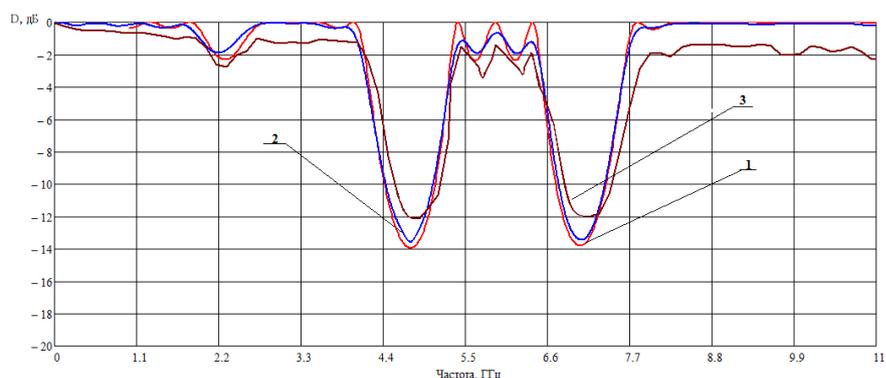


Рисунок 1.15 Спектры пропускания пятнадцатислойной структуры на основе фторопласта и воздуха, с одним нарушением периодичности, полученные путем: 1– теоретического расчета, 2– компьютерного моделирования, 3–экспериментального исследования



1.16 Спектры пропускания пятнадцатислойной структуры на основе фторопласта и воздуха, с двойным нарушением периодичности, полученные путем: 1– теоретического расчета, 2– компьютерного моделирования, 3–экспериментального исследования



1.17 Спектры пропускания пятнадцатислойной структуры на основе фторопласта и воздуха, с тройным нарушением периодичности, полученные путем: 1– теоретического расчета, 2– компьютерного моделирования, 3–экспериментального исследования

Проанализировав все данные полученные в результате экспериментального исследования, можно сказать что экспериментальная модель полностью подтверждает данные полученные в результате теоретического расчета и компьютерного моделирования, а незначительные расхождения по положению запрещенных и разрешенных зон в частотном диапазоне является результатом неточности при изготовлении фторопластовых слоев для внутреннего диэлектрического заполнения, а также несовершенностью коаксиальной измерительной линии.

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

### *ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ*

Таким образом, в ходе выполнения выпускной квалификационной работы магистра:

1. Проведено теоретическое исследование коаксиальных фотонных кристаллов с нарушением и без нарушений. Произведен теоретический расчет для пятнадцатислойного фотонного кристалла фторопласт – воздух, построены спектры прохождения электромагнитного

излучения для структур: без нарушения, с одним нарушением периодичности, двумя и тремя.

2. Установлено что при увеличении количества числа нарушений, в области запрещенной зоны ФК прямо пропорционально увеличивается количество пиков окна прозрачности.
3. Проведено компьютерное моделирование спектров прохождения одномерных коаксиальных пятнадцатислойных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона при поочередном изменении диаметров слоев внутреннего диэлектрического заполнения.
4. Установлено, что при уменьшении внешнего диаметра слоев с большей диэлектрической проницаемостью происходит уменьшение по глубине и ширине запрещенной зоны ФК, а при уменьшении внешнего диаметра у слоев с меньшей  $\epsilon$  наоборот происходит увеличение запрещенной зоны в глубине и ширине.
5. Проведено моделирование коаксиального фотонного кристалла на основе слоев из одного диэлектрика разного внешнего диаметра. Произведен расчет эффективной диэлектрической проницаемости для слоев меньшего внешнего диаметра по формуле Брауна, по формуле для структур в которой вектор напряженности электрического поля перпендикулярен слоям диэлектрика и путем решения электродинамической задачи.
6. Установлено, что применение метода эффективной диэлектрической проницаемости при использовании структур, не полностью заполняющих поперечное сечение коаксиала, возможно, при этом использование выражений для расчета эффективной диэлектрической проницаемости с использованием формулы Брауна позволяет получить искомые результаты с погрешностью 2%, а с использованием соотношения для слоистых структур в которых вектор напряженности

электрического поля перпендикулярен слоям диэлектрика с погрешностью 12,4%.

7. Проведено компьютерное моделирование пятнадцатислоного фотонного кристалла на основе фторопласта и воздуха, построены модели ФК с одним нарушением, с двумя, стремя.
8. Установлено что при внесении в структуру дополнительно нарушения в запрещенной зоне возникает дополнительный пик окна прозрачности.
9. Проведено экспериментальное исследование взаимодействия электромагнитного излучения и пятнадцатислойного коаксиального фотонного кристалла фторопласт – воздух, с разным количеством нарушений периодичности.
10. Установлено что данные полученные в результате экспериментального исследования незначительно отличаются от данных полученных путем компьютерного моделирования и теоретического расчета. В спектрах прохождения экспериментальной модели, при увеличении количества нарушений также, как и при теоретических расчетах, в запрещенной зоне ФК возникает дополнительный пик окна прозрачности.

### Список использованных источников

1. Пономарев Д. В. Особенности взаимодействия СВЧ-излучения с фотонными кристаллами, содержащими в качестве неоднородностей диэлектрические, полупроводниковые и металлические включения. Саратов, 2012.–139с.
2. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов. Саратов, 2014. –32 с.
3. Щемеров И. В. Разработка и создание аппаратуры для бесконтактного измерения электрофизических параметров полупроводниковых материалов. Москва, 2015. –128 с.
4. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Вениг С.Б. Измерение параметров полупроводников и диэлектриков на СВЧ. Саратов, 2010. –91 с.
5. 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.
6. 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.