

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 материалов и структур с использованием
коаксиальных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 411 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Урзяевой Светланы Владимировны

Научные руководители

профессор, д.ф.-м.н.

А. В. Скрипаль

доцент, к.ф.-м.н.

Д. В. Пономарев

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

Д. А. Усанов

Саратов 2018

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие микро- и наноэлектроники, а также сопутствующее развитие нанотехнологий стало причиной создания нового класса периодических структур – фотонных кристаллов. Данный класс обладает периодической структурой, период которой соизмерим с длиной волны электромагнитного излучения, распространяющегося по кристаллу [1, 2]. В периодических фотонных структурах существуют разрешенные и запрещенные для распространения электромагнитной волны частотные области [3].

На физические свойства фотонных кристаллов сильное влияние оказывает расположение элементов, из которых они состоят. Изменение электрофизических параметров, а также геометрических размеров одного или нескольких слоев фотонного кристалла способствует появлению в фотонной запрещенной зоне, так называемого, «пика пропускания», представляющего собой частотную область с минимальным значением коэффициента отражения электромагнитного излучения. Положение и форма «пика пропускания» определяются геометрическими размерами и электрофизическими параметрами создаваемого нарушения в периодичности расположения слоев. Это изменение частотного положения и формы «пика пропускания» является основой для создания методов по определению электрофизических параметров материалов, нарушающих периодичность фотонного кристалла.

Свойства фотонных кристаллов уникальны, так как в таких структурах взаимодействие электромагнитной волны с периодической структурой носит резонансный характер. Создание на основе фотонных кристаллов новых типов структур и устройств с управляемыми параметрами, реализация новых высокочувствительных методов измерения параметров материалов возможно, благодаря таким свойствам фотонных периодических структур.

Поведение таких систем довольно активно исследуется последние несколько десятилетий. Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона создаются с использованием элементов на основе линий передачи различных типов:

волноводов с диэлектрическим заполнением [4], а также планарных линий передачи с структурой, которая периодически изменяется [5]. Однако созданию фотонных кристаллов на основе коаксиальных линий передачи в СВЧ-диапазоне посвящено крайне мало работ. Коаксиальная линия – одна из самых распространенных и применяемых в СВЧ-технике линий передачи. Достоинствами коаксиальных линий передачи являются широкополостность, а также отсутствие паразитного излучения, вследствие экранированной конструкции линии. Комбинация уникальных свойств фотонных кристаллов и свойств коаксиальной линии позволяет найти новые практические применения свойств СВЧ-фотонных кристаллов, в связи с этим исследование коаксиальных фотонных кристаллов является перспективным направлением для научных изысканий.

Целью бакалаврской работы являлось выявление особенностей взаимодействия СВЧ-излучения с одномерными коаксиальными фотонными кристаллами и реализация на их основе методов определения параметров материалов и структур в СВЧ-диапазоне.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе приведен теоретический обзор о видах и свойствах фотонных кристаллов СВЧ-диапазона.

Во втором разделе представлена математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными коаксиальными фотонными кристаллами.

Также представлено компьютерное моделирование АЧХ коэффициентов отражения и прохождения одномерных коаксиальных фотонных структур СВЧ-диапазона.

Исследовался 11-слойный фотонный кристалл, заполняющий коаксиальную линию (рис. 1). Нечетные слои были выполнены из поликора (Al_2O_3 , $\varepsilon=9.6$) толщиной 2 мм, четные – из фторопласта ($\varepsilon=2$) толщиной 10 мм.

Расчет проводился в диапазоне частот 1-26 ГГц. Нарушение периодичности фотонной структуры создавалось изменением диэлектрической проницаемости центрального (шестого) слоя, толщина которого оставалась неизменной и составляла 10 мм.

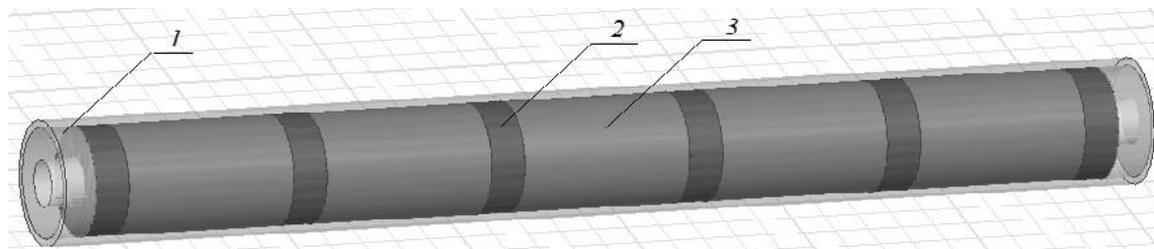


Рис. 1 Модель коаксиального фотонного кристалла: 1 – отрезок коаксиальной линии передачи, 2 – слои поликора, 3 – слои фторопласта.

Расчетные спектры отражения и прохождения фотонного кристалла «поликор-фторопласт» без нарушения периодичности структуры представлены на рис. 2. По данным спектрам видно, что у фотонного кристалла в диапазоне частот 1–26 ГГц существуют 4 разрешенных и 3 фотонных запрещенных зоны.

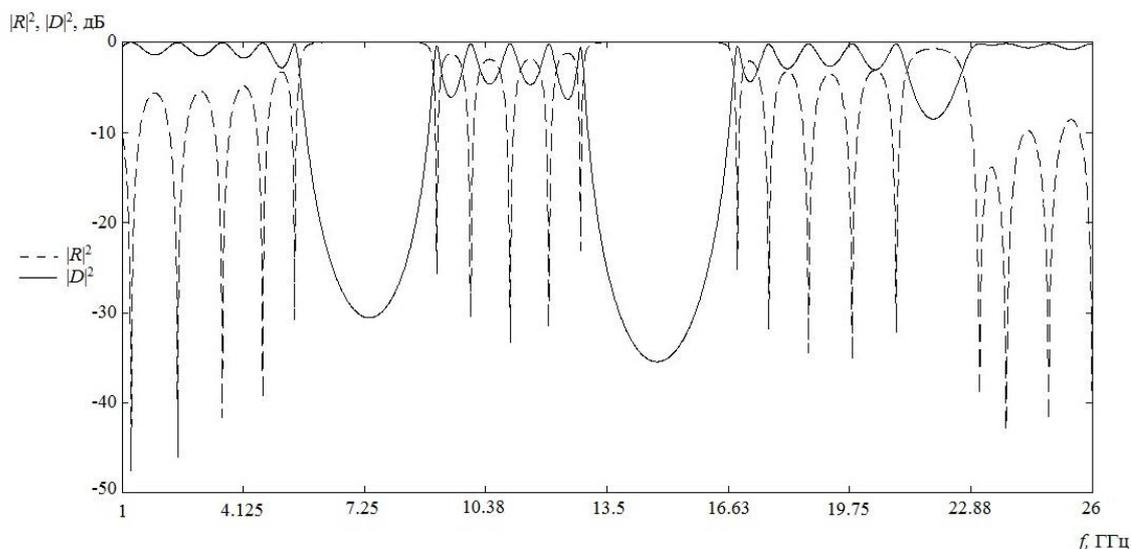


Рис. 2. Расчетные спектры отражения и прохождения 11-слойного фотонного кристалла «поликор-фторопласт» без нарушения периодичности структуры.

Результаты компьютерного моделирования АЧХ коэффициентов отражения и прохождения одномерных коаксиальных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона с различными значениями величины диэлектрической проницаемости центрального слоя в диапазоне частот 10-20 ГГц представлены на рис. 3. По данным зависимостям видно появление пика пропускания в

фотонной запрещенной зоне. Пик пропускания сдвигается в низкочастотную область с увеличением диэлектрической проницаемости нарушенного слоя.

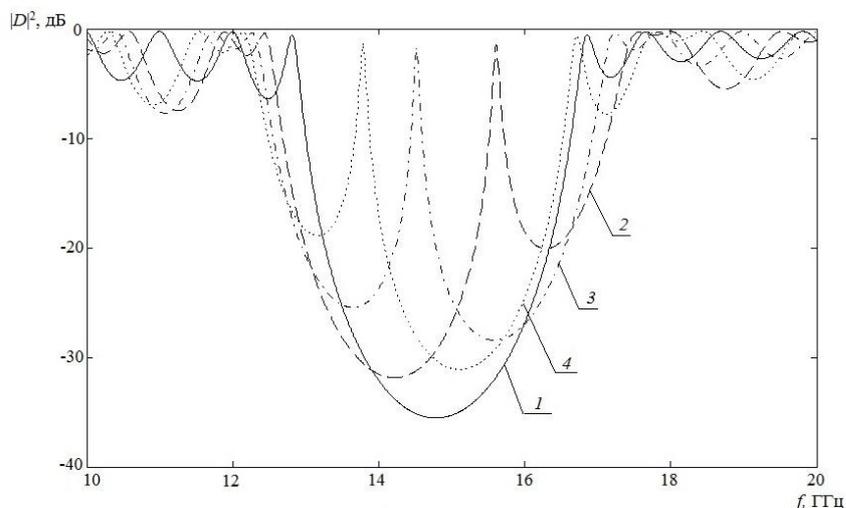
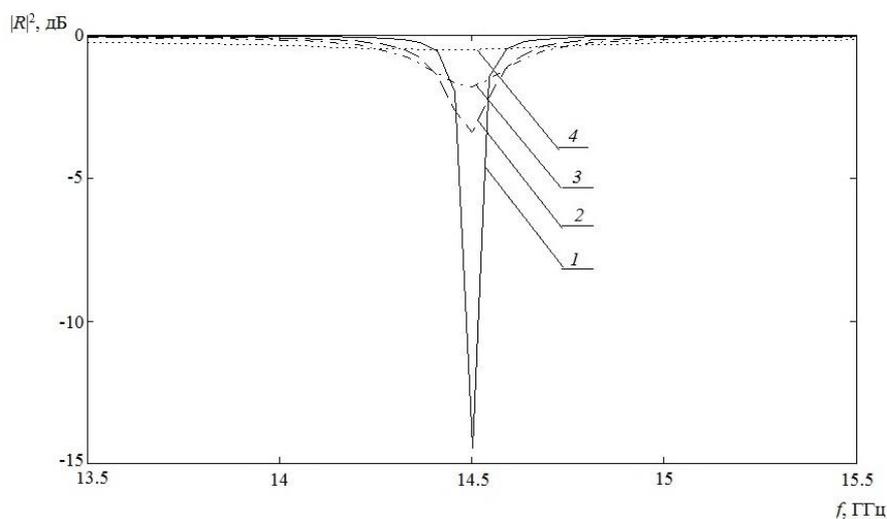
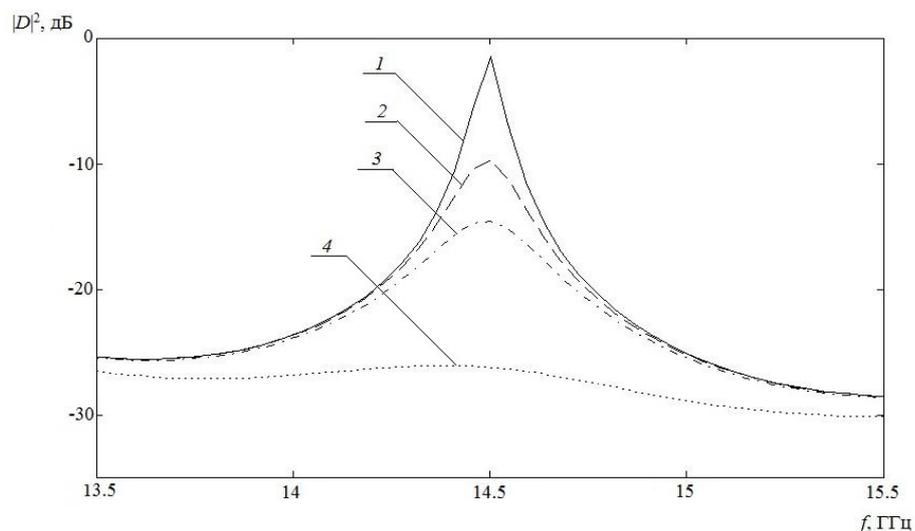


Рис. 3 Расчетные АЧХ коэффициентов пропускания фотонного кристалла «поликор-фторопласт» для различных значений диэлектрической проницаемости нарушенного 6-го слоя: 2 – $\epsilon=3$, 3 – $\epsilon=4$, 4 – $\epsilon=5$ (кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без нарушений).

Результаты компьютерного моделирования АЧХ коэффициентов отражения и прохождения одномерных коаксиальных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона с нарушением периодичности в виде измененной диэлектрической проницаемости центрального слоя ($\epsilon=4$) при различных значениях электропроводности центрального слоя приведены на рис. 4. При увеличении электропроводности нарушенного слоя наблюдается увеличение коэффициента отражения и уменьшение коэффициента пропускания.



a)



б)

Рис. 4 Спектры отражения (а) и прохождения (б) вблизи «окна прозрачности» 11-слойного фотонного кристалла «поликор-фторопласт» с нарушением периодичности в виде измененной диэлектрической проницаемости центрального слоя ($\epsilon=4$) при различных значениях электропроводности центрального слоя: 1 - $\sigma=0 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, 2 - $\sigma=0.045 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, 3 - $\sigma=0.1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, 4 - $\sigma=0.45 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

В третьем разделе представлено компьютерное моделирование и экспериментальное исследование АЧХ коэффициентов отражения и прохождения одномерных коаксиальных фотонных структур СВЧ-диапазона.

Исследовался 11-слойный фотонный кристалл, заполняющий коаксиальную линию (рис. 5). Нечетные слои были выполнены из фторопласта ($\epsilon=2$), четные – из воздуха ($\epsilon=1$). Толщина нечетных отрезков 10 мм, четных – 8 мм. Нарушение периодичности фотонной структуры создавалось изменением диэлектрической проницаемости центрального (шестого) слоя ($\epsilon=2.4$, эбонит), толщина которого оставалась неизменной и составляла 8 мм.

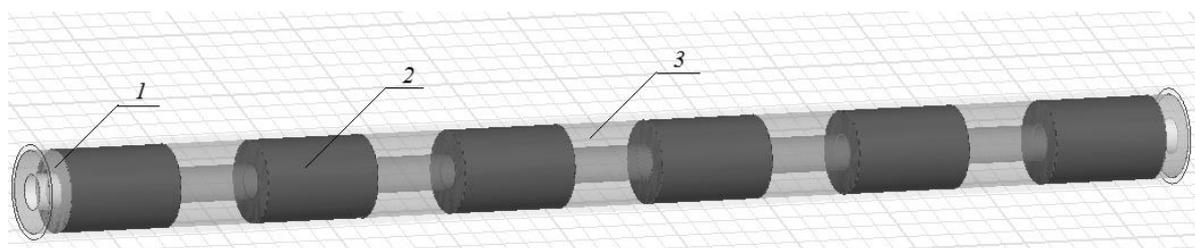


Рис. 5 Модель коаксиального фотонного кристалла: 1 – отрезок коаксиальной линии передачи, 2 – слои фторопласта, 3 – слои воздуха.

Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотной зависимости коэффициентов прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом без нарушения периодичности (кривая 1) и с нарушением периодичности в виде изменения диэлектрической проницаемости ($\epsilon=2.4$) центрального слоя (кривая 2) представлены на рис. 6. Из полученной зависимости видно, что при изменении диэлектрической проницаемости центрального слоя в запрещенных зонах появляются «пики пропускания». При детальном рассмотрении данной зависимости видно, что ширина запрещенных зон увеличивается, причем первая запрещенная зона сдвигается в высокочастотную область.

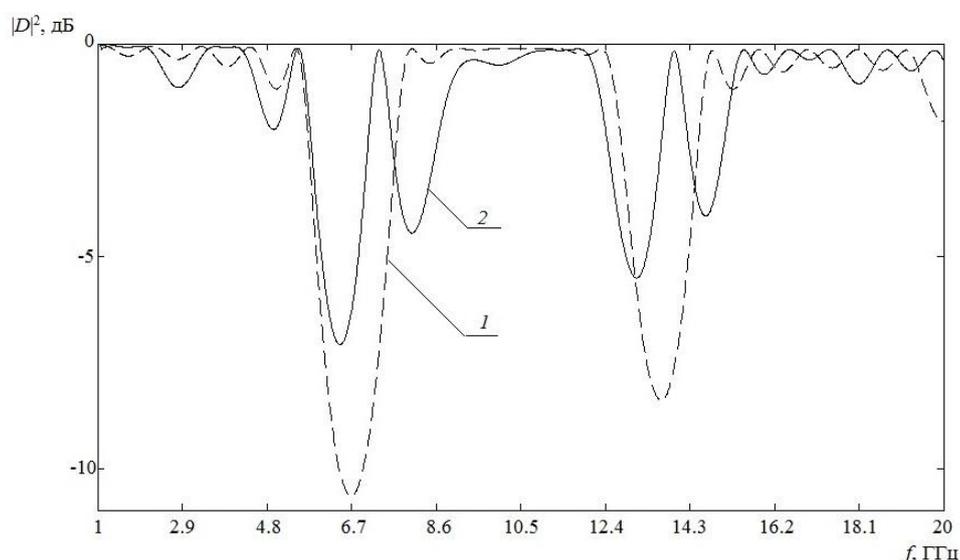


Рис. 6 Расчетные амплитудно-частотные зависимости коэффициентов прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с 11-слойным фотонным кристаллом «фторопласт-воздух» 1 - без нарушения периодичности, 2 - с нарушенным центральным слоем.

На рис. 7 представлены экспериментальные амплитудно-частотные зависимости коэффициентов прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом «фторопласт-воздух» без нарушения периодичности (кривая 1) и с нарушением периодичности в виде изменения диэлектрической проницаемости ($\epsilon=2.4$) центрального слоя (кривая 2). Данные результаты подтверждают появление «пиков пропускания» в запрещенных зонах, увеличение ширины фотонных запрещенных зон и сдвиг первой запрещенной зоны в высокочастотную область.

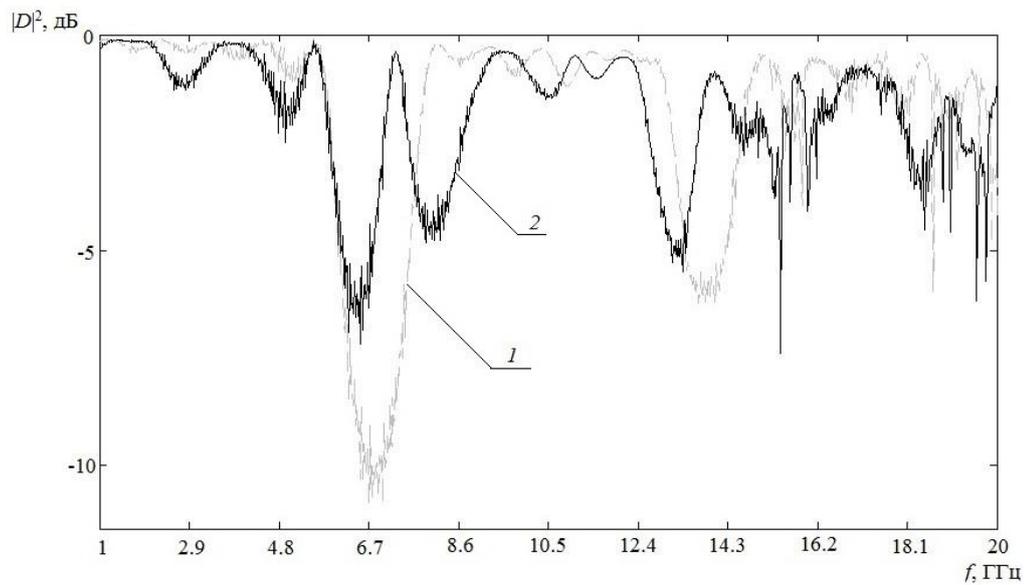


Рис. 7 Экспериментальные амплитудно-частотные зависимости коэффициентов прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом «фторопласт-воздух» 1 - без нарушения периодичности, 2 - с нарушенным центральным слоем.

На рис. 8 представлены расчетные (кривая 1) и экспериментальные (кривая 2) АЧХ коэффициентов прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом «фторопласт-воздух» без нарушения и с нарушением периодичности структуры.

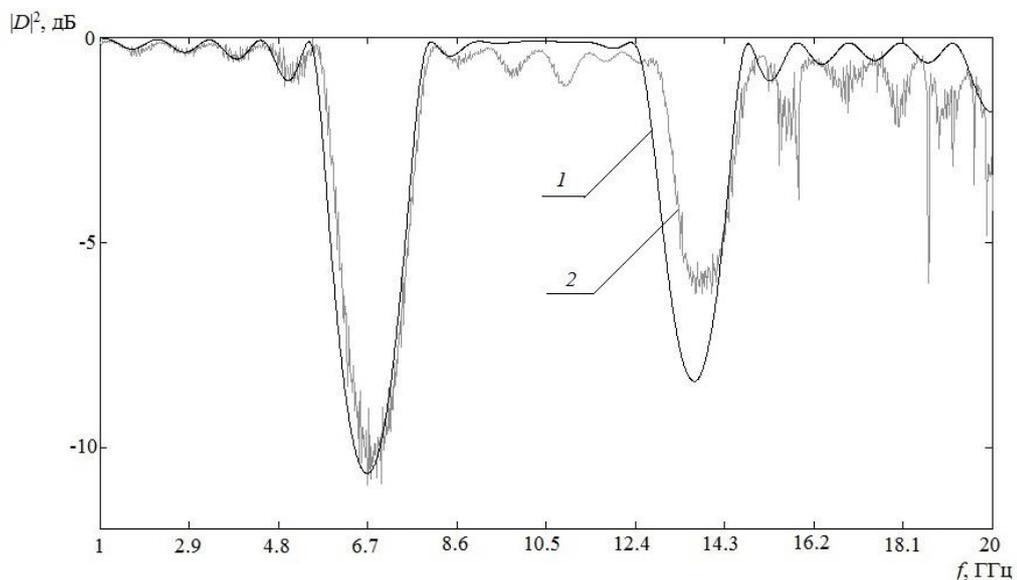


Рис. 8 Расчетные (кривая 1) и экспериментальные (кривая 2) АЧХ коэффициентов прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом «фторопласт-воздух» без нарушения периодичности.

Сравнение результатов расчёта и эксперимента свидетельствует о об их хорошем качественном и количественном совпадении.

В четвертом разделе был обоснован теоретически и реализован экспериментально метод определения комплексной диэлектрической проницаемости диэлектрика, выполняющего роль нарушения коаксиального фотонного кристалла СВЧ-диапазона, посредством решения обратной задачи.

Для реализации решения обратной задачи был выбран нарушенный (шестой) слой фотонного кристалла «фторопласт-воздух».

Были получены следующие значения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости нарушенного слоя: $\epsilon'=2.4$, $\epsilon''=0.027$.

На рис. 9 представлены амплитудно-частотные зависимости экспериментальных значений $|R|^2$ и $|D|^2$ и аналогичных расчетных зависимостей для одномерного 11-слойного фотонного кристалла, полученных с использованием найденных значений параметров $\epsilon'=2.4$, $\epsilon''=0.027$.

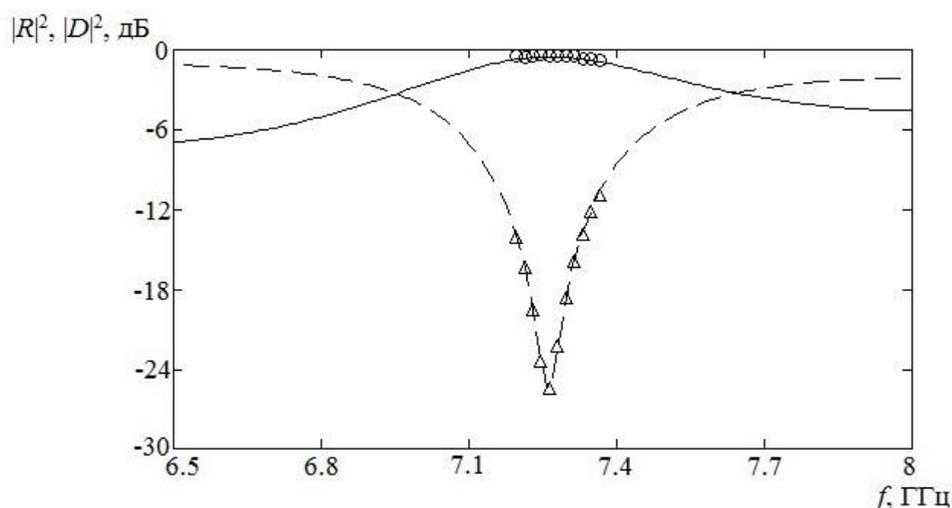
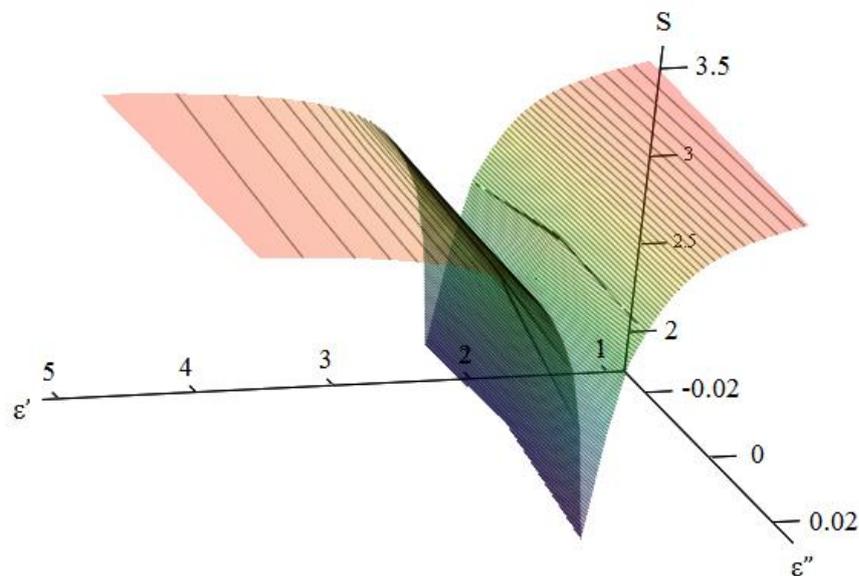


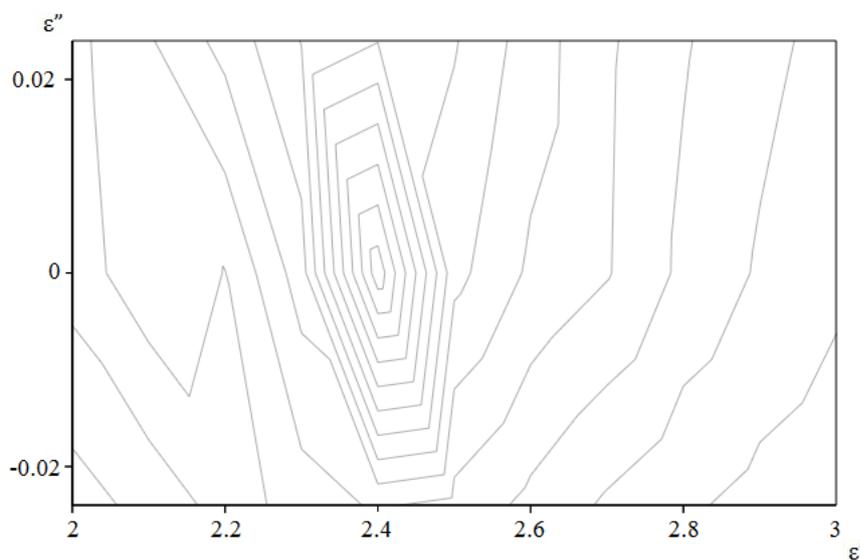
Рис. 9 Амплитудно-частотные зависимости экспериментальных (кружки, треугольники) и рассчитанных (сплошная и пунктирная линии) значений коэффициентов прохода и отражения, полученные с использованием найденных значений параметров $\epsilon'=2.4$, $\epsilon''=0.027$.

Функция невязок $S(\epsilon', \epsilon'')$ обладает четко выраженным глобальным минимумом в пространстве координат $(\epsilon', \epsilon'', S(\epsilon', \epsilon''))$ (рис. 10, а), что позволило

однозначно определить действительную и мнимую части комплексной диэлектрической проницаемости слоя. Контурная карта функции невязок вблизи глобального минимума в системе координат искомых параметров представлена на рис. 10, б).



а)



б)

Рис. 10 Вид функции невязок в пространстве координат $(\epsilon', \epsilon'', S(\epsilon', \epsilon''))$ (а) и контурная карта функции невязок в системе координат искомых параметров ϵ' и ϵ'' (б).

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы бакалаврской работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе выполнения бакалаврской работы:

1. Проведено компьютерное моделирование спектров отражения и прохождения одномерных коаксиальных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона без нарушения и с нарушением периодичности структуры в виде изменения диэлектрической проницаемости центрального слоя, а также в виде изменения электропроводности центрального слоя в частотном диапазоне 1-26 ГГц.

2. Установлено, что при изменении диэлектрической проницаемости центрального слоя фотонного кристалла «поликор-фторопласт» в фотонной запрещенной зоне появляется «окно прозрачности», частотное положение которого зависит от значения диэлектрической проницаемости нарушенного слоя – при увеличении значения диэлектрической проницаемости измененного слоя «окно прозрачности» сдвигается в сторону больших длин волн.

3. При увеличении электропроводности центрального слоя фотонного кристалла «поликор-фторопласт» с нарушением периодичности в виде изменения диэлектрической проницаемости центрального слоя наблюдается увеличение коэффициента отражения и уменьшение коэффициента пропускания.

4. Представлены результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования взаимодействия СВЧ-излучения с одномерными коаксиальными фотонными кристаллами «фторопласт-воздух» в частотном диапазоне 1-20 ГГц. Экспериментально и теоретически исследованы спектры отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с одномерными коаксиальными фотонными кристаллами «фторопласт-воздух», содержащими нарушения периодичности в виде изменения диэлектрической проницаемости центрального слоя.

5. Установлено, что при изменении диэлектрической проницаемости центрального слоя фотонного кристалла «фторопласт-воздух» в запрещенных зонах появляются «пики пропускания», увеличивается ширина фотонных запрещенных зон, первая запрещенная зона сдвигается в высокочастотную область.

6. Был обоснован теоретически и реализован экспериментально метод определения комплексной диэлектрической проницаемости диэлектрика, выполняющего роль нарушения коаксиального фотонного кристалла СВЧ-диапазона, посредством решения обратной задачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics// Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, no. 20. pp. 2059—2062.

2 Yablonovitch E. Photonic Crystals: Semiconductors of Light// Scientific American. 2001. Vol. 285, no. 6. pp. 47–55.

3 Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов. Саратов, 2014. –32 с.: ил. Электронное издание.

4 Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopoulos 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.

5 Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации// Радиотехника. 2003. — №8. — С. 26—30.