

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

Кафедра физики твёрдого тела

**Особенности АЧХ коаксиальных несимметричных фотонных
кристаллов с несколькими типами нарушений**

Автореферат

студента 2 курса 2251 группы

направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

института физики

Кляуцер Сергей Сергеевич

Научные руководители

д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

к.ф.-м.н., доцент
должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Е.В. Латышева
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Саратов 2021

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Фотонными кристаллами называются периодические структуры, размеры элементов которых сравнимы с длинами распространяющихся в них электромагнитных волн.

В такого рода структурах реализуется периодическое изменение как электрофизических свойств (диэлектрической проницаемости, электропроводности) формирующих их элементов, так и их геометрических размеров. Это приводит к появлению четко выраженного зонного характера спектров отражения и прохождения взаимодействующего с фотонными кристаллами электромагнитного излучения.

Аналогично ситуации, характерной для электронов, находящихся в поле кристалла, энергетические состояния которых образуют для электронов зоны допустимых и запрещенных значений энергии, свойства фотонных кристаллов связаны с периодическим расположением образующих их элементов.

Общие характерные свойства, в частности появление «примесной моды колебаний» при создании нарушения периодичности, присущие фотонным структурам других диапазонов, СВЧ фотонные структуры сохраняют и позволяют осуществлять исследования их общих физических свойств без привлечения чрезвычайно сложного и дорогостоящего оборудования.

Целью магистерской работы является теоретическое и экспериментальное исследование особенностей спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с фотонными кристаллами на основе коаксиальной линии передачи с различными типами структуры, в том числе с несколькими типами нарушений.

В ходе выполнения магистерской работы были рассмотрены амплитудно-частотные характеристики коаксиального фотонного кристалла, слои с большей диэлектрической проницаемостью которого выполнены из

отрезков ФЛАНА ($\epsilon = 8.8$) толщиной 2.93 мм, а слои с меньшей диэлектрической проницаемостью – из фторопласта ($\epsilon = 2$, толщина 3.8 мм). В данном фотонном кристалле было создано нарушение периодичности путем изменения толщины четвертого и восьмого слоя фторопласта $d = 10.47$ мм.

Для расчета коэффициента прохождения и отражения электромагнитной волны в КБС использовалась матрица передачи T четырехполюсника сложной структуры, представляющего собой каскадное соединение элементарных четырехполюсников с известными матрицами передачи, которые имеют вид:

$$T = \begin{pmatrix} T_{[1,1]} & T_{[1,2]} \\ T_{[2,1]} & T_{[2,2]} \end{pmatrix} = T'_N \times \prod_{i=1}^{N-1} (T''_{i,i+1} \times T'_i), \quad (1)$$

где T'_i и $T''_{i,i+1}$ – матрицы передачи четырехполюсников, описывающих соответственно i – тый отрезок и прямое соединение i - того и $(i+1)$ - ого отрезков коаксиальной линии передачи.

Коэффициенты прохождения и отражения СВЧ мощности определяются через элементы матрицы передачи T по известным соотношениям:

$$D = \frac{1}{|T_{[1,1]}|^2}, \quad R = \left| \frac{T_{[2,1]}}{T_{[1,1]}} \right|^2$$

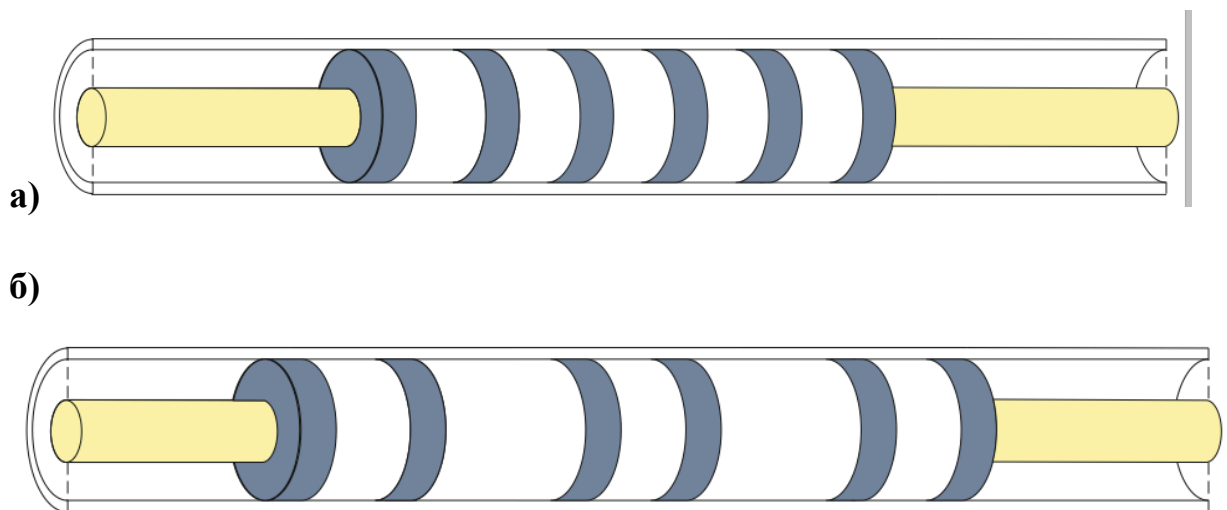


Рис. 1 Структура 11 – слойного фотонного кристалла: **(а)**– без нарушения периодичности, **(б)** – с нарушением периодичности

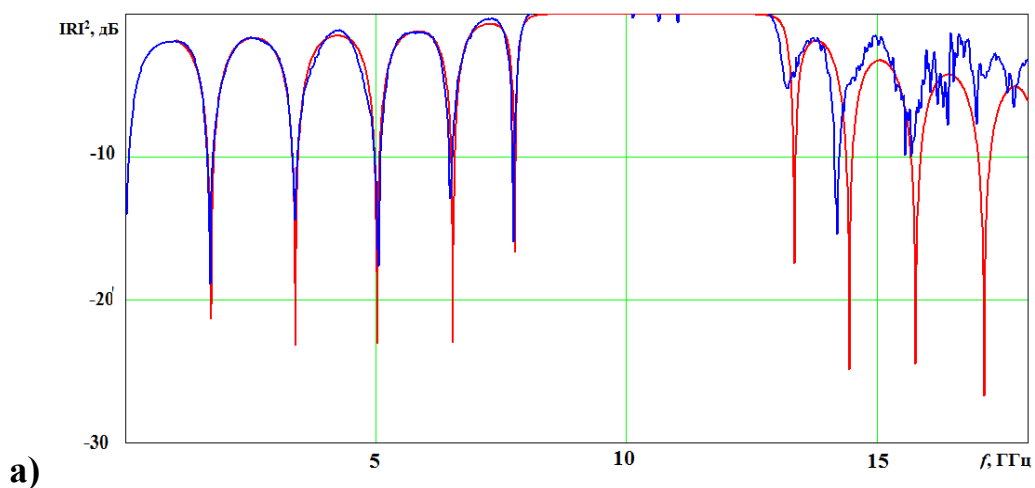
Для проведения экспериментальных исследований использовалась измерительная секция, представленная на рисунке 2.



Рис. 2 Измерительная секция сверхвысокочастотной КБС

На рисунках 3 – 6 представлены амплитудно-частотные характеристики коаксиального фотонного кристалла, структура которого начинается слоем с большим значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 8.8$ $d = 2.93$ мм) и заканчивается слоем с меньшим значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 2$ $d = 3.8$ мм). Количество слоев фотонного кристалла выбиралось равным двенадцати. Структура 11 – слойного фотонного кристалла представлена на рисунке 1.

Далее на иллюстрациях обозначены: красным цветом расчетные зависимости квадратов модулей коэффициента отражения, синим – экспериментальные зависимости квадратов модулей коэффициента прохождения отражения.



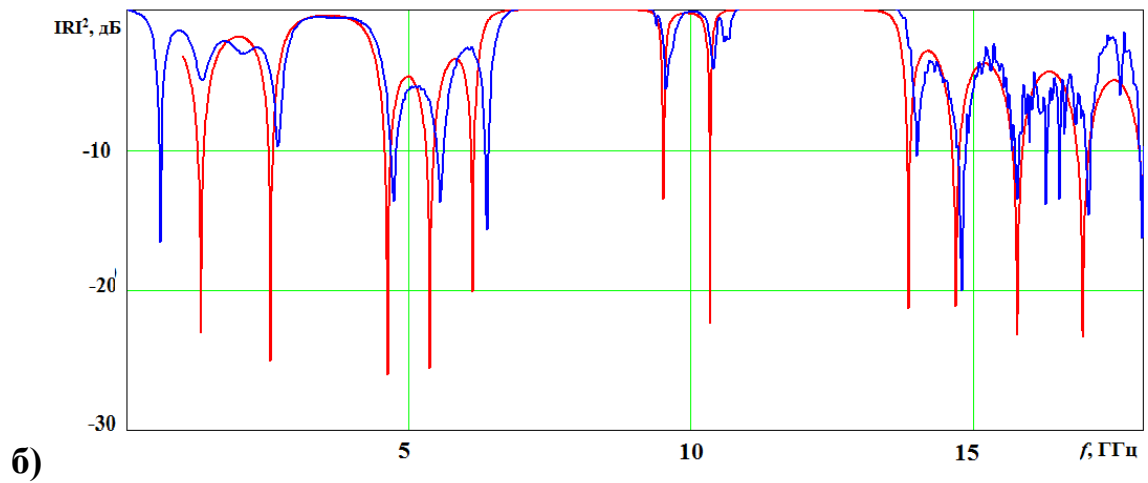


Рис. 3 Расчетные и экспериментальные частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, структура которого начинается и заканчивается слоем с большим значением диэлектрической проницаемости (слой ФЛАН): **(а)**– без нарушения периодичности, **(б)** – с нарушением периодичности

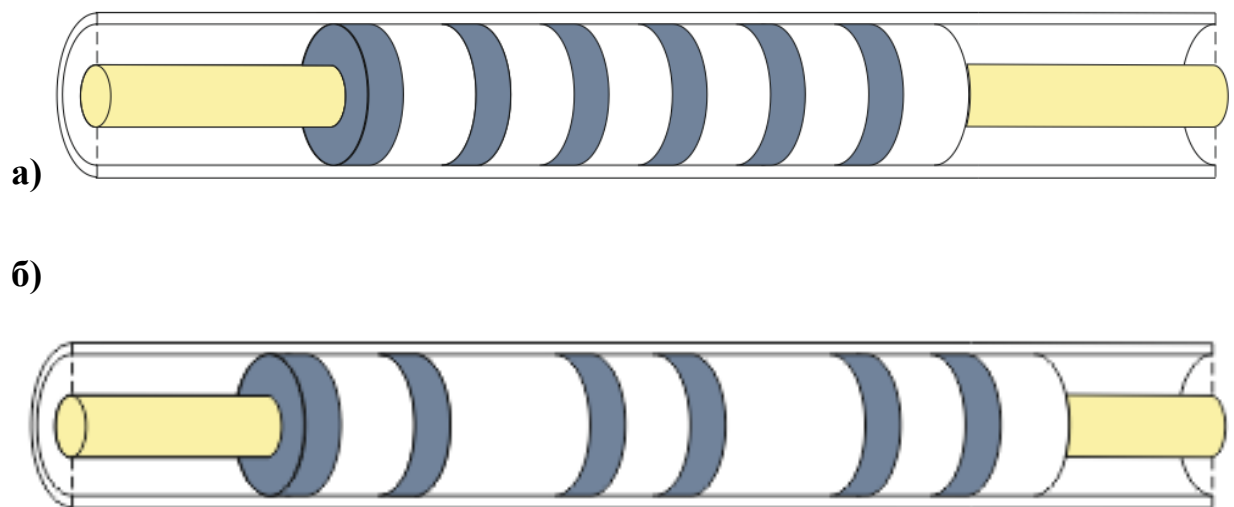


Рис. 4 Структура 12 – слойного фотонного кристалла: **(а)**– без нарушения периодичности, **(б)** – с нарушением периодичности

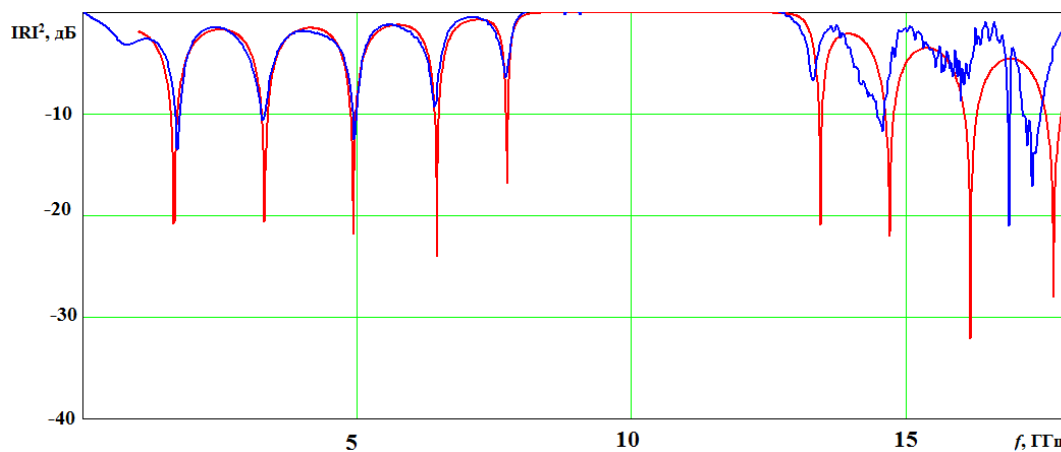


Рис. 5 Частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, структура которого начинается слоем с бóльшим значением диэлектрической проницаемости (слой ФЛАН) и заканчивается слоем с меньшим значением диэлектрической проницаемости (слой фторопласта). В данном ФК не было создано нарушений периодичности.

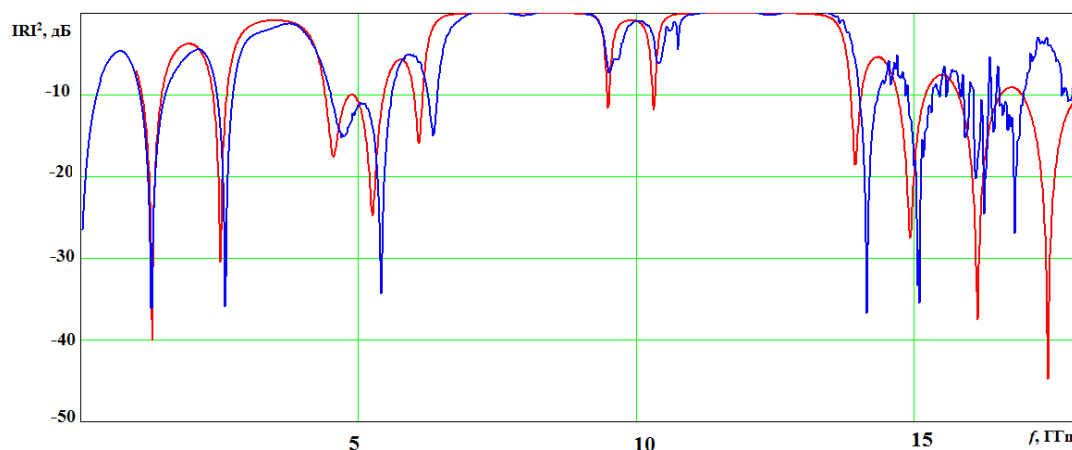


Рис. 6 Частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, и начинается слоем с бóльшим значением диэлектрической проницаемости (слой ФЛАН) и заканчивается слоем с меньшим значением диэлектрической проницаемости (слой фторопласта). В данном фотонном кристалле было создано нарушение периодичности путем изменения толщины четвертого и восьмого слоя фторопласта $d = 10.47$ мм.

Из рисунков 3 и 6 видно, что при увеличении количества слоев фотонного кристалла от одиннадцати до двенадцати величина коэффициента отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, на частоте 10 ГГц уменьшается. На указанной частоте величина

коэффициента прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, структура которого начинается и заканчивается слоем ФЛАН, меньше, чем величина коэффициента прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, структура которого начинается слоем ФЛАН и заканчивается слоем фторопласта.

В ходе проведения дальнейших исследований проведено сравнение амплитудно-частотных характеристик коаксиального фотонного кристалла, начинающегося с фторопласта и заканчивающегося ФЛАНом с фотонным кристаллом, начинающимся слоем ФЛАН и заканчивающимся слоем фторопласта.

На рисунке 7 представлена двенадцатислойная структура фотонного кристалла, которая начинается слоем с меньшим значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 2$) и заканчивается слоем с большим значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 8.8$).

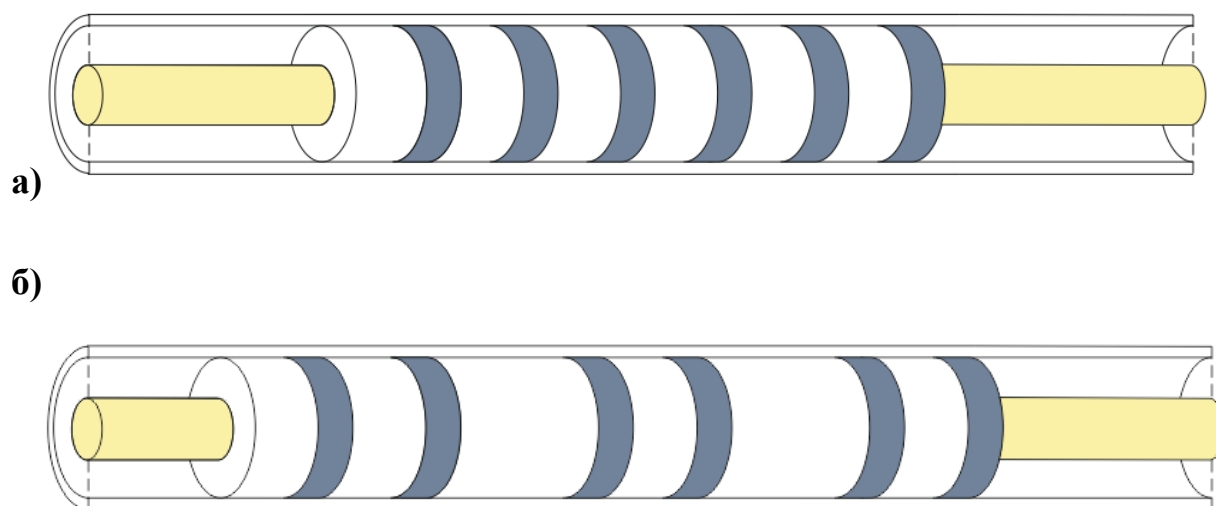


Рис. 7 Структура 12 – слойного фотонного кристалла:

(а)– без нарушения периодичности, (б) – с нарушением периодичности

Результаты исследований показали, что амплитудно-частотные характеристики фотонного кристалла, начинающегося с фторопласта и

заканчивающегося ФЛАНом совпадают с амплитудно-частотными характеристиками фотонного кристалла, начинающегося слоем ФЛАНа и заканчивающегося слоем фторопласта.

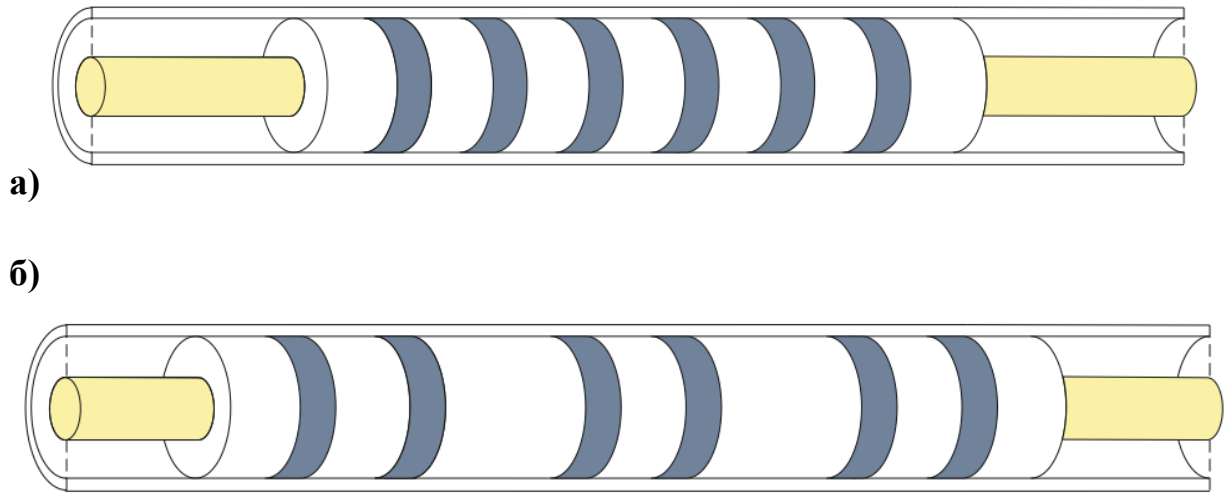


Рис. 8 Структура 13 – слойного фотонного кристалла: (а)– без нарушения периодичности, (б) – с нарушением периодичности

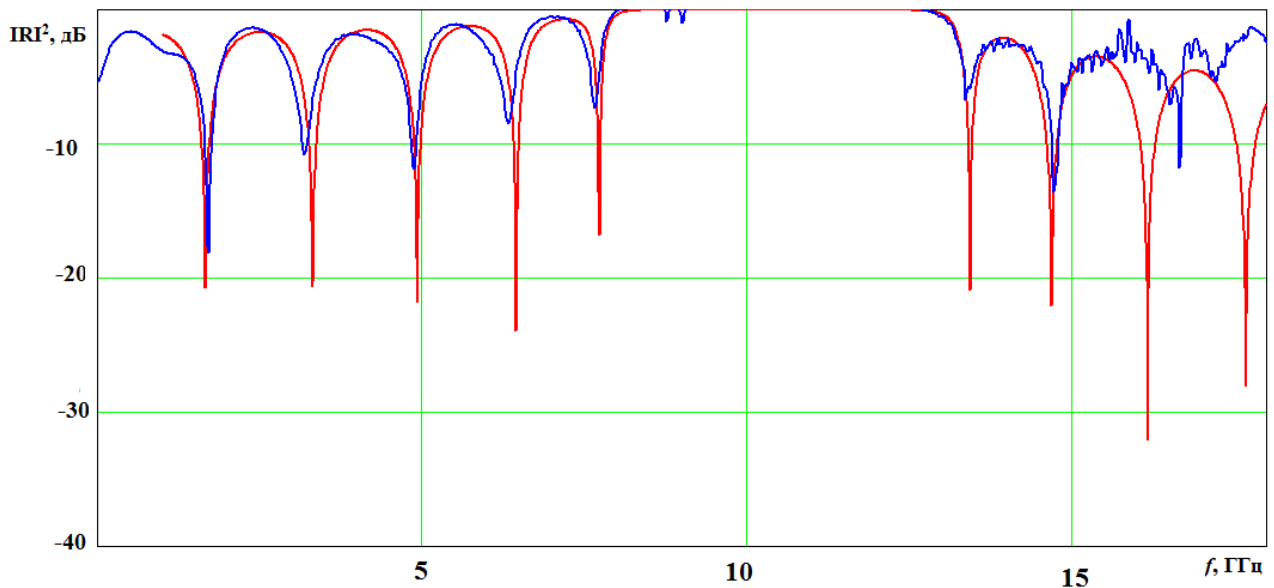


Рис. 9 Частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом (без нарушения периодичности), структура которого начинается и заканчивается слоем с меньшим значением диэлектрической проницаемости (слой фторопласта).

На рисунках 9 – 10 представлены амплитудно-частотные характеристики коаксиального фотонного кристалла, структура которого

начинается и заканчивается слоем с меньшим значением диэлектрической проницаемости (слой фторопласта). Количество слоев фотонного кристалла выбиралось равным тринадцати.

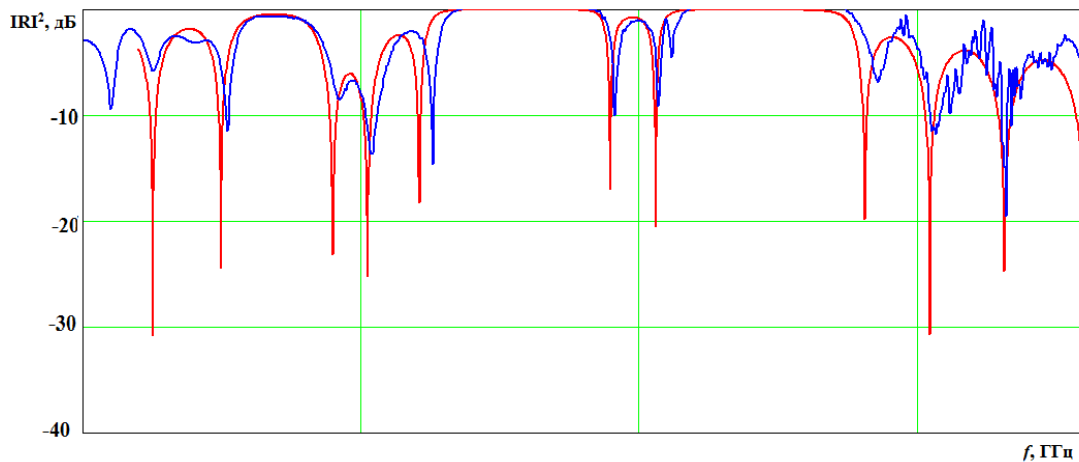


Рис. 10 Частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, структура которого начинается и заканчивается слоем с меньшим значением диэлектрической проницаемости (слой фторопласта). В данном фотонном кристалле было создано нарушение периодичности путем изменения толщины пятого и девятого слоя фторопласта $d = 10.47$ мм.

Из рисунков 3 и 10 видно, что при увеличении количества слоев фотонного кристалла до тринадцати дефектные моды приближаются к середине частотного диапазона, при этом величина коэффициента отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, структура которого начинается и заканчивается слоем фторопласта на частотах дефектных мод уменьшается по сравнению с величиной коэффициента отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, структура которого начинается слоем фторопласта и заканчивается слоем ФЛАН.

В ходе выполнения магистерской работы были получены следующие результаты:

В ходе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований было проведен анализ запрещенных и разрешенных зон ряда коаксиальных фотонных кристаллов без нарушения периодичности и с различными типами нарушения периодичности, также было проведено исследование АЧХ коаксиальных фотонных кристаллов с различными типами структуры

Было проведено исследование зонного характера спектров отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонными кристаллами без нарушения периодичности в зависимости от размера одного типа слоев. Показано, что при увеличении толщины слоев одного типа число запрещенных зон увеличивается.

Установлено, что при изменении параметров нарушенного слоя примесная мода колебаний смещается по частоте. Частотное положение примесной моды колебаний смещается в область низких частот при увеличении диэлектрической проницаемости нарушенного слоя или при увеличении его толщины.

Показано, что при увеличении количества слоев фотонного кристалла на единицу число разрешенных состояний (полос пропускания) в разрешенной частотной зоне не изменяется.

Исследовано влияние типа структуры на спектры отражения от фотонного кристалла при добавлении к структуре одного или двух слоев.

В результате сравнения установлено, что амплитудно-частотные характеристики фотонного кристалла, начинающегося с фторопласта и заканчивающегося ФЛАНом и фотонного кристалла, начинающегося слоем ФЛАНа и заканчивающегося слоем фторопласта совпадают.

Список использованных источников:

1. Усанов Д.А.. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения / Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 184 с.
2. Беляев Б.А., Исследование частотно-селективных устройств, построенных на основе микрополоскового двумерного фотонного кристалла / Б.А. Беляев, [и др.] // Доклады Академии наук – 2016. – Т. 467. – № 4. – С. 400–404.
3. Усанов Д.А., Мерданов М.К., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В СВЧ фотонные кристаллы. Новые сферы применения. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2015. Т. 15. Вып. 1 С. 57–73.
4. Резонансные особенности в разрешенных и запрещенных зонах сверхвысокочастотных коаксиальных брэгговских структур с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, О. М. Рузанов, И. О. Тимофеев
5. СВЧ коаксиальные брэгговские структуры и их использование для измерения диэлектриков
Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, О.М. Рузанов, И.О. Тимофеев
6. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Романов А.В., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Физика полупроводников (явления переноса в структурах с туннельно-тонкими полупроводниковыми слоями). Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1996. 236 с.
7. Гаджиев Г.М., Голубев В.Г., Курдюков Д.А., Певцов А.Б., Селькин А.В., Травников В.В. Характеризация фотонных кристаллов на основе композитов опал–полупроводник по спектрам брэгговского отражения света // Физика и техника полупроводников, 2005, том 39, вып. 12
8. Морозов Г.А., Морозов О.Г., Насыбулин А.Р., Севастьянов А.А., Фархутдинов А.Р. Коаксиальные Брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 3. С. 65–70.
9. Ranjit D. Pradhan, George H. Watson. Impurity effects in coaxial-connector photonic crystals : A quasi-one-dimensional periodic system // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60, № 4. P. 2410–2415. DOI: 10.1103/PhysRevB.60.2410
- 10 Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Рузанов О. М., Тимофеев И. О. Резонансные особенности в разрешенных и запрещенных зонах сверхвысокочастотных коаксиальных брэгговских структур с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2020. Т. 20. Вып. 1. С. 29–41.