

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

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

**ДЕФЕКТНЫЕ МОДЫ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА С
НАРУШЕНИЕМ В ВИДЕ СЛОЯ С ПОЛЯРНЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ**

студента 4 курса 4051 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

код и наименование направления

института физики

наименование факультета, института

Белякова Захара Анатольевича

фамилия, имя, отчество

Научные руководители

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание



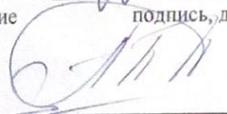
подпись, дата

Скрипаль А.В.

инициалы, фамилия

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

Фролов А. П.

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

Скрипаль А.В.

инициалы, фамилия

Саратов 2023 г.

Введение

Научно-технический прогресс всегда связан с инновациями в электронике, материаловедении и физике твердого тела, а одним из наиболее интересных и перспективных направлений в электронике, материаловедении и фотонике является изучение фотонных кристаллов. Фотонные кристаллы - это материалы с периодической изменчивостью диэлектрической проницаемости, способные контролировать распространение электромагнитных волн в определенном диапазоне частот. Введение дефектов в структуру фотонного кристалла позволяет управлять свойствами материала и создавать новые типы функциональных элементов фотоники. Одним из таких дефектов может стать слой с полярным диэлектриком.

В теоретической части представлены базовые понятия и определения в области фотонных кристаллов, а также классификация этих уникальных материалов на одномерные, двумерные и трехмерные. Более подробно описаны особенности полярных и неполярных жидкостей, которые играют важную роль в процессе формирования дефектных мод.

Практическая часть нашей работы включает подробное изучение дефектных мод фотонного кристалла. Изучались коэффициенты отражения и пропускания на частотах дефектных мод, которые позволят в дальнейшем применять полученные знания для проектирования и создания новых материалов и устройств с требуемыми свойствами.

Цель работы: Исследование влияния слоя с полярным диэлектриком на дефектные моды фотонного кристалла и разработка компьютерной модели для анализа амплитудно-частотных характеристик таких структур.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- ▶ Проанализировать основные свойства фотонных кристаллов.
- ▶ Построить теоретическую модель СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности виде слоя полярного диэлектрика.

- ▶ Описать частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков и их влияние на дефектные моды фотонного кристалла.
- ▶ Провести численный анализ полученной модели, исследуя влияние различных параметров нарушения на дефектные моды фотонного кристалла.
- ▶ Оформить результаты исследования и формулировать выводы, оценивая практическую значимость и возможности применения полученных результатов в науке и технике.

Работа выполнена на 40 страниц, содержит 42 рисунка и список литературных источников, содержащий 16 наименований.

Содержание основной части работы:

Фотонные кристаллы: определение и свойства

Классификация фотонных кристаллов

Частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов

В диапазоне частот $f = 7\text{--}13$ GHz исследован СВЧ ФК на основе прямоугольного волновода с диэлектрическим заполнением в виде периодически чередующихся слоев керамики Al_2O_3 (нечетные слои, $\epsilon = 9.6$, толщина $1,0$ mm) и тефлона (четные слои, $\epsilon = 2.0$, толщина 9 mm). Фотонный кристалл состоял из 11 слоев, слои полностью заполняют поперечное сечение волновода. В ФК создавалось нарушение периодичности в виде замены центрального слоя из тефлона на воздушный отрезок (рис. 1). Продольный размер нарушения составлял $d_6 = 2.0$ mm.

Результаты расчёта частотных зависимостей действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости воды представлены на рис. 1.

Исследовались частотные характеристики коэффициентов отражения и пропускания при изменении толщины слоя полярного диэлектрика (воды) при толщине нарушения периодичности, равной 2 mm.

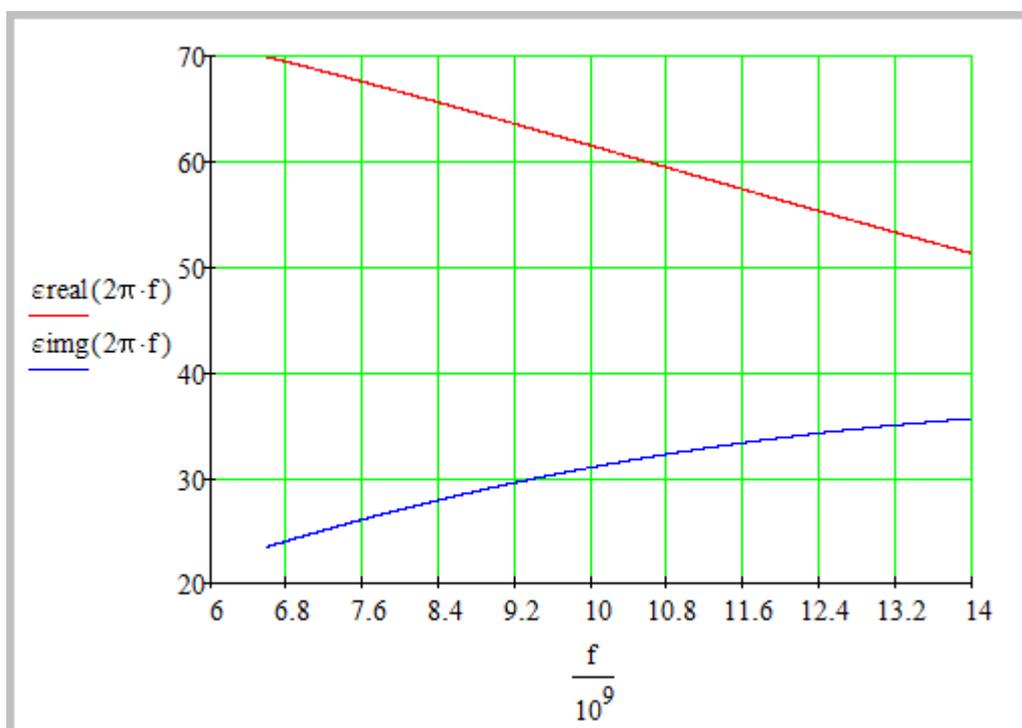


Рис. 1 Частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости воды

Результаты расчёта амплитудно-частотных характеристик коэффициентов прохождения при изменении толщины слоя жидкости, в диапазоне от 0.5 мм до 1.5 мм, представлены на рис. 2.

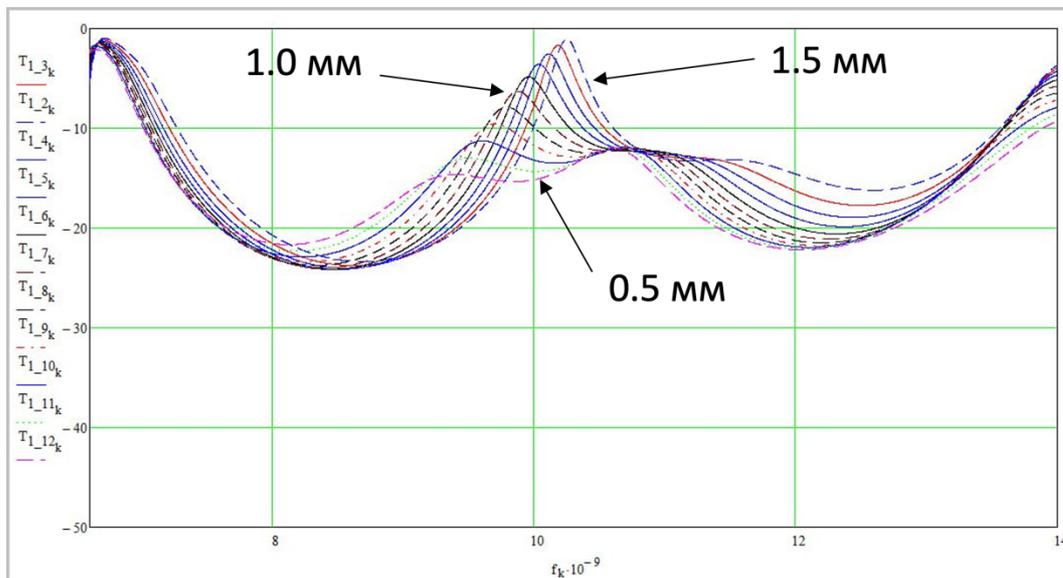


Рис. 2 Амплитудно-частотные характеристики коэффициентов прохождения при изменении толщины слоя жидкости, в диапазоне от 0.5 мм до 1.5 мм

Результаты расчёта амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения при изменении толщины слоя жидкости, в диапазоне от 0.5 мм до 1.5 мм, представлены на рис. 3.

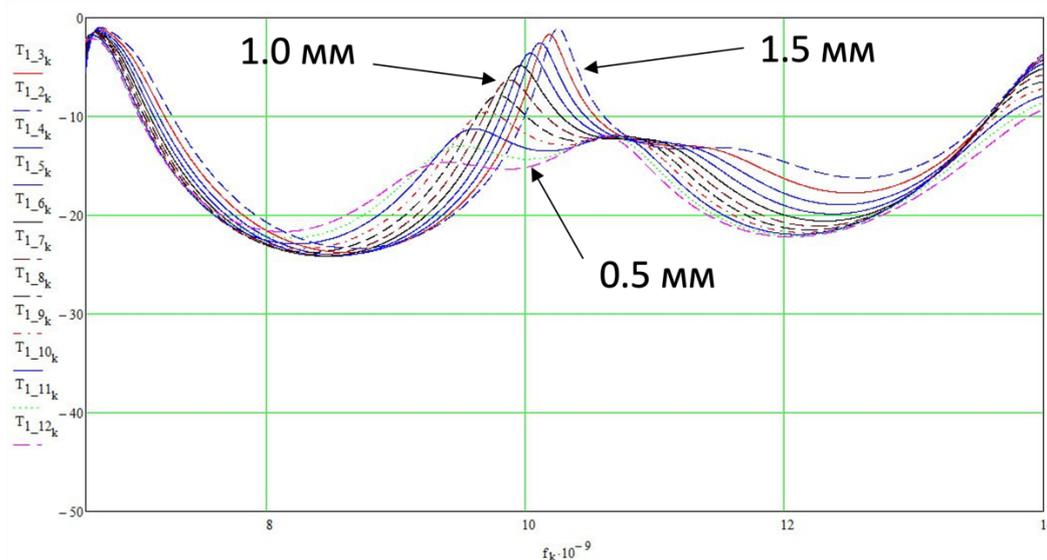


Рис. 3 Амплитудно-частотные характеристики коэффициентов отражения при изменении толщины слоя жидкости, в диапазоне от 0.5 мм до 1.5 мм

Из результатов расчета следует, что при создании воздушного нарушения в фотонном кристалле размером 2 мм в запрещенной зоне ФК появляется дефектная мода на частоте 10.561 МГц.

При внесении слоя воды в нарушение наблюдается смещение пика пропускания в сторону низких частот.

Результаты расчёта амплитудно-частотных характеристик коэффициентов прохождения при изменении толщины слоя жидкости, в диапазоне от 0.5 мм до 1.5 мм, представлены на рис. 4.

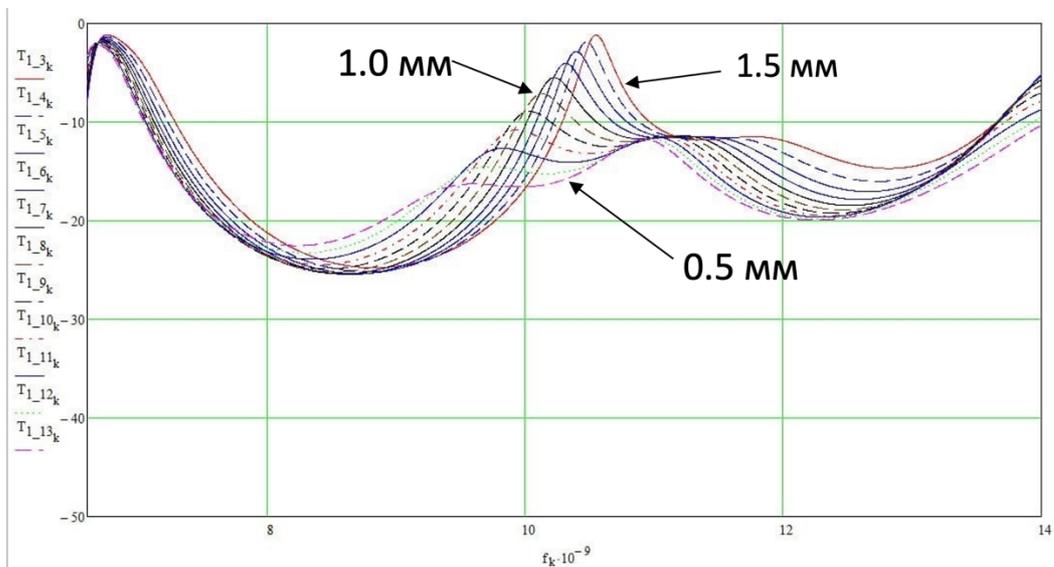


Рис. 4 Амплитудно-частотные характеристики коэффициентов прохождения при изменении толщины слоя жидкости, в диапазоне от 0.5 мм до 1.5 мм

Результаты расчёта амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения при изменении толщины слоя жидкости, в диапазоне от 0.5 мм до 1.5 мм, представлены на рис. 5.

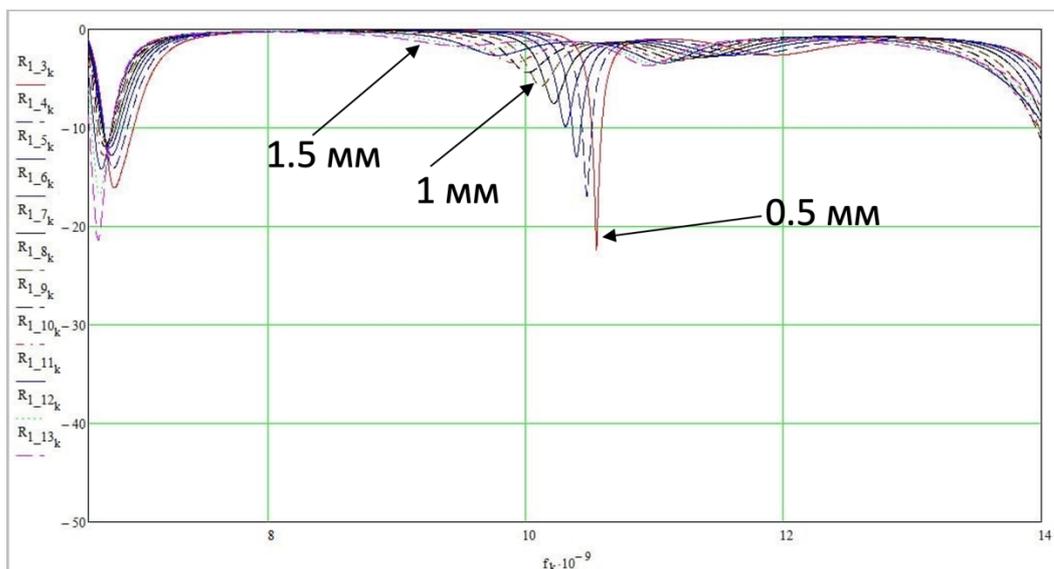


Рис. 5 Амплитудно-частотные характеристики коэффициентов отражения при изменении толщины слоя жидкости, в диапазоне от 0.5 мм до 1.5 мм

Из результатов расчета следует, что при создании воздушного нарушения в фотонном кристалле размером 1.5 мм в запрещенной зоне ФК появляется дефектная мода на частоте 10.883 МГц.

При внесении слоя воды в нарушение наблюдается смещение пика пропускания в сторону низких частот также, как и в случае нарушения, равного 2.0 мм.

При этом с ростом толщины слоя воды наблюдается уменьшение коэффициента пропускания ФК на частоте дефектной моды, а сама форма пика пропускания искажается.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были изучены ключевые концепции и теоретические аспекты фотонных кристаллов, их классификация, а также особенности частотных зависимостей диэлектрической проницаемости полярных и неполярных жидкостей.

Были рассмотрены дефектные моды в фотонных кристаллах с нарушением в виде слоя с полярным диэлектриком, что открывает новые возможности в сфере исследования и применения этих уникальных структур.

В рамках практической части работы были проведены расчеты и анализ зависимостей коэффициентов отражения и пропускания фотонного кристалла на частоте дефектной моды при различных толщинах нарушенного слоя и слоя полярной жидкости (от 0.5 до 1.5 мм). Результаты показали, что изменение толщины слоя с полярным диэлектриком оказывает значительное влияние на свойства дефектных мод, что подтверждает важность данного параметра при проектировании и изготовлении фотонных кристаллов для определенных приложений.

Дальнейшие исследования в этой области могут привести к созданию новых типов фотонных кристаллов с управляемыми свойствами, что обещает революцию в области радиофотоники и связанных с ней технологий. Эта работа служит лишь началом этого пути, наметив направления для будущих исследований.

Список использованной литературы

1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Горлицкий В.О. Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями// Журнал технической физики. 2016. Т. 86, вып. 2. С. 65–70.
2. Орешкин П. Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа. 1977. 448 с.
3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Вениг С.Б. Измерение параметров полупроводников, микро- и наноструктур на СВЧ (учебное пособие). – Саратов: Электронное издание Саратов. ун-та, 2012. – 55 с.
4. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль, А. В. Пономарев Д. В., Латышева Е. В. Многопараметровые измерения эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных сверхвысокочастотных фотонных кристаллов // радиотехника и электроника, 2016, том 61, No 1, с. 45–53
5. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Фролов А. П. Ближнеполевой сверхвысокочастотный микроскоп на основе фотонного кристалла с резонатором и регулируемым элементом связи в качестве зонда // радиотехника и электроника, 2013, том 58, No 12, с. 1179–1186
6. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. Резонансные особенности в разрешенных и запрещенных зонах сверхвысокочастотного фотонного кристалла с нарушением периодичности // радиотехника и электроника, 2013, том 58, No 11, с. 1071–1076
7. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Фролов А. П., Орлов В. Е. волноводы, содержащие рамочные элементы с электрически управляемыми характеристиками разрешенных и запрещенных зон // радиотехника и электроника, 2014, том 59, No 11, с. 1079–1084

8. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Рязанов Д. С. брэгговские сверхвысокочастотные структуры на волноводнощелевых линиях // радиотехника и электроника, 2016, том 61, No 4, с. 321–326
9. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Мерданов М. К., Евтеев С. Г. Волноводные фотонные кристаллы на резонансных диафрагмах с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками // радиотехника и электроника, 2018, том 63, No 1, с. 65–71
10. Никитов С. А., Гуляев Ю. В., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. Определение проводимости и толщины полупроводниковых пластин и нанометровых слоев с использованием одномерных свч-фотонных кристаллов // доклады академии наук, 2013, том 448, No 1, с. 35–37
11. Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Посадский В. Н., Тяжлов В. С., Байкин А. В. низкоразмерные волноводные свч-фотонные кристаллы // доклады академии наук, 2014, том 458, No 4, с. 406–409
12. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.В. Комплексная диэлектрическая проницаемость композитов на основе диэлектрических матриц и входящих в их состав углеродных нанотрубок // Журнал технической физики, 2011, том 81, вып. 1
13. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Горлицкий В.О. Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями // Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 2
14. 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
15. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.А. Характеристики дефектной моды одномерного свч волноводного фотонного кристалла с

металлическим включением в элементе, нарушающем его периодичность // Журнал технической физики, 2017, том 87, вып. 6

16. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Рузанов О. М., Тимофеев И. О. Использование сверхвысокочастотной коаксиальной брэгговской структуры для измерения параметров диэлектриков // радиотехника и электроника, 2020, том 65, No 5, с. 495–503

