

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НАРУШЕНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ
СВЧ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА НА ЕГО АМПЛИТУДНО-
ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 2251 группы
направления (специальности) 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
Института Физики
Паниной Татьяны Александровны

Научные руководители:

доцент, к. физ.-мат.наук
Должность, ученая степень, уч. звание


подпись, дата

Д.В. Пономарев
Инициалы Фамилия

профессор, д.ф.-м.н.
Должность, ученая степень, уч. звание


подпись, дата

А.В. Скрипаль
Инициалы Фамилия

Зав. кафедрой

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


подпись, дата

А.В. Скрипаль
Инициалы Фамилия

Саратов 2023 г.

Введение

Уже более тридцати лет наука занимается изучением свойств фотонных кристаллов и устройств, базирующихся на их основе. Существует несколько определений термина «фотонный кристалл», однако понятийное ядро сохраняется: фотонный кристалл – это естественно или искусственно созданная сверхрешётка, состоящая из чередующихся слоёв (областей) с отличающимися показателями преломления, размеры которых сравнимы с длинами электромагнитных волн оптического диапазона – то есть, представляют собой систему связанных резонаторов, как следствие – обладают «окнами прозрачности» и «полосами заграждения» – фотонными запрещёнными зонами.

Благодаря возможности создания контролируемого дефекта в структуре фотонного кристалла относительно простыми методами с контролируемыми (в большинстве своём) начальными условиями фотонный кристалл можно применять для изменения положения и ширины запрещённой зоны, и, соответственно, для измерения оптических показателей электромагнитной волны (её распространения и локализации в том числе).

Актуальность работы: исследований особенностей изменения чувствительности «окна прозрачности» при контролируемом изменении структуры дефекта в СВЧ фотонном кристалле.

Цель работы: является определение влияния изменения структуры нарушения периодичности СВЧ фотонного кристалла на его амплитудно-частотные характеристики, обусловленное введением исследуемого диэлектрика, и использование характеристик дефектной моды для измерения параметров вводимого диэлектрика.

Задачи:

1) Анализ современной литературы, посвящённой исследованиям в области взаимодействия СВЧ-излучения с волноводным фотонным кристаллом;

2) Разработка математической модели для описания поведения электромагнитной волны в фотонном кристалле;

3) Проведение эксперимента с размещением дефекта в центральном слое фотонного кристалла при двух значениях величины: 17мм и 20мм;

4) Проведение эксперимента при передвижении флановой пластинки внутри дефекта, расположенного в центральном слое фотонного кристалла на шаг ~ 2 мм;

5) Анализ полученных значений параметров диэлектрика – диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Материалы исследования: решение прямой задачи методом матриц передачи для определения коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны в волноводном фотонном кристалле со сложно-структурированным дефектом двух величин при перемещении образца ФЛАНa внутри уже имеющегося дефекта; измерение параметров диэлектрика – диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь – при решении обратной задачи.

Разделы ВМР: «Введение», «Анализ современной литературы в области взаимодействия СВЧ-излучения в волноводных фотонных кристаллах с дефектным слоем», «Математическая модель взаимодействия СВЧ-излучения с волноводным фотонным кристаллом», «Результаты компьютерного моделирования», «Результаты экспериментального исследования», «Заключение» и «Список использованных источников».

Структура ВМР: работа представлена 70 страницами; включает в себя 64 рисунка, 2 таблицы и 17 формул; список использованной литературы представлен 61 источником.

Основное содержание работы

Во *«Введении»* представлены актуальность, цель, задачи и новизна магистерской работы.

Первая глава «Анализ современного состояния исследований в области взаимодействий СВЧ-излучения с волноводным фотонным кристаллом» состоит из 4 разделов.

Раздел 1.1 «Понятие фотонного кристалла» представлен историей открытия фотонного кристалла, особенностями представления его определений в различных источниках, также представлена типология фотонных кристаллов.

Раздел 1.2 «СВЧ-методы измерения параметров материала» представлен описанием существующих методов измерения параметров диэлектрика: кроме общеизвестных – а именно: резонаторного, фидерного, рефлектометрического (импульсного) – указаны следующие: рефлектометрические, мостовые, автодинные и СВЧ-методы исследования полупроводниковых материалов в сильных электрических полях.

Раздел 1.3 «Распространение волн в ФК» посвящён оценке имеющихся исследований о локализации электромагнитного поля в дефектных модах волноводного фотонного кристалла. В конце данного раздела представлен один из важнейших теоретических выводов, на которые опирается выпускная магистерская работа: уменьшение числа слоев в образце ФК с дефектом решетки почти в два раза приводит к заметной модификации спектра пропускания; кривые пропускания уширены, изменилось положение минимума, а также частотное положение максимума в пропускании излучения.

Раздел 1.4 «Фильтры на основе СВЧ фотонных кристаллов» состоит из различных классификаций фильтров на основе СВЧ фотонного кристалла:

1) *По заданной полосе пропускания:* фильтр нижних частот, фильтр высоких частот, полосовой фильтр, полосовой заграждающий (режекторный)

фильтр, дуплексер (частотно-разделительный фильтр), диплексер (мультиплексер), модульный фильтр (модуль фильтра);

2) По амплитудно-частотной характеристике полосы пропускания: фильтр Баттерворта и фильтр Чебышева;

3) По конструктивному исполнению: индуктивно-ёмкостной (LC), микрополосковые, резонаторный, диэлектрические резонаторные (DR), пьезофильтры, коаксиальные, волноводные, фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ-фильтры).

Вторая глава «Математическая модель взаимодействия СВЧ-излучения с волноводным фотонным кристаллом» состоит из двух разделов.

Раздел 2.1 «Описание математической модели для решения прямой задачи» посвящён описанию метода характеристических матриц для решения прямой задачи – определения коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны в волноводном фотонном кристалле. Матрица передачи электромагнитной волны между областями с различными значениями постоянных распространения волны:

$$T(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1}-\gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1}+\gamma_j)z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1}+\gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1}-\gamma_j)z_{j,j+1}} \end{pmatrix}$$

Коэффициенты отражения электромагнитной волны R и прохождения D, определяются формулами:

$$R = \frac{T_N[2,1]}{T_N[2,2]} \quad D = \frac{T_N[1,1] * T_N[2,2] - T_N[1,2] * T_N[2,1]}{T_N[2,2]}$$

Раздел 2.2 «Описание математической модели для решения обратной задачи» посвящён описанию метода наименьших квадратов, используя который можно решить обратную задачу – найти значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь структуры. При реализации этого метода составляется такая аналитическая

функция, которая проходит настолько близко к экспериментальным данным, насколько это возможно – значение параметра, при котором сумма квадратов разностей экспериментальных и теоретических данных значений квадратов модулей коэффициента пропускания становится минимальной:

$$S(\varepsilon) = \sum_n \left(|t_{exp_n}|^2 - |t(\varepsilon_n)|^2 \right)^2$$

В этом же разделе для определения величины случайной ошибки решения, полученного методом наименьших квадратов, были составлены три функции невязки: функция невязки по прохождению, функция невязки по отражению и функция невязки по отражению и прохождению (является суммой двух предыдущих). Соответственно, функция невязки по отражению и прохождению имеет следующий вид:

$$S(\varepsilon, tg) = \sum_n \left(|t_{exp_n}|^2 - |t(\varepsilon_n, tg_n)|^2 \right)^2 + \left(|r_{exp_n}|^2 - |r(\varepsilon_n, tg_n)|^2 \right)^2$$

где ε_n и tg_n – вычисляемые диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь; k – число точек экспериментальной кривой; $r(\varepsilon_n, tg_n)$ – функция, описывающая спектры отражения электромагнитной волны; $t(\varepsilon_n, tg_n)$ – функция, описывающая спектры прохождения электромагнитной волны.

Третья глава «Результаты компьютерного моделирования» представляет собой анализ изменения положения пика «окна пропускания» путём отображением графиков АЧХ по прохождению и отражению электромагнитной волны в структуре для 11-слойного ФК, в центре которого расположен дефект толщиной 17 мм и 20 мм, а также для 13-слойного ФК, в уже имеющееся нарушение которого внесен образец ФЛАН, перемещающийся от 5-го слоя, представленного поликором, с шагом, равным ~2мм; все графики были получены при использовании программы Mathcad.

В этой же программе для определения оптимального положения флановой пластинки внутри центрального слоя ФК, выраженного воздушным

зазором толщиной 17 мм, был проведён теоретический расчёт распределения электрического поля на частоте резонансного пика, равной 11,3 ГГц и была представлена конфигурация электрического поля в 11-слойном ФК при расположении в 6-ом слое нарушения, выраженного воздушным зазором толщиной 20 мм, на частоте резонансного пика 10,57 ГГц.

При анализе графиков распределения электрического поля в ФК при величине воздушного зазора, равного 17 мм и 20 мм, в центре структуры можно сделать следующий вывод: при увеличении толщины воздушного слоя нарушения наблюдается рост напряжённости величины относительного электрического поля E/E_0 с 6,93 до 8,2.

В ходе исследования распределения электрического поля в 13-слойном ФК при увеличении воздушного зазора – дефектного слоя – наблюдается аналогичная тенденция: чем ниже значения частоты резонансного пика, тем выше скачок напряжённости электрического поля в дефектном слое. Другой немаловажный вывод: по частотному расположению резонансного пика можно определить размер нарушения.

В результате компьютерного моделирования установлено, что в случае величины воздушного зазора равной как 17 мм, так и 20 мм, при перемещении флановой пластинки от «края к центру» со сдвигом, равным ~2мм, наблюдается тенденция к смещению пика пропускания в низкочастотную область; также отмечено максимальное значение амплитуды частотной характеристики при нахождении флановой пластинки в «центре», но достаточно малые её значения при других её положениях.

Глава 4 «Результаты экспериментального исследования» представлена тремя разделами, раздел 4.2 состоит из двух подразделов.

Раздел 4.1 «Описание экспериментальной установки» посвящён описанию экспериментальной установки и характеристикам материалов, использованных для построения волноводного фотонного кристалла; на рисунках представлены фотографии макета 11-слойного фотонного кристалла, 13-слойного фотонного кристалла и принципиальная векторного

анализатора цепей Agilent N5242a серии PNA-X (серийный номер: MY51221714) (PNA-X NETWORK ANALYZER), с помощью которого были экспериментально получены данные для решения обратной задачи.

Раздел 4.2 «Анализ данных эксперимента» поделён на два подраздела. После представления т.н. контрольных измерений, идут результаты решения обратной задачи.

Подраздел 4.2.1 «Анализ данных эксперимента для толщины воздушного зазора, равной 17 мм» посвящён результатами экспериментов, проведённых для 13-слойного ФК, центральный слой которого представлен воздушным зазором, равным 17 мм, внутри которого был расположен передвигаемый с шагом, равным ~2мм, образец ФЛАН. По снятым АЧХ были определены комплексная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь.

Подраздел 4.2.2 «Анализ данных эксперимента для толщины воздушного зазора, равной 20 мм» посвящён, соответственно, результатам экспериментов, проведённых для 13-слойного ФК, центральный слой которого представлен воздушным зазором, равным 20 мм, внутри которого был расположен передвигаемый с шагом, равным ~2мм, образец ФЛАН. По снятым АЧХ были определены комплексная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь.

Как следует из результатов, полученных в ходе экспериментов, измерение параметров диэлектрика с использованием частотной зависимости коэффициентов прохождения и отражения в окрестности пика пропускания возможно проводить при различных положениях ФЛАН внутри нарушения, созданного в виде воздушного зазора.

При величине центрального слоя сложно-структурированного нарушения, равного 17 мм, изменение положения образца внутри нарушения приводит к определению диэлектрической проницаемости с погрешностью измерений от 1% (величина отступа от поликоровой пластинки: 5.9 мм) до 10,6% («центр», величина отступа от поликоровой пластинки: 8.14 мм).

При величине центрального слоя сложно-структурированного нарушения, равного 20 мм, изменение положения образца внутри нарушения даёт погрешность измерения от 0,5% (величина отступа от поликоровой пластинки: 3.65 мм) до 8,07% (величина отступа от поликоровой пластинки: 5.9 мм).

Раздел 4.3 «Анализ расчёта добротности дефектной моды» представлен анализом теоретически и экспериментально полученными АЧХ и рассчитанной добротности дефектной моды для каждого случая. Для наглядности все результаты представлены в двух таблицах.

Экспериментально рассчитанные показатели ниже тех, что были получены при теоретическом расчёте: при величине воздушного зазора, равном 17 мм отличие экспериментальных данных от теоретических варьируется от 20% (если считать компьютерно смоделированный расчёт абсолютной величиной) до 47%, а : при величине воздушного зазора, равном 20 мм отличие экспериментальных данных от теоретических варьируется от 21% до 44%. Тем не менее, при меньшей величине общего воздушного зазора (17 мм) наблюдается более высокая добротность, что обозначает меньшие потери энергии при возможной конструкции пропускающего фильтра.

Глава 5 «Заключение» содержит основные выводы по результатам проведённой работы и подтверждает достижение поставленной ранее цели – *определение влияния изменения структуры нарушения периодичности СВЧ фотонного кристалла на его амплитудно-частотные характеристики, обусловленное введением исследуемого диэлектрика, и использование характеристик дефектной моды для измерения параметров вводимого диэлектрика* – была достигнута, в результате решения следующих задач:

1. Был проведён сбор и анализ современной литературы, посвящённой исследованиям в области взаимодействия СВЧ-излучения с волноводным фотонным кристаллом;
2. Была разработана математическая модель для описания поведения электромагнитной волны в фотонном кристалле;

3. Был проведён ряд экспериментов с размещением сложно-структурированного дефекта в центральном слое фотонного кристалла при двух значениях величин: 17 мм и 20 мм;

4. Был проведён ряд экспериментов при перемещении пластинки ФЛАНА с шагом ~ 2 мм внутри дефекта, расположенного в центральном слое фотонного кристалла;

5. Были рассчитаны значения искомых параметров диэлектрика – диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь.

В ходе выполнения магистерской работы установлено, что:

- При величине центрального слоя сложно-структурированного нарушения, равного 17 мм, изменение положения образца внутри нарушения приводит к определению диэлектрической проницаемости с погрешностью измерений не более 10.6%;

- При величине центрального слоя сложно-структурированного нарушения, равного 20 мм, изменение положения образца внутри нарушения даёт погрешность измерения не более 8.07%;

- Как следствие двух предыдущих пунктов, является вывод: измерения при большей величине сложно-структурированного нарушения (20 мм) являются более точными;

- Однако, при меньшей величине воздушного зазора сложно-структурированного нарушения (17 мм) наблюдается более высокая добротность, что обозначает меньшие потери энергии при возможной конструкции пропускающего фильтра.

Глава 6 «Список использованной литературы» представлен 61 источником.