

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра физики твёрдого тела

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТОВ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ, СОЗДАНЫХ МЕТОДОМ 3D ПЕЧАТИ

Автореферат к выпускной квалификационной работе магистра

студента 2 курса 2251 группы
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
институт физики

Аленин Роман Петрович

Научные руководители

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. ст., уч. зв.



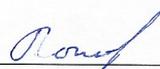
личная подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы,
фамилия

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. ст., уч. зв.



личная подпись, дата

Д.В. Пономарев

инициалы,
фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. ст., уч. зв.



личная подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы,
фамилия

Саратов 2023

Введение

Благодаря прогрессу электроники и стремительному развитию теории и техники СВЧ-устройств открываются широкие возможности для их применения.

Волноводная техника ежегодно всё глубже проникает в научные исследования в областях атомной физики, радиоспектроскопии, радиоэлектроники, медицины и биологии.

Бурное развитие СВЧ-устройств началось с зарождением радиолокации в 40-50-х годах. Это связано как с модернизацией ранее используемых СВЧ устройств включающих в себя перечень приборов в виде делителей мощности, линий передачи, согласующих элементов и т.д. для работы на более высоких частотах, так и с созданием новых приборов на основе достижений физики твёрдого тела таких как микрополосковые линии передачи, интегральные схемы СВЧ, полупроводниковые управляющие устройства СВЧ и т.д.

Интенсивное развитие техники СВЧ продолжается и сейчас. Одним из самых актуальных направлений стало создание поглощающих электромагнитное излучение материалов, например технология «Стелс». Также актуальным является создание малогабаритных элементов СВЧ цепи т.к. они имеют обширную область применения как в качестве самостоятельных приборов СВЧ тракта, так и в качестве элементов более сложных функциональных устройств.

На сегодняшний день одной из наиболее интенсивно развивающихся областей науки является направление по созданию и исследованию свойств метаматериалов, представляющих собой искусственно созданные гетерогенные среды, в которых геометрические размеры и электрофизические параметры специально подобранных составляющих элементов периодически изменяются вдоль одного или нескольких пространственных направлений.

К метаматериалам можно отнести фотонные кристаллы как искусственные периодические структуры с периодом, сравнимым с длиной

волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. По аналогии с реальными кристаллами, в фотонных кристаллах существуют разрешенные и запрещенные для распространения электромагнитного излучения частотные области.

Уникальные свойства фотонных кристаллов, обусловленные резонансным взаимодействием электромагнитной волны с периодической структурой, позволяют создавать на их основе новые типы структур и устройств с управляемыми параметрами, а также реализовать новые высокочувствительные методы измерения параметров материалов.

Представленные в данной работе методы направлены на измерение и определение электрофизических параметров материалов с использованием фотонных кристаллов СВЧ-диапазона.

В связи с актуальностью исследований в данной области **целью работы** является: Измерение диэлектрической проницаемости композитов созданных методом 3D печати в СВЧ диапазоне с помощью СВЧ фотонных кристаллов.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ современной литературы, посвящённой исследованиям в области методов измерения параметров материалов и структур с использованием ФК СВЧ
2. Компьютерное моделирование измерения порошкообразных диэлектриков
3. Экспериментальная реализация метода
4. Анализ полученных экспериментально значений – диэлектрической проницаемости.

Новизна работы: измерена диэлектрическая проницаемость композитов в СВЧ диапазоне, созданных методом 3D печати с разным заполнением

Разделы ВМР:

«Введение», «Методы измерения параметров материалов и структур с использованием ФК СВЧ», «Компьютерное моделирование амплитудно-

частотных характеристик фотонных кристаллов с дефектами в виде композитного материала», «Математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерным СВЧ фотонным кристаллом, содержащим нарушение в виде матрицы с включением в виде порошкообразного диэлектрика», «Компьютерное моделирование характеристик одномерного СВЧ фотонного кристалла, содержащего нарушение в виде матрицы с включением в виде порошкообразного диэлектрика», «Результаты компьютерного моделирования процедуры измерения диэлектрической проницаемости порошкообразного композита», «Описание математической модели для решения обратной задачи», «Результаты компьютерного моделирования», «Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов с дефектами в виде композитного материала», «Экспериментальное исследование особенностей амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов с дефектами в виде композитного материала», «Экспериментальное определение диэлектрической проницаемости порошкообразного композита», «Заключение» и «Список использованных источников».

Структура ВМР: работа занимает 58 страниц; включает в себя 59 рисунков и 16 формул; список использованной литературы представлен 25 источниками.

Основное содержание работы

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

Первая глава «Методы измерения параметров материалов и структур с использованием ФК СВЧ» содержит несколько определений понятия «фотонный кристалл» и его актуальное, современное значение:

1. Фотонный кристалл есть материал, структура которого характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях.
2. Фотонный кристалл–структура, у которой диэлектрическая проницаемость меняется периодически в пространстве с периодичностью, допускающей брэгговскую дифракцию света.

На данный момент фотонные кристаллы относят к метаматериалам или композитным метаматериалам. И, если изначально понятие «метаматериал» применялось для материалов, характеризующихся отрицательным показателем преломления, то сегодня данный термин обозначает любую искусственно созданную среду, обладающую необычными свойствами, благодаря структурированию в масштабах, существенно меньших характерных масштабов внешнего воздействия (длина волны излучения): материалы с экстремально высокими или нулевыми показателями преломления и диэлектрической проницаемости.

Так же первая глава содержит различные актуальные методики изменения физических параметров материалов

Вторая глава «Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов с дефектами в виде композитного материала» представлена в виде 3 разделов и двух подразделов.

Раздел 2.1 «Математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерным СВЧ фотонным кристаллом, содержащим нарушение в виде матрицы с включением в виде

порошкообразного диэлектрика» посвящён разработке математической модели для решения прямой задачи (для теоретического расчёта) и обратной (для обработки экспериментальных данных) использовалась программа, написанная в среде Mathcad.

Чтобы изготовить структуру с определенными характеристиками, предварительный расчет спектров отражения и пропускания одномерного фотонного СВЧ кристалла является безусловно необходимой процедурой.

Так же этот раздел содержит структуру рассмотренного фотонного волноводного СВЧ кристалл, состоящего из 11 слоёв.

Нечётный слой Al_2O_3 Поликор толщиной 1mm $\epsilon=9.6$

Чётный слой Фторопласт толщиной 9mm $\epsilon=2$

Вместо шестого слоя как нарушения помещались матрицы, заполненные исследуемым веществом

В работе использовались четыре матрицы для наполнения сыпучими материалами:

ПМ – Полая Малая

ПБ – Полая Большая

РМ –Малая Решётка

РБ –Большая Решётка

Чертежи матриц так же представлены в данном разделе.

Раздел 2.2 «Компьютерное моделирование характеристик одномерного СВЧ фотонного кристалла, содержащего нарушение в виде матрицы с включением в виде порошкообразного диэлектрика» посвящён расчёту амплитудно-частотных характеристик фотонного кристалла с нарушением в виде матриц типа ПМ, ПБ, РМ, РБ с наполнением порошкообразного диэлектрика. Расчеты проводились в среде Mathcad с использованием таблиц параметров нарушенного слоя.

Раздел 2.3 «Результаты компьютерного моделирования процедуры измерения диэлектрической проницаемости порошкообразного композита» состоит из двух подразделов

Подраздел 2.3.1 «Описание математической модели для решения обратной задачи» посвящён описанию математической модели для решения обратной задачи.

В связи с различными погрешностями проведения опытов и получения некоторого разброса имеющихся данных, возникает необходимость применения методов оптимизации – нахождения таких значений параметров, которые обеспечивали бы оптимальную балансировку полученных данных.

Соответственно, для определения неизвестного параметра, например, комплексной диэлектрической проницаемости или тангенса угла диэлектрических потерь, необходимо решить обратную задачу которая и разбирается в данном подразделе.

Подраздел 2.3.2 «Результаты моделирования на ПК» посвящён решению тестовой задачи, которая заключалась в следующем. Задавалась диэлектрическая проницаемость образца, выполняющего роль нарушения, и рассчитывались частотные зависимости коэффициентов пропускания и отражения исследуемой структуры с использованием выражений, т.е. решалась прямая задача.

Эти частотные зависимости выбирались в качестве исходных при решении обратной задачи по нахождению диэлектрической проницаемости образца, считающейся в этом случае неизвестной величиной и подлежащей определению.

Сравнение результатов решения обратной задачи с исходным значением диэлектрической проницаемости образца позволяет оценить погрешность предложенного метода измерений. Данные, полученные во время моделирования, показали возможность и актуальность реализации данного эксперимента.

Третья глава «Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов с дефектами в виде композитного материала» представлена в виде двух разделов.

Раздел 3.1 «Экспериментальное исследование особенностей амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов с дефектами в виде композитного материала» посвящён экспериментальному исследованию одномерного волноводного СВЧ фотонного кристалла, созданный в соответствии с описанной выше моделью, в диапазоне частот 7–13 ГГц.

Для проведения эксперимента был изготовлен фотонный волноводный СВЧ кристалл, состоящий из 11 слоёв.

Нечётный слой Al_2O_3 Поликор толщиной 1mm $\varepsilon=9.6$

Чётный слой Фторопласт толщиной 9mm $\varepsilon=2$

Вместо шестого слоя как нарушения помещались матрицы, заполненные исследуемым веществом

Было изготовлено четыре матрицы методом печати на 3D принтере из материала PETG прошедшего лабораторные испытания на определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Были использованы следующие материалы для исследования:

1. Воздух
2. КТ – 30
3. Корундовый порошок

Измерение проводились в прямоугольном латунном волноводе сечением 23x10 на установке PNA X Network Analyzer N5242A в диапазоне от 7 до 13 ГГц.

Раздел 3.2 «Экспериментальное определение диэлектрической проницаемости порошкообразного композита» посвящён реализации метода измерения, основанного на использовании спектров отражения $S_{11}(\varepsilon, \text{tg}\delta, f)$ и прохождения $S_{21}(\varepsilon, \text{tg}\delta, f)$ СВЧ-излучения, взаимодействующего с фотонным кристаллом, содержащим исследуемую структуру, на частоте дефектной моды.

Предложенный метод основан на минимизации функции невязки, характеризующей разность между экспериментальными и теоретически рассчитанными в окрестности дефектной моды спектрами отражения и прохождения СВЧ-излучения, с использованием метода наименьших квадратов.

При реализации этого метода находится такое значение диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь поглотителя, при котором сумма квадратов разностей экспериментальных и теоретически рассчитанных спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения в окрестностях дефектной моды становится минимальной.

С использованием результатов измерений АЧХ коэффициентов прохождения и отражения на частоте дефектной моды 9.0 ГГц на основе решения обратной задачи были определены значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь.

Так же представлены в виде рисунков АЧХ коэффициентов прохождения и отражения, измеренные и рассчитанные при значениях диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, найденных из решения обратной задачи.

Данные обрабатывались с использованием программы в среде Mathcad.

«Заключение» содержит основные выводы по результатам проведённой работы и подтверждает достижение поставленной ранее цели

«Список использованных источников» представлен 25 источниками

Заключение

В ходе выполнения магистерской работы получены следующие результаты:

Построена математическая модель для описания амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения и пропускания электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с фотонным кристаллом, выполненным в виде чередующихся слоёв диэлектриков с разными значениями диэлектрической проницаемости и толщины.

Проведено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик одномерного СВЧ фотонного кристалла без нарушения периодичности и с нарушением периодичности в виде включения из композитного материала. Расчет выполнен с использованием метода матрицы передачи.

Для отработки метода измерения параметров композитного материала, играющего роль нарушения периодичности фотонного кристалла, была реализована процедура компьютерного моделирования решения обратной задачи, заключающейся в определении диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь порошкообразного композита.

Была решена тестовая задача, которая заключалась в следующем. Задавалась диэлектрическая проницаемость образца, выполняющего роль нарушения, и рассчитывались частотные зависимости коэффициентов пропускания и отражения исследуемой структуры с использованием выражений, т.е. решалась прямая задача.

Эти частотные зависимости выбирались в качестве исходных при решении обратной задачи по нахождению диэлектрической проницаемости образца, считающейся в этом случае неизвестной величиной и подлежащей определению. Обратная задача решалась с использованием метода наименьших квадратов.

Экспериментально исследованы амплитудно-частотные характеристики фотонных кристаллов с дефектами в виде композитного материала, выполненного на основе диэлектрической матрицы, созданной методом 3D-печати, с наполнением порошкообразного материала типа КТ-30 и корунда.

Экспериментально определены диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь порошкообразного композита типа КТ-30 и корунда с использованием частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения фотонного кристалла на частоте дефектной моды методом наименьших квадратов.

Для характеристики диэлектрической проницаемости композита использовалась модель эффективной среды.

Проведенная методика измерения может быть использована для определения параметров различного типа композитных материалов, используемых при проектировании приборов и устройств твердотельной СВЧ-электроники.

