

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

Кафедра физики твёрдого тела

**Исследование электродинамических структур, изготовленных технологией
3D-печати**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ
студента 4 курса 4052 группы
направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
Института физики

Андреева Антона Андреевича

Научные руководители:

к.ф.-м.н., доцент

должность, ученая степень, ученое звание

ассистент

должность, ученая степень, ученое звание

Зав. кафедрой физики твердого
тела:

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

подпись, дата

С.А. Сергеев

инициалы, фамилия

подпись, дата

Е.А. Рябов

инициалы, фамилия

подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2023

ВВЕДЕНИЕ

Электродинамические структуры с периодическими неоднородностями применяются в телекоммуникационных системах, радиолокации, радиоуправлении, системах связи и навигации в качестве фильтров и преобразователей сигналов СВЧ-диапазона. Они могут обладать рядом уникальных свойств, например, киральностью, анизотропией, бианизотропией, отрицательными значениями одной или обеих проницаемостей в определённых частотных областях с вытекающими отсюда эффектами, в том числе и необычными законами преломления и отражения, иметь запрещенные зоны. Эти особые свойства обусловлены резонансным взаимодействием электромагнитных волн, падающих и отраженных от границы неоднородностей. Такие устройства можно рассматривать как аналоги оптических фотонных кристаллов и метаматериалов.

В настоящее время технология 3D-печати дает возможность с высокой точностью изготавливать высококачественные объекты с малой себестоимостью. Проводятся исследования изготовления фотонных кристаллов, метаматериалов и антенн СВЧ-диапазона. При исследовании структур данного типа необходимо обрабатывать большой объем данных. Для их анализа могут использоваться алгоритмы машинного обучения, которые позволяют выявлять закономерности в большом количестве данных.

Целью данной работы является исследование электродинамических структур, изготовленных технологией 3D-печати, в X-диапазоне частот.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1) проведение литературного обзора по видам электродинамических структур, технологии 3D-печати и машинному обучению;
- 2) исследование влияния температуры на диэлектрическую проницаемость пластиков, применяемых в технологии 3D-печати;
- 3) теоретическое и экспериментальное исследование электродинамических структур, изготовленных технологией 3D-печати;
- 4) анализ полученных результатов.

Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ, СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ и ПРИЛОЖЕНИЯ, работа включает 6 разделов:

1. Система уравнений Максвелла;
2. Электродинамические структуры;
3. Технологии 3D печати;
4. Машинное обучение;
5. Исследование температурной зависимости диэлектрической проницаемости пластиков, используемых в технологии 3D-печати;
6. Создание и исследование электродинамических структур.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В разделе 1 проведен анализ научно-технической литературы, посвящённой электромагнитным волнам и их распространению в волноводе.

В разделе 2 рассмотрены основные виды электродинамических структур.

Фотонные кристаллы, метаматериалы и смеси в частотном диапазоне с длиной волны, сравнимой с периодичностью структуры, обладают новыми электродинамическими свойствами, зависящими от материала и структуры объекта.

Под фотонным кристаллом понимается электродинамическая структура, в которой периодически изменяется диэлектрическая проницаемость. Фотонные кристаллы, имеют запрещенные и разрешенные зоны для волн, распространяющихся перпендикулярно границам раздела слоев с различной диэлектрической проницаемостью. Запрещенные зоны фотонного кристалла образуются при смещении интенсивности электрического поля стоячих волн в разные области фотонного кристалла.

Метаматериалы являются искусственными композиционными материалами, которые обладают уникальными свойствами, не наблюдаемые в природных веществах. Для описания электродинамических параметров метаматериалов можно использовать гомогенизацию. Уникальные свойства метаматериалов обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько их структурой, упорядоченной особым образом. Такие

искусственные структуры позволяют создавать материалы с любыми значениями эффективной диэлектрической и магнитной проницаемости (ϵ и μ соответственно), в том числе и отрицательными. Среды с одновременно положительными ϵ и μ называют DPS, материалы, у которых отрицательна либо ϵ , либо μ – SNG.

При смешивании материалов могут быть получить их общие свойства. Это позволяет создавать смеси с необходимыми свойствами. К примеру, эффективная диэлектрическая проницаемость смеси зависит от формы, размера, электромагнитных свойств, пространственного распределения и соотношения частиц.

В разделе 3 проведен обзор технологии 3D-печати.

К базовым типам 3D-печати относятся ламинирование, сублимирование, экструдирование и фотополимеризация. Рассмотрены технологии 3D-печати: FDM (моделирование методом наплавления), SLA (стереолитография), SLS (селективное лазерное спекание).

В разделе 4 рассмотрены основные принципы и методы машинного обучения.

Основная задача машинного обучения – находить неизвестную функцию по некоторой начальной информации.

Машинное обучения делится на 2 типа: с учителем и без учителя. Обучение с учителем может использоваться для решения задач регрессии и классификации. Обучение без учителя используется для обработки данных, в которых необходимо составить взаимосвязи между объектами и может решать задачи кластеризации, сокращения размерности и поиска правил ассоциации. Для решения каждого вида задач применяются свои методы.

Данные, описывающие объект составляют n -мерное пространство X , называемое признаковым пространством, состоящее из векторов $\tilde{x} = (x_1, \dots, x_n)$. Предполагается, что существует неизвестная целевая функция $y: X \rightarrow Y$.

Задача машинного обучения с учителем будет иметь следующую формулировку: дано $\{x_1, \dots, x_n\} \in X$ – обучающая выборка, и $\{y_1, \dots, y_n\}$ –

известные ответы, причем $y_i = y(x_i)$. Найти: $a: X \rightarrow Y$ – решающую функцию, приближающую y на всем множестве X .

Рассмотрен метод машины опорных векторов для решения задачи классификации. В его основе лежит поиск гиперплоскости в многомерном пространстве, в процессе подбираются такие веса, при которых объекты классов будут находиться на максимальном расстоянии от разделяющей гиперплоскости. Построенная гиперплоскость разделяет объекты на два класса.

В разделе 5 проведены исследования температурной зависимости диэлектрической проницаемости пластиков, используемых в технологии 3D-печати.

Для определения диэлектрической проницаемости пластиков на языке программирования Python реализована программа для определения диэлектрической проницаемости веществ по частотным зависимостям коэффициента отражения. В качестве метода машинного обучения выбран SVM.

Для получения данных для обучения и тестирования модели машинного обучения использовалась программа openEMS, в которой проводилось численное моделирование прямоугольного параллелепипеда, имеющего габариты $23 \times 10 \times 30$ мм³, при различной диэлектрической проницаемости, изменяющейся в диапазоне 1,50÷5,00, в прямоугольном волноводе с сечением 23×10 мм² в частотном диапазоне 8÷12 ГГц.

Проведены измерения частотных зависимостей коэффициентов отражения, в соответствии с численным моделированием, в температурном диапазоне 20÷105 °C. В качестве исследуемых материалов выбраны следующие пластики: ABS, флуоресцентный PLA, HIPS, PETG, SBS, PLA, PLA с добавлением меди 30% и PLA с добавлением алюминия 30%.

Для установления соответствия данных численного моделирования и экспериментального измерения проводилась интерполяция экспериментальных данных. Значения частот принимались в данной работе как признаки, целевая

переменная, зависимая от температуры – ε . При проверке модели на тестовой выборке были получены приемлемые метрики.

В результате были получены температурные зависимости диэлектрической проницаемости исследуемых пластиков. Сравнение полученных в данной работе диэлектрических проницаемостей пластиков при температуре 20 °С демонстрирует схожесть значений с результатами других работ.

После проведения измерений коэффициентов отражения и пропускания при высокой температуре все образцы, за исключением образцов из пластиков ABS и PETG, уменьшились в объеме, что оказало сильное влияние на результаты измерений коэффициентов отражения и пропускания, и, следовательно, на результат определения диэлектрической проницаемости.

В разделе 6 проведены исследования спроектированных электродинамических структур.

Спроектированы электродинамические структуры, имеющие длину 84 мм, для волновода, полностью заполняющие сечение, равное 23×10 мм². На рисунке 1 представлен главный вид спроектированных электродинамических структур.

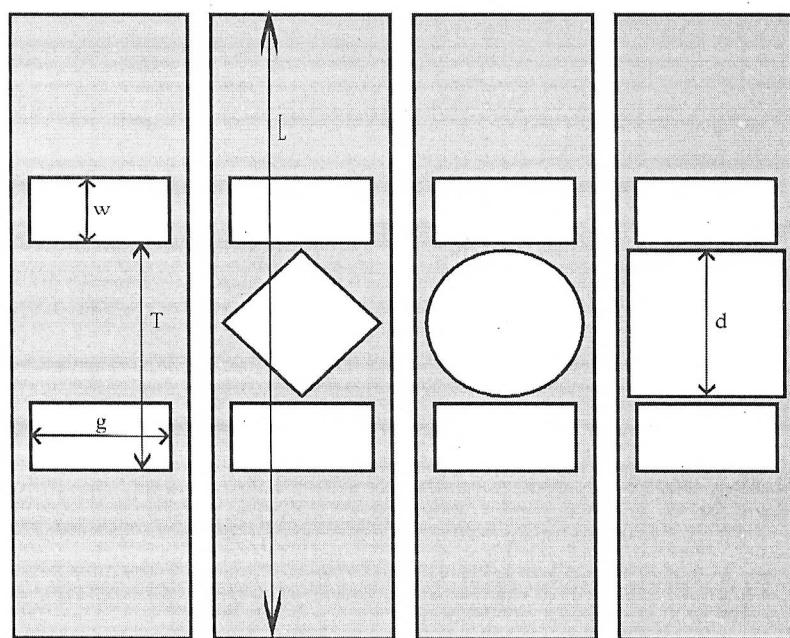


Рисунок 1 – Главный вид спроектированных электродинамических структур

Проведено численное моделирование спроектированных электродинамических структур в прямоугольном волноводе с сечением 23×10 мм² в частотном диапазоне 8 ÷ 12 ГГц при различных формах сечения и размерах центрального отверстия d . Диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2,6$ соответствует пластику PETG.

С помощью FDM технологии 3D-печати изготовлены спроектированные электродинамические структуры, представленные на рисунке 2.

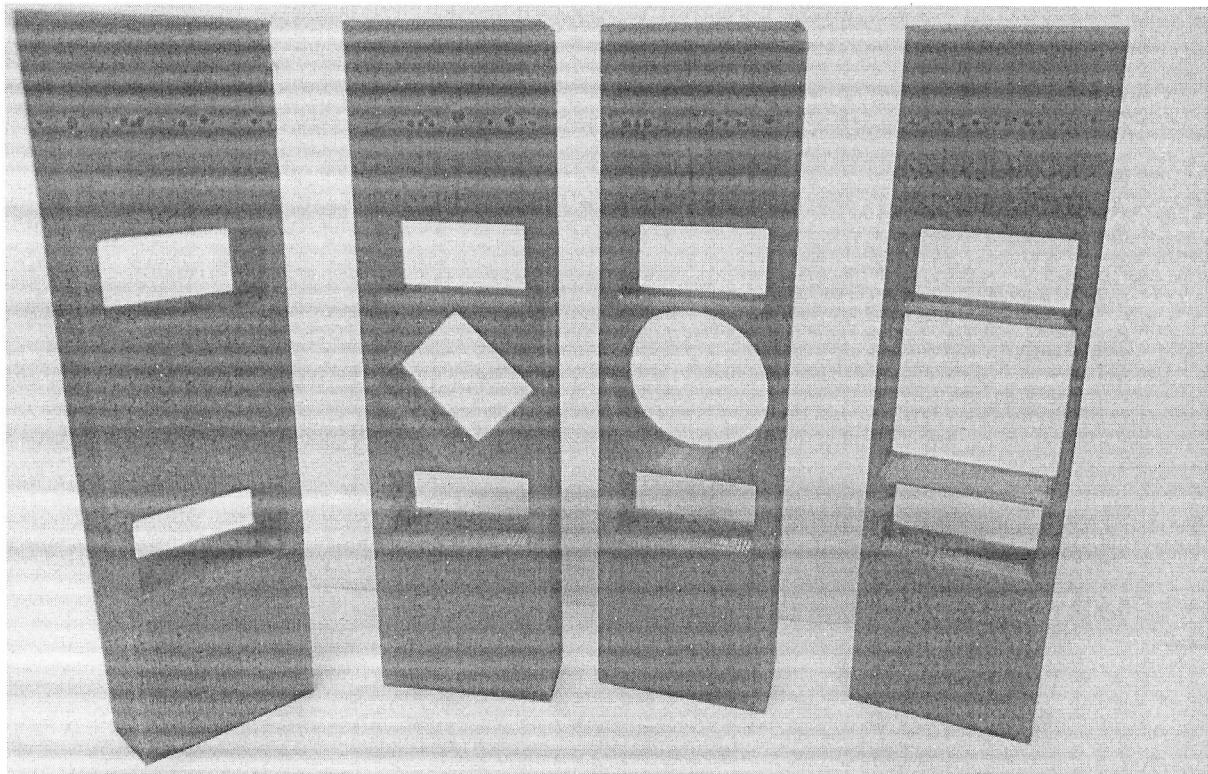


Рисунок 2 – Электродинамические структуры, изготовленные технологией 3D-печати

Изготовленные электродинамические структуры помещены в прямоугольный волновод с сечением 23×10 мм² для измерения коэффициентов отражения и пропускания. Результаты измерений представлены на рисунке 3.

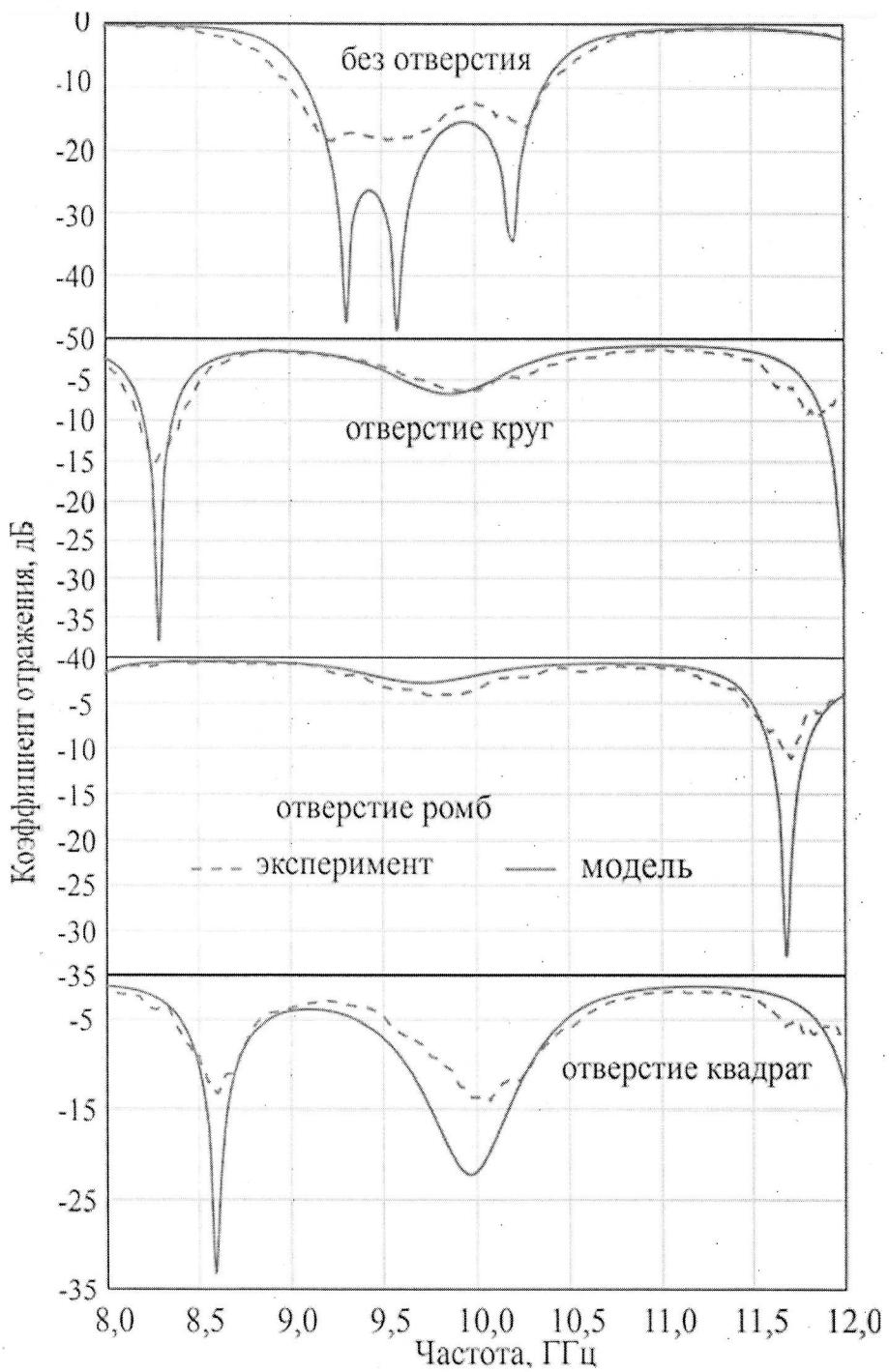


Рисунок 3 – Сравнение результатов численного моделирования с результатами натурного эксперимента

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология 3D-печати позволяет создавать прототипы электродинамических структур для исследования в СВЧ диапазоне. В ходе выполнения выпускной квалификационной работы решены следующие задачи:

1. Исследовано влияние температуры на диэлектрическую проницаемость в X-диапазоне частот пластиков, применяемых в FDM технологии. В результате можно сделать следующие выводы:

a. После проведения измерений частотной зависимости коэффициентов отражения и пропускания при высокой температуре у всех образцов, за исключением образцов из пластиков ABS и PETG, уменьшились геометрические размеры, что оказало сильное влияние на результаты измерений коэффициентов отражения и пропускания, и, следовательно, на результат определения диэлектрической проницаемости.

b. Полученные в данной работе значения диэлектрической проницаемости пластиков при температуре 20 °C соответствуют значениям результатов других работ.

2. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование спроектированных электродинамических структур, изготовленных технологией 3D-печати. В результате можно сделать следующие выводы:

a. Частотная зависимость коэффициентов отражения и пропускания при добавлении центрального отверстия изменяется. При увеличении размера отверстия до 12 мм, полоса пропускания превращается в резонансный пик. При дальнейшем увеличении размера отверстия, происходит смещение резонансного пика в высокочастотную область.

b. При увеличении стороны отверстия в форме квадрата более 16 мм формируется полоса пропускания.

c. При добавлении центрального отверстия в форме суперэллипса со степенью $n > 0,4$ и длиной полуосей 10 мм, полоса пропускания превращается в резонансный пик. При увеличении степени суперэллипса до 2,5, резонансный

пик смещается в высокочастотную область. Дальнейшее увеличение степени суперэллипса не оказывает существенное влияние на смещение частоты максимума резонансного пика.

d. Результаты, полученные в ходе анализа частотных зависимостей коэффициента отражения и пропускания, экспериментального исследования и численного моделирования электродинамических структур, качественно согласуются.

