

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕШЕТОК С ВОЗМОЖНОСТЬЮ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭНЕРГИИ В СПЕКТРЕ РАССЕЯННОГО СВЧ И ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Л.А. Калоша<sup>1</sup>, Л.С. Гайда<sup>2</sup>, В.Н. Комар<sup>2</sup>, Д.В. Заерко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гродненский государственный колледж техники, технологий и дизайна

<sup>2</sup>Гродненский государственный университет им. Я. Купалы

## MODELING OF DIELECTRIC GRATINGS TO CONTROL THE REDISTRIBUTION OF ENERGY IN THE SPECTRUM OF THE SCATTERED MICROWAVE OPTICAL AND ELECTROMAGNETIC FIELDS

L.A. Kalosha<sup>1</sup>, L.S. Gaida<sup>2</sup>, V.N. Komar<sup>2</sup>, D.V. Zaerko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grodno State College of Engineering, Technology and Design

<sup>2</sup>Y. Kupala Grodno State University

Приведены методика построения модели и обоснование выбора построения периодических структур на основе диэлектрических брусков с возможностью изменения коэффициента диэлектрической проницаемости. Представлены результаты моделирования рассеяния электромагнитных волн СВЧ и оптического диапазонов в периодических структурах на основе диэлектрических брусков с изменяемыми электрофизическими параметрами. Показано влияние изменения диэлектрической проницаемости компонентов структуры на перераспределение энергии между гармониками рассеянного электромагнитного излучения.

**Ключевые слова:** периодические диэлектрические структуры, коэффициент диэлектрической проницаемости, изменения S-параметров, управление характеристиками распространения СВЧ и оптического излучения.

The choice of the periodic structures based on hollow dielectric rods with filling, which offer the possibility to vary the dielectric constant is considered. The simulation results obtained for scattering of microwave and optical ranges electromagnetic radiation in equidistant structures based on dielectric rods with variable electrophysical parameters are given. The effect of variations in the dielectric constant of the structural components on the energy redistribution of harmonics of the scattered electromagnetic radiation is demonstrated.

**Keywords:** periodic dielectric structures, dielectric constant, s-parameter changes, control of the propagation characteristics of microwave and optical ranges electromagnetic radiation.

### Введение

Создание материалов с определенными электрофизическими свойствами служит основанием для создания нового класса электронной аппаратуры [1]–[3]. Современные средства связи требуют высоких скоростей обработки информации, поэтому в качестве альтернативной элементной базы для электроники и систем связи рассматривают оптическую, основанную на фотонах. Управление потоком электронов изучено и реализовано, в то время как для оптики и фотоники управление пучком передаваемого излучения с помощью наноразмерных объектов является одной из самых сложных проблем. Изготовить нанобъект возможно, но детальное изучение особенностей их работы на практике чрезвычайно сложно. В идеале средства, контролируемые направление распространения световых волн, должны быть близки по размерам к длине контролируемых волн.

В качестве перспективных элементов, позволяющих управлять распространением электромагнитных волн, рассматриваются и исследуются периодические структуры с изменяющимися

электрофизическими характеристиками. Эти структуры составляют основу новых устройств обработки сигналов и активно применяются в опто- и СВЧ-электронике [1]. Примером могут служить переключающие и управляющие СВЧ-элементы. Модельные объекты на основе материалов с изменяющимся коэффициентом диэлектрической проницаемости позволяют изучить особенности распространения электромагнитных волн в пространстве с целью выработки рекомендаций по разработке управляющих устройств на основе периодических систем, работающих в оптическом диапазоне, и радиоэлектронной аппаратуры [1]–[6].

Целью данной работы является исследование возможностей управления распространением в периодических структурах электромагнитных волн сантиметрового и нанометрового диапазонов.

### 1 Методика моделирования

Для построения модели была выбрана решетка из диэлектрических брусков с изменяемыми электрофизическими характеристиками.

Предметом исследований является изучение закономерностей рассеяния электромагнитных волн сантиметрового и нанометрового диапазонов в решетке из управляемых диэлектрических брусьев с изменяемыми электрофизическими характеристиками.

Влияние диэлектрической проницаемости периодических структур рассматривалось для СВЧ и оптического диапазонов.

При построении модели исследуемых объектов учитывались особенности взаимодействия электромагнитного поля со структурами различных размеров и обладающих различными электрофизическими параметрами. Параметры структуры в оптическом диапазоне рассчитывались аналогично соответствующим значениям для СВЧ-диапазона [3].

Исследуемые структуры представляют собой периодические диэлектрические решетки из сегнетоэлектрических стержней в виде брусьев прямоугольного сечения (рисунок 1.1).

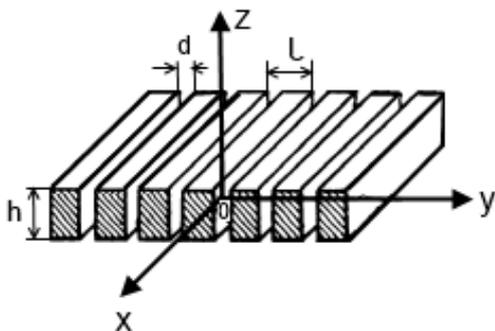


Рисунок 1.1 – Решетка из диэлектрических брусьев ( $l$  – период,  $d$  – расстояние между брусьями решетки,  $h$  – высота брусьев решетки)

Математическое решение данной задачи привело к уравнениям, которые позволяют провести достаточно эффективное аналитическое и численное исследование задачи. Результаты анализа показали наличие зависимости модулей амплитудных коэффициентов отражения и прохождения от диэлектрической проницаемости брусьев периодической структуры [7]. При этом интерференция волн внутри решетки приводит к тому, что в отдельных случаях возникает изменение модулей амплитудных коэффициентов отражения и прохождения от 1 до 0. Это позволяет провести численное исследование влияния изменения диэлектрической проницаемости брусьев решетки на рассеяние электромагнитного излучения [7].

В качестве среды моделирования использовался программный продукт CST MICROWAVE STUDIO, в котором для расчета пространственных распределений поля используется метод конечных интегралов, имеющий высокую эффективность в задачах анализа нестационарных

процессов в неоднородном, анизотропном пространстве для объектов с произвольной формой границ. Метод может быть реализован как во временной, так и в частотной области. Решение во временной области используется для решения задач с большим числом ячеек. Частотные методы, использующие вместо прямоугольной тетраэдральную сетку разбиения, предлагают лучшую аппроксимацию геометрии структуры [5].

Задачу получения параметров, характеризующих взаимодействие электромагнитного СВЧ-излучения с плоской бесконечной периодической решеткой, возможно рассматривать как задачу получения параметров, характеризующих взаимодействие излучения с фрагментом, качественно совпадающим с фрагментом решетки. При проведении моделирования рассматривалось влияние изменения диэлектрической проницаемости элементов решетки на амплитуду прошедших и отраженных электромагнитных волн при различных размерах, периодах решетки и нормальном падении электромагнитного излучения в диапазоне облучающих частот.

Для проведения исследования были разработаны модели периодической структуры на основе диэлектрических брусьев с периодами, обеспечивающими распространение, как только основных гармоник, так и гармоник высших порядков. Модели располагались между излучающим портом, расположенным в точке  $Z_{min}$ , и принимающими портами, расположенными в точке  $Z_{max}$ , для регистрации прошедшего излучения, и в точке  $Z_{min}$ , для регистрации отраженного поля.

Рассматриваемые периодические решетки анизотропны для облучающего излучения. Исследовались зависимости амплитуды гармоник от диэлектрической проницаемости брусьев решетки и наличие перераспределения энергий между гармониками постоянного спектра рассеянного поля.

Взаимодействие решетки и излучения описывается с помощью падающих и рассеянных волн, связь между которыми отражает волновая матрица рассеяния или матрица  $S$ -параметров. В процессе моделирования были получены значения амплитуд для каждой из пространственных гармоник. Значения  $S$ -параметров, характеризующих передачу энергии гармоник при распространении электромагнитных волн из точки  $Z_{min}$  в точку  $Z_{max}$ , в диапазоне частот при всех значениях диэлектрической проницаемости для каждой из гармоник представлены в графическом виде.

Для рассмотренных периодов структур характерно изменение значений  $S$ -параметров основных гармоник  $TE(0,0)$  и  $TM(0,0)$  в диапазоне частот, причем характер изменений не одинаков для различных значений диэлектрической проницаемости.

## 2 Результаты моделирования

Модель периодической структуры на основе диэлектрических брусьев с периодом 4,5 см для СВЧ-излучения и 450 нм для оптического диапазона обеспечивает распространение гармоник высших порядков.

Установлено изменение перераспределения энергии гармоники  $TE(0,0)$  в спектре прошедшего и отраженного поля в зависимости от значений диэлектрической проницаемости брусьев структуры. На рисунках 2.1 и 2.2 представлены графики изменения  $S$ -параметров гармоники  $TE(0,0)$  для рассматриваемых диапазонов при различных значениях диэлектрической проницаемости.

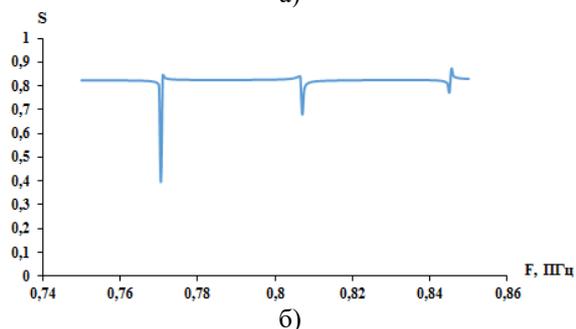
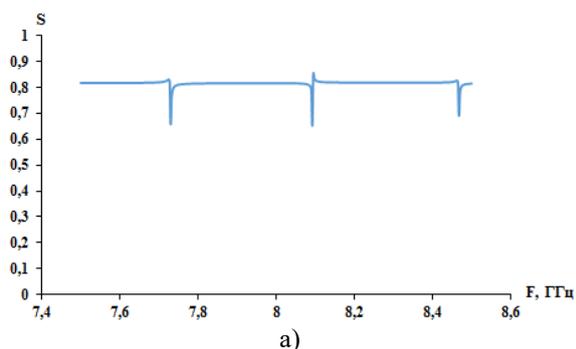


Рисунок 2.1 – Изменение значений  $S$ -параметров  $TE(0,0)$  для а) – СВЧ-диапазона и б) – оптического диапазона при значениях  $\epsilon = 150$

Распространение электромагнитных волн рассматриваемых диапазонов частот в периодических решетках носит аналогичный характер: при одном значении диэлектрической проницаемости брусьев изменения значений  $S$ -параметров гармоники  $TE(0,0)$  происходит на одинаковых численных значениях частот с учетом исследуемого диапазона.

Уменьшение амплитуды гармоники  $TE(0,0)$  сопровождается передачей энергии остальному спектру. Перераспределение энергии в спектре зависит от диэлектрической проницаемости компонентов структуры.

Диаграмма распределения энергии  $TE(0,0)$  в гармонике рассеянного спектра при различных значениях диэлектрической проницаемости вставок периодической структуры для СВЧ и оптического диапазонов представлена на рисунках 2.3 и 2.4.

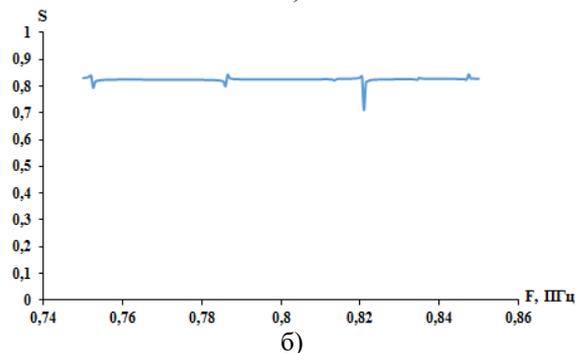
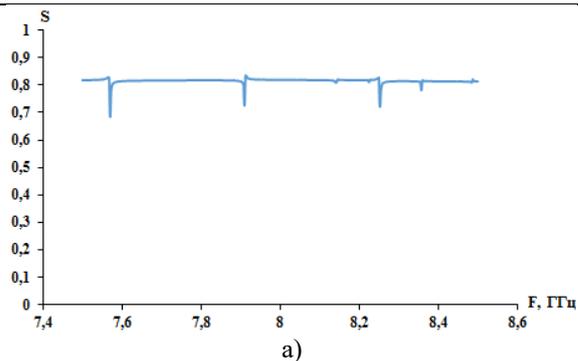


Рисунок 2.2 – Изменение значений  $S$ -параметров  $TE(0,0)$  для а) – СВЧ-диапазона и б) – оптического диапазона при значениях  $\epsilon = 250$

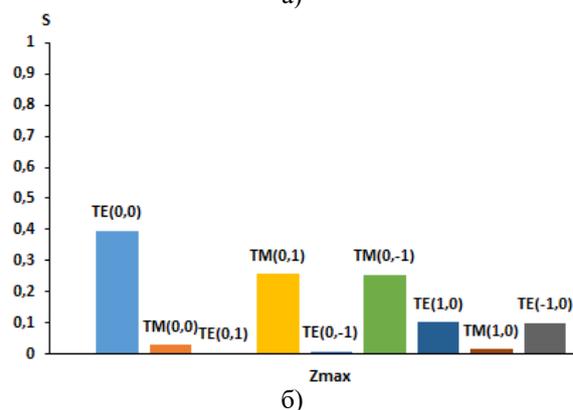
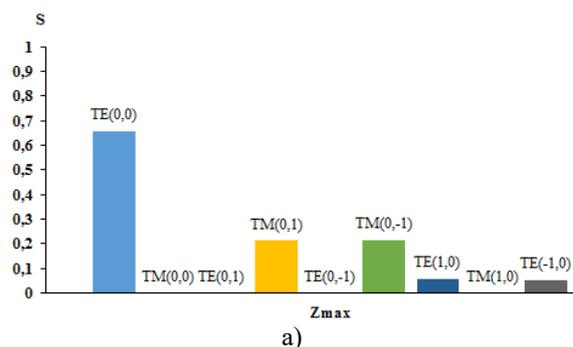


Рисунок 2.3 –  $S$ -параметры прошедшего излучения для  $TE(0,0)$  при  $\epsilon = 150$  для:

- а) – СВЧ диапазона на частоте  $f = 7,7$  ГГц и б) – оптического диапазона на частоте  $f = 0,77$  ПГц

При сохранении постоянных значений  $S$ -параметров  $TE(0,0)$  в диапазоне частот перераспределение энергии по гармоникам отсутствует.

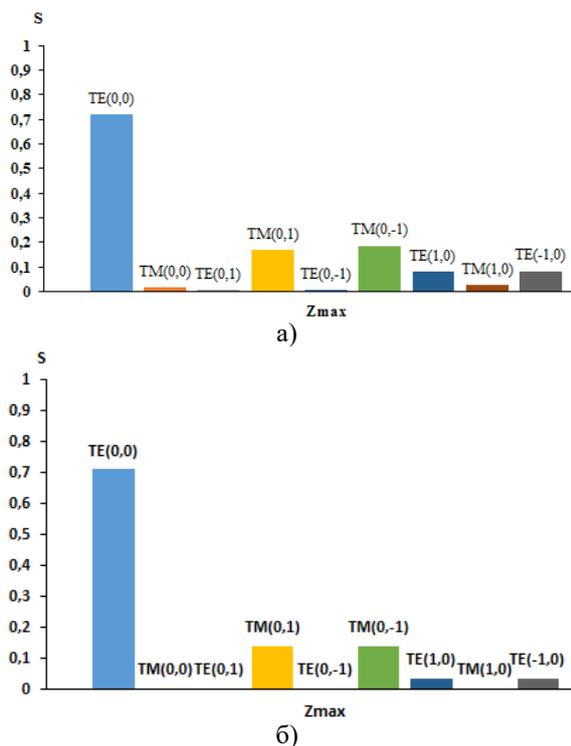


Рисунок 2.4 – S-параметры прошедшего излучения для TE(0,0) при  $\epsilon = 250$  для:  
 а) – СВЧ диапазона на частоте  $f = 8,2$  ГГц и  
 б) – оптического диапазона на частоте  $f = 0,82$  ПГц

Значения S-параметров спектра гармоник отраженного поля сохраняются постоянными с незначительными колебаниями в пределах 0,1.

Перераспределение энергии наблюдается между модами с различной поляризацией. Причем на разных частотах и при различной диэлектрической проницаемости изменяется как перечень гармоник высших порядков, получивших энергию, так и количество перераспределенной энергии.

### Заключение

Численно исследован спектр рассеяния электромагнитного поля периодической решетки из параллельных диэлектрических брусьев с управляемой диэлектрической проницаемостью в СВЧ и оптическом частотных диапазонах.

Установлено, что при конструктивных параметрах решетки, обеспечивающих существование мод различных порядков, фиксированных частоте и направлении распространения падающей электромагнитной волны управление диэлектрической проницаемостью элементов решетки приводит к изменению амплитуд гармоник спектра.

Проведенное моделирование демонстрирует возможность опосредованного переноса результатов изучения рассеяния электромагнитного поля СВЧ-диапазона в оптический диапазон и наоборот.

Возможность перераспределения энергии поля между пространственными гармониками может использоваться при создании устройств для управления рассеянием электромагнитных волн СВЧ и оптического частотных диапазонов.

Полученные результаты моделирования позволяют определить требования к электрофизическим свойствам материалов, использование которых позволит осуществить контроль и управление распространением электромагнитных волн в системах с регулируемыми электрофизическими параметрами. Такие структуры могут быть использованы при разработке новых электронно-управляемых устройств в опто- и СВЧ-электронике.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Поплавко, Ю.М. Физика активных диэлектриков: учеб. пособие / Ю.М. Поплавко, Л.П. Переверзева, И.П. Раевский; под ред. В.П. Сахненко. – Ростов н/Д: Изд-во Юж. Федер. ун-та, 2009. – 480 с.
2. Gaponenko, S. Introduction to Nanophotonic / S. Gaponenko. – UK: Cambridge University Press, 2010. – 484 p.
3. Моделирование рассеяния электромагнитных волн СВЧ-диапазона на структурах с изменяемыми электрофизическими параметрами / Д.В. Заерко [и др.] // Вестн. Беларус. Дзярж. ун-та. Серия 1. Физика. Математика. Информатика. – 2016. – № 2. – С. 90–96.
4. Электрически управляемые компоненты на основе керамики BST-Mg / Е.А. Ненашева [и др.] // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, вып. 8. – С. 1468–1471.
5. Курушин, А.А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio / А.А. Курушин, А.Н. Пластиков. – М.: Издательство МЭИ, 2010. – 160 с.
6. Распространение электромагнитных волн СВЧ-диапазона в управляемых двумерных периодических структурах / Ю.М. Рычков [и др.] // Докл. НАН Беларуси. – 2010. – Т. 54, № 1. – С. 50–53.
7. Дифракция волн на решетках / В.П. Шестопалов [и др.]. – Харьков: Издательство Харьковского университета, 1973. – 288 с.

Поступила в редакцию 02.12.16.