

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН СВЧ-ДИАПАЗОНА НА СТРУКТУРАХ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Д. В. ЗАЕРКО¹⁾, Л. С. ГАЙДА¹⁾, А. Ч. СВИСТУН¹⁾, Л. А. КАЛОША²⁾

¹⁾Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Республика Беларусь

²⁾Гродненский государственный колледж техники, технологий и дизайна,
ул. Горького, 86, 230009, г. Гродно, Республика Беларусь

Приведены методика создания модели и аргументация выбора построения периодических структур на основе диэлектрических стержней с возможностью изменения коэффициента диэлектрической проницаемости. Представлены результаты моделирования рассеяния электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона в периодических структурах на основе диэлектрических стержней с изменяемыми электрофизическими параметрами. Показано влияние изменения диэлектрической проницаемости компонентов структуры на перераспределение энергии между гармониками рассеянного электромагнитного излучения. 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 сверхвысокочастотной электронике.

Ключевые слова: периодические диэлектрические структуры; коэффициент диэлектрической проницаемости; изменения S-параметров; управление характеристиками распространения СВЧ-излучения.

SIMULATION OF SCATTERING OF THE MICROWAVE-RANGE ELECTROMAGNETIC RADIATION BY THE STRUCTURES WITH VARIABLE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS

D. V. ZAERKO^a, L. S. GAIDA^a, A. C. SVISTUN^a, L. A. KALOSHA^b

^aYanka Kupala State University of Grodno, Ozheshko street, 22, 230023, Grodno, Republic of Belarus

^bGrodno State College of Engineering, Technology, and Design,
Gorky street, 86, 230009, Grodno, Republic of Belarus

This paper presents simulation of the possibilities to control the microwave radiation propagation characteristics by varying the dielectric constant of the structural components. The models for complex periodic structures with adjustable electromagnetic parameters are considered. The influence of electromagnetic parameters on the propagation characteristics of microwave-range electromagnetic

Образец цитирования:

Заерко Д. В., Гайда Л. С., Свистун А. Ч., Калоша Л. А. Моделирование рассеяния электромагнитных волн СВЧ-диапазона на структурах с изменяемыми электрофизическими параметрами // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2016. № 3. С. 90–96.

For citation:

Zaerko D. V., Gaida L. S., Svistun A. C., Kalosha L. A. Simulation of scattering of the microwave-range electromagnetic radiation by the structures with variable electrophysical parameters. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2016. No. 3. P. 90–96 (in Russ.).

Авторы:

Дмитрий Владимирович Заерко – старший преподаватель кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета.

Леонид Станиславович Гайда – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физико-технического факультета.

Андрей Чеславович Свистун – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры технической механики инженерно-строительного факультета.

Любовь Александровна Калоша – преподаватель информационно-экономического отделения.

Authors:

Dmitry Zaerko, senior lecturer at the department of electrical engineering and electronics, physico-technical faculty.

dim.dia2011@yandex.by

Leonid Gaida, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of laser physics and spectroscopy, physico-technical faculty.

gls@grsu.by

Andrey Svistun, PhD (physics and mathematics); docent at the department of technical mechanics, faculty of engineering and construction.

laser777@gmail.com

Liubou Kalosha, lecturer at the information and economic branch.
ya-2009@tut.by

radiation is studied. The simulation procedures are described. The choice of the periodic structures based on hollow dielectric rods with filling, which offer the possibility to vary the dielectric constant, is substantiated. The simulation results obtained for scattering of microwave-range 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. Based on the results of simulation, the requirements for electrophysical properties of the materials offering the control over the propagation of electromagnetic waves in systems with adjustable electrophysical parameters may be determined. Such structures can be used for the development of new electronics-controlled opto- and microwave devices.

Key words: periodic dielectric structures; dielectric constant; S-parameter changes; the control of the propagation characteristics of microwave radiation.

В процессе создания и изучения новых материалов возникает проблема управления электромагнитным излучением за счет его взаимодействия с периодическими структурами с изменяющимися электрофизическими характеристиками. Эти структуры составляют основу новых устройств обработки сигналов и активно применяются в опто- и сверхвысокочастотной (СВЧ) электронике [1]. Примером могут служить переключающие и управляющие СВЧ-элементы. Существующий выбор материалов с определенными электрофизическими свойствами дает основание для создания нового класса электронной аппаратуры [1–3]. Модельные объекты, функционирующие на основе материалов с изменяющимся коэффициентом диэлектрической проницаемости, позволяют изучить особенности распространения электромагнитных волн в пространстве в целях выработки рекомендаций по созданию современной радиоэлектронной аппаратуры [1, 4]. Таким образом, в настоящее время актуальным является решение задачи управления распространением СВЧ-излучения на основе изменения электрофизических параметров элементов излучателей.

Цель настоящей работы – исследование возможностей управления распространением СВЧ-излучения в периодических структурах из диэлектрических брусьев с изменяемыми электрофизическими характеристиками. Материал брусьев решетки представляет собой металлодиэлектрический композит, изготовленный на основе титаната кальция (CaTiO₃) [5]. Предметом исследований является изучение закономерностей рассеяния электромагнитных волн СВЧ-диапазона в управляемых периодических диэлектрических структурах из диэлектрических стержней с изменяемыми электрофизическими характеристиками.

Методика построения модели

При создании модели исследуемых объектов учитывались особенности взаимодействия СВЧ-поля со структурами, различающимися по размерам и электрофизическим параметрам. Исследуемые структуры представляют собой периодические диэлектрические решетки из сегнетоэлектрических стержней в виде брусьев прямоугольного сечения [6].

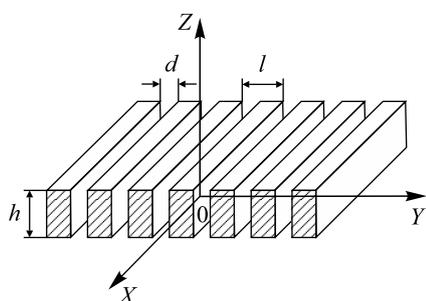


Рис. 1. Решетка из диэлектрических брусьев: l – период; d – расстояние между брусьями решетки; h – высота брусьев решетки

Пусть на периодическую решетку из диэлектрических брусьев (рис. 1) нормально падают плоские E -поляризованная и H -поляризованная волны (диэлектрическая проницаемость брусьев такова, что $\text{Im } \epsilon > 0$).

Полное решение задачи дифракции в рассматриваемом случае определяется отличными от нуля составляющими электрического и магнитного полей [6].

Для электрического поля

$$E_x(y, z) = \sum_{m=0}^{\infty} u_m(z) \chi_m(y, \epsilon).$$

Решение задачи имеет вид

$$E_x(y, z) = \sum_m (c_m e^{-\Lambda_m z} + d_m e^{\Lambda_m z}) \chi_m(y, \epsilon), \quad \left(|y| < \frac{l}{2}, |z| < \frac{y}{2} \right),$$

где $\Lambda_m = \frac{2\pi\xi_m}{l}$; $\chi = \frac{kl}{2\pi}$; c_m, d_m – неизвестные коэффициенты.

Результаты решения имеют вид

$$\sum_{n=0}^{\infty} x_n A_{mn} = \gamma_m, \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

где $x_n = a_n + b_n$, a_n, b_n – комплексные амплитуды волн;

$$A_{mn} = \left(\xi_m th\pi\delta\xi_m - i\sqrt{v^2 - n^2} \right) \tau_m^n;$$

$$\gamma_m = -\exp(-i\chi\pi\delta) (\xi_m th\pi\delta\xi_m + iv) \tau_m^0,$$

где $\delta = \frac{h}{l}$; $v = \frac{l}{\lambda}$;

$$\tau_m^n = (l + \delta_0^n) \chi^2 (\epsilon_2 - \epsilon_1) \times \\ \times \frac{n \cos \sqrt{v^2 \epsilon_2 + \xi_m^2} \pi (1 - \theta) \sin n\pi\theta + \sqrt{v^2 \epsilon_2 + \xi_m^2} \sin \sqrt{v^2 \epsilon_2 + \xi_m^2} \pi (1 - \theta) \cos n\pi\theta}{(v^2 \epsilon_2 + \xi_m^2 - n^2)(v^2 \epsilon_1 + \xi_m^2 - n^2)} A_n^2,$$

где $\theta = \frac{d}{l}$; $\xi_m = \frac{\Lambda_m l}{2\pi}$.

Для магнитного поля

$$\sum_{n=0}^{\infty} x_n \left(\xi_m \eta_m^n th\pi\delta\xi_m - i\tau_m^n \sqrt{v^2 - n^2} \right) = -\exp(-i\chi\pi\delta) (\xi_m th\pi\delta\xi_m \eta_m^0 + iv\tau_m^0);$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} y_n \left(\xi_m \eta_m^n - i\tau_m^n \sqrt{v^2 - n^2} th\pi\delta\xi_m \right) = -\exp(-i\chi\pi\delta) (\xi_m \eta_m^0 + iv\tau_m^0 th\pi\delta\xi_m),$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$,

$$\eta_m^n = \frac{A_m^2 (1 + \delta_0^n) (\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 \epsilon_1} \times \\ \times \frac{(n^3 - n(\xi_m + \chi^2 (\epsilon_1 - \epsilon_2))) \cos(\pi(1 - \theta) \sqrt{\chi^2 \epsilon_2 + \xi_m^2}) \sin n\pi\theta + \sqrt{\chi^2 \epsilon_1 + \xi_m^2} \chi^2 \epsilon_2 \sin(\pi(1 - \theta) \sqrt{\chi^2 \epsilon_2 + \xi_m^2})}{(\chi^2 \epsilon_2 + \xi_m^2 - n^2)(\chi^2 \epsilon_1 + \xi_m^2 - n^2)},$$

где A_m – амплитуда; ϵ_1, ϵ_2 – диэлектрические проницаемости окружающей среды и брусьев периодической решетки; $A_m^2 = \frac{4}{\frac{2\pi(1-\theta)}{\epsilon_1} + f_m^2 \left(\frac{2\pi\theta}{\epsilon_2} + \frac{1}{\epsilon_1 \sqrt{\chi^2 \epsilon_2 + \xi_m^2}} \right) + \frac{\sin(\pi(1-\theta) 2\sqrt{\chi^2 \epsilon_2 + \xi_m^2})}{\sqrt{\chi^2 \epsilon_2 + \xi_m^2}}}$.

Полученные системы уравнений первого и второго рода позволяют провести достаточно эффективное аналитическое и численное исследование задачи.

Результаты анализа показывают наличие зависимости модулей амплитудных коэффициентов отражения и прохождения $|a_0|$ и $|b_0|$ от параметров v, h, ϵ, θ .

Меняя значения χ либо h в этом диапазоне, получаем синусоидальную зависимость для $|a_0|$ и $|b_0|$. В случае распространения диапазона волн внутри диэлектрической решетки характер дифракционных зависимостей резко усложняется и существенно зависит от значений $\epsilon_1, \epsilon_2, \theta$, так как внутри решетки гармоники интерферируют друг с другом. Наиболее важно то, что для обеих поляризаций существуют точки полного прохождения и полного отражения при изменении как частоты, так и толщины (h) либо других параметров задач (ϵ_2, θ). При этом интерференция волн внутри решетки приводит к тому, что в отдельных случаях изменение χ обуславливает изменение модулей амплитудных коэффициентов отражения и прохождения от 1 до 0. Это позволяет провести численное исследование влияния изменения диэлектрической проницаемости брусьев решетки ϵ_2 на рассеяние электромагнитного излучения СВЧ-диапазона [6].

В качестве среды моделирования использовался программный продукт *Microwave Studio*, предназначенный для численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, ответвителей мощности, планарных и многослойных структур). В данной программе 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. Во временной области он применяется для решения задач с большим числом ячеек. Частотные методы, использующие вместо прямоугольной тетраэдральную сетку разбиения, обеспечивают лучшую аппроксимацию геометрии структуры [4].

Параметры, определяющие взаимодействие электромагнитного СВЧ-излучения с плоской бесконечной периодической решеткой, сходны с параметрами, характеризующими взаимодействие СВЧ-излучения с фрагментом решетки. При моделировании рассматривалось влияние изменения диэлектрической проницаемости элементов решетки (от 3 до 350) на амплитуду прошедших и отраженных электромагнитных волн при различных размерах, периодах решетки и нормальном падении электромагнитного излучения в диапазоне облучающих частот 7,5–10,0 ГГц.

Для проведения исследования была разработана модель периодической структуры на основе диэлектрических стержней с периодом, меньшим длины волны СВЧ-излучения, равным 1,5 см ($\lambda/2$) и 0,75 см ($\lambda/4$), позволяющая рассмотреть распространение основных гармоник. Данная модель размещалась между облучающей антенной, расположенной в точке Z_{\min} , и приемными антеннами, находящимися в точке Z_{\max} , для регистрации прошедшего излучения и в точке Z_{\min} – для регистрации отраженного поля.

Рассматриваемая периодическая решетка анизотропна для СВЧ-излучения (7,5–10,5 ГГц). Исследовались зависимости амплитуды гармоник от диэлектрической проницаемости брусков решетки и наличие перераспределения энергий (мощностей) между гармониками постоянного спектра рассеянного поля.

Взаимодействие решетки и СВЧ-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 на рис. 2. Для основных гармоник $TE(0,0)$ и $TM(0,0)$ значения S -параметров в диапазоне частот изменяются, причем характер изменений неодинаков для различных значений диэлектрической проницаемости.

Спектр рассеяния электромагнитного излучения в моделируемой периодической структуре с периодом, равным 1,5 см, содержит только основные гармоники – $TE(0,0)$ и $TM(0,0)$. При значениях диэлектрической проницаемости вставок (ϵ) до 75 изменения для $TE(0,0)$ значений S -параметров практически линейны (см. рис. 2).

В диапазоне значений ϵ от 75 до 350 происходит изменение для $TE(0,0)$ значений S -параметра передачи энергии в $TE(0,0)_{Z_{\max}}$ в диапазоне от 0,01 до 0,98.

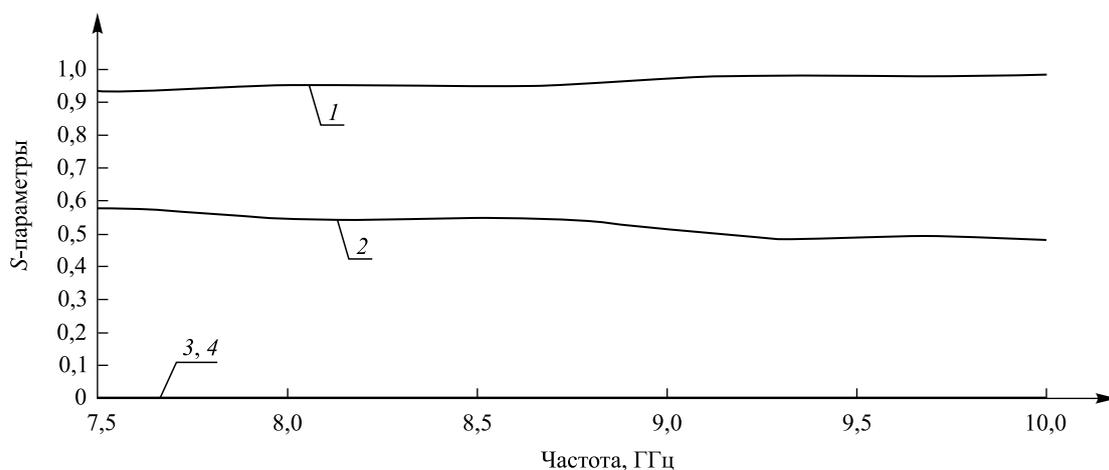


Рис. 2. Изменение значений S -параметров при $\epsilon < 75$:

1 – $TE(0,0)_{Z_{\max}}$ в $TE(0,0)_{Z_{\max}}$; 2 – $TE(0,0)_{Z_{\min}}$ в $TE(0,0)_{Z_{\min}}$;
3 – $TE(0,0)_{Z_{\min}}$ в $TM(0,0)_{Z_{\max}}$; 4 – $TE(0,0)_{Z_{\min}}$ в $TM(0,0)_{Z_{\min}}$

При диэлектрической проницаемости вставок $\epsilon = 75$ максимальное для $TE(0,0)$ значение S -параметра передачи энергии в $TE(0,0)_{Z_{max}}$ равно 0,95, а минимальное – 0,03. Изменение амплитуд прошедшего и отраженного излучений наблюдается в диапазоне частот от 8,5 ГГц. На частотах 9,2; 9,56; 9,9 ГГц отмечается незначительное перераспределение энергии $TE(0,0)$ гармоники: значение S -параметра передачи энергии в $TE(0,0)_{Z_{max}}$ уменьшается до 0,03–0,1; значение S -параметра, отражающего переход энергии в $TM(0,0)_{Z_{max}}$, равно 0,01. При уменьшении значения амплитуды прошедшего излучения наблюдается значительное увеличение амплитуды отраженного излучения (амплитуда прошедшего излучения изменяется в 10–30 раз) (рис. 3, а). Аналогичное изменение значений S -параметров отмечается для $TM(0,0)$ гармоники.

Для $\epsilon = 100$ чередование минимальных (0,02–0,50) и максимальных (0,97) для $TE(0,0)$ значений S -параметра передачи энергии в $TE(0,0)_{Z_{max}}$ наблюдается во всем исследуемом диапазоне частот, причем на отдельных частотах происходит перераспределение энергии пространственных гармоник. Уменьшение амплитуды рассматриваемой гармоники до минимального значения сопровождается переходом энергии во вторую гармонику (увеличение соответствующего S -параметра с 0,01 до 0,34).

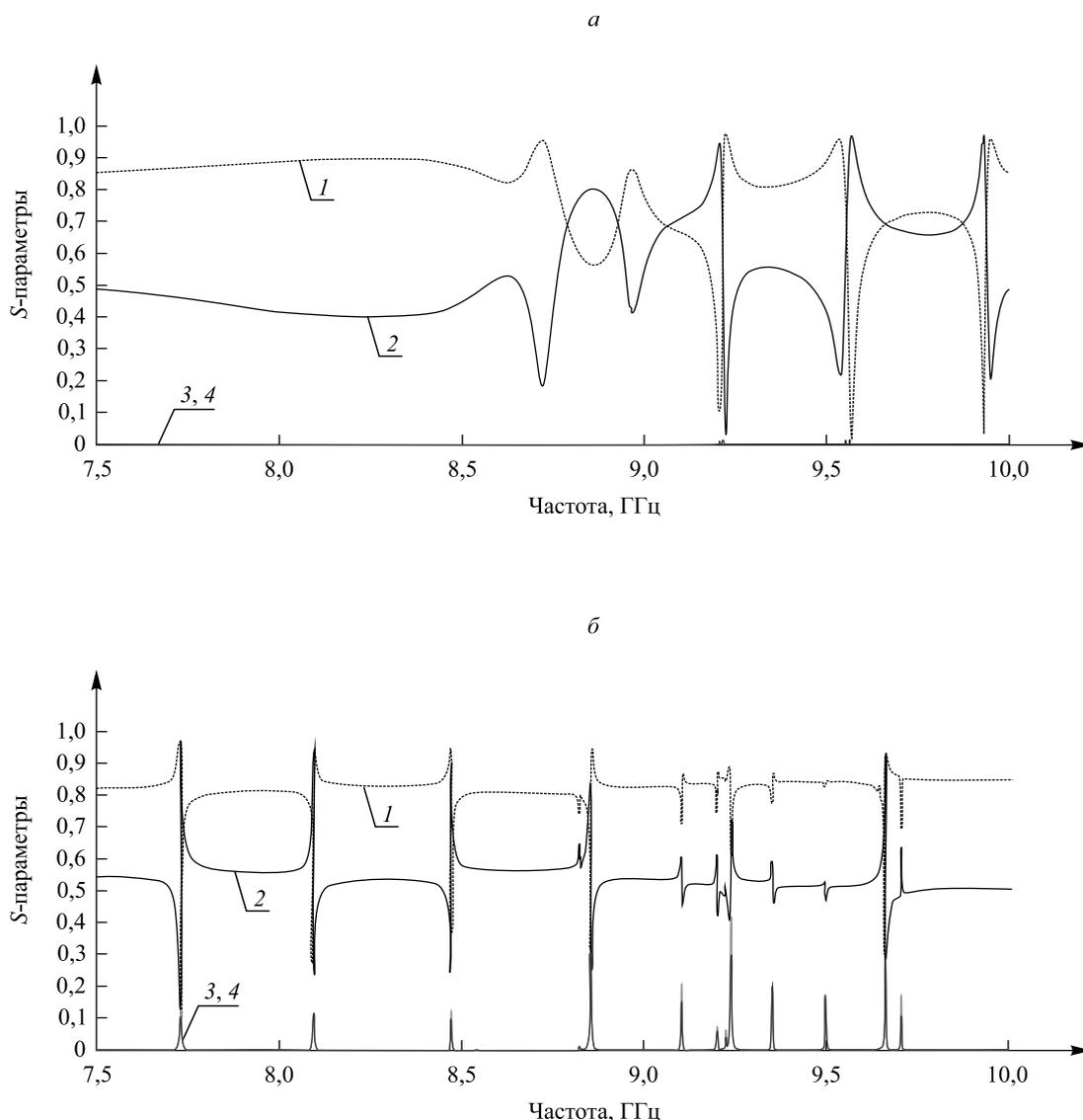


Рис. 3. Изменение значений S -параметров для $TE(0,0)$ при $\epsilon = 75$ (а); $\epsilon = 200$ (б):
 1 – $TE(0,0)_{Z_{min}}$ в $TE(0,0)_{Z_{max}}$; 2 – $TE(0,0)_{Z_{min}}$ в $TE(0,0)_{Z_{min}}$;
 3 – $TE(0,0)_{Z_{min}}$ в $TM(0,0)_{Z_{max}}$; 4 – $TE(0,0)_{Z_{min}}$ в $TM(0,0)_{Z_{min}}$

Для диэлектрической проницаемости вставок $\epsilon = 150$ в диапазоне частот 7,5–9,3 ГГц изменение для $TE(0,0)$ значений S -параметра передачи энергии в $TE(0,0)_{Z_{\max}}$ носит периодический характер, но перераспределения энергии между пространственными гармониками не наблюдается, кроме частоты 7,83 ГГц (значение соответствующего S -параметра возрастает до 0,06). В диапазоне частот 9,3–10,0 ГГц изменения для $TE(0,0)$ значений S -параметра передачи энергии в $TE(0,0)_{Z_{\max}}$ также носят периодический характер и наблюдается появление перераспределения энергии поля между гармониками. Наибольшее перераспределение энергии между пространственными гармониками рассеянного поля отмечается на частотах 9,48; 9,57; 9,68; 9,8 ГГц, причем значения энергии пространственных гармоник прошедшего поля и количество перераспределенной энергии спектра имеют приблизительно равные значения (соответствующие значения S -параметров колеблются в диапазоне 0,33–0,54).

График изменения значений S -параметра для $TE(0,0)$ при диэлектрической проницаемости вставок $\epsilon = 200$ представлен на рис. 3, б.

При увеличении ϵ до 300, 350 перераспределение энергии основной гармоники наблюдается в диапазоне частот 8,63–10,0 ГГц.

Перераспределение энергии распространяющейся гармоники происходит из-за перестройки периодичности структуры для СВЧ-излучения путем изменения диэлектрической проницаемости элементов периодической решетки.

Изменение для $TE(0,0)$ значений S -параметров передачи энергии гармоникам отраженного поля противоположно: минимальные значения S -параметров для прошедшего спектра соответствуют максимальным значениям S -параметров отраженного спектра и наоборот, принимают значения от 0,04 до 0,98.

Спектр рассеяния электромагнитного излучения в моделируемой периодической структуре с периодом, равным 0,75 см ($\lambda/4$), содержит также только основные гармоники $TE(0,0)$ и $TM(0,0)$. При распространении электромагнитного излучения наблюдаются колебания значений амплитуд рассеянного поля с ярко выраженными максимумами и минимумами (значения соответствующих S -параметров изменяются в пределах от 0,95 до 0,02).

При распространении электромагнитного излучения в пространственной периодической структуре с диэлектрической проницаемостью вставок $\epsilon = 75$ перераспределения энергии между пространственными гармониками не наблюдается (рис. 4, а). При увеличении диэлектрической проницаемости вставок отмечается перераспределение энергии, причем с ростом ϵ от 100 до 300 значения соответствующих S -параметров возрастают с 0,05 до 0,45.

Характерно, что значительное уменьшение амплитуды основной гармоники не сопровождается максимальным перераспределением энергии в спектре. При диэлектрической проницаемости вставок $\epsilon = 100$ уменьшение для $TE(0,0)$ значений S -параметра передачи энергии в $TE(0,0)_{Z_{\max}}$ в 3 или 158 раз сопровождается изменением значений S -параметра, характеризующего перераспределение энергии, на величину 0,05 или 0,01 соответственно. На частотах 9,09; 9,47; 9,5 ГГц наблюдается резкое уменьшение амплитуды прошедшего электромагнитного излучения и возрастание амплитуды отраженного (значения соответствующих S -параметров составляют 0,01 и 0,92 соответственно) при отсутствии распределения энергии.

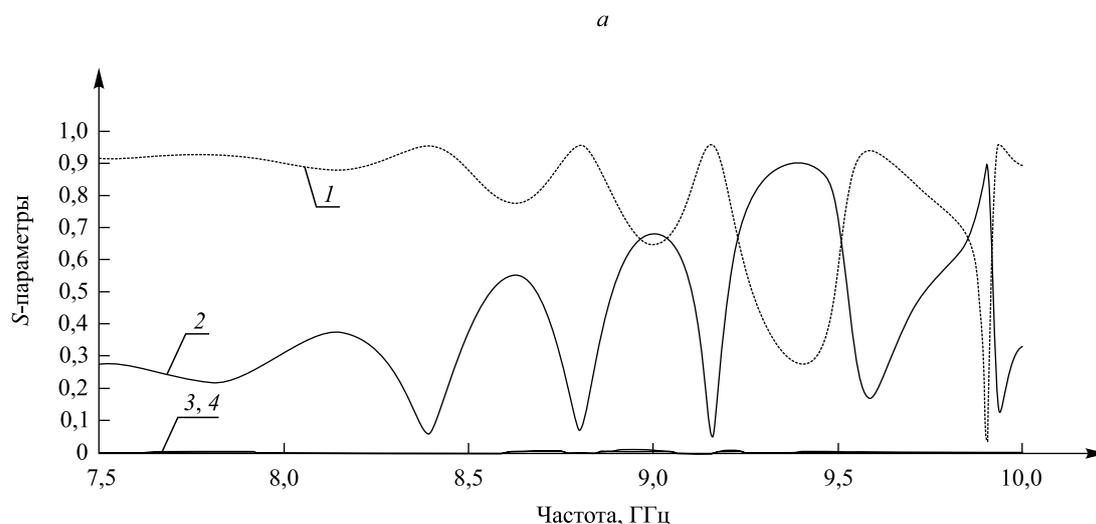


Рис. 4. Изменение значений S -параметров при $\epsilon = 75$ (а):

1 — $TE(0,0)_{Z_{\max}}$ в $TE(0,0)_{Z_{\max}}$; 2 — $TE(0,0)_{Z_{\min}}$ в $TE(0,0)_{Z_{\min}}$;

3 — $TE(0,0)_{Z_{\min}}$ в $TM(0,0)_{Z_{\max}}$; 4 — $TE(0,0)_{Z_{\min}}$ в $TM(0,0)_{Z_{\min}}$

(начало)

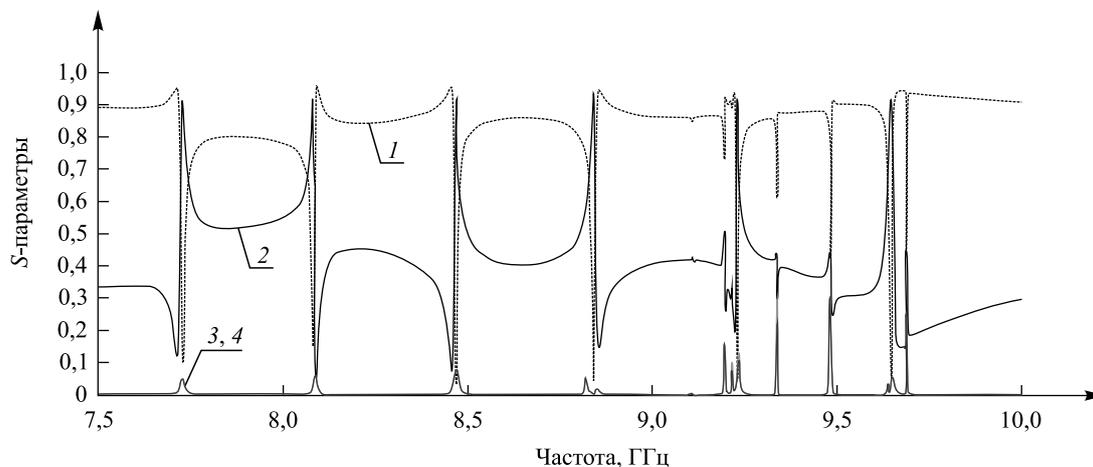


Рис. 4. Изменение значений S -параметров при $\epsilon = 200$ (б):
 1 – $TE(0,0)_{z_{\min}}$ в $TE(0,0)_{z_{\max}}$; 2 – $TE(0,0)_{z_{\min}}$ в $TE(0,0)_{z_{\min}}$;
 3 – $TE(0,0)_{z_{\min}}$ в $TM(0,0)_{z_{\max}}$; 4 – $TE(0,0)_{z_{\min}}$ в $TM(0,0)_{z_{\min}}$
 (окончание)

При $\epsilon = 150$ периодичный характер чередования минимумов и максимумов S -параметров сохраняется, здесь наблюдается их смещение по шкале частот: минимальные значения S -параметров регистрируются на меньших частотах по сравнению с предыдущим случаем.

В случае изменения ϵ от 150 до 300 отмечается увеличение количества частот, на которых наблюдается перераспределение энергии, при этом максимальные значения S -параметров, характеризующих перераспределение энергии между пространственными гармониками, колеблются в пределах 0,2–0,4. Минимальные значения S -параметра основной гармоники прошедшего излучения находятся в диапазоне 0,02–0,08. Разность частот с минимальным значением S -параметров равна 0,4 ГГц. При этом разность частот, на которых наблюдаются минимальные значения S -параметров прошедшей основной гармоники, в случае изменения ϵ на 50 составляет 0,1 ГГц. Наблюдаемая закономерность справедлива и для случая периодической структуры с шагом размещения стержней $\lambda/2$.

Таким образом, численно исследованы спектры рассеяния электромагнитного поля периодической структуры с периодом, равным $\lambda/2$ и $\lambda/4$, состоящей из параллельных диэлектрических брусьев с управляемой диэлектрической проницаемостью.

Установлено, что в периодических структурах из диэлектрических брусьев с регулируемым коэффициентом диэлектрической проницаемости возможно управление характеристиками рассеяния СВЧ-излучения за счет перераспределения энергии электромагнитного поля между гармониками переизлученного спектра. Изменения значений амплитуд гармоник рассеянного спектра (в 10–150 раз) носят периодический характер, а частоты, соответствующие минимумам и максимумам амплитуд, зависят от диэлектрической проницаемости брусьев периодической структуры. Этот эффект может использоваться при создании устройств для управления направлением распространения и амплитудой электромагнитных волн [3, 6].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (REFERENCES)

1. Поплавко Ю. М., Переверзева Л. П., Раевский И. П. Физика активных диэлектриков / под ред. В. П. Сахненко. Ростов н/Д., 2009.
2. Gaponenko S. Introduction to Nanophotonic S. Cambridge, 2010.
3. Ненасьева Е. А., Канарейкин А. Д., Дидук А. И., Павлова Ю. В. Электрически управляемые компоненты на основе керамики BST-Mg // Физика твердого тела. 2009. Т. 51, № 8. С. 1468–1471 [Nenasheva E. A., Kanareykin A. D., Didyk A. I., Pavlova Yu. V. Electrically controlled components based on ceramic BST-Mg. *Fiz. tverd. tela*. 2009. Vol. 51, No. 8. P. 1468–1471 (in Russ.)].
4. Курушин А. А., Пластиков А. Н. Проектирование СВЧ-устройств в среде CST Microwave Studio. М., 2010.
5. Рычков Ю. М., Акимов А. И., Василевич А. Е. Распространение электромагнитных волн СВЧ-диапазона в двумерных управляемых периодических структурах // Докл. НАН Беларуси. 2010. Т. 54, № 1. С. 50–53 [Rychkov Yu. M., Akimov A. I., Vasilevich A. E. Propagation of electromagnetic waves of microwave frequency in controlled two-dimensional periodic structures. *Dokl. NAN Belarusi = Proc. Natl. Acad. Sci. Belarus*. 2010. Vol. 54, No. 1. P. 50–53 (in Russ.)].
6. Шестопалов В. П., Литвиненко Л. Н., Масалов С. А., Сологуб В. Г. Дифракция волн на решетках. Харьков, 1973.