

УДК 621.371.334

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА РЕШЕТКЕ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ

Д. Д. Иванченко, М. Н. Малеев

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина  
61077, пл. Свободы, 4, Харьков, Украина  
E-mail: mihail\_maleev@mail.ru  
Поступила в редакцию 28 ноября 2009 г.*

В статье приводятся результаты экспериментального исследования дифракции электромагнитных волн на объемной решетке из прямоугольных элементов. Решетка представляла собой две плоские двумерно-периодические структуры из прямоугольных металлических полосковых элементов, расположенных на обеих поверхностях слоев диэлектрика и соединенных между собой перемычками. Измерения частотной и поляризационной зависимости коэффициентов прохождения решетки проводились в диапазоне частот 26-38,8 ГГц. Решетка облучалась линейно поляризованной квазиплоской волной для случая ее нормального падения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дифракция электромагнитных волн, киральная структура, поляризационно-частотные свойства.

У статті приводяться результати експериментального дослідження дифракції електромагнітних хвиль на об'ємній решітці з прямокутних елементів. Решітка утворена двома плоскими двовірно-періодичними структурами, з прямокутних металевих полоскових елементів, розташованих на обох поверхнях шарів діелектрика й з'єднаних між собою перемичками. Вимірювання частотної та поляризаційної залежності коефіцієнтів проходження решітки проводились в діапазоні 26-38,8 ГГц. Решітка опромінювалась лінійно поляризованою хвилею для випадку її нормального падіння.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** дифракція електромагнітних хвиль, кіральна структура, поляризаційно-частотні властивості.

In given paper the diffraction of electromagnetic waves on volume grid is investigated experimentally. The grid consists of rectangular elements. Two planes of two-dimensional periodic rectangular metallic string elements located on both dielectric surfaces and connected by cylindrical conductors. The measurements of dependence of grid transmission index on frequency and polarization are carried out. The measurements were made in frequency range 26-38,8 GHz. The grid was irradiated by quasi-plane wave with incident on the normal to the surface of the grid.

**KEYWORDS:** diffraction electromagnetic waves, chiral structure, polarization properties on frequency.

Электродинамические характеристики структур из элементов сложного профиля в значительной мере зависят как от формы элементов, так и от способа их расположения в пространстве. Усложнение геометрии элемента, а также многослойность структуры приводит к появлению новых свойств, а, следовательно, и возможностей применения. Такие структуры нашли свое применение в СВЧ и антенной технике. Успешно используются для частотной фильтрации, преобразования поляризации, для моделирования киральных структур и пр.

Экспериментальные и теоретические исследования дифракции волн на сложных трехмерных решетках дали полезные для практики приложения: высокодобротные резонансы на "запертых модах" [1,2], резонансное поглощение и пропускание электромагнитных волн киральными структурами [3] и др.. В ряде работ приведены результаты взаимодействия волн с объемными элементами [4], а также периодически расположенными металлическими рассеивателями сложной конфигурации [5]. Изготовить плоские структуры без диэлектрического слоя, на котором и располагаются рассеиватели, практически не представляется возможным. Значительные трудности возникают при изготовлении структур из объемных рассеивателей, даже если они представляют собой набор связанных слоев.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе исследуется дифракция электромагнитной волны на структуре, представляющей собой два идентичных слоя диэлектрика ( $\epsilon = 4,2$ ,  $\text{tg}\delta = 0,02$ ) толщиной  $a = 0,9$  мм, расположенных параллельно. На поверхность каждого из слоев диэлектрика нанесены металлические рассеиватели в виде прямоугольных элементов, образующих двумерно-периодическую решетку с периодом  $l = 7$  мм.

Одна из решеток повернута относительно другой на  $90^\circ$  (см. рис. 2а). Расстояние между слоями  $a_1 = 4$  мм. Проводящие элементы соединены между собой цилиндрической металлической перемычкой перпендикулярной слоям диэлектрика и диаметром  $r = 0,4$  мм. Каждый конец прямоугольного элемента одного слоя припаян к соответствующему концу прямоугольного элемента второго слоя.

Таким образом, удобно условно разделить решетку на одинаковые ячейки с высотой 7мм, шириной 7мм и толщиной 6мм, как показано на рис.1.

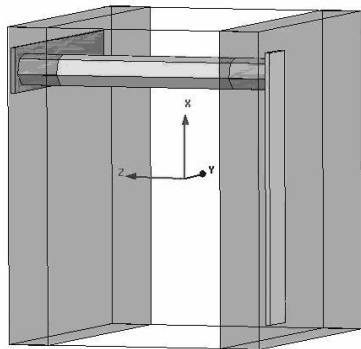


Рис. 1. Общий вид ячейки решетки.

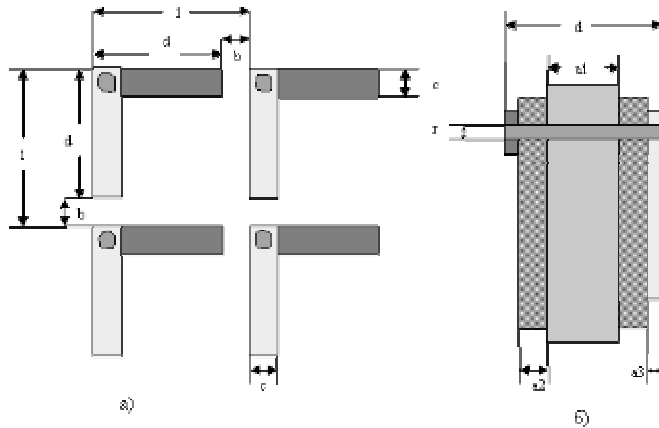


Рис. 2. Структура решетки: а – вид сверху, б – вид сбоку.  $l = 7\text{мм}$ ,  $d = 6\text{мм}$ ,  $b = 1\text{мм}$ ,  $c = 1\text{мм}$ ,  $a_1 = 4\text{мм}$ ,  $a_2 = 0.9\text{мм}$ ,  $a_3 = 0.1\text{мм}$ ,  $r = 0.6\text{мм}$ .

В работе исследуется дифракция электромагнитной волны на структуре, представляющей собой два идентичных слоя диэлектрика ( $\epsilon = 4,2$ ,  $\text{tg}\delta = 0,02$ ) толщиной  $a_2 = 0,9\text{мм}$ , расположенных параллельно. На поверхность каждого из слоев диэлектрика нанесены металлические рассеиватели в виде прямоугольных элементов, образующих двумерно-периодическую решетку с периодом  $l = 7\text{мм}$ .

Одна из решеток повернута относительно другой на  $90^\circ$  (см. рис. 2а). Расстояние между слоями  $a_1 = 4\text{мм}$ . Проводящие элементы соединены между собой цилиндрической металлической перемычкой перпендикулярной слоям диэлектрика и диаметром  $r = 0,4\text{мм}$ . Каждый конец прямоугольного элемента одного слоя припаян к соответствующему концу прямоугольного элемента второго слоя.

Таким образом, удобно условно разделить решетку на одинаковые ячейки с высотой 7мм, шириной 7мм и толщиной 6мм, как показано на рис.1. Геометрические размеры рассеивателей и диэлектрических слоёв указаны на рис. 2.

Измерения коэффициента прохождения проводились на двухпозиционной установке квазиоптического типа (см. рис. 3) в диапазоне частот 26-38,8 ГГц. В качестве источника СВЧ использовался генератор качающейся частоты (ГКЧ) P2-65.

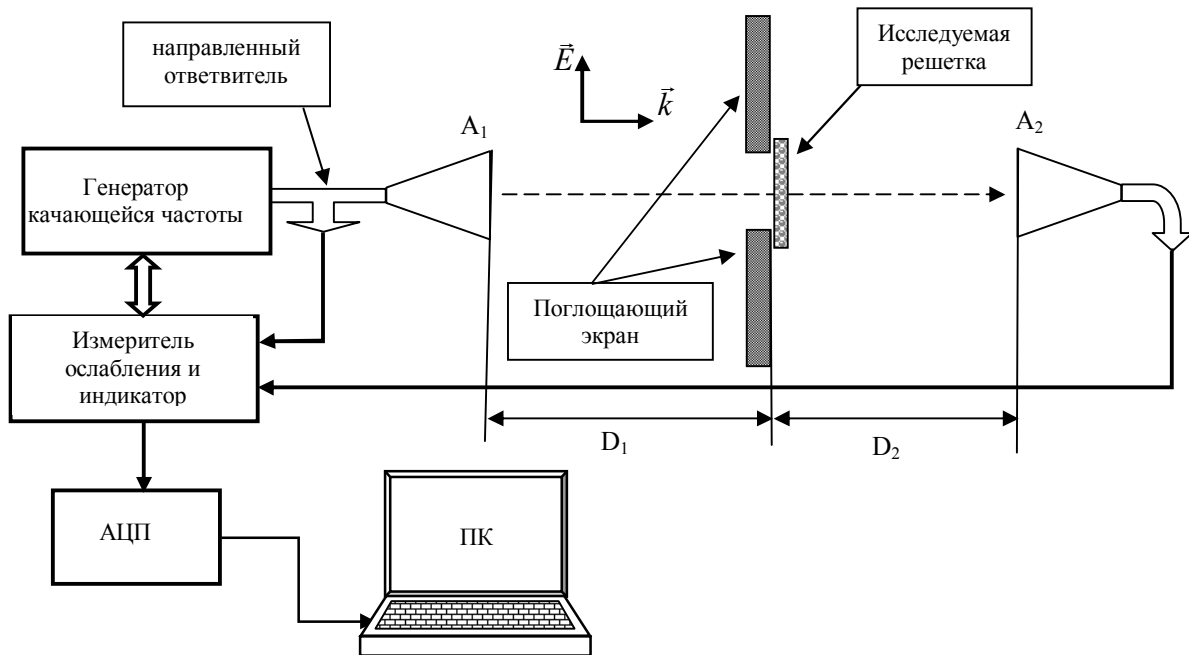


Рис. 3. Блок схема измерительной установки.

В качестве излучающей  $A_1$  и приёмной  $A_2$  антенн использовались линейно поляризованные пирамидальные рупоры высотой 210 мм и размерами апертуры 80мм×80 мм с фазокорректирующими линзами из пенополистирола. Исследуемая структура располагалась за квадратным отверстием

(100мм×100мм) в поглощающем экране на расстоянии ( $D_1=2000$ мм) от излучающего рупора и на расстоянии ( $D_2=1250$ мм) от приемного рупора так, чтобы плоскость решетки была перпендикулярна оптической оси установки.

Исследуемая решетка облучалась линейно-поляризованной волной. Сигналы с передающего и приемного рупоров поступали на измеритель ослабления и КСВН Я2Р-67, где происходило их сравнение. Сигнал с выхода индикатора подавался на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а с него на вход персонального компьютера (ПК). Для улучшения соотношения сигнал/шум на ПК происходило накопление информации о сигнале во временной области по 64 измерениям.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модуль коэффициента прохождения определялся как отношение амплитуды поля прошедшего через решетку, к амплитуде поля прошедшего через отверстие в экране без решетки.

Для физической интерпретации процессов, возникающих при дифракции электромагнитной волны на решетке, в начале исследовались частотные зависимости коэффициентов прохождения составных частей решетки. Дополнительно, методом конечных элементов проводилось численное моделирование дифракции плоской волны на ячейке аналогичной решетки. Результаты численных расчетов показаны на рисунках пунктирной линией.

На рис. 4 приведены частотные зависимости коэффициентов прохождения для однослойной решетки и двухслойной решетки без перемычек. Для случая однослойной решетки прямоугольные элементы, на поверхности диэлектрика располагались параллельно направлению вектора напряженности электрического поля падающей волны. В случае двухслойной решетки вектор напряженности электрического поля падающей волны был параллелен элементам, расположенным на поверхности ближней к источнику излучения.

Коэффициент прохождения обеих решеток имеет минимум на частоте 35,4 ГГц. Этот резонанс обусловлен интерференционными явлениями пространственных гармоник, которые образовались после прохождения первой решетки. Для случая одномерно периодической ленточной структуры в диэлектрическом слое такой резонанс был рассмотрен в работе [6]. Из-за небольшой относительной толщины диэлектрического слоя  $a/l=0,13$ , резонанса при котором коэффициент отражения близок к единице, не наблюдается.

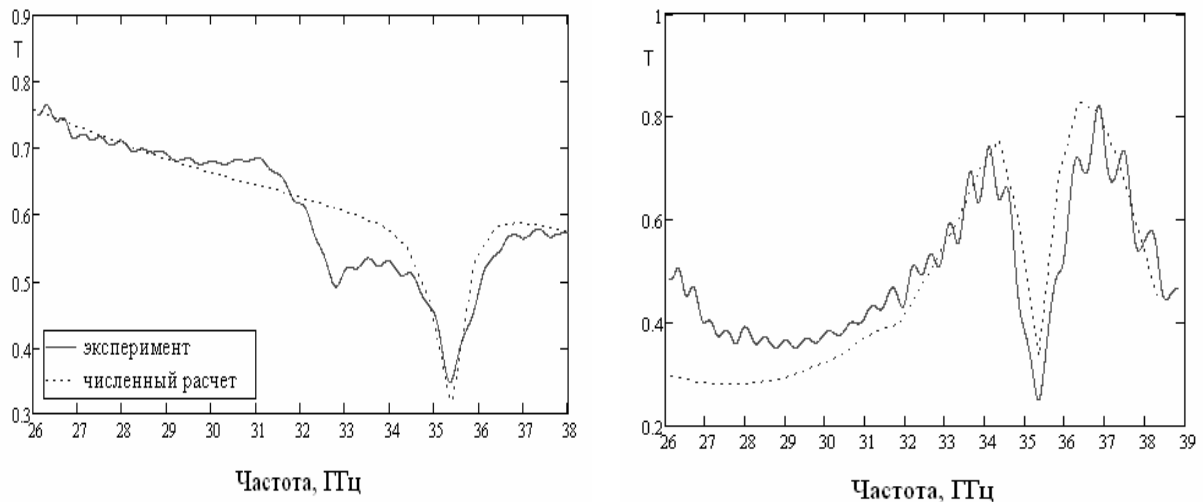


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента прохождения однослойной решетки (слева) и двухслойной решетки без перемычек (справа).

Частотная зависимость коэффициента прохождения объемной решетки с перемычками приведена на рис. 5. На этом же рисунке показаны частотные зависимости коэффициентов прохождения для однослойной и двухслойной решеток без перемычек. Наличие перемычек приводит к смещению резонанса в область более длинных волн при общем поведении коэффициента прохождения волны характерном для случая двухслойной структуры.

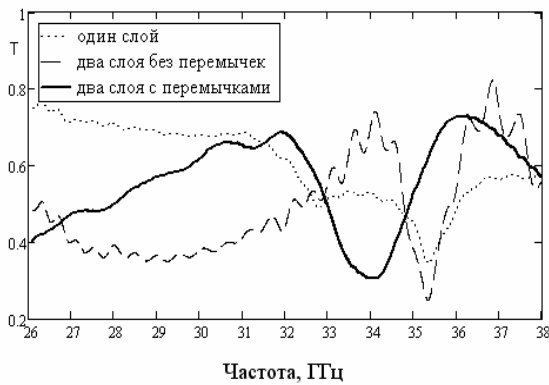


Рис.5. Частотные зависимости коэффициента прохождения объемной решетки и ее составляющих.

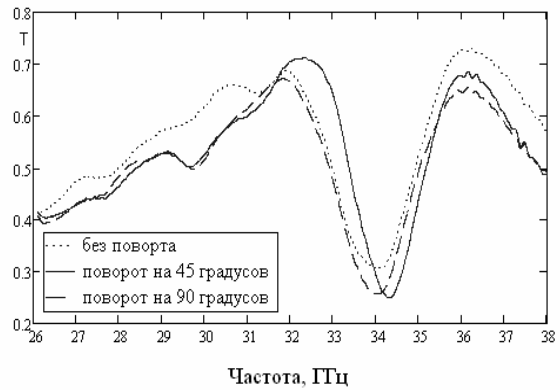


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициентов прохождения решетки при различных углах поворота решетки.

На рис. 6 представлены частотные зависимости коэффициента прохождения объемной решетки при различных углах  $\varphi$  ее поворота относительно поляризации падающего поля в плоскости перпендикулярной направлению падения волны. Как видно из рисунка, характер поведения частотных зависимостей коэффициента прохождения решетки остается неизменным при значительном угле поворота решетки  $\varphi = 45^\circ$  и  $90^\circ$ . Наблюдается небольшое смещение частоты резонанса и изменение величины модуля коэффициента прохождения.

Методом поляризационной диаграммы исследовались поляризационные характеристики прошедшего через решетку поля при разных частотах. При этом приемный рупор поворачивался вокруг своей оси на угол  $\psi$  через  $10^\circ$ . Угол  $\psi$  отсчитывался между направлением поляризации падающего поля и направлением поляризации приемного рупора. На рис.7 приведены измеренные значения прошедшего поля при различных углах поворота  $\psi$  приемного рупора и фиксированном угле поворота решетки  $\varphi = 45^\circ$ .

Как показали исследования падающее поле имеет уровень кросс-поляризации не превышающий 0,02 во всем частотном диапазоне.

На рис. 8 приведена частотная зависимость коэффициента эллиптичности прошедшего через объемную решетку поля. Вблизи частоты 34 ГГц прошедшее поле становится эллиптически поляризованным. Причем, направление максимального значения амплитуды прошедшего поляризованного поля совпадает с направлением вектора  $\vec{E}$  падающего поля. На других частотах коэффициент эллиптичности прошедшего и падающего поля совпадают.

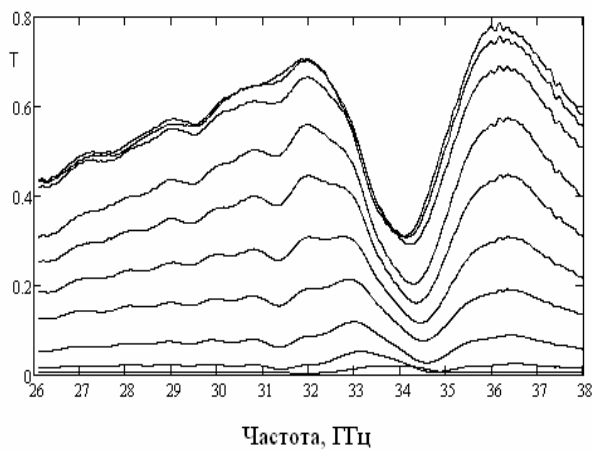


Рис. 7. Поляризационно-частотные характеристики прошедшего поля решетки из плоских прямоугольных элементов от различных углов поворота приемного рупора в плоскости перпендикулярной оптической оси установки.

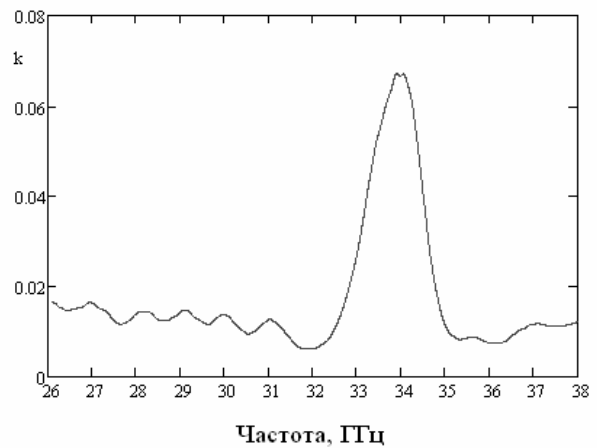


Рис. 8. Зависимость коэффициента эллиптичности прошедшего поля от частоты.

## ВЫВОДЫ

Исследована дифракция электромагнитных волн на объемной решетке из плоских прямоугольных элементов. Получены частотные зависимости коэффициента прохождения решетки и ее составных частей в диапазоне частот 26-38,8 ГГц. Показано, что наличие перемычек соединяющих соответствующие элементы приводит к смещению резонансов отражения в длинноволновую область. Обнаружено, что вблизи 34 ГГц прошедшее поле становится эллиптически поляризованным, а коэффициент эллиптичности достигает значения  $k \approx 0,07$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prosvirnin S. L., Zouhdi S. Resonances of closed modes in thin arrays of complex particles/Advances in Electromagnetics of Complex Media and Materials. – Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers.–2003–V.89–P.281-290
2. Fedotov V. A., Rose M., Prosvirnin S. L., Papasimakis N. and Zheludev N. I. Sharp trapped-mode resonances in planar materials with a broken structural symmetry // Phys. Rev. Lett. – 2007. – Vol. 99, No. 14. – P. 147401(4)
3. Fedotov V. A., Mladynov P. L., Prosvirnin S. L., Rogacheva A. V., Chen Y. and Zheludev N. I. Asymmetric Propagation of Electromagnetic Waves through a Planar Chiral Structure//Phys.Rev. Lett.–2006.–Vol. 97, No.16. – P. 167401(4)
4. Barth A J., Clausing K. R. An approximate model for artificial chiral material// IEEE Transactions on antennas and propagation-1994. Vol.42, NO.12.-1592-1599
5. Cloete J. H., Bingle M., Davidson D. B. Scattering and absorption by thin metal wires in rectangular waveguide – chiral cranks versus non-chiral staples// Annual research report electrical engineering -2000. - 353-358
6. Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. Резонансное рассеяние волн. – К.: Наукова думка, 1986, – Т.1. 232 с.

© Иванченко Д. Д., Малеев М. Н., 2009