



Экспериментальное исследование частотной зависимости модуля коэффициента прохождения двупериодической решетки из С-образных полосковых элементов

Д. Д. Иванченко, Н. Н. Колчигин, С. Л. Просвирнин¹, Д. О. Тырнов¹

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4
E-mail: Nicolay.N.Kolchigin@univer.kharkov.ua*

*¹Радиоастрономический институт НАН Украины,
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная 4
E-mail: prosvirn@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 25 марта 2003 г.

Представлены результаты экспериментального исследования двупериодической решетки из металлических полосковых С-образных элементов. Описана методика измерений, проведено сравнение результатов измерений с теоретическими расчетами. Предложено физическое объяснение наиболее ярко выраженных резонансов прохождения электромагнитной волны сквозь решетку.

Представлено результати експериментального дослідження двоперіодичної ґратки з металевих стрічкоподібних елементів у вигляді літери С. Описано методику вимірювань, проведено порівняння результатів вимірювань з результатами теоретичних обчислень. Запропоновано фізичне пояснення найбільш яскраво виражених резонансів проходження електромагнітної хвилі крізь ґратку.

Частично прозрачные полосковые периодические структуры широко используются в микроволновой технике в качестве частотно- и поляризационно-селективных поверхностей, а так же для формирования отдельных слоев, из которых набираются искусственные среды, в частности, имеющие свойства электромагнитных кристаллов. Полосковые периодические структуры можно разделить на два больших класса в зависимости от типа элементов, из которых они состоят: структуры из элементов простой формы (диски, прямоугольники и т. п.) и структуры из узких полосок сложной формы. Эти два класса решеток существенно отличаются, в первую очередь, характерными для них резонансными частотами. Первый класс решеток имеет резо-

нансы в частотных зависимостях коэффициентов отражения и прохождения на длине волны примерно в два раза превышающей диаметр элемента, т. е. на длине волны того же порядка, что и размеры периодической ячейки. Второй может иметь резонансы на значительно большей длине волны за счет того, что длина узкого полоскового элемента сложной формы может быть существенно больше размеров ячейки структуры. Именно благодаря этому свойству периодические структуры из полосок сложной формы, в частности, периодические решетки из С-образных элементов, являются перспективными для использования в качестве элементов новых искусственных материалов в микроволновой области.

Свойства дупериодических решеток из С-образных элементов исследованы численно, и результаты представлены в [1, 2]. Исследование выполнено с помощью метода, предложенного в [3]. Его суть состоит в численном решении методом моментов интегрального уравнения относительно плотности поверхностного тока на элементе периодической структуры и в определении амплитуд пространственных гармоник отраженного и прошедшего поля по найденной плотности тока.

Многослойная структура из решеток С-образных элементов имеет частотные зависимости коэффициентов отражения по двум ортогональным поляризациям поля, типичные для искусственных структур фотоники. В этих зависимостях, благодаря резонансам в частотных характеристиках отдельных слоев и интерференционным резонансам в промежутках между слоями, имеются полосы практически полного отражения с резкими границами. Результаты теоретического исследования характеристик многослойных систем из полосковых С-элементов как структур фотоники представлены в [1, 2]. В [4] приведены данные, полученные в ходе экспериментального исследования свойств четырехслойной структуры.

Для проектирования многослойных структур с заданными характеристиками важно иметь надежные оценки для точности, с которой резонансные частоты реальной дупериодической решетки из неидеальных материалов и с некоторым типичным для простой технологии изготовления разбросом параметров соответствуют расчетным значениям. Поэтому целью настоящей работы является экспериментальное исследование свойств решетки из С-образных элементов и их сопоставление с данными расчета.

Измерения выполнены в Харьковском национальном университете им. В. Н. Каразина, на кафедре теоретической радиофизики.

Исследуемый слой представлял собой решетку из С-образных полосковых элементов, ориентированных в одном направлении, (см. рис. 1, а). Такой выбор формы элемента решетки обусловлен тем, что в этом случае при малом, по сравнению с длиной вол-

ны, периоде решетки на элементе возможно существование нескольких нижних резонансов тока. Элементы решетки – из меди – размещены на слое диэлектрика FR-4 (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 4.3$, тангенс угла потерь $\text{tg}\delta = 0.01$). Толщина подложки составляет 1 мм, толщина элементов – 0.05 мм. Радиус средней линии элемента $a = 1.8$ мм, ширина полоски $2w = 0.4$ мм, угловой размер прорези $\phi = 40^\circ$. Периоды по осям OX и OY одинаковы и равны 5 мм. Размеры исследуемой решетки 150×150 мм. Рассматривался случай нормального падения

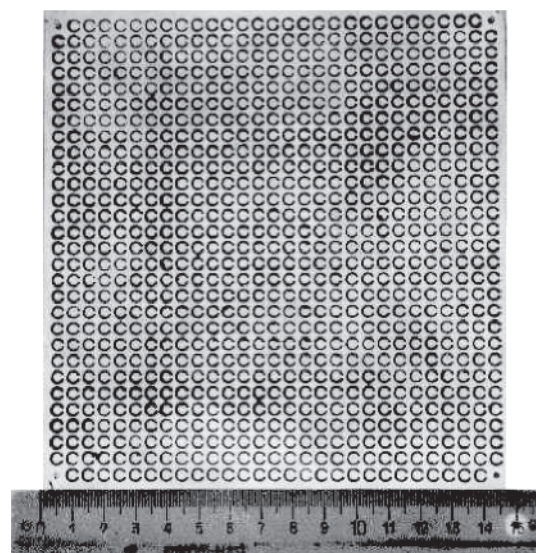
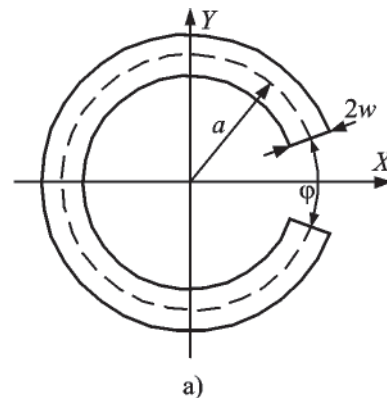


Рис. 1. Геометрия экспериментального образца: а) элемент решетки, б) внешний вид исследуемой решетки

волны на решетку. Измерения проводились для двух волн, ортогональных линейно поляризованных вдоль осей OX и OY . Поскольку элементы решетки симметричны, то в отраженном и прошедшем поле преобразования поляризации не происходит.

На рис. 2 и 3 приведены расчетные частотные зависимости модуля коэффициента прохождения решеток с указанными выше параметрами. Графики на рис. 2 построены для решетки, находящейся в свободном пространстве, а на рис. 3 – для решетки, лежащей на слое диэлектрика с параметрами материала FR-4. Рисунки (а) и (б) соответствуют двум ортогональным поляризациям падающей волны. На рисунках указано направление векторов напряженности электри-

ческого поля. Резонансы 1–3 на рис. 2 объясняются тем, что на этих частотах на длине S -элемента укладывается примерно целое число длин полувольт. Некоторое смещение происходит из-за влияния дополнительной индуктивности, поскольку элементы криволинейны. При размещении решетки на слое диэлектрика эти резонансы переходят соответственно в резонансы 1–3 на рис. 3. Появление остальных резонансов на частотных зависимостях рис. 3 вызвано тем, что в слое диэлектрика на частотах выше 30 ГГц начинают распространяться высшие пространственные гармоники, не излучающиеся, впрочем, за пределы этого слоя.

Экспериментальное исследование проводилось на двухпозиционной установке квазиоп-

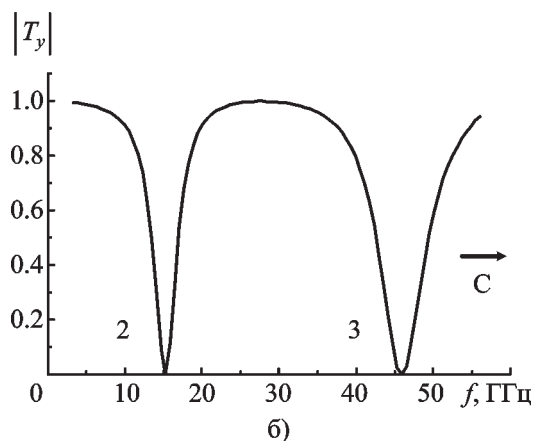
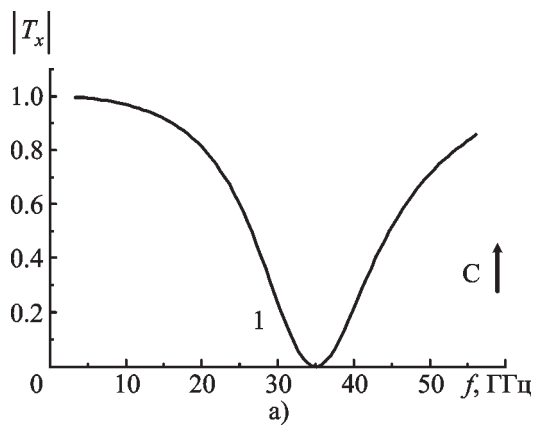


Рис. 2. Частотные зависимости модуля коэффициента прохождения двупериодической решетки, находящейся в свободном пространстве, для двух ортогональных поляризаций

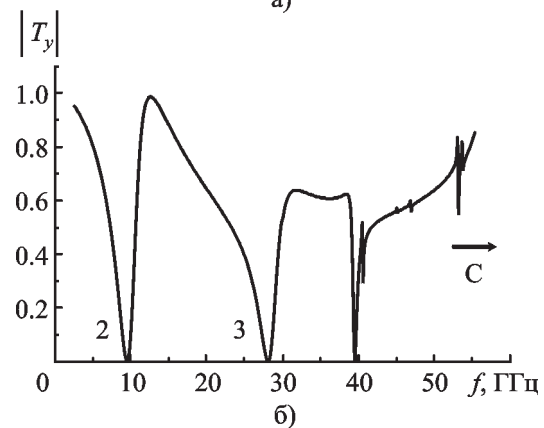
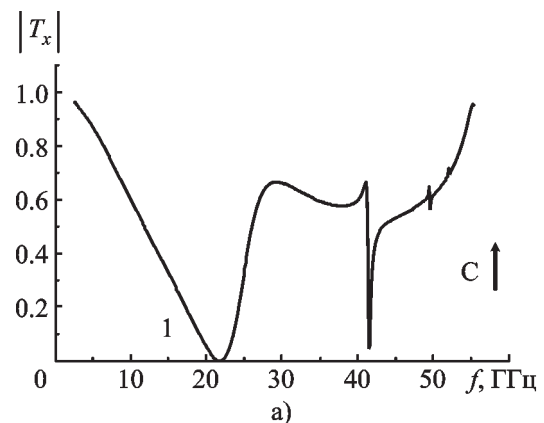


Рис. 3. Частотные зависимости модуля коэффициента прохождения двупериодической решетки, расположенной на слое диэлектрика, для двух ортогональных поляризаций

тического типа с разнесенными передающей и приемной антеннами (см. рис. 4). Частотный диапазон был разбит на два поддиапазона: $25.5 \div 37.5$ ГГц и $36.7 \div 55.1$ ГГц. В качестве передающей и приемной антенн использовались прямоугольные пирамидальные рупоры с размерами излучающей апертуры 80×80 мм и 60×60 мм соответственно для первого и второго поддиапазонов.

Рупоры комплектовались фазокорректирующими линзами. Исследуемая структура располагалась на специальном поворотном-юстировочном устройстве и находилась в дальней зоне относительно как приемной, так и передающей антенны.

Для исключения влияния поворотного устройства, на котором располагалась структура, на характеристики рассеянного поля использовались плоские экраны из поглощающего материала толщиной 50 мм и площадью 600×600 мм. В геометрическом центре каждого поглощающего экрана выполнено квадратное отверстие, размеры которого для первого и второго частотного поддиапазонов составляли 100×100 мм и 61×61 мм соответственно. Поглощающий экран располагался перед исследуемой структурой со стороны падающей электромагнитной волны.

Установка юстировалась таким образом, чтобы ее главная ось проходила через геометрические центры апертур излучающего рупора, отверстия в поглощающем экране, исследуемой структуры, приемного рупора и была перпендикулярна всем этим апертурам. Модуль коэффициента прохождения определялся

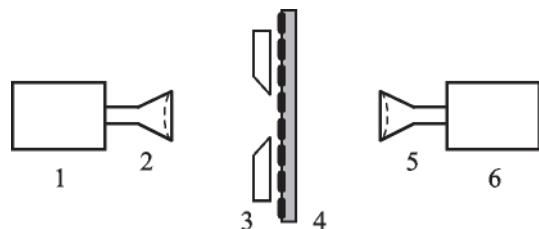


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – генератор СВЧ-диапазона, 2 – излучающая антенна, 3 – экран из поглощающего материала, 4 – исследуемая структура, 5 – приемная антенна, 6 – приемный блок

ся как отношение амплитуды электромагнитной волны в максимуме диаграммы направленности поля, прошедшего через систему “отверстие в экране – структура”, к амплитуде волны в максимуме диаграммы направленности поля, прошедшего только через отверстие в экране. Погрешность измерения частоты не превышала ± 0.1 %, модуль коэффициента прохождения ± 3.0 %.

На рис. 5 и 6 представлены частотные зависимости модуля коэффициента прохождения для двух ортогональных поляризации.

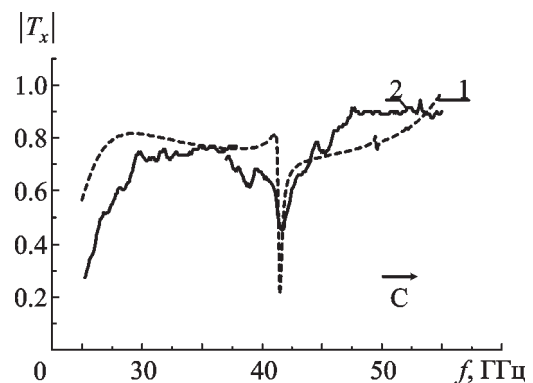


Рис. 5. Частотные зависимости модуля коэффициента прохождения для X-поляризованной волны: 1 – теория, 2 – эксперимент

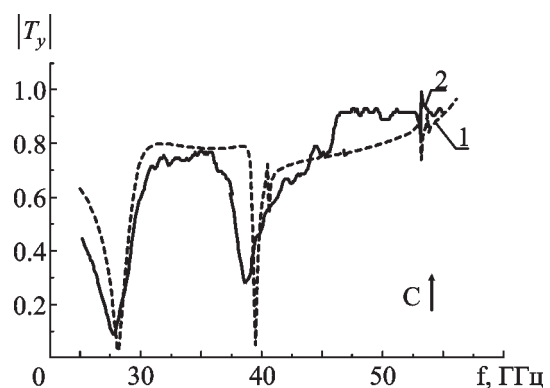


Рис. 6. Частотные зависимости модуля коэффициента прохождения для Y-поляризованной волны: 1 – теория, 2 – эксперимент

На обоих рисунках номером 1 обозначена расчетная зависимость, а номером 2 – экспериментальная. Видно, что частоты резонансов отражения, найденные в эксперименте, хорошо совпадают с расчетными значениями. Значения модулей коэффициентов прохождения также качественно согласуются с расчетными величинами. Мелкая “рябь” на экспериментальной кривой – результат переотражений в отсутствие безэховой камеры. Таким образом, можно говорить о том, что расчетные характеристики соответствуют истинным.

Результаты расчетов, аналогичные приведенным в настоящей статье, использовались в качестве отправных для определения дисперсионных характеристик и коэффициентов отражения слоистых композитных структур, составленных из решеток, подобных исследованной в нашем эксперименте. Экспериментальное подтверждение исходных данных косвенно свидетельствует об экспериментальной воспроизводимости результатов, представленных в [5]. В дальнейшем планируется провести эксперименты по исследованию характеристик слоистых композитных структур, описанных в [5].

Авторы выражают благодарность С. А. Шило, оказавшему помощь при подготовке эксперимента.

Литература

1. S. L. Prosvirnin, S. A. Tretyakov, T. D. Vasilyeva, A. Fourier-Lamer, S. Zouhdi. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2000, **14**, No. 6, pp. 807-826.
2. S. L. Prosvirnin and S. Zouhdi. *International Journal of Electronics and Communications. Special Issue: Bianisotropics*. 2000, 2001, **55**, No. 4, pp. 260-265.
3. С. Л. Просвирнин. *Радиотехника и электроника*. 1999, **44**, №6, с. 681-686.
4. S. Zouhdi, A. Fourier-Lamer, S. L. Prosvirnin, S. A. Tretyakov, T. G. Kharina, H. Jallageas. *Proc. SPIE*. 2001, **4467**, pp. 256-264, *Complex Mediums II: Beyond Linear Isotropic Dielectrics*. Editors: Akhlesh Lakhtakia; Werner S. Weiglhofer; Ian J. Hodgkinson.
5. Л. Н. Литвиненко, С. Л. Просвирнин, Д. О. Тырнов. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2002, **7**, №2, с. 170-174.

Experimental Investigation of Frequency Dependence of Module of Transmission Coefficients of C-Shaped Metal Strip Array

D. D. Ivanchenko, N. N. Kolchigin, S. L. Prosvirnin, D. O. Tyrnov

In the paper, the results of experimental investigation of C-shaped metal strip array are presented. The measuring technique is described, comparison of measured and theoretical results is carried out. The physical interpretation of the most prominent transmission resonances is suggested.