

ДВУХСЛОЙНЫЙ ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ ЭКРАН СВЧ ДИАПАЗОНААлешкевич Н.Н.¹, Будаев А.Г.¹, Кныш В.П.¹, Малый С.В.², Наумович Н.М.³, Юбка А.П.³¹Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем БГУ²Белорусский государственный университет³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Частотно-избирательные экраны (ЧИЭ) широко используются для снижения радиолокационной заметности, обеспечения электромагнитной совместимости и защиты информации, в составе конструкций антенных систем, антенных укрытий и обтекателей [1-3]. Электромагнитные свойства частотно-избирательных структур находятся в сложной зависимости от конструктивных и материальных параметров. Наличие потерь в материалах оказывает существенное влияние на электромагнитные свойства ЧИЭ.

Представляет практический интерес создание ЧИЭ, частотная зависимость коэффициента прохождения через которые близка к прямоугольной. Основными требованиями к электродинамическим характеристикам таких экранов являются малые потери в рабочей полосе частот укрываемого объекта и минимальный коэффициент прохождения вне этой полосы. В зависимости от условий эксплуатации к экрану могут предъявляться также требования по механическим и климатическим характеристикам

Выбор материалов для разработки ЧИЭ должен учитывать уровень потерь на поглощение в рабочем частотном диапазоне. Для создания ЧИЭ предлагается использовать материалы и технологии, используемые при изготовления высокочастотных печатных плат (диэлектрические листы с одно или двухсторонней металлизацией), а также многослойные металло-диэлектрические структуры.

Основными варьируемыми параметрами являются: тип ЧИЭ, конструктивные и электродинамические параметры используемых материалов. Следует учитывать, что выпускаемые материалы для изготовления печатных плат имеют дискретный набор конструктивных (толщина диэлектрика, толщина металлизации, количество слоев) и электромагнитных параметров (диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь).

В качестве объектов исследования были рассмотрены периодические дифракционные решетки (ДР) с прямоугольной ячейкой из отверстий прямоугольной формы.

Вычислительные модели ЧИЭ реализованы на основе метода минимальных автономных блоков (МАОБ) и метода конечных интегралов.

В вычислительных моделях ЧИЭ использовались два типа материалов: FR4 и Taconic RF35-

A2. Первый из них является наиболее распространенным и сравнительно дешевым. Однако он обладает существенными потерями электрического типа в СВЧ диапазоне и представляет практический интерес на этапе предварительного проектирования, изготовления и испытания опытных образцов. Наличие потерь существенно сказывается на резонансных свойствах ЧИЭ и снижает их добротность.

Материал Taconic RF35-A2 предназначен для использования в составе высокочастотных устройств, обладает малыми потерями в СВЧ диапазоне и может быть использован для создания ЧИЭ с требуемыми характеристиками.

На первом этапе разработки рассмотрена модель ЧИЭ, реализованная в виде периодической решетки из прямоугольных отверстий в тонком металлизированном слое материала с толщиной диэлектрической подложки 0.51 мм и толщиной слоя металлизации 0.017 мм. Для обеспечения радиопрозрачности в трехсантиметровом диапазоне СВЧ рассмотрена периодическая решетка прямоугольных щелей с параметрами: длина щели $\ell = 11,25 \text{ мм}$; ширина щели $d = 0,25 \text{ мм}$, 0,5 мм, 1 мм; периоды решетки с прямоугольной формой ячейки - $\Delta x = 7 \text{ мм}$ и $\Delta y = 15 \text{ мм}$.

Анализ результатов численного моделирования показал, что увеличение ширины щели приводит к смещению резонансной частоты в более высокую область ($d = 0,25 \text{ мм} - f_0 \approx 9,5 \text{ ГГц}$, $d = 1 \text{ мм} - f_0 \approx 10,5 \text{ ГГц}$) и увеличение полосы пропускания (по уровню - 3 дБ для $d = 0,25 \text{ мм} - 2 \Delta f = 1,5 \text{ ГГц}$, $d = 1 \text{ мм} - 2 \Delta f = 4 \text{ ГГц}$).

При увеличении угла падения Θ волны в Е - плоскости резонансная частота практически не меняется, а частотный диапазон на фиксированных уровнях радиопрозрачности расширяется ($\Theta = 0^\circ - 2 \Delta f = 1,5 \text{ ГГц}$, $\Theta = 60^\circ - 2 \Delta f = 3,5 \text{ ГГц}$). Форма частотная зависимость коэффициента прохождения для однослойной решетки далека от прямоугольной.

Одним из возможных способов повышения крутизны частотной зависимости коэффициента прохождения на границах полосы радиопрозрачности является использование двухслойных дифракционных решеток.

Анализ двухслойной структуры из одинаковых ранее рассмотренных ДР, показывает, что если исключить взаимное влияние ДР, входящих в слоистую структуру,

коэффициенты прохождения для каждой из них должны перемножаться, что обеспечивает увеличение крутизны кривой частотной зависимости коэффициентов прохождения. В результате вычислительного эксперимента установлено, что параллельно расположенные ДР взаимодействуют друг с другом, а расстояние между ними можно использовать в качестве управляющего параметра.

На основе результатов компьютерного моделирования и предварительных экспериментальных исследований была разработана ДР со следующими конструктивными параметрами:

- форма периодической ячейки – прямоугольная;
- периоды решетки: 8мм и 16мм;
- длина щели 11,625мм;
- ширина щели 0,25мм.

Образец ЧИЭ представляет собой трехслойную конструкцию, включающую две панели ДР с диэлектрической пластиной между ними. Фотография фрагмента ЧИЭ представлена на рисунке 1. В качестве межслойного заполнителя использовалась пластина толщиной 8мм из пенополистирола плотностью 35 кг/м³.



Рисунок 1. Фрагмент частотно-избирательного экрана

Проведено измерение коэффициента прохождения ЧИЭ в диапазоне 8 ÷ 12ГГц. Исследуемый образец устанавливался в окно металлического экрана, который закреплялся на поворотном столе. Облучение образца производилось измерительной антенной П6-23А, с корректирующей линзой. Приемная антенна (открытый конец волновода) устанавливалась в зоне Френеля за экраном. Измерения проводились с использованием векторного анализатора цепей Vector Star VS4642B.

Перед установкой измеряемого образца в отверстие экрана для каждого положения экрана проводилась калибровка тракта (облучающая антенна – экран – приемная антенна) на коэффициент прохождения равный единице.

На рис.2 приведена частотная зависимость коэффициента прохождения ЧИЭ на материале Taconic RF35-A2 при нормальном падении волны.

Максимальное значение коэффициента прохождения ЧИЭ на резонансной частоте (метка1) составило $T_0 = -0,2\text{дБ}$, что значительно лучше, чем у структуры из F4 ($T_0 = -0,56\text{дБ}$).

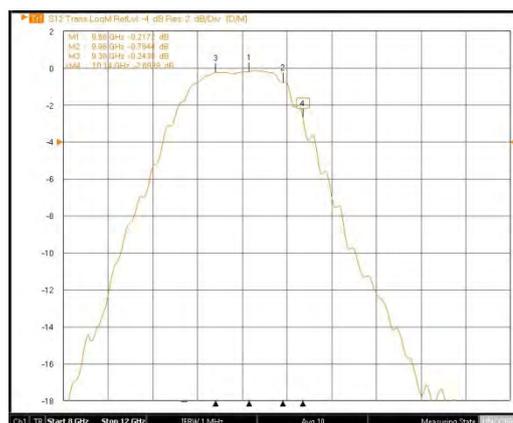


Рисунок 2 Частотная зависимость коэффициента прохождения ЧИЭ. $\theta = 0^\circ$

Различие результатов натурального и вычислительного эксперимента в зоне радиопрозрачности не превышает 0,05дБ, что соизмеримо с точностью измерений, а вне рабочей полосы – не более 2-3дБ на уровнях меньше – 10дБ.

1. В. А. Munk, Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York: Wiley Interscience, 2000.
2. Будаев А.Г., Кныш В.П., Малый С.В., Рудницкий А.С., Орлова А.С. Частотно-селективные экраны на основе связанных полосковых резонаторов // Материалы 7-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2014», 19-21 ноября 2014 г., Минск.– С.262-264.
3. Будаев А.Г., Кныш В.П., Малый С.В., Рудницкий А.С. Электромагнитные экраны с расширенными функциональными свойствами // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конференции. Севастополь, 6-12 сентября, 2015. С. 439-440.