

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯВЛЕНИЙ ДИФРАКЦИИ

## ВЛИЯНИЕ ПОТЕРЬ НА ДИФРАКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК ИЗ ТОЛСТЫХ БРУСЬЕВ

*В. В. Пилипенко, Г. Г. Половников, Б. Т. Кныш*

Харьков

Работа является продолжением исследований дифракционных решеток из толстых металлических брусьев прямоугольного профиля с узкими щелями и посвящена экспериментальному изучению влияния потерь в брусьях на амплитудные значения коэффициента прохождения.

В работах [1, 2] теоретически и экспериментально исследовались дифракционные свойства периодических решеток из брусьев с узкими щелями. Обнаружены ярко выраженные резонансы коэффициентов отражения и прохождения основной  $H$ -поляризованной волны, т. е. такая структура является полностью прозрачной (или отражающей) в узком интервале частот. Однако опыт применения структур из прямоугольных брусьев с узкими щелями в практических устройствах миллиметрового диапазона (измерение диэлектрической проницаемости  $\xi$  вещества [2], фильтр-поляризатор) показывает, что резонансные значения коэффициента прохождения не достигают расчетных величин. При измерении в тонких пленках методом, основанным на резонансных свойствах такой структуры, наблюдается уменьшение амплитуды прошедшей волны, которое не может быть объяснено только потерями в диэлектрике. Это можно объяснить тем, что теоретическое определение характеристик переизлученного поля получено в предположении идеальной проводимости брусьев структуры.

При нормальном падении на решетку плоской  $H$ -поляризованной волны поле дифракции нулевой гармоники в областях: под решеткой ( $\eta < -\delta$ ), в щелях ( $|\eta| < \delta$ ) и над решеткой ( $-\eta > \delta$ ) можно представить в виде [1]

$$H_z(\xi, \eta) = \begin{cases} e^{i\pi x \eta} + \frac{1}{D} e^{-i\pi x(\eta+2\delta)} \left\{ \left[ 1 - \theta^2 \left( 1 + 4x^2 \ln^2 \sin \frac{\pi\theta}{2} \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \sin 2\pi x \delta - 4x\theta \ln \sin \frac{\pi\theta}{2} \cos 2\pi x \delta \right\}, \quad \eta < -\delta; \end{cases} \quad (1)$$

$$H_z(\xi, \eta) = \begin{cases} 2e^{-i\pi x \delta} \frac{1}{D} [\sin \pi x (\delta - \eta) + ix\theta S_0 \cos \pi x (\delta - \eta)], & |\eta| < \delta, \quad |\xi| < 0, \\ 2i \frac{\theta}{D} e^{i\pi(\eta - 2\delta)}, & \eta > \delta, \\ E_x = -\frac{1}{ik} \frac{\partial H_z}{\partial y}; \quad E_y = \frac{1}{ik} \frac{\partial H_z}{\partial x}; \quad E_z = 0; \quad H_x = H_y = 0, \end{cases}$$

где

$$\xi = 2 \frac{x}{l}, \quad \eta = 2 \frac{y}{l}, \quad \theta = \frac{d}{l}, \quad \delta = \frac{h}{l} \quad \text{и} \quad x = \frac{l}{\lambda} -$$

безразмерные параметры. Обозначения соответствуют работе [1]. Из представления (1) следует, что вектор электрического поля не имеет компонент, совпадающих с направлением основных (прошедшей и отраженной) переизлученных волн, т. е. отсутствуют потери, обусловленные пространственным рассеянием электромагнитной энергии падающей волны. В этом случае теоретические значения коэффициента прохождения основной волны  $|b_0|$ , полученные из (1), на резонансных частотах достигают значений, равных единице. Однако при измерениях, несмотря на то, что применяются материалы с малыми омическими потерями (медь М-0, М-00) и чистота обработки поверхностей решетки не ниже 9—10 класса (среднеквадратичная величина неровностей не более 0,1—0,25 мк), наблюдаются несколько заниженные резонансные значения амплитуд коэффициента прохождения. Расхождение экспериментальных данных с расчетными объясняется наличием потерь, источниками которых являются, с одной стороны, конечная проводимость материала брусьев решетки, а с другой, недостаточная чистота обработки поверхностей структуры.

Влияние активных потерь дифракционных структур за счет конечной проводимости материала брусьев решетки на величину коэффициента прохождения определяется экспериментально. Для этой цели измеряются максимальные значения амплитуды  $|b_0|_{\max}$ , соответствующие резонансным длинам волн решеток с одинаковыми геометрическими параметрами, изготовленных из материалов с различной проводимостью. Чистота обработки поверхностей брусьев при этом также одинакова. Наличие неровностей эквивалентно увеличению глубины поверхностного слоя. Причина этого в том, что при шероховатостях, величина которых сравнима с глубиной скин-слоя, путь поверхностных токов удлиняется. В связи с этим значение поверхностного импеданса увеличивается. Глубина скин-слоя  $\Delta$  определяется формулой [3]

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — удельная проводимость металла,  
 $\mu$  — магнитная проницаемость,  
 $f$  — частота.

При работе в миллиметровом диапазоне с использованием реальных материалов глубина проникновения поверхностных токов составляет десятые доли микрона и одного порядка с величиной шероховатостей поверхности брусьев. Показано [3], что величина потерь увеличивается в 1,6 раза, если размер шероховатостей равен толщине скин-слоя. Кроме того, неровности являются дополнительным источником потерь за счет пространственного рассеяния энергии падающей волны. Оценка влияния шероховатостей на величину коэффициента прохождения может быть получена из экспериментальной зависимости  $|b_0|_{\max} = f(\delta)$ , т. е. изменение резонансных значений коэффициента прохождения от длины пути, проходимого волной в решетке. Суть наших экспериментов заключается в измерении величин  $|b_0|_{\max}$ , соответствующих резонансным длинам волн при изменении высоты структуры и различных вариациях ширины щели  $d$  и периода  $l$ .

Это достигается использованием решеток, изготовленных из различных материалов, начальная высота которых одинакова и составляет  $h_1 = 50$  мм. Первая серия измерений проводится при различных щелях между брусьями  $d_1, d_2, d_3$  и  $d_4$  и соответственно  $l_1, l_2, l_3, l_4$ . Далее высота решеток последовательно уменьшается до значений  $h_2, h_3, h_4$  и измеряются величины  $|b_0|_{\max}$  при тех же значениях  $d$ . В этом случае при оценке потерь за счет проводимости материала ошибка измерений, обусловленная недостаточной чистотой обработки брусьев, является систематической и не влияет на характер зависимостей потерь от  $\sigma$ . Были изготовлены три идентичные решетки из меди, алюминия и стали, параметры которых сведены в таблицу.

$l, \text{мм}$	$d, \text{мм}$	$\theta = \frac{d}{l}$	$\delta_1 = \frac{h_1}{l}$	$\delta_2 = \frac{h_2}{l}$	$\delta_3 = \frac{h_3}{l}$	$\delta_4 = \frac{h_4}{l}$
2,00	0,10	0,050	25,00	20,00	1,50	10,00
2,10	0,20	0,095	23,80	19,04	14,28	9,52
2,20	0,30	0,136	22,73	18,18	13,64	9,09
2,40	0,50	0,208	20,83	16,66	12,50	8,33

Измерения проводились в диапазоне волн 3,8—5,2 мм. Методика эксперимента и описание установки приведены в работах [1, 2]. Экспериментальные кривые получены в результате обработки многократных измерений, максимальная относительная погрешность которых лежит в интервале  $M_{2,5}^{\pm 1,5}\%$ .

Характер зависимостей коэффициента прохождения от длины волны для решеток из материалов с различной проводимостью сохраняется. Однако амплитуда резонансных значений  $|b_0|_{\max}$  тем меньше, чем хуже проводимость материала. Поэтому влияние потерь за счет  $\sigma$  и шероховатостей поверхностей элементов решетки может быть оценено по максимальным амплитудам  $|b_0|_{\max}$  на

резонансных длинах волн. На рис. 1 представлены графики значений  $|b_0|_{\max}$  от параметра  $\theta$  для решеток из различных материалов и с различными  $h$ , а на рис. 2 — аналогичные зависимости от  $\delta$  при различных  $d$ . Увеличение

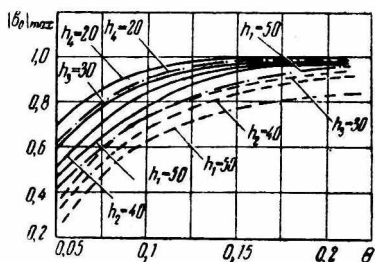


Рис. 1. Зависимость коэффициента прохождения  $|b_0|_{\max}$  от  $\theta$  при различных  $h$  для решеток из меди, алюминия и стали (— медь; -.- алюминий; -.-.- сталь).

высотой, четко выражено изменение  $|b_0|_{\max}$  от величины удельной проводимости брусьев, которое достигает 40% (у решеток с очень

к монотонному уменьшению  $|b_0|_{\max}$ . Потери существенно возрастают при уменьшении ширины щели. Характерно, что при изменении  $d$  величина  $|b_0|_{\max}$  изменяется непропорционально. Это объясняется тем, что при очень узких щелях ( $\theta < 0,1$ ) возрастает плотность потока электромагнитной энергии в щелях, отношение величины неровностей к ширине щели достигает существенной величины и, кроме того, проявляется влияние разброса геометрических размеров элементов структуры. На экспериментальных графиках рис. 3, где приведены зависимости  $|b_0|_{\max} = f(\sigma)$  для решеток с различной

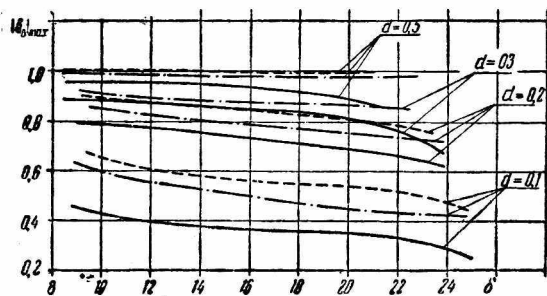


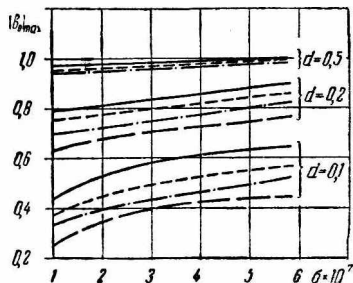
Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения  $|b_0|_{\max}$  от параметра  $\delta$  при различных  $d$  для решеток из меди, алюминия и стали (— медь; -.- алюминий; -.-.- сталь).

узкими щелями) соответственно для медной и стальной структур. При этом зависимости  $|b_0|_{\max} = f(\sigma)$  не подчиняются линейному закону.

При разработке действующих устройств миллиметрового диапазона с применением решеток из прямоугольных брусьев с узкими

щелями необходимо иметь в виду, что если параметр  $\theta > 0,2$ , то практически не имеет значения величина удельной проводимости материала структуры. Следовательно, для изготовления решеток может быть использована сталь, что значительно упрощает технологию. Для решеток с очень узкими щелями ( $\theta < 0,05$ ) различие

Рис. 3. Зависимость коэффициента прохождения  $|b_0|_{\max}$  от проводимости материала брусьев  $\sigma$  для решеток с различными параметрами (—  $h = 20$ ; - -  $h = 30$ ; - . -  $h = 40$ ; - -  $h = 50$ ).



значений  $|b_0|_{\max}$  от  $\sigma$  достигает значительной величины, и улучшение резонансных свойств этой структуры может быть достигнуто тщательной обработкой поверхностей элементов. Влияние активных потерь за счет проводимости материала брусьев для решеток с конкретными параметрами можно оценить из рис. 3, который соответствует диапазону длин волн 3,9—5,2 мм и чистоте обработки по 9—10 классу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Сологуб, В. П. Шестопапов, Г. Г. Половников. ЖТФ, XXXVII, 4, 1967.
2. В. В. Пилипенко, Г. Г. Половников, В. Г. Сологуб, В. П. Шестопапов. ЖТФ, XXXIX, 12, 1969.
3. Э. Л. Гинзтон. Измерения на сантиметровых волнах. Изд-во иностр. лит., 1960.