

ОТРАЖЕНИЕ (ПРОХОЖДЕНИЕ) ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ОТ РЕШЕТКИ, ШИРИНА ЛЕНТЫ МЕТАЛЛА КОТОРОЙ РАВНА ШИРИНЕ ЩЕЛИ

А. В. Провалов

Плоская металлическая решетка, образованная параллельно проводящими лентами, при нормальном падении на нее электромагнитных волн для $\lambda \gg L$ является фильтром, отражающим E -поляризованную и пропускающим H -поляризованную волну, а для $\lambda < L$ — дифракционной решеткой. При этом в таких решетках для случая $\lambda < L$ приблизительно половина мощности падающей волны передается дифракционным спектром.

В работе [3] методом Винера—Хопфа [4] дано строгое решение задачи о дифракции плоской электромагнитной волны на плоской металлической решетке при нормальном падении волны и равенстве ширины лент металла и щелей между ними. Этим же методом решена аналогичная задача в работе [1]. Анализ графиков зависимости коэффициента прохождения $|b_0|$ (отражения $|a_0|$) от $x = \frac{L}{\lambda}$ показывает, что имеется существенное расхождение в поведении коэффициентов прохождения $|b_0|$ (отражения — $|a_0|$) при $x > 1,8$, определенное в работах [3] и [1]. В то время как согласно [3] при $x > 1,8$ $|a_0|$ и $|b_0|$ приближаются к 0,5, совершая при этом затухающие зигзагообразные колебания, причем $|a_0|$ приближается к 0,5 снизу, а $|b_0|$ сверху, в работе [1] показано, что при $x > 1,8$ $|a_0|$ и $|b_0|$ колеблются вблизи 0,5, принимая значения как больше, так и меньше 0,5 (например, для $2 \leq x \leq 4$ $|a_0|$ всегда меньше 0,5, а $|b_0|$ — больше 0,5).

В работе [2] решена задача о дифракции волн на плоских ленточных решетках, находящихся в однородных, изотропных и свободных от пространственных зарядов диэлектрических средах при любом соотношении между шириной лент металла и шириной щелей между ними. Для частного случая, когда диэлектрические среды с обеих сторон решетки имеют значение $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$, а ширина щели Δ равна ширине ленты металла ($\Delta = \frac{L}{2}$), расчет, произведенный для $|b_0|$ и $|a_0|$, показал, что поведение $|b_0|$ и $|a_0|$ в зависимости от x близко к поведению $|b_0|$ ($|a_0|$) в работе [1]. В связи с этим был поставлен специальный эксперимент для изучения поведения $|b_0|$ и $|a_0|$ в зависимости от x при $1 \leq x \leq 4$. Проведенные исследования подтвердили справедливость выводов работ [1] и [2].

1. Результаты теоретического исследования

Если на плоскую периодическую решетку (рис. 1), образованную бесконечно тонкими идеально проводящими металлическими лентами и помещенную в однородные, изотропные и свободные от пространственных зарядов диэлектрические среды со значениями $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$, со стороны $z > 0$ нормально к решетке падает плоская электромагнитная волна,

то для волны с E -поляризацией (вектор электрического поля направлен параллельно оси Ox) задача об отыскании поля над решеткой и под решеткой сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n e^{in\varphi} = 0; \quad \frac{\pi\Delta}{L} < |\varphi| < \pi; \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n |n| (1 - \delta_n) e^{in\varphi} = ix (b_0 \varepsilon_{cp} - \sqrt{\varepsilon_1}); \quad |\varphi| < \frac{\pi\Delta}{L}, \end{cases} \quad (1)$$

где $b_0 = 1 + a_0$ — искомые коэффициенты прохождения и отражения соответственно, а $b_n = a_n$ — комплексные амплитуды волн дифракционных спектров;

$$\varepsilon_{cp} = \frac{1}{2} (\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2});$$

$$\delta_n = 1 + \frac{i}{2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{x\sqrt{\varepsilon_1}}{n}\right)^2 - 1} + \sqrt{\left(\frac{x\sqrt{\varepsilon_2}}{n}\right)^2 - 1} \right\}.$$

В работе [2] решение системы (1) для случая, когда соотношение между шириной ленты металла и шириной щелей между ними произвольно, свелось к решению задачи Римана — Гильберта [5]. В частном случае, когда $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$ и $\Delta = \frac{L}{2}$, для коэффициентов прохождения и отражения имеют место следующие формулы:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{ixd}{ixd + D}; \quad b_0 = 1 + a_0; \\ \delta_n &= 1 + i \sqrt{\left(\frac{x}{n}\right)^2 - 1}, \end{aligned} \quad (2)$$

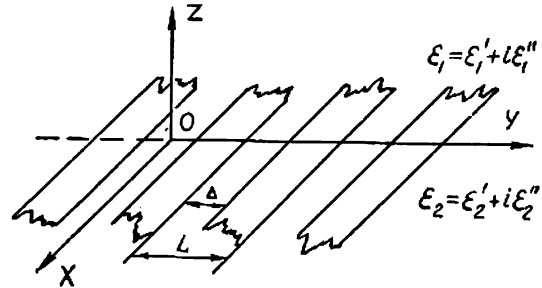


Рис. 1 Дифракционная решетка.

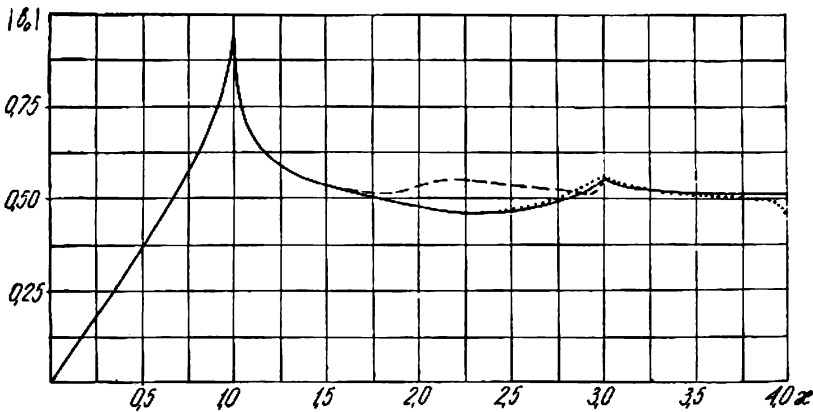


Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения от параметра x .

где

$$D = -0,5 + \frac{3}{8} \delta_1 + \frac{7}{32} \delta_2 + \frac{9}{32} \delta_3 - \frac{13}{128} \delta_1 \delta_2 - \frac{105}{512} \delta_1 \delta_3 - \frac{39}{512} \delta_2 \delta_3 + \frac{63}{8192} \delta_1 \delta_2 \delta_3; \quad (3)$$

$$d = D \ln \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \delta_1 + \frac{1}{32} \delta_2 + \frac{1}{48} \delta_3 - \frac{9}{128} \delta_1 \delta_2 - \frac{27}{192} \delta_1 \delta_3 - \frac{65}{1536} \delta_2 \delta_3 + \frac{131}{24576} \delta_1 \delta_2 \delta_3.$$

По формулам (2) и (3) построены графики зависимости $|b_0|$ от x . На рис. 2 сплошная кривая — график, рассчитанный согласно (2), (3); точечная кривая взята из работы [1], пунктирная — из [3].

2. Экспериментальная установка

Экспериментальное исследование дифракционных свойств решеток проведено на экспериментальной установке, осуществленной на базе измерительной машины ИЗА—10. Эта установка включает передающее устройство, приемное устройство, механизм крепления и юстировки дифракционных решеток. На рис. 3 приведена блок-схема установки.

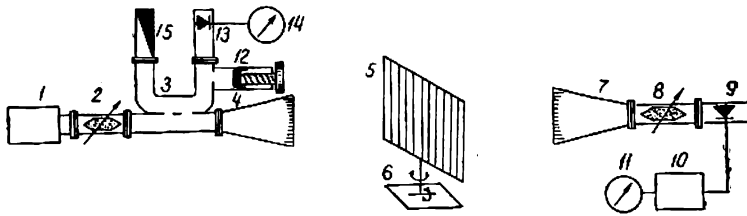


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки:

- 1 — генератор СВЧ; 2 — развязывающий аттенуатор; 3 — направленный ответвитель; 4 — передающий рупор; 5 — исследуемая решетка; 6 — юстирующее устройство; 7 — приемный рупор; 8 — аттенуатор приемного тракта; 9 — детектор; 10 — усилитель постоянного тока; 11 — индикатор; 12 — резонансный волномер; 13 — детектор; 14 — индикатор; 15 — поглощающая нагрузка.

От источника СВЧ мощности, развязанного с основным трактом аттенуатором до 50 децибел, волна типа H_{01} передается по прямоугольному волноводу к излучающему рупору. Часть энергии через направленный ответвитель (ослабление 20 децибел) поступает в тракт контроля частоты. Контроль частоты осуществляется резонансным волномером, точность градуировки которого контролировалась волномером высокой точности.

Прошедшая через решетку СВЧ мощность попадает в приемную часть установки, где и регистрируется.

Расстояние между элементами экспериментальной установки выбирается из условия работы их в зоне дифракции Фраунгофера, где распространяющаяся электромагнитная энергия имеет характер плоской волны. Эта зона определяется из условия $r > \alpha \frac{q^2}{8\lambda_0}$ (r — расстояние вдоль нормали к элементам установки, q — ширина щели, λ_0 — длина волны в свободном пространстве, $\alpha = 8 \div 32$ — коэффициент, выбираемый в зависимости от необходимой точности измерения).

При применении коррекции фазового фронта в раскрыве рупоров эти расстояния составляют $(80 \div 100)\lambda$. При конструировании антенн

экспериментальной установки исходили из условий обеспечения: а) необходимой диаграммы направленности; б) плоского фазового фронта; в) широкополосности; г) максимальной простоты изготовления. В соответствии с этими требованиями антенны установки имеют ширину диаграммы направленности в плоскости $H - 10^\circ$, в плоскости $E - 7^\circ$. Коррекция фазового фронта осуществлялась металло-пластинчатыми линзами.

В приемной части экспериментальной установки используются кристаллические детекторы с последующим усилением по постоянному току ($K_y \approx 200$). Большое усиление позволяет вести экспериментальные

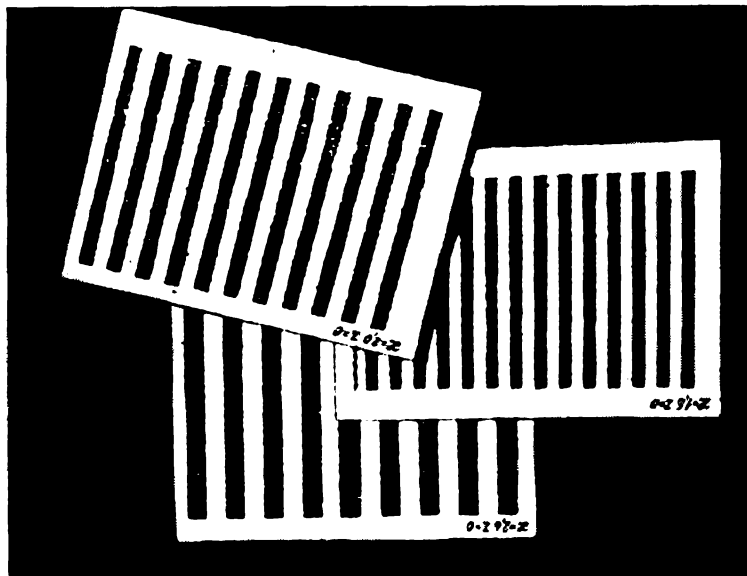


Рис. 4. Образцы дифракционных решеток.

исследования на малых уровнях мощности, где характеристику детектора, с достаточной для эксперимента точностью, можно считать квадратичной. Поскольку при измерении коэффициентов прохождения сравнивается мощность СВЧ, прошедшая через решетку и достигшая детектора, и мощность, достигающая детектора при прямом прохождении (без решетки), то отпадает необходимость градуировки детектора по абсолютному стандарту.

Исследование различных конструкций решеток позволило определить как их оптимальные размеры, так и конструкцию, обеспечивающую наибольшую точность их изготовления при высоком качестве зеркал. Дифракционные решетки, на которых производились исследования, представляют собой набор медных лент толщиной $0,05$ мм, наклеенных на пластины беспрессового пенополистирола ($\varepsilon = 1,02 \div 1,03$; $\text{tg } \delta = 2,4 \times 10^{-4}$; удельный вес $0,05$ г/см³).

Незначительные потери в пенополистироле и неучтенные при теоретических расчетах потери в металле лент учитываются как систематическая погрешность в процессе исследования решеток. Образцы дифракционных решеток приведены на рис. 4.

В соответствии с поставленной задачей были изготовлены и исследованы решетки с параметрами $Z = 0 \left(Z = \cos \frac{\pi \lambda}{L} \right)$; $x = 1,0; 1,6; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0; 3,4; 3,8$.

3. Обсуждение результатов экспериментальных исследований

В процессе эксперимента проводилось многократное измерение коэффициента прохождения $|b_0|$ с целью исключения влияния на точность измерения случайных колебаний мощности СВЧ. Кроме того, применение специального юстирующего устройства позволило ориентировать исследуемые решетки по отношению к падающей волне точно в соответствии с поставленной задачей. Одновременно особое внимание уделялось тщательной юстировке приемного и передающего рупоров.

Результаты проведенных измерений представлены в таблице. В этой же таблице для сравнения приведены значения коэффициентов прохождения $|b_0|$, полученные из теоретического решения задачи на основании формул (2) и (3).

Таблица

x	1.0	1.6	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
$ b_0 $ экспериментальное	0,952	0,516	0,456	0,461	0,460	0,475	0,49	0,536
$ b_0 $ теоретическое	0,954	0,525	0,476	0,463	0,466	0,477	0,496	0,547

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведенные экспериментальные исследования с достаточно высокой степенью точности подтвердили справедливость выводов работ [1] и [2].

2. Небольшое расхождение экспериментально полученных и вычисленных коэффициентов прохождения объясняется незначительными потерями мощности в металле и диэлектрике, учет которых в [2] не производился.

3. Анализ графиков зависимости коэффициента прохождения $|b_0|$ от x показывает, что согласно [1] и [2] кривые практически полностью совпадают; в то же время между ними и кривой работы [3] имеется расхождение. Область наиболее существенного расхождения лежит в пределах $10 \leq x \leq 8,0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. L. Baldwin, A. E. Heins. Math. Scand., 1954, 2, № 1, 103.
2. А. И. Адонина, А. В. Провалов, В. П. Шестопапов. Труды радиофизич. ф-та ХГУ, т. 6, 1962.
3. Л. А. Вайнштейн. Дифракция электромагнитных волн на решетке из параллельных проводящих полос, ЖТФ, 1955, т. XXV, в. 5.
4. Л. А. Вайнштейн. Дифракция электромагнитных и звуковых волн на открытом конце волновода «Сов. радио», М., 1953.
5. С. Г. Михлин. Интегральные уравнения, Гостехиздат, М. — Л., 1947.