

УДК 535.421

## К ВОПРОСУ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОГНУТЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

Саимова Т. С., Куинджи В. В., Стрежнев С. А.

Проведен расчет интегральной эффективности вогнутых дифракционных решеток с учетом изменения углов наклона отражающих граней всех штрихов по поверхности решеток. Показано, что с увеличением апертуры происходит смещение положения максимума интегральной эффективности решеток в длинноволновую сторону с одновременным уменьшением ее величины в максимуме.

Как известно [1], штрихи наиболее распространенных типов нарезных вогнутых решеток имеют постоянный угол  $\gamma_0$  наклона рабочих граней штрихов по отношению к хорде, стягивающей края решетки, равный углу наклона рабочей грани центрального штриха (рис. 1). При этом  $\gamma_i$  — угол наклона рабочей грани  $i$ -го штриха по отношению к касательной к поверхности решетки—

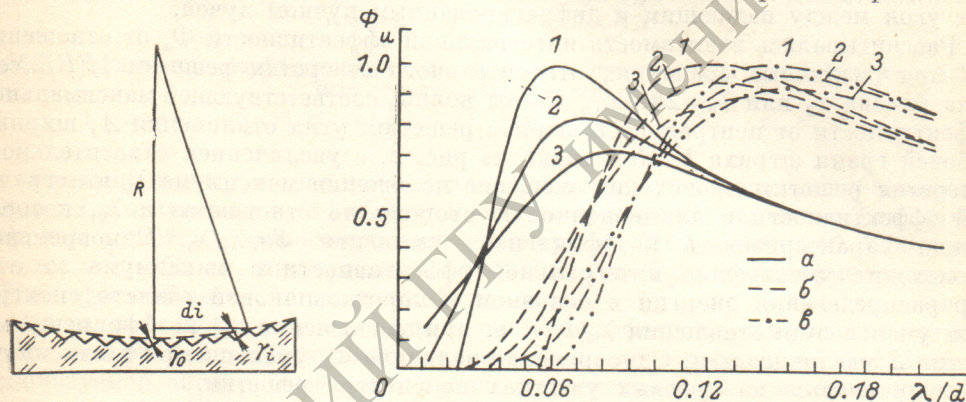


Рис. 1. Схема изменения угла блеска по поверхности решетки.

Рис. 2. Распределение эффективности от центрального штриха (1) и интегральной эффективности  $\Phi_u$  решеток с относительным отверстием 1 : 25 (2) и 1 : 16.6 (3) при  $A=0$ ;  $b=0.7d$ .  
 $\lambda_0/d$ : а — 0.06, б — 0.12, в — 0.144.

или угол блеска каждого  $i$ -го штриха меняется по апертуре решетки в соответствии с выражением

$$\gamma_i = \gamma_0 \pm \arcsin(di/R), \quad (1)$$

где  $d$  и  $R$  — постоянная и радиус кривизны решетки соответственно.

Влияние изменения угла блеска на эффективность вогнутых решеток исследовалось в ряде работ [2-5], где определялось распределение эффективности от отдельных штрихов по апертуре решетки. Такое распределение представляет интерес в тех случаях, когда для работы используются небольшие ( $\sim 2-3$  мм) участки заштрихованной поверхности [3]. Решетки же, как правило, используются в спектральных приборах при значительно больших апертурах, поэтому определение эффективности с учетом углов блеска всех штрихов используемой апертуры решетки представляет практический интерес для оценки энергетических характеристик спектральных приборов с вогнутыми дифракционными решетками.

В настоящей статье приведены результаты расчета эффективности вогнутых дифракционных решеток с учетом изменения углов наклона отражающих граней всех штрихов по поверхности решетки.

Функцию

$$\Phi_u = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \Phi_i(\gamma_i) \quad (2)$$

(где  $\Phi_i(\gamma_i)$  — относительная эффективность  $i$ -го штриха,  $2N$  — общее число штрихов) определим как интегральную эффективность вогнутой дифракционной решетки.

Расчет проводился на основе скалярной теории дифракции в области ее применимости ( $\lambda/d \leq 0.2$ , где  $\lambda$  — длина волны) [6] для решеток, работающих в первом порядке спектра в автоколлимационной схеме и схемах с постоянным углом отклонения. Предполагалось, что величина угла блеска  $\gamma_i$  является постоянной по всей длине штриха. Относительная эффективность  $i$ -го штриха определялась по известным формулам [7]

$$\Phi_i(\gamma_i) = \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2, \\ u = \frac{2\pi b}{\lambda} \sin \left[ \arcsin \frac{\lambda}{2d \cos(A/2)} - \gamma_i \right] \cos(A/2), \quad (3)$$

где  $b$  — ширина рабочей грани штриха;  $A$  — угол отклонения, определяемый как угол между падающим и дифрагированным пучком лучей.

Рассчитывалась зависимость интегральной эффективности  $\Phi_u$  от отношения  $\lambda/d$  при различных значениях относительного отверстия решетки  $1/(R/2Nd)$ ; угла блеска  $\gamma_0$  или  $\lambda_0 = 2d \sin \gamma_0$  длины волны, соответствующей максимальной эффективности от центрального штриха решетки; угла отклонения  $A$ ; ширины рабочей грани штриха  $b$ . Как видно из рис. 2, с увеличением относительного отверстия решетки происходит смещение положения максимума  $\lambda_u$  интегральной эффективности в длинноволновую сторону по отношению к  $\lambda_0$ , которое можно характеризовать коэффициентом смещения  $S = \lambda_u/\lambda_0$ . Одновременно происходит уменьшение интегральной эффективности в максимуме за счет перераспределения энергии в основном в коротковолновой области спектра. При уменьшении отношения  $\lambda_0/d$  (т. е. при уменьшении  $\gamma_0$ ) коэффициент смещения  $S$  увеличивается. Одновременно величина  $\Phi_u$  уменьшается в максимуме и увеличивается на краевых участках по спектру решетки.

При увеличении угла отклонения  $A$  происходит смещение положения максимума  $\Phi_u$  в соответствии с формулой

$$\lambda_{uA} = \lambda_{u0} \cos(A/2), \quad (4)$$

где  $\lambda_{uA}$  — длина волны, соответствующая положению максимума  $\Phi_u$  в схеме с углом отклонения  $A$ ;  $\lambda_{u0}$  — длина волны, соответствующая положению максимума  $\Phi_u$  в автоколлимационной схеме. При этом коэффициент смещения  $S$  и величина максимума  $\Phi_u$  не зависят от схемы использования решетки и полностью определяются ее относительным отверстием и отношением  $\lambda_0/d$  (рис. 3).

Изменение ширины рабочей грани штрихов в пределах (0.7 . . . 1.0)  $d$ , как показал расчет, не влияет на величину коэффициента смещения  $S$  максимума интегральной эффективности, поэтому при проведении расчетов ширина рабочей грани штрихов  $b$  выбиралась равной  $0.7d$ , что, как показывают наш опыт изготовления вогнутых решеток и результаты работ [3, 8], наиболее близко соответствует действительному значению этого параметра у реальных решеток.

Из вышеизложенного следует, что представляет практический интерес определение зависимости коэффициента смещения от отношения  $\lambda_0/d$  при различных значениях относительного отверстия решетки (рис. 4). Штриховая линия на рис. 4 определяет величину  $S$  для предельных апертур  $W_0 = \lambda_0 R/d$ , соответствующих условию геометрического выполнения профиля штрихов. Приведенные кривые показывают, что величина коэффициента смещения может

быть достаточно большой, поэтому при изготовлении решеток для обеспечения заданного положения максимума  $\Phi_u$  длина волны  $\lambda_0$  и соответственно угол  $\gamma_0$  должны выбираться с учетом коэффициента смещения максимума интегральной эффективности. Например, для изготовления решетки с относительным отверстием 1 : 12.5, имеющей 1200 штрихов/мм и максимум  $\Phi_u$  при  $\lambda_u = 100$  нм, как следует из рис. 4, длина волны  $\lambda_0$  должна быть выбрана равной 80 нм ( $\lambda_0/d = 0.096$ ,  $S = 1.26$ ).

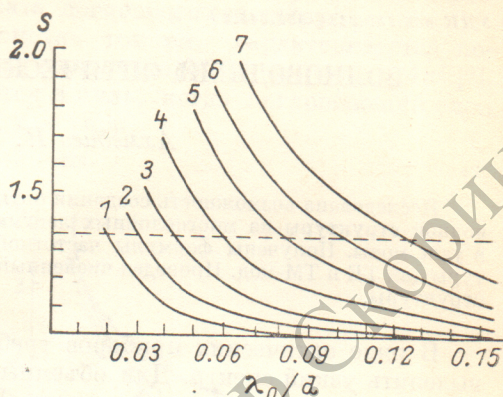
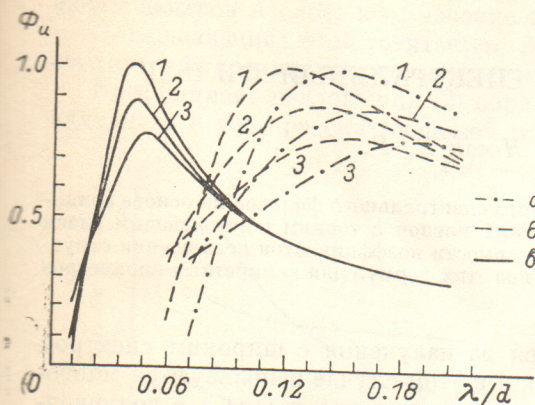


Рис. 3. Распределение эффективности от центрального штриха (1) и интегральной эффективности  $\Phi_u$  для решеток с относительным отверстием 1 : 12.5 (кривые 2,  $\Phi_u \approx 0.88$ ,  $S \approx 1.12$ ) и 1 : 8.3 (кривые 3,  $\Phi_u \approx 0.78$ ,  $S \approx 1.25$ ) при  $\lambda_0/d = 0.144$  и угле отклонения  $A$ , град:  $a - 0$ ,  $b - 70$ ,  $c - 150$ .

Рис. 4. Зависимость коэффициента смещения  $S$  от отношения  $\lambda_0/d$  для решеток с различным относительным отверстием.

1 — 1 : 50, 2 — 1 : 33, 3 — 1 : 25, 4 — 1 : 16.6, 5 — 1 : 12.5, 6 — 1 : 10, 7 — 1 : 8.3.

Уменьшение  $\Phi_u$  в максимуме при изменении относительного отверстия решетки и отношения  $\lambda_0/d$  также может быть достаточно большим. Так, например, для решетки с относительным отверстием 1 : 16.6, имеющей 1200 штрихов/мм и  $\lambda_0 = 50$  нм, интегральная эффективность  $\Phi_u$  в максимуме составляет 0.7 от эффективности, определяемой углом  $\gamma_0$ .

Из изложенного следует, что интегральная эффективность решетки существенно отличается от эффективности ее отдельных штрихов. С увеличением используемой апертуры решетки происходит смещение положения максимума интегральной эффективности в длинноволновую сторону с одновременным уменьшением ее максимального значения. Это приводит к перераспределению энергии в спектре решетки и должно учитываться как при изготовлении решеток, так и при разработке спектральных приборов с вогнутыми дифракционными решетками для ультрафиолетовой и вакуумной ультрафиолетовой областей спектра.

#### Литература

- [1] Герасимов Ф. М., Наумов С. С., Денисов Л. М. — *Опт. и спектр.*, 1964, т. 16, в. 1, с. 133—138.
- [2] Michels D. J. — *JOSA*, 1974, v. 64, N 5, p. 662—666.
- [3] Прокофьев В. К. — *Изв. КАО*, 1981, т. XIV, с. 198—200.
- [4] Брунс А. В. — *ЖПС*, 1981, № P—4671/81.
- [5] Neviere M., Hunter M. R. — *Appl. Opt.*, 1980, v. 19, N 12, p. 2059—2065.
- [6] Loewen E. G., Neviere M., Mastry D. — *Appl. Opt.*, 1977, v. 16, N 10, p. 2711—2721.
- [7] Пейсахсон И. В. *Оптика спектральных приборов*. Л., 1975, с. 56.
- [8] Иванов А. В. — *ОМП*, 1971, № 1, с. 56—58.

Поступило в Редакцию 8 июня 1983 г.