

# 闪耀全息光栅槽轮廓的控制方法

祝绍箕

(上海光学仪器研究所)

## 提 要

本文提出用傅里叶合成方法制造闪耀全息光栅的一种具体方案。描述了合成的槽形轮廓，并与理论值进行了比较。文中对反射时光波相移  $\varphi$  进行了计算，并提出了一种结构简单、调整方便和控制精度高的实验装置。

与刻划光栅相比，全息光栅具有信噪比高、无鬼线和可消象差等优点；此外利用全息照相的方法还可制造大刻划面积和高线槽密度的光栅。近年来，随着全息光栅的分光性能的不断提高，应用也日益广泛。

但是，全息光栅也有弱点，主要是衍射效率一般较低。这是因为目前所使用的全息光栅是照相记录的双光束干涉条纹。在照相记录时，如果不考虑感光材料、曝光和处理过程的非线性的影响，那末光栅线槽的截面轮廓是呈正弦形的。对于正弦槽形的光栅，其衍射效率为30~60% (对于-1级李特洛装置)。为了提高衍射效率，我们必须控制线槽的轮廓，即制造具有闪耀特性的锯齿槽形的全息光栅。

近来已有文献论及全息光栅槽轮廓的控制问题，提出了用傅里叶合成法<sup>[1,2]</sup>、驻波法<sup>[3]</sup>和离子蚀刻法<sup>[4]</sup>来制造闪耀全息光栅，本文利用傅里叶合成方法提出一项制造高性能的闪耀全息光栅的具体新方案。

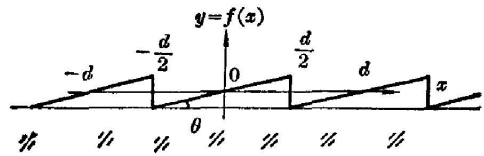


图1 平面衍射光栅的锯齿槽形  
 $d$ —光栅槽距； $\theta$ —闪耀角

具有闪耀特性的平面衍射光栅的线槽轮廓可用图1来近似表示，并用周期为  $d$  的函数  $f(x)$  来描写：

$$y = f(x) = \text{tg } \theta \cdot x \quad \left( -\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2} \right), \quad (1)$$

式(1)是奇函数，可展开为傅里叶正弦级数：

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin \frac{2n\pi x}{d}, \quad (2)$$

$$b_n = \frac{4}{d} \int_0^{\frac{d}{2}} \text{tg } \theta \cdot x \cdot \sin \frac{2n\pi x}{d} dx,$$

$$\therefore \int x \cdot \sin \frac{2n\pi x}{d} dx = -x \frac{d}{2n\pi} \cos \frac{2n\pi x}{d} + \frac{d^2}{4n^2\pi^2} \sin \frac{2n\pi x}{d},$$

$$\therefore b_n = -\frac{d \text{tg } \theta}{n\pi} \cos n\pi = (-1)^{n-1} \frac{d \text{tg } \theta}{n\pi}.$$

因此  $f(x)$  可写成：

$$f(x) = \frac{d \operatorname{tg} \theta}{\pi} \left[ \sin \frac{2\pi x}{d} - \frac{1}{2} \sin \frac{4\pi x}{d} + \frac{1}{3} \sin \frac{6\pi x}{d} - \frac{1}{4} \sin \frac{8\pi x}{d} + \dots \right]. \quad (3)$$

从式(3)可知,如果我们能取更多的级数项,那末合成的曲线越接近函数 $f(x)$ ,亦即合成精度越高。但是从制造角度来看,则希望取较少的项数来满足一定的合成精度的要求。为寻求最优的解,我们对此进行了计算,计算表明:取级数中的前三项,并适当修正振幅或位相因子,也可以同时修正振幅和位相因子,得到较好的锯齿形。根据计算,我们选用下式:

$$f(x) = \frac{d \operatorname{tg} \theta}{\pi} \left[ \sin \frac{2\pi x}{d} - 0.45 \sin \frac{4\pi x}{d} + 0.26 \sin \frac{6\pi x}{d} \right], \quad (4)$$

计算结果见表1。从表1可见,合成的光栅线槽轮廓十分接近理论的锯齿形,图2是根据表1数据绘制的图形。

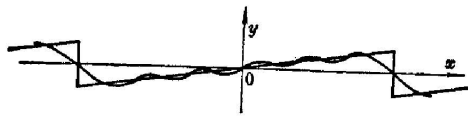


图2 合成的光栅线槽轮廓

表1 1200槽/毫米光栅的合成槽形与理论值的比较

(闪耀角 $\theta=8^{\circ}38'$ ;闪耀波长 $\lambda_B=2500$ 埃)

$x(d)$	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$y_{合成}$ (微米)	0	-0.051	-0.043	-0.021	-0.017	0	0.017	0.021	0.043	0.051	0
$y_{理论}$ (微米)	-0.063	-0.051	-0.038	-0.025	-0.013	0	0.013	0.025	0.038	0.051	0.063
$y_{合成-理}$ (微米)	0.063	0	-0.005	0.004	-0.004	0	0.004	-0.004	0.005	0	-0.063

为了实现上述的要求,提出图3所示的光学系统。如准直的激光束以某一角度射到平面反射镜 $M_4$ 上时,则在入射光和反射光的重迭区将形成干涉条纹,干涉条纹的波节面和波腹面是交替地平行于反射面的。随着入射角的改变形成不同空间频率的条纹。

为了用傅里叶合成法制取1200槽/毫米的闪耀全息光栅,根据(3)式要产生三组具有给定初始位相的正弦分布的干涉条纹,它们的空间频率分别为1200, 2400和3600槽/毫米。

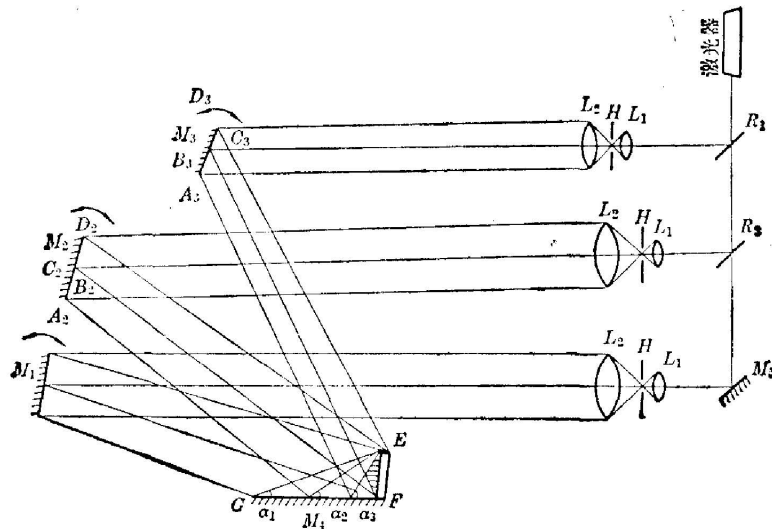


图3 制造闪耀全息光栅的光学系统

$L_1$ —显微物镜;  $L_2$ —准直物镜;  $H$ —空间滤波器;  $R_1, R_2$ —分光板;  $M_{1-5}$ —反射镜;  $EF$ —光栅白坯

为此,我们首先要控制三组光路相对于平面反射镜  $M_4$  的入射角  $i$ , 关于入射角  $i$  的计算如下:

$$\sin \alpha = \lambda / 2d, \quad (5)$$

式中  $\lambda$ ——激光波长,若用氩离子激光器  $\lambda = 4880$  埃;  $d$ ——光栅槽距,对于第一组 1200 槽/毫米的干涉条纹则有:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 17^\circ 1', \\ i_1 &= 90^\circ - \alpha_1 = 72^\circ 59'. \end{aligned}$$

对于第二组 2400 槽/毫米的干涉条纹则有  $\alpha_2 = 35^\circ 51'$  和  $i_2 = 54^\circ 9'$ 。对于第三组 3600 槽/毫米的干涉条纹则有  $\alpha_3 = 61^\circ 27'$  和  $i_3 = 28^\circ 33'$ 。

为了获得最佳的合成槽形,还要适当控制三组条纹的位相。因此,要考虑每一组光路在平面反射镜  $M_4$  (镀铝镜面) 上的反射相移  $\varphi$ 。当第一准直激光束经反射镜  $M_1$  反射后,以角  $i$  入射到空气和铝层交界的  $M_4$  上时,反射相移可用下式计算<sup>[5]</sup>。

$$\varphi_1 = \text{tg}^{-1} \left( \frac{2v_2 n_1 \cos i_1}{v_2^2 + v_1^2 - n_1^2 \cos^2 i} \right), \quad (6)$$

而

$$v_2^2 = \frac{1}{2} [n_2^2 - k_2^2 - n_1^2 \sin^2 i_1 + \sqrt{(n_2^2 - k_2^2 - n_1^2 \sin^2 i_1)^2 + 4n_2^2 k_2^2}], \quad (7)$$

$$v_1^2 = \frac{1}{2} [-(n_2^2 - k_2^2 - n_1^2 \sin^2 i_1) + \sqrt{(n_2^2 - k_2^2 - n_1^2 \sin^2 i_1)^2 + 4n_2^2 k_2^2}], \quad (8)$$

式中  $n_1$ ——空气折射率,  $n_2$  和  $k_2$  为垂直入射时铝的折射率和吸收系数。根据文献[6]的报导,当波长为 4880 埃时,铝的  $n_2 = 0.64$  和  $k_2 = 5.50$ , 这时铝层的反射率  $R = 92.2\%$ 。

由式(6)~(8),我们可以求出第一组干涉条纹的反射相移  $\varphi_1 = 5^\circ 56'$ , 同理求得第二组干涉条纹的  $\varphi_2 = 11^\circ 53'$ 。第二组干涉条纹相对于第一组干涉条纹的反射相移差值为:

$$\varphi_{2-1} = \varphi_2 - \varphi_1 = 5^\circ 27'.$$

从式(3)可见,第二组干涉条纹要有  $\pi$  的位相移动,所以第二组干涉条纹相对于第一组的总相移为  $\varphi_{2-1} = 180^\circ - 5^\circ 57' = 174^\circ 3'$ 。

为移动第二组干涉条纹的位相,建议把反射镜  $M_2$  用真空蒸镀铝层的方法做成阶梯式,  $A_2 B_2$  区的膜层要比  $C_2 D_2$  区的厚,其厚度差值(光束垂直入射时)为:

$$B_2 C_2 = \frac{\lambda \varphi_{2-1}}{4\pi} = 4880 \times \frac{174^\circ 3'}{720^\circ} = 1179 \text{ 埃}.$$

第三组干涉条纹的反射相移  $\varphi_3 = 17^\circ 51'$ , 它相对于第一组条纹的反射相移差  $\varphi_{3-1} = \varphi_3 - \varphi_1 = 11^\circ 55'$ 。如上所述,为了补偿  $11^\circ 55'$  的相移,同样要把  $M_3$  做成阶梯式,  $C_3 D_3$  区的膜层要比  $A_3 B_3$  区的厚,其厚度差值(光束垂直入射时)为:

$$B_3 C_3 = \frac{\lambda \varphi_{3-1}}{4\pi} = 4880 \times \frac{11^\circ 55'}{720^\circ} = 81 \text{ 埃}.$$

同时(或分别)照相记录满足式(3)所要求的三组干涉条纹(通过适当调整图3中分光板  $R_1$  和  $R_2$  的反射率来控制三组的曝光量),由于三组条纹的迭加实现干涉条纹的光强度成近似锯齿形分布,经显影处理和表面镀铝(或其它合适的反射材料)后,就可制成具有闪耀特性的全息光栅。

感谢陈祥熙、唐晋发和范世福等同志的帮助和指正。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] G. Schmahl; *J. Spectrosc. Soc. Japan*, 1975, **24** (Suppl.), No. 1, 3.
- [ 2 ] M. Bredne; *Opt. Acta* 1979. Vol. **26**, No. 11 (Nov), 1427.
- [ 3 ] N. K. Shenidon; *A. P. L.*, 1968, **12**, Na. 9 (May), 316.
- [ 4 ] 佐野一雄, 青柳克信, 難波進; 応用物理, 1979. **18** No. 6, 539.
- [ 5 ] Max Born, Emil Wolf; *«Principles of Optics»*, (Pergamon Press, 1975.)
- [ 6 ] Hass Georg; *«Physics of Thin Film»*, (Academic Press N. Y., 1964).

### A method for controlling of the groove shapes of blaze holographic gratings

ZHU SHAOJI

(Shanghai Optical Instrument Research Institute)

(Received 30 December 1980)

#### Abstract

A detailed program concerning the production of blaze holographic gratings by the help of Fourier synthetic method is suggested. A description of the synthetic groove shapes is given and the comparison with the theoretical value is conducted. The calculation of the phase-shift of light waves under reflection is also given. An experimental equipment which is simple in construction, convenient in adjustment and high precision in control is put forward.