

用傅里叶合成法获得具有锯齿槽形的 闪耀全息光栅

朱伟利

(苏州大学激光研究室)

提 要

本文描述了一种用简单的光路系统实现傅里叶合成而获得闪耀全息光栅的方法。用干涉计量法调整光路,提高了工艺精度。本实验制作的全息闪耀光栅具有较好的锯齿槽形,闪耀特性显著,+1级衍射效率超过了50%,比-1级效率提高约11倍。最后探讨了如何提高衍射效率,控制闪耀波长及增大刻划面积等问题。

一、引 言

近年来,全息光栅制作技术得到迅速发展,全息光栅具有制作简便,价格低廉,槽间距均匀,槽密度高,刻划面积大,能消除鬼线以及降低杂散光等优点,在某些应用领域里正在逐步取代刻划光栅。然而,用通常的双光束干涉法制作的光栅由于刻槽呈正弦形而极大地限制了衍射效率的提高和应用范围。因而,必须用全息工艺获得锯齿槽形,以得到能与刻划光栅相比的高效率。十多年来,国际上已有许多人提出各种用全息术获得锯齿槽形的方法,如空间滤波法^[1]、驻波法^[2]、傅里叶合成法^[3~5]等,各有其优缺点。本实验采用 Johansson 等提出的傅里叶合成法,简化了光路,探索了某些工艺规律,取得了初步进展。

二、实验原理与步骤

傅里叶合成法是将锯齿函数的傅里叶分量进行叠加,从而获得锯齿槽形的一种近似方法。若将顶角为 90° 的锯齿形函数进行傅里叶展开可得到

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

式中 ν_0 为基频, b_n 是傅里叶系数,它与函数周期 d 、锯齿面倾角 α 的关系由下式确定

$$b_n = \frac{d}{(n\pi)^2} [\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{ctg} \alpha] \sin(n\pi \sin^2 \alpha). \quad (2)$$

当取 $n=2$ 时得到

$$f(x) = b_1 \sin 2\pi\nu_0 x + b_2 \sin 2\pi 2\nu_0 x, \quad (3)$$

(3)式意味着将两套空间频率分别为 ν_0 和 $2\nu_0$ 的正弦形光强分布进行非相干叠加,可在光

致抗蚀剂上得到近似锯齿的槽形。很容易推算出这样制得的反射型位相光栅在垂直入射情况下 +1 级衍射的效率公式

$$\eta_{+1} = J_1^2(b_1) [J_0^2(b_2) + J_1^2(b_2) + 2J_0(b_2)J_1(b_2)\cos\beta], \quad (4)$$

其中 J_0 、 J_1 分别是零级和一级第一类贝塞尔函数, β 是由两套正弦形光强分布的相互位置而引入的初相差。经过一般的数学处理可知, 当 $b_1 \doteq 1.8$, $b_2 \doteq 0.8$, $\beta = 0$ 时, 可使 η_{+1} 达极大值, 这是本文所需要的(详见参考文献[4])。

实验光路如图 1 所示。其中 FL 为扩束及针孔滤波系统, M 为准直抛物面镜, M_1 、 M_2 、 M_3 是平面反射镜, 基片 G 置于可进行原位显影的特制基片架上, 与光束 2 垂直, P 为观察屏。光束 1、2 和光束 1、3 分别在 G 处形成空间频率分别为 ν_0 和 $2\nu_0$ 的正弦形光强分布, Q_1 和 Q_2 应满足下式

$$\left. \begin{aligned} \sin\theta_1 &= \nu_0\lambda, \\ 2\sin(\theta_2/2) &= 2\nu_0\lambda, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 λ 为曝光波长。由此可知, 只有当 $\theta_2 = 2\theta_1$ 精确成立时, 才能在实际上得到 ν_0 和 $2\nu_0$ 的准确关系。

光路的调节采用干涉计量方法。首先用光束 1, 2 摄下基频干涉花样, 原位显影后得到基频参考光栅, 然后用信频光束(1, 3)照射该光栅, 可在屏幕 P 上观察到因频率误差和方位误差而形成的干涉条纹。调节反射镜 M_3 , 改变光束 3 的方位, 使上述干涉条纹间距增大, 直到远大于基片尺寸, 这样可使前面提到的两种误差降到最低限度。调节光束 3 的相对光程, 使干涉场宽区处于基片位置。由全息原理^[3]容易证明此时恰好满足前面提到的 $\beta = 0$ 的条件。该光路一次调节成功后, 在正常情况下可连续摄制闪耀全息光栅, 提高了生产效率。

本实验选用“江师正型光刻胶”作为记录材料, 用旋涂法涂布在 K_9 玻璃基片上, 涂片台转速为 3000 rpm, 胶厚约 1μ , 适当进行预处理后, 将干板置于基片架上, 先后用基频和倍频光强分布对平板曝光。具体条件视闪耀波长的要求而定。显影后用去离子水冲洗, 干燥后于 120W 红外灯下烘焙坚膜, 随即送入真空镀膜机镀上铝膜。

本实验用南京电子管厂 360 型氩离子激光器 4765 \AA 单谱线作光源, 摄制了 600 lines/mm 和 175 lines/mm 两种槽密度的光栅, 刻划面积分别为 $15 \times 30 \text{ mm}^2$ 和 $28 \times 28 \text{ mm}^2$ 。

三、实验结果

对所制光栅的槽形和衍射效率分别进行了测试, 结果如下:

1. 槽形

用 6JA 型干涉显微镜对光栅槽形进行测试, 图 2 是摄制的闪耀全息光栅槽形的干涉显微照片, 槽密度分别为 (a) 600 lines/mm, (b) 175 lines/mm。由照片可见刻槽呈明显的锯齿形状。

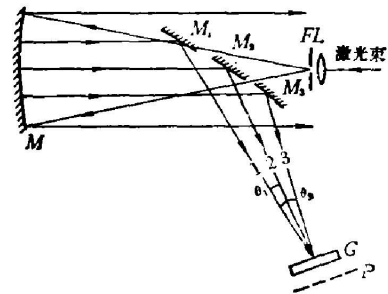


图 1 制作闪耀全息光栅的光路图
Fig. 1 Arrangement for producing blazed holographic grating

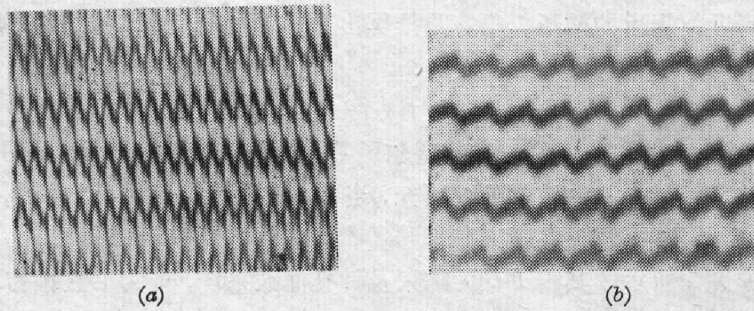


图 2 闪耀全息光栅槽形的干涉显微照片

Fig. 2 Interference micrographs of groove shape of blazed holographic grating

2. 衍射效率

为方便起见, 衍射效率的测试是在可见光范围内进行的, 利用平面光栅单色仪系统, 入

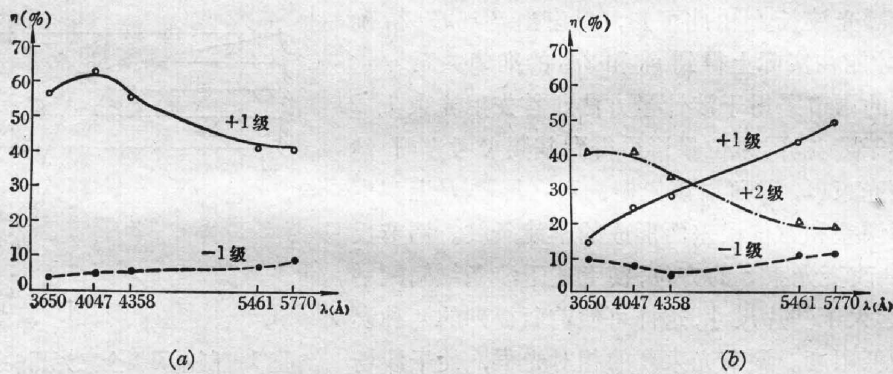


图 3 闪耀全息光栅的衍射效率曲线

Fig. 3 Efficiency as a function of wavelength for blazed holographic grating

(a) 175 lines/mm; (b) 600 lines/mm

射光和衍射夹角(称为偏离角)固定为 $31^{\circ}14'$ 。对样品 GP_1 和 BG_{16} 的测试结果示于图 3(a), (b)。前者闪耀峰在 4000 \AA 附近, 峰值效率达 63%, 后者闪耀峰可由 +2 级效率曲线峰值位置推算, 约在 8000 \AA 附近。

用同样的测试系统对样品 GP_1 的各级衍射效率(指相对效率)在 4047 \AA 处进行测试, 结果示于图 4。由比较可见, 衍射光能量集中于 +1 级, 其效率比 -1 级增长约 11 倍, 闪耀特性是明显的。

3. 闪耀角

由于闪耀全息光栅的闪耀角在制作时是未知的, 所以必须通过测试而定, 这在使用中是有意义的, 本实验通过测试效率曲线得到闪耀峰的位置, 由简单的几何关系及光栅方程可得到确定光栅闪耀角 α 的关系式:

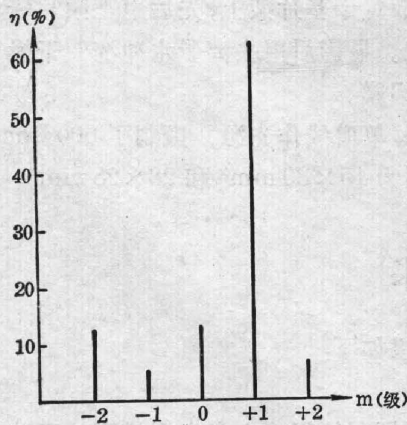


图 4 各级衍射效率分布

Fig. 4 Distribution of efficiencies of various diffracted orders

$$\sin \alpha = \frac{\nu_0 \lambda_D}{2 \cos(\theta_D/2)},$$

其中 θ_D 是测试系统的偏离角, λ_D 是在该偏离位置上测得的效率峰值位置(即闪耀波长), ν_0 为光栅槽密度。由图 3(a) 效率曲线计算得到样品 GP₁ 的闪耀角为 $2^\circ 5'$ 。

四、结论与讨论

1. 怎样控制闪耀波长

闪耀波长的控制问题是制作闪耀全息光栅的关键问题, 本实验对此作了一些探索。在光刻胶的线性范围内, 适当增加曝光量可增加蚀刻深度。图 5(a)、(b) 是样品 GA₄ 和 G₃₀ 的槽形干涉显微照片, 前者总曝光量为 564 mJ/cm^2 , 后者为 651 mJ/cm^2 , 用完全相同的显影条件, 得到的槽深明显不同, 用干涉显微镜测得其槽深图 5(a) 为 0.13μ , 图 5(b) 为 0.18μ 。在曝光量相同情况下, 增加显影液浓度和增长显影时间也能获得同样效果。槽深的增加, 导致闪耀峰向长波方向移动。图 6 中曲线(a)和(b)是对槽深分别为 0.33μ 和 0.27μ 两个样品所测得的效率曲线, 可以看到前者的闪耀峰在红外, 而后者在可见区闪耀。由此可见, 槽密度确定之后, 通过改变曝光和显影条件, 可以有效地控制闪耀全息光栅的闪耀波长。

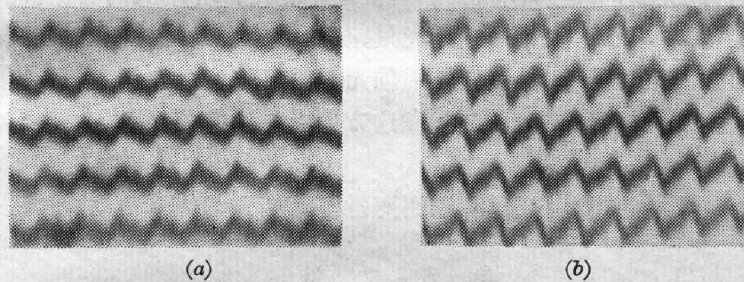


图 5 两个不同样品的槽形干涉显微图

Fig. 5 Interference micrographs of groove shape of the two different grating specimens

2. 影响衍射效率的因素

表面镀铝的反射型全息光栅, 其衍射效率通常受多种因素影响, 如系统中各元件缺陷引起波面畸变, 会破坏刻槽的均匀性; 光刻胶浓度配置不当, 或显影液浓度过浓, 显影时间过长都将影响光栅刻槽面的光洁度, 增加杂散光比例; 光栅表面所镀反射膜的性质、厚度、介质保护膜的性质及厚度如选择和控制在不当, 都是造成衍射效率下降的因素。然而, 对于用傅里叶合成法制作的闪耀全息光栅来说, 除上述因素外, 还有其特殊性, 如 b_1 , b_2 的最佳值条件以及 $\beta=0$ 的条件能否满足, 是影响衍射效率的直接因素。例如当 $\beta \approx \frac{\pi}{2}$ 时, 槽形锐变为对称形(如图 7 所示), 闪耀特性消失。

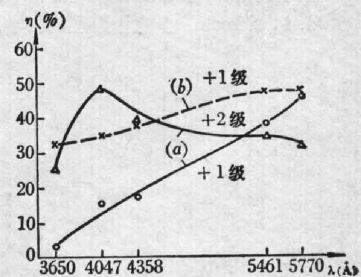


图 6 两个不同样品的效率曲线
Fig. 6 Efficiency curves of two different grating specimens

3. 影响光栅刻划面积的因素

增大光栅刻划面积,可以提高分辨率,同时也能开辟更广阔的应用领域,因而这是一个值得探讨的问题。

实验光路的调节是一个重要环节。准直光的准确精度,参考光栅的复位精度都直接关系到光栅的刻划面积。当调节误差较大时,光栅表面将记录到各种形状的莫尔花样,如图8所示,结果可在同一光栅面上得到形状截然不同的槽形,破坏了均匀一致的闪耀特性,限制了光栅的有效刻划面积。另外,光路中各元件的尺寸也在一定程度上限制了光栅的面积。

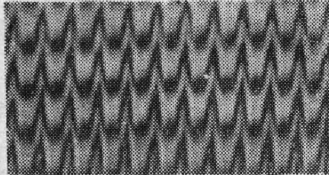


图7 $\beta \approx \pi/2$ 时得到的对称槽形干涉显微照片

Fig. 7 Interferogram of the symmetrical groove corresponding to $\beta \approx \pi/2$

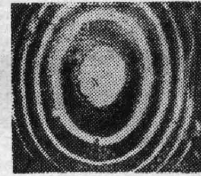


图8 光栅表面记录到的由准直误差引起的莫尔花样

Fig. 8 Moiré pattern recorded on the grating surface resulted from uncollimated beams

此外激光器的稳定性对实验影响很大。若模式不稳定,会增大两套相叠加干涉条纹的频率误差和方位误差,功率不稳定将影响曝光量,从而不能有效地控制闪耀波长。

本实验提出的方法比较简单,所制作的闪耀光栅具有较理想的锯齿槽形,但衍射效率的进一步提高主要取决于位相 β 的有效控制,在这方面上将作继续努力。

作者感谢凌德洪教授的指导和关怀,感谢陶世荃等同志的热情帮助。

参 考 文 献

- [1] Bryngdahl; *J. O. S. A.*, 1970, **60**, No. 1 (Jan), 140.
- [2] H. Nagata, M. Kishi; *Proc. ICO Conf., Opt. Methods in Sci. & Indus. Measure.*, Tokyo, 1974; *Japan J. A. P.*, 1975, **14** (Suppl. 14-1), 181.
- [3] G. Schmahl, D. Rudolph; *Progress in Optics*, Vol. 14, (Amsterdam, North Holland, 1976), 197.
- [4] S. Johansson, L.E. Nilsson *et al.*; *Marom Ed Application of Holography & Optical Data Processing* (Oxford Pergamon Press, 1977), 521.
- [5] M. Breidne, S. Johansson *et al.*; *Opt. Acta*, 1979, **26**, No. 11 (Nov), 1427.
- [6] H. M. Smith; *《全息学原理》*(科学出版社, 1973).

Production of blazed holographic grating with sawtooth groove profiles by means of Fourier synthesis technique

ZHU WENLI

(*Laser Research Section, Suzhou University*)

(Received 3 September 1981)

Abstract

In this paper an experimental method of producing blazed holographic grating by Fourier synthesis technique is described. We devised a simple and feasible optical arrangement and succeeded in making precise adjustment by means of interferometry. When Fourier components of a sawtooth groove were incoherently superposed with double exposure, desirable asymmetric groove profiles were obtained in Jiang shi positive photoresist made in China. The measured results show that the grating has a fine blazing character. At the blaze wavelength of the grating the diffraction efficiency of the +1 order is over 50%. The efficiency is about 11 times higher than that of the -1 order. An experimental method for measuring blaze angle of blazed holographic grating is proposed, and the following problems are discussed: (1) how to effectively control the blaze wavelength in an experimental way, (2) the factors affecting diffraction efficiency of blazed grating, (3) the effect of the stability of the laser and the adjustment of the optical arrangement on the experimental results. Finally, some suggestions are made on how to raise the diffraction efficiency and enlarge the ruling area of the grating in terms of experiment.