

文章编号: 0253-2239(2004)02-235-4

等腰闪耀光栅的相位补偿设计*

湛廷政¹ 吕海宝¹ 曹聚亮¹ 漆新民²

(¹ 国防科学技术大学机电工程研究所, 长沙 410073)
(² 南昌航空工业学院测控系, 南昌 330034)

摘要: 设计了一种新型同面相位补偿型等腰闪耀光栅。等腰设计保证了正负衍射级对称分布在光栅法线两侧; 通过优化设计同面相位补偿槽的大小, 可使衍射能量向中间级次转移, 只保留两个衍射极大值方向, 抑制 0 级和高衍射级能量分布, 避免能量的浪费, 而且降低了高衍射级次光线因刻线阻挡导致的散射噪声, 解决了加工对准与多次衍射的难题。通过理论建模和计算机仿真, 分析了与反面相位补偿等腰闪耀光栅的差异, 绘制了典型的衍射光强分布图。另外, 还探讨了这种新型等腰闪耀光栅的灰度掩模二元光学加工方法。

关键词: 物理光学; 光栅设计; 相位补偿; 模型; 仿真; 灰度掩模

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Phase-Compensation Design of Isosceles Blazed Grating

Shen Tingzheng¹ Lü Haibao¹ Cao Juliang¹ Qi Xinmin²

(¹ Institute of Mechatronics Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)
(² Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034)

(Received 23 September 2002; revised 15 November 2002)

Abstract: A new type of isosceles blazed grating with compensated phase on the obverse side (IBGCPOS) is designed. Isosceles design ensures the positive and negative diffractive orders distributing on the two sides of the grating normal symmetrically. By optimizing the size of the groove to observe phase compensation, the diffractive energy can be transferred to the middle orders. Two maximum diffractive directions are reserved. Energy distribution of zeroth order and higher orders diffraction is restrained, which can avoid energy wasting. Moreover, the problems of double-sided fabricating alignment and multiple-diffraction are solved. The theoretical model of diffraction intensity is founded and simulated by computer. The difference between IBGCPOS and the isosceles blazed grating with compensated phase on the inverse side (IBGCPIS) is analyzed. Typical distribution figures of diffraction intensity are given. In addition, the fabricating method with gray-scale mask for the new type grating is discussed.

Key words: physical optics; grating design; phase compensation; model; simulation; gray mask

1 引 言

闪耀光栅在位移精密测量中得到了广泛的应用。在一些特殊的测量系统中^[1], 需要利用闪耀光栅产生两束光强大致相等的衍射光。利用普通锯齿形闪耀光栅, 需采用斜入射, 选取适当的闪耀角, 才

能产生光强大致相等的 0 级和 +1 级衍射光束。光路偏轴布置, 调整困难, 而且由于制作工艺等原因, 两束主衍射光强度往往差别较大, 叠栅条纹的对比度低, 不利于条纹信号的接收和处理。针对这些问题, 文献[2]提出了反面相位补偿型等腰闪耀光栅 (Isosceles blazed grating with compensated phase on the inverse side, IBGCPIS), 见图 1。这种闪耀光栅的刻槽为等腰三角形, 底角为闪耀角, 两个腰所在平面为透射面。在其中一个侧腰的反面入射侧刻一

* 国家自然科学基金(50175107)资助课题。

E-mail: dfzt2001@163.com

收稿日期: 2002-09-23; 收到修改稿日期: 2002-11-15

矩形槽,作相位补偿。可采用单色平行光垂直入射,光路共轴布置,调整容易。而且0级衍射光强度为零,正负衍射级次对称分布在光栅法线的两侧,对称级次的光强比为1:1,有很高的衍射效率和较好的条纹对比度,可在多方面改善原光路的性能。但采用消0级衍射光的异面相位补偿矩形槽,同时也引入了新的问题:(i)反面相位补偿矩形槽本身也是一个相位光栅,入射光在通过矩形槽时,已经发生衍射,导致能量衰减和光路噪声;(ii)由于需要双面加工,要求矩形槽和等腰三角形的侧腰严格对准,用传统的机械刻划法或全息法很难实现,增加了加工难度;(iii)异面对准加工,不利于大规模复制。

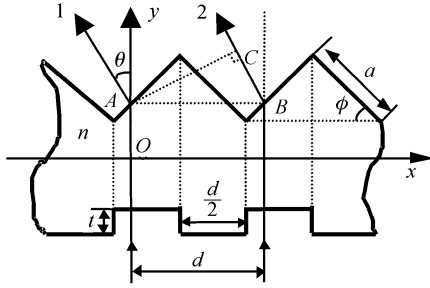


Fig. 1 Isosceles blazed grating with compensated phase on the inverse side

为此,本文对反面相位补偿型等腰闪耀光栅作进一步的改进,变反面相位补偿为同面相位补偿,设计出一种同面相位补偿型等腰闪耀光栅(Isosceles blazed grating with compensated phase on the obverse side, IBGCPOS),见图2。同面相位补偿型等腰闪耀光栅既保持了反面相位补偿型等腰闪耀光

栅的优点,又降低了加工难度,利用二元光学加工方法可实现大规模复制,大大增加了等腰闪耀光栅的实用性。

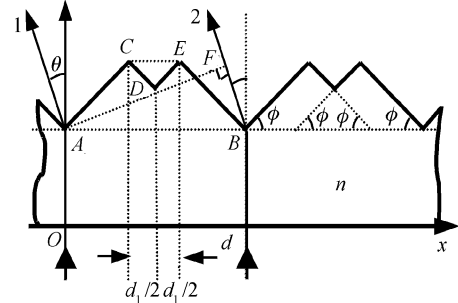


Fig. 2 Isosceles blazed grating with compensated phase on the same side

2 同面相位补偿型等腰闪耀光栅的设计原理

根据反面相位补偿型等腰闪耀光栅在侧腰增加相位补偿可有效抑制0级衍射光的原理,将新型等腰闪耀光栅外形设计成如图2所示。设光栅材料的折射率为 n ,单色入射光波长为 λ ,光栅栅距 AB 为 d ,等腰三角形的底角(即闪耀角)为 ϕ 。在每个等腰三角形刻线的正中开一个倒等腰三角形刻槽(CDE)用于相位补偿, CE 的长度为 d_1 ,底角同样为 ϕ 。利用波动光学可推导出该面形衍射光强的分布公式。在图2中,以光束1为基准,衍射角为 θ ,当入射光束2分别照射在 AC 、 CD 、 DE 、 EB 段时,光束1、2之间的光程差为

$$\Delta x = \begin{cases} (n - \cos \theta) x \tan \phi + x \sin \theta, & 0 < x < (d - d_1)/2 \\ (n - \cos \theta)(d - d_1 - x) \tan \phi + x \sin \theta, & (d - d_1)/2 < x < d/2 \\ (n - \cos \theta)(x - d_1) \tan \phi + x \sin \theta, & d/2 < x < (d + d_1)/2 \\ (n - \cos \theta)(d - x) \tan \phi + x \sin \theta, & (d + d_1)/2 < x < d \end{cases} \quad (1)$$

根据(1)式,利用复振幅积分法可推导出单色平行光垂直入射该光栅时衍射光强 I_θ 的分布公式:

$$I_\theta = C I_N I_d, \quad (2)$$

式中 C 为常量,

$$I_N = \sin^2 N w / \sin^2 w, \quad (3)$$

$$I_d = A_1^2 \left(\frac{\sin^2 p}{p^2} + \frac{\sin^2 t}{t^2} \right) + A_2^2 \left(\frac{\sin^2 s}{s^2} + \frac{\sin^2 q}{q^2} \right) + 2A_1 A_2 \left(\frac{\sin p \sin q}{pq} \right) \cos \omega_1 + 2A_1 A_2 \left(\frac{\sin p \sin s}{ps} \right) \cos \omega_2 + 2A_1^2 \left(\frac{\sin p \sin t}{pt} \right) \cos \omega_3 + 2A_2^2 \left(\frac{\sin q \sin s}{qs} \right) \cos \omega_4 + 2A_1 A_2 \left(\frac{\sin q \sin t}{qt} \right) \cos \omega_5 + 2A_1 A_2 \left(\frac{\sin s \sin t}{st} \right) \cos \omega_6, \quad (4)$$

其中 $A_1 = \frac{d - d_1}{2}$, $A_2 = \frac{d_1}{2}$, $u = \frac{\pi}{\lambda} (n - \cos \theta) \tan \phi$, $w = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$.

变量 p, q, s, t 分别为

$$p = \frac{d - d_1}{4} \left(2u + \frac{2w}{d} \right), \quad q = \frac{d_1}{4} \left(-2u + \frac{2w}{d} \right), \quad s = \frac{d_1}{4} \left(2u + \frac{2w}{d} \right), \quad t = \frac{d - d_1}{4} \left(-2u + \frac{2w}{d} \right),$$

变量 $\omega_1 \sim \omega_6$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= p - 2ud + 2ud_1 - \frac{2d}{d_1}q + q, & \omega_2 &= p + 2ud_1 - \frac{2d}{d_1}s - s, \\ \omega_3 &= 2ud + \frac{4d}{d-d_1}t - t - p, & \omega_4 &= 2ud + \frac{2d}{d_1}q - q - \frac{2d}{d_1}s - s, \\ \omega_5 &= -2ud_1 + \frac{2d}{d_1}q - q - \frac{4d}{d-d_1}t + t, & \omega_6 &= -2ud - 2ud_1 + \frac{2d}{d_1}s + s - \frac{4d}{d-d_1}t + t. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由(1)式~(6)式可以看出, C 与光强的相对分布无关; I_N 项为多缝干涉因子, 仅与光斑照射的刻线数 N 以及栅距 d 有关, 与闪耀角 ϕ 无关, 它决定了光栅衍射强度极大值的位置。 I_d 为单缝衍射因子, 大小取决于光栅刻槽的形状, 与闪耀角 ϕ 、栅距 d 以及补偿刻槽宽 d_1 有关, 它决定了光栅衍射强度的分布形状。对(3)式求一阶导数, 可以得到同相位补偿型等腰闪耀光栅在单色平行光垂直入射时的光栅方程:

$$d \sin \theta_m = m\lambda, \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (6)$$

式中 m 为衍射级次, 表示入射平面波波长; θ_m 为第 m 级衍射光束的衍射角。

3 仿真优化计算

采用计算机对(2)式~(4)式进行仿真分析。仿真时取 $\lambda=632.8 \text{ nm}$, $n=1.584$ 。图 3(a)为仿真得

到的 600 gr/mm 同相位补偿型等腰闪耀光栅的衍射光强分布图。为便于比较, 图 3(b)同时给出了反相位补偿型等腰闪耀光栅衍射光强分布。图中, 横轴为衍射角 θ , 范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$; 纵轴为相对衍射光强 I_d 和 I_o ; ϕ 为闪耀角, $d_1 = d/16$ 。通过仿真结果比较可以发现:

1) 同相位补偿型等腰闪耀光栅和反相位补偿型等腰闪耀光栅一样, 可以产生对称衍射级等光强分布, 有两个衍射极大值方向, 且对称分布在光栅法线两侧;

2) 同相位补偿型等腰闪耀光栅虽然不能完全抑制 0 级衍射光, 但可以将 0 级衍射光抑制在很低的水平, 使绝大部份光能分布在 ± 1 级或更高级次的衍射光束之中, 满足测量的需要。因此, 具有很高的衍射光强利用率。而反相位补偿型等腰闪耀光栅完全消除 0 级衍射光是建立在背面刻槽的深度满足条件 $(n-1)t = \lambda/2$ 以及双面加工对准的基础上。目

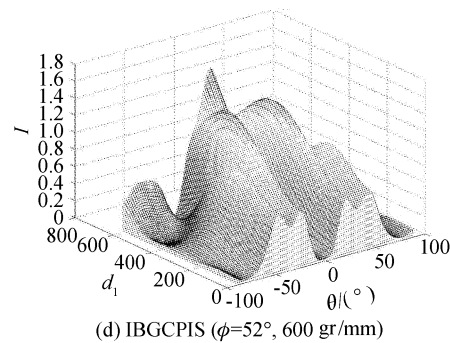
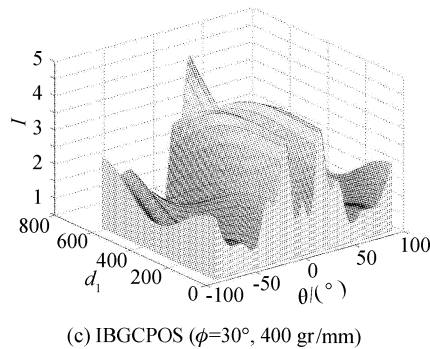
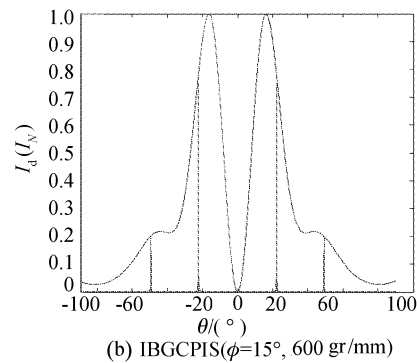
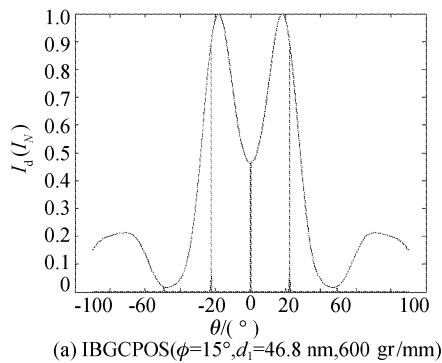


Fig. 3 Simulation results. (a) IBGCPOS ($\phi=15^\circ, d_1=46.8 \text{ nm}, 600 \text{ gr/mm}$), (b) IBGCPIIS ($\phi=15^\circ, 600 \text{ gr/mm}$), (c) IBGCPOS ($\phi=30^\circ, 400 \text{ gr/mm}$), (d) IBGCPIIS ($\phi=52^\circ, 600 \text{ gr/mm}$)

前的加工水平无法满足这种要求,因此刻槽深度的误差和对准误差同样会保留部分 0 级衍射光;

3) 图 3(c)为改变同面相位补偿刻槽宽度时得到的三维仿真图,可以看出,通过仿真优化设计,适当的补偿刻槽可使同面相位补偿型等腰闪耀光栅衍射能量向中间级次转移,抑制了 0 级和高级次衍射光线,避免衍射能量的浪费,降低了高衍射级次光线因刻线阻挡导致的散射噪声;

4) 图 3(d)可以看出,对于 600 gr/mm 等腰闪耀光栅,闪耀角为 52° 时,不加补偿槽,0 级衍射光强的能量也可降至零,衍射光强主要分布在 ± 1 、 ± 2 级。但由于 ± 1 、 ± 2 级衍射光能量分布比较接近,造成衍射级之间的能量分散。同时, ± 2 级衍射光线的角度较大,约为 50° ,刻线之间相互遮挡会造成光散射和多次衍射。因此 ± 2 级衍射光实际的衍射强度会明显偏小,并产生背景噪声;

5) 当等腰闪耀光栅的线数高于 600 gr/mm 以上时,光栅周期常量与入射光波长相近,此种标量方法分析的同面相位补偿效果会下降,必须改用矢量分析法重新建模计算。

同面相位补偿型等腰闪耀光栅对 0 级衍射光抑制程度与补偿刻槽的宽度 d_1 有关,当采用二元光学加工方法,用台阶近似连续斜坡时,为便于相位补偿刻槽的加工, d_1 应选为栅距 d 的 2^n (n 为正整数)分之一。可以说,同面相位补偿型等腰闪耀光栅通过牺牲很小一部分能量,换取加工上的便利,大大增加了自身的实用性和可复制性。

4 同面相位补偿型等腰闪耀光栅的灰度掩模加工方法

与普通闪耀光栅相比,等腰闪耀光栅的制作要相对复杂一些。尤其是反面相位补偿型等腰闪耀光栅需要双面加工,用传统的机械刻划法、全息法以及二元光学^[3]掩模法都很难实现。但对于同面相位补偿型等腰闪耀光栅来说,由于采用同面相位补偿,大大降低了刻线对准加工的难度。一般情况下,闪耀光栅的线数都比较高,同面相位补偿型等腰闪耀光栅的相位补偿刻槽尺寸很小,因此,适合采用二元光学元件的加工方法。

采用二元光学激光直写或电子束直写直接加工时,单刻线复杂面形的制作很容易实现。缺点是,刻线深度难以精确控制且设备昂贵^[4]。目前,研究最多也是最有前途的二元光学加工方法是变灰度掩模

板法。常用的制作掩模板的方法^[5]有:(i)在掩模板光刻胶上用激光直接写入法^[6];(ii)用电子束曝光进行微光刻方法。用电子束进行微光刻虽能得到较好的曝光效率,但在制作具有多层结构的衍射光学元件时需要套准。激光直写灰度掩模的主要特点是:分辨率高、掩模尺寸大,而且可加工连续面形,光刻时不必在真空中^[4,5]。控制激光束在高能束敏感玻璃(High energy beam sensitive glass, HEBSG)上等腰闪耀光栅两条对称透射边对应位置的曝光强度,改变掩模灰度分布,控制加工基板上厚度均匀的光刻胶的曝光深度,从而改变基板的刻蚀深度和刻蚀形状,实现一次加工成型,避免了双面加工对准的难题,简化了生产过程,提高了等腰闪耀光栅实用性。

结束语 同面相位补偿型等腰闪耀光栅,利用倒等腰三角形补偿槽,实现了大幅度抑制 0 级衍射光强、对称衍射级等光强的目的,可以在多方面改善双光栅高分辨率位移测量光路的性能。倒等腰三角形的两条边分别与正等腰三角形的两条边平行,避免了对高衍射级次的影响。同面相位补偿继承了反面相位补偿的优点,同时降低了加工难度,便于大规模复制。利用二元光学变灰度掩模加工方法,可实现一次光刻成形,解决了多次套刻易引入对准误差的难题。

参 考 文 献

- 1 Post D. Moire fringe multiplication with a nonsymmetrical doubly blazed reference grating. *Appl. Opt.*, 1971, **10** (4):901~907
- 2 Lu Haibao, Ye Xiangbing, Cao Juliang *et al.* Research for isoscesles blazed grating and its application in double gratings precise displacement measurement. *ISTM*, 1999, 79~83
- 3 Zhang Liang, Shi Yunfei. Computer generated holography wavefront-transforming element fabrication by binary optical technique. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(9):1150~1152 (in Chinese)
- 4 Zhang Jinghe, Liao Jianghong, Liu Wei *et al.* Research of laser-direct-writing device for BOE. *Chin. J. Scientific Instrument* (仪器仪表学报), 2001, **22**(2):154~157 (in Chinese)
- 5 Shen Yibing, Yang Guoguang, Hou Xiyun *et al.* Research on phenomenon of the super-resolution in laser lithography. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19** (11):1512~1517 (in Chinese)
- 6 Du Chunlei, Xu Ping. Microlens array fabrication by using laser direct lithography system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(8):1194~1196 (in Chinese)