

文章编号: 1004-4213(2011)06-0843-4

I 型全息凹面光栅制作误差对光谱像的影响分析

孔鹏^{1,2}, 巴音贺希格¹, 李文昊¹, 唐玉国¹, 崔锦江³

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 苏州 215163)

摘 要:通过对 I 型全息凹面光栅制作参量误差对光谱像的影响进行数值计算发现: 1) 两记录臂长的相对误差而不是绝对误差决定光谱像的展宽程度, 即使绝对误差较大, 只要两记录臂长的误差值相同, 像宽也没有明显改变; 2) 由于 I 型光栅的记录臂一般较长, 记录角度误差对像宽的影响不大, 但会影响光栅的刻线密度, 导致光谱成像位置的偏移; 3) 曲率半径误差对像宽的影响较大. 通过数值模拟明确了 I 型全息凹面光栅制作的误差容许范围, 找到了对光谱像宽度影响较大的误差来源, 从而为此类光栅的制作提供理论指导, 有助于制作出高质量光栅, 降低罗兰圆光谱仪的调节难度.

关键词:光谱仪; 衍射光栅; 全息; 罗兰圆; 光栅制作

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114006.0843

0 引言

凹面光栅的概念由罗兰于 19 世纪末提出, 它同时具有色散和聚焦功能. 它在高分辨光谱分析、光通信等诸多领域有着广泛的应用^[1-3]. 在全息光栅出现以前, 罗兰圆结构中使用的是机械刻划凹面光栅. 二十世纪六十年代以后出现了利用激光干涉方法制作的全息光栅^[4,7], 它除了具有与刻划光栅相同的成像特性外, 还具有无鬼线、低杂散光、制作面积及刻线密度可选择性强等诸多优点. 利用离子束刻蚀技术能够将全息光栅的槽形转化为三角形, 从而获得很高的衍射效率^[8-10]. 因此, 在许多应用领域机械刻划凹面光栅已经被全息凹面光栅所取代. 罗兰圆结构的成像原理可由凹面光栅的几何理论^[11-12]进行阐释, 此前的许多研究者利用此理论对罗兰圆结构的像差特性和像差校正进行了细致的研究^[13-17], 给出了确定光栅制作结构的方法. 但是, 鲜有文献讨论制作误差对全息光栅成像性能的影响及其规律.

目前在科研、生产中使用较多的一种光栅是 I 型全息凹面光栅, 其制作光路有两种: 第一种是将两记录点光源对称于光栅表面法线放置于无穷远处, 即利用准直光学系统将点光源发出的球面波转化为

平面波. 由于这种光路中光学元件比较多, 因此光路调节较为复杂, 同时曝光系统中的光学缺陷较大, 直接影响到所制作光栅的技术指标; 第二种是将两个记录点光源对称于光栅表面法线放置于罗兰圆上, 这种光路光学元件较少, 制作出的光栅缺陷较少, 光路调节也较为简便, 实际制作中较多使用. 本文就第二种制作光路中存在的制作误差对光栅成像性能的影响进行分析讨论.

在曝光光路调整过程中, 两相干光源点的位置无法严格放置在理想位置, 必然会存在与理想位置的偏差, 即必然存在制作结构参量误差. 另外, 在凹面基底上涂覆光刻胶采用的是离心式旋涂的方式, 涂胶后得到的胶层为中心薄边缘厚^[18], 加之基底加工、镀膜、复制等环节带来的误差, 最终制得光栅的曲率半径将会偏离理论设计值, 即光栅曲率半径也必然存在误差. 而制作误差的存在必然会影响到光栅的成像性能^[19]. 鉴于此, 本文对制作误差(包括记录臂长误差、记录角度误差以及曲率半径误差)对 I 型全息凹面光栅成像性能的影响进行分析. 运用数值模拟的方法, 分别计算记录臂长、记录角度、曲率半径存在误差时的光谱像宽度, 并分析光谱像宽度在不同误差值下的变化规律, 从而找到对 I 型全息凹

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60478034)、“十一五”国家科技支撑计划重大项目(No. 2006BAK03A02)和吉林省科技发展计划项目(No. 20070523, No. 20086013)资助

第一作者: 孔鹏(1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为全息凹面光栅设计及制作技术. Email: kongdapeng@yahoo.com.cn

通讯作者: 巴音贺希格(1962-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光栅理论、光栅制作技术和光谱技术研究. E-mail: bayin888@sina.com

导师: 唐玉国(1967-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光谱技术和光谱仪器研究. Email: tangyg@yiliaoyiqi.com

收稿日期: 2010-11-17; 修回日期: 2011-01-26

面光栅成像影响最大的误差因素,为光栅的设计制作提供理论指导。

1 罗兰圆结构的像差特性

图1所示为罗兰圆结构的制作光路与使用光路示意图,以光栅表面中心点 O 为原点建立直角坐标系, x 轴为光栅表面法线, $x-y$ 平面为子午面即色散平面, z 轴沿光栅刻线方向。记录光源点 C 、 D 均在子午面内,光源即入缝的中心点 A 位于罗兰圆上,由 A 点发出的波长为 λ 的光线经光栅衍射后第 m 级衍射光汇聚于罗兰圆上一点 B , B 即是物点 A 的像点。以 A 、 B 、 C 、 D 为汇聚点的光束的中心主光线 OA 、 OB 、 OC 、 OD 与 x 轴夹角分别为 α 、 β 、 γ 、 δ ,各角

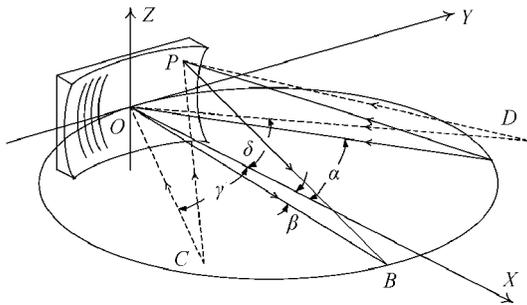


图1 罗兰圆结构制作光路与使用光路

Fig.1 Schematic diagram of the Rowland circle mount

度的符号以 x 轴为基准,逆时针方向旋转所成的角度符号为正,顺时针方向旋转所成的角度符号为负,则 A 、 B 、 C 、 D 四点的极坐标分别表示为 $(R\alpha, \alpha)$ 、 $(R\beta, \beta)$ 、 $(R\gamma, \gamma)$ 、 $(R\delta, \delta)$ 。 $P(x, y, z)$ 是光栅上任一点,光线 APB 的光程函数 F 可表示为^[11]

$$F(y, z) = F_{00} + F_{10} + \frac{1}{2}y^2 F_{20} + \frac{1}{2}z^2 F_{02} + \frac{1}{2}y^3 F_{30} + \frac{1}{2}yz^2 F_{12} + \quad (1)$$

式中 F_{20} 及其以后的各项系数 F_{ij} 为光栅的像差系数,其中 F_{20} 代表离焦, F_{02} 代表像散, F_{30} 代表子午彗差, F_{12} 代表弧矢彗差,每一个像差系数都可以写为

$$F_{ij} = M_{ij} + \left(\frac{m}{\lambda} \right) H_{ij} \quad (2)$$

式中 M_{ij} 与光栅的使用结构参量即 A 、 B 的坐标有关, H_{ij} 与全息光栅的制作结构参量即 C 、 D 的坐标有关, λ 为记录波长。

在全息凹面光栅的像差中,越高阶的像差对光栅成像的影响越小,决定光栅色散方向聚焦性能的像差主要是离焦和子午彗差。在罗兰圆结构中,物点 A 与像点 B 均位于罗兰圆上,即罗兰光栅的使用结构参量可以表示为

$$R\alpha = R\cos\beta, R\beta = R\cos\alpha \quad (3)$$

式中 R 为光栅表面曲率半径,也是罗兰圆的直径。由凹面光栅几何理论可知,对所有波长来说由使用

结构引入的离焦和子午彗差均为零,即 $M_{20} = M_{30} = 0$ 。在利用全息方法制作I型全息凹面光栅时,记录点的位置参量应满足约束条件 $H_{20} = H_{30} = 0$ 。有两种制作结构可以满足此条件:1) $\alpha = -\beta, R_c = R_d = R$; 2) $\alpha = -\beta, R_c = R\cos\gamma, R_d = R\cos\delta$ 。本文就是对第二种情况下存在的制作误差进行数值计算与分析,通过一个具体的I型全息凹面光栅的设计制作实例对记录臂长、记录角度、曲率半径等误差对光栅成像的影响进行讨论。

2 数值模拟结果与讨论

2.1 设计实例

光栅的使用波段为150~500 nm,刻线密度为2400 grooves/mm,曲率半径 $R = 750$ mm,光栅面积为 50×50 mm²,入射角 $\alpha = +40^\circ$,光谱级次 $m = +1$,记录波长 $\lambda = 441.6$ nm,四个记录参量分别为: $R_c = 636.036$ mm, $\alpha_c = -32^\circ$, $R_d = 636.036$ mm, $\alpha_d = +32^\circ$ 。入缝宽度为10 μ m,高度为400 μ m。

由于I型全息凹面光栅的离焦和子午彗差为零,其残余像差主要是较大的像散和弧矢彗差,所以入缝经光栅衍射所成的像斑是一条窄而细长的月牙形谱线。利用出缝的拦光作用可以屏蔽掉谱线上下两侧弯曲部分的光线,而只允许谱线中心部分的光线通过出缝进入接收器,因此决定光栅光谱分辨率的只是谱线中心部分的宽度,即为本文数值计算结果中给出的光谱像宽度均为谱线的中心宽度。为了使讨论具有实际意义,必须根据实际情况设定各个参量的误差范围。在调整光路时将记录光源点位置调整至以设计位置为圆心、半径为2 mm的空间区域内是能够做到的,因此将记录臂长误差的最大值设定为2 mm。当记录光源点沿垂直于记录臂长方向横向偏移2 mm时记录角度误差有最大值,其值为 $2/636.036 = 0.003$,因此将记录角度误差的最大值设定为0.003 rad。

2.2 记录臂长误差对光谱像的影响

运用几何光线追迹方法能够计算入缝发出的光线经光栅衍射后在像面上的分布,从而能够计算出光谱像的中心宽度。在讨论记录臂长误差对光谱像的影响时,保持其它所有参量值不变,只改变记录臂长的取值,进而计算出在不同的记录臂长误差下各个波长处的光谱像宽度,以波长为横坐标,像宽为纵坐标,绘出像宽曲线。

图2中共给出了7条曲线,包括记录臂长无误差、只有一个臂长有误差、和两个臂长都有误差时的像宽曲线。从图中可以看出,当只有一个臂长有误差时,随着误差的增加,谱线展宽较为严重,所以像宽

对记录臂长的误差较为敏感. 当两个臂长均存在误差时, 两记录臂长度的差值越大, 谱线的展宽就越严重. 也就是说, 决定像宽变化的是两记录臂长之间的相对误差, 而非每个记录臂长的绝对误差值. 如图所示, 当两个记录臂长均产生 + 2 mm 或 - 2 mm 的误差时, 虽然单个误差值都是最大值, 但其相对误差值为零, 谱线宽度几乎没有变化. 因此可以得出结论: 当两记录臂长之间的相对误差越大时谱线的展宽越严重. 因此在光栅制作过程中, 虽然记录臂长的绝对误差无法消除, 但仍然可以通过减小两记录臂长的相对误差以达到消除谱线展宽的目的.

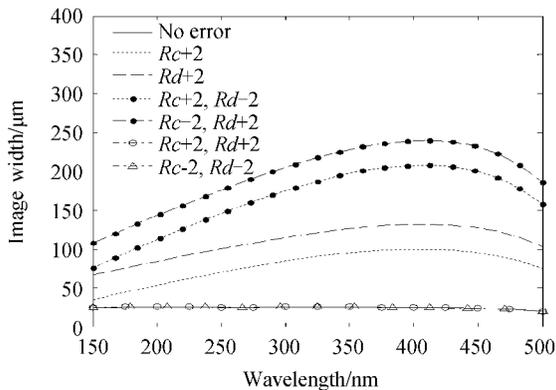


图 2 不同记录臂长误差下的像宽曲线
Fig. 2 Image widths versus wavelength for different recording distance errors

2.3 记录角度误差对光谱像的影响

在讨论记录角度误差对光谱像的影响时, 同样是保持其它所有参量值不变, 只改变记录角度的取值. 图 3 中给出了 5 条曲线, 包括记录角度无误差、两记录角度有相同符号误差值以及相反符号误差值的情况. 从图中可以看出, 在本文讨论的误差范围内, 记录角度误差对谱线宽度的影响不大. 需要特别指出的是, 对于 增大 减小、减小 增大这两种情况, 当两束干涉光之间的夹角发生了变化但依然对称于光栅法线时, 光谱像宽度几乎没有变化. 但这种误差会导致光栅刻线密度的变化, 以 + 0.003、- 0.003 这种情况为例, 此时光栅的刻线密度变为 2388.5 grooves/mm, 在此情况下 190 nm 光的成像位置将产生约 1.63 mm 的偏移. 因此, 在调整制作光路时两束记录光的夹角需要精确调整, 以确保获得要求的刻线密度. 对于 增大 增大、减小 减小这两种情况, 此时两束记录光的夹角不变, 相当于基底在子午面内产生一定角度的旋转. 从图中可以看出这种情况下光谱像宽度产生了少量的变化, 虽然在本文讨论的误差范围内可以忽略, 但也应具体问题具体分析, 必要时应加以考虑.

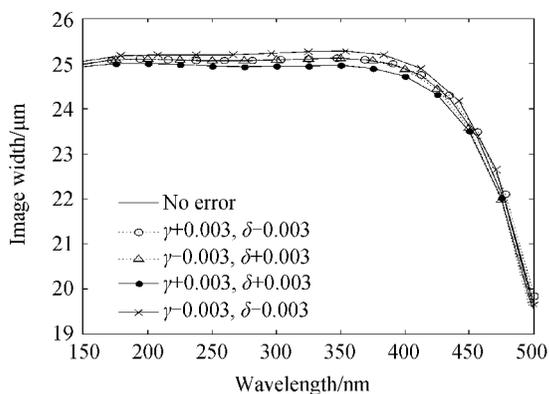


图 3 不同记录角度误差下的像宽曲线
Fig. 3 Image widths versus wavelength for different recording angle errors

2.4 曲率半径误差对光谱像的影响

图 4 为不同曲率半径误差下像宽曲线的变化趋势. 从图中可以看出, 光谱像宽度的变化随曲率半径误差的变化较为明显. 当曲率半径误差为正时, 误差值越大谱线展宽就越严重. 当曲率半径误差为负时, 光谱像宽度变化趋势表现为先减小后增加, 且当曲率半径误差为 - 0.3 mm 时谱线宽度回复到无误差时的大小. 因此, 对于本文讨论的例子, 曲率半径误差的允许范围可以定为 [- 0.3, 0]. 曲率半径误差造成的直接后果就是光谱像的离焦, 即子午光线的聚焦位置偏离罗兰圆, 进而导致通过出缝到达探测器的光能量减少, 严重时将导致探测不到光谱信号. 因此在制作 I 型全息凹面光栅时必须对曲率半径误差进行严格控制.

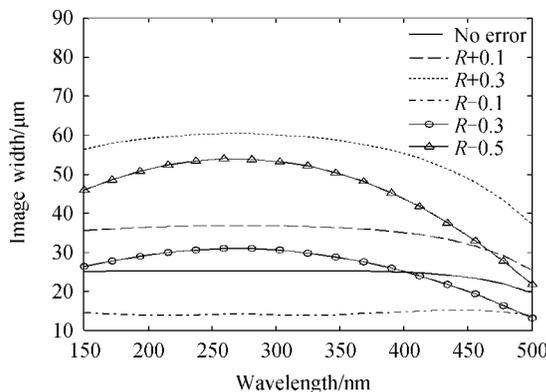


图 4 不同曲率半径误差下的像宽曲线
Fig. 4 Image widths versus wavelength for different curvature radius errors

3 结论

本文利用数值计算的方法讨论了制作误差对 I 型全息凹面光栅成像质量的影响. 计算并分析了不同记录臂长误差、记录角度误差以及曲率半径误差下光谱像宽度的变化规律并得出以下结论: 1) 两个

记录臂长的相对误差而非绝对误差决定了谱线的展宽程度; 2) 由于 I 型光栅的记录臂长一般都很大, 所以制作中产生的记录角度误差值较小, 因此对谱线宽度影响不大, 但会影响光栅的刻线密度, 导致光谱成像位置的偏移; 3) 曲率半径误差对光谱像宽度影响较大, 应予以严格控制. 通过本文的分析找到了对 I 型全息凹面光栅成像质量有较大影响的误差因素, 给出了各种制作误差的容许范围. 同时, 能够为此类光栅的制作提供理论指导, 有助于制作出高质量光栅, 从而降低罗兰圆光谱仪的调节难度.

参考文献

- [1] CHURIN E G, BAYVEL P, STAVDAS A, *et al.* Optimization of Rowland circle mounts for grating demultiplexers and narrow-band spectrographs[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(14): 1084-1086.
- [2] BROUCKAERT J, BOGAERTS W, DUMON P, *et al.* Planar concave grating demultiplexer fabricated on a nanophotonic silicon-on-insulator platform [J]. *J Lightw Technol*, 2007, **25**(5): 1053-1060.
- [3] KIM T H, KONG H J, KIM T H, *et al.* Design and fabrication of a 900 ~ 1700 nm hyper-spectral imaging spectrometer[J]. *Opt Comm*, 2010, **283**(3): 355-361.
- [4] LABEYRIE A, FLAMAND J. Spectrographic performance of holographically made diffraction gratings [J]. *Opt Comm*, 1969, **1**(1): 5-8.
- [5] ZHAO Jiu-song, LI Li-feng, WU Zhen-hua. In-situ self-monitoring of latent image in fabrication of holographic gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 851-858.
赵劲松, 李立峰, 吴振华. 全息光栅制作中的实时潜像自监测技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 851-858.
- [6] KONG Peng, BAYANHESHIG, LI Wen-hao, *et al.* Modeling and in-situ monitoring of the asymmetric exposure and development of holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 65-69.
孔鹏, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 全息光栅非对称曝光显影的理论模拟及实时监测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 65-69.
- [7] YUAN Yi, WANG Ke-yi, HUANG Jin-tang, *et al.* Phase grating fabricated by polarization laser direct-writing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1520-1524.

- 袁毅, 王克逸, 黄金堂, 等. 偏振光直写相位光栅的实验分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1520-1524.
- [8] JOHNSON L F. Evolution of grating profiles under ion-beam erosion[J]. *Appl Opt*, 1979, **18**(15): 2559-2574.
 - [9] ZNAMENSKII M Yu, SATTAROV F A. Ion etching of holographic diffraction gratings on layers of chalcogenide glasses[J]. *J Opt Technol*, 2007, **74**(6): 412-414.
 - [10] SUN Mei, XING Su-xia, CHEN Yuan-yuan, *et al.* Enhanced transmission through periodic H-shaped arrays[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(9): 1602-1605.
孙梅, 邢素霞, 陈媛媛, 等. 周期排列的 H-空气槽光学特性研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(9): 1602-1605.
 - [11] NODA H, NAMIOKA T, SEYA M. Geometric theory of the grating[J]. *J Opt Soc Am*, 1974, **64**(8): 1031-1036.
 - [12] PALMER C. Second-order imaging properties of circular field spectrographs[J]. *Appl Opt*, 1990, **29**(10): 1451-1454.
 - [13] BROWN B J, WILSON I J. Holographic grating aberration correction for a Rowland circle mount [J]. *Opt Acta*, 1981, **28**(12): 1587-1599.
 - [14] BROWN B J, WILSON I J. Holographic grating aberration correction for a Rowland circle mount [J]. *Opt Acta*, 1981, **28**(12): 1601-1610.
 - [15] BAZHANOV Yu V. Determination of optimal parameters of concave diffraction gratings in devices with a Rowland circle [J]. *Opt Spectrosc(USSR)*, 1983, **55**(6): 639-642.
 - [16] GRANGE R. Aberration-reduced holographic spherical gratings for Rowland circle spectrographs [J]. *Appl Opt*, 1992, **31**(19): 3744-3749.
 - [17] GRANGE R. Holographic spherical gratings: a new family of quasi-stigmatic designs for the Rowland circle mounting[J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(25): 4875-4880.
 - [18] BAYANHESHIG, ZHANG Hao-tai, LI Wen-hao. Mathematic model and experiment verification of spin-coating on concave spherical substrate [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(2): 229-234.
巴音贺希格, 张浩泰, 李文昊. 凹球面基底离心式涂胶的数学模型及实验验证[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(2): 229-234.
 - [19] MENG Fan-tao, CHU Jiu-kui, HAN Zhi-tao, *et al.* Effect of profile error on performance of sub-wavelength wire-wire polarizer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 951-955.
孟凡涛, 褚金奎, 韩志涛, 等. 面形误差对亚波长金属光栅偏振器性能的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 951-955.

Effect of Recording Parameters Error on Imaging Performance of Type I Holographic Concave Gratings

KONG Peng^{1,2}, Bayanheshig¹, LI Wen-hao¹, TANG Yü-guo¹, CUI Jiu-jiang³

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)

Abstract: The imaging performance of type I holographic concave gratings would be seriously deteriorated by the recording parameters error during fabrication of the gratings. A numerical simulation was made for analyzing the effect of recording parameters error on imaging performance of the grating. The following conclusions can be obtained from the simulation results. Firstly, the larger the difference between errors of the two recording distances, the worse the imaging performance becomes. Secondly, the recording angle error remains very small because the recording distances for type I gratings are usually very long. The image widths would not change significantly. But the locations of the images would change because the grating constant is different from the desired value. Finally, it is very important to make the curvature radius as close to the namely value as possible, because the radius error would greatly deteriorated the focusing abilities of the gratings. This study can give theoretical guidance to the fabrication for type I holographic concave gratings and reduce the alignment difficulty for the Rowland circle spectrographs.

Key words: Spectrograph; Diffraction grating; Holography; Rowland circle; Grating fabrication