

# 曲率半径误差对平场全息凹面光栅分辨率的影响及其补偿方法

孔 鹏<sup>1,2</sup>, 巴音贺希格<sup>1\*</sup>, 李文昊<sup>1</sup>, 唐玉国<sup>1</sup>, 崔锦江<sup>3</sup>

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 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, 江苏 苏州 215163

**摘 要** 在平场凹面全息光栅的设计制作中, 不可避免的存在曲率半径误差, 严重影响光栅光谱仪的分辨率。为了从理论上分析并指导光谱仪器的设计和装调, 运用几何光线追迹方法计算并分析了不同曲率半径误差下光谱像宽度的变化规律, 发现在一个较大的误差范围内子午焦线的位置随着曲率半径的变化前后平移, 同时其弯曲程度几乎没有改变。数值计算发现通过调整像面位置或入臂长度均能够补偿曲率半径的误差。数值模拟结果显示, 修正使用结构后的光栅能够达到与设计结果相近的成像质量。

**关键词** 光谱仪; 衍射光栅; 全息; 平场; 光栅制作

中图分类号: O433.4 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)05-1435-04

## 引 言

平场凹面全息光栅是将使用波段内所有波长的光谱成像在一个平面上, 利用 CCD、微通道板等平面阵列探测器接收光谱, 实时快速地进行多通道光谱分析<sup>[1,2]</sup>。它是便携式小型光栅光谱仪的核心元件, 其光谱成像质量直接决定光谱仪的性能指标<sup>[3,4]</sup>。随着应用范围的日益扩大, 平场光栅光谱仪的优化设计及制造技术越来越受到人们的重视。由于平场光栅的成像面与平面探测器并不是严格重合, 且有其他像差存在, 如像散、彗差、球差等, 所以一般运用凹面光栅几何理论及光线追迹等方法对其进行像差校正, 从而求得使成像质量最佳的制作结构和使用结构<sup>[5-8]</sup>。实际制作及使用过程中不可能将理论计算所得的最优化结构准确实现, 即存在制作误差和装调误差, 这势必影响光栅的成像质量。有报道分析了平场凹面全息光栅的制作结构误差和使用结构误差对光栅成像的影响, 并指出使用结构误差与制作结构误差之间可以相互补偿, 但没有涉及曲率半径误差的分析与补偿问题。

在全息凹面光栅制作过程中不可避免的存在曲率半径误差, 即制得光栅的曲率半径与优化设计值之间的差异。全息凹面光栅是在涂有光刻胶的凹面基底上记录两束激光的干涉

条纹, 然后通过显影、离子束刻蚀转化为浮雕轮廓制作而成<sup>[9-12]</sup>。在凹面基底上涂覆光刻胶一般采用离心式旋涂的方式, 涂胶后得到的胶层一般为中心薄边缘厚<sup>[13]</sup>, 因而造成凹面光栅曲率半径相比基底有所减小。加之基底加工、镀膜、复制等环节带来的误差, 制得光栅的曲率半径将会偏离优化设计值, 对光谱分辨率造成严重影响。

鉴于此, 本文运用几何光线追迹方法计算分析不同曲率半径误差下光谱像宽度的变化规律, 进而找到对由曲率半径误差造成的光谱分辨率下降进行误差补偿的方法, 从而为光栅的设计制作及光谱仪的装调提供理论指导。

## 1 平场全息凹面光栅像差理论

图 1 所示为平场凹面全息光栅制作结构及使用结构示意图。以光栅中心点  $O$  为原点建立直角坐标系, 光栅法线方向为  $x$  轴, 垂直刻线方向为  $y$  轴, 沿刻线方向为  $z$  轴。狭缝中心点  $A$  及其像点  $B$ 、记录点  $C$  和  $D$  均位于子午面  $xoy$  内,  $P(x, y, z)$  为光栅上任一点。由  $C$  和  $D$  发出的记录光束的中心主光线  $CO$  和  $DO$  长度分别为  $r_C$ 、 $r_D$ , 与  $x$  轴夹角分别为  $\gamma$ 、 $\delta$ 。由  $A$  发出波长为  $\lambda$  光束的中心主光线  $AO$  长度为  $r_A$ , 与  $x$  轴夹角为  $\alpha$ , 经光栅衍射后第  $m$  级衍射光成像在探测器  $B_1B_2$  上  $B$  点, 像距为  $OB$  长度为  $r_B$ , 衍射角为  $\beta$ 。 $OH$  为从  $O$  点向光

收稿日期: 2010-07-27, 修订日期: 2010-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(60478034), “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAK03A02)和吉林省科技发展计划项目(20070523, 20086013)资助

作者简介: 孔 鹏, 1981 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: kongdapeng@yahoo.com.cn

\* 通讯联系人 e-mail: bayin888@sina.com

谱面  $B_1 B_2$  所作的垂线, 其长度为  $r_H$ , 与  $x$  轴夹角为  $\beta_H$ 。各角度的符号规则是, 以  $x$  轴为基准, 逆时针为正, 顺时针为负。

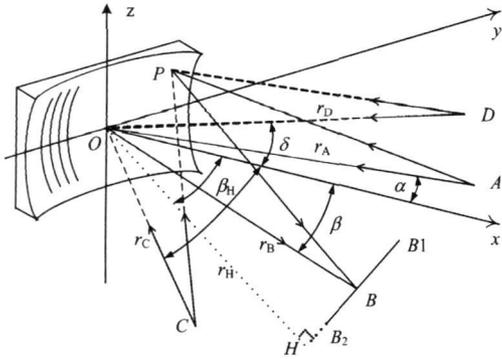


Fig 1 Schematic diagram of the recording and using geometry of the flat-field holographic concave grating

光线  $APB$  的光程函数  $F$  的级数展开式为<sup>[14]</sup>

$$F = F_{000} + yF_{100} + zF_{011} + 1/2y^2F_{200} + 1/2z^2F_{020} + 1/2y^3F_{300} + 1/2yz^2F_{120} + \dots \quad (1)$$

式中从  $F_{200}$  开始后面的各项  $F_{ijk}$  代表各种像差, 其中  $F_{200}$  代表离焦,  $F_{020}$  代表像散,  $F_{300}$  代表子午彗差,  $F_{120}$  代表弧矢彗差。像差的阶越高对光栅成像的影响越小, 因此光栅在子午方向的聚焦条件为  $F_{200} = 0$ , 弧矢方向的聚焦条件为  $F_{020} = 0$ 。对光谱仪来讲, 子午方向的聚焦特性是人们最关心的, 它直接决定了光谱仪所能达到的分辨率水平。本文将问题限制在于凹球面基底上利用两束球面波制作全息光栅的情况来进行分析讨论, 此时光栅的离焦像差系数  $F_{200}$  的表达式为

$$F_{200} = M_{200} + \frac{m\lambda}{\lambda_0} H_{200} \quad (2)$$

其中  $\lambda_0$  为记录波长,  $M_{200}$  和  $H_{200}$  分别代表由使用结构和制作结构引入的像差, 其表达式分别为

$$M_{200} = \cos^2\alpha/r_A + \cos^2\beta/r_B - (\cos\alpha + \cos\beta)/R \quad (3)$$

$$H_{200} = \cos^2\gamma/r_C - \cos^2\delta/r_D - (\cos\gamma - \cos\delta)/R \quad (4)$$

由于子午聚焦条件  $F_{200} = 0$  便可求得子午焦线的位置, 将接收器放置在子午焦线上就可接收到无离焦的光谱像。对于平场光谱仪, 最理想的子午焦线无疑应该是平直的, 实际上无法实现, 只能通过像差校正将其优化至某一平面附近从而在工作波段内所有波长处均获得相对最好的光谱分辨率。

## 2 数值模拟结果与讨论

### 2.1 曲率半径误差对分辨率的影响

为了便于对曲率半径误差对光谱分辨率造成的影响进行模拟与分析, 给出一个平场全息凹面光栅的设计实例。光栅的使用波段为 350~ 850 nm, 光谱长度为 28.6 nm, 光栅曲率半径为 80 mm, 光栅直径 25 mm, 记录波长 441.6 nm, 光谱级次为 +1 级, 其使用结构参数和制作结构参数列于表 1 中。

利用光线追迹方法能够得到像面上光谱像的大小, 光谱像的宽度直接影响光栅的光谱分辨率, 通过分析各个波长处光谱像宽度的变化趋势就能够直观的了解曲率半径误差对分

辨率的影响。本文在进行计算模拟时均是对轴上点光源进行光线追迹, 在对不同曲率半径的情况进行计算时其他所有参数均保持不变。图 2 给出的是曲率半径存在不同程度误差时光谱像宽度随波长变化的曲线, 图中五条曲线分别对应  $R$  取 79, 79.5, 80, 80.5, 81 mm 的情况, 可以看出曲率半径误差对光栅分辨率的影响是巨大的。

Table 1 Mounting and recording parameters of the grating

Mounting parameters		Recording parameters	
$r_A / \text{mm}$	72.014	$r_C / \text{mm}$	106.273
$\alpha / (^\circ)$	-2.164	$\gamma / (^\circ)$	6.333
$r_H / \text{mm}$	67.383	$r_D / \text{mm}$	128.338
$\beta_H / (^\circ)$	-40.099	$\delta / (^\circ)$	14.051

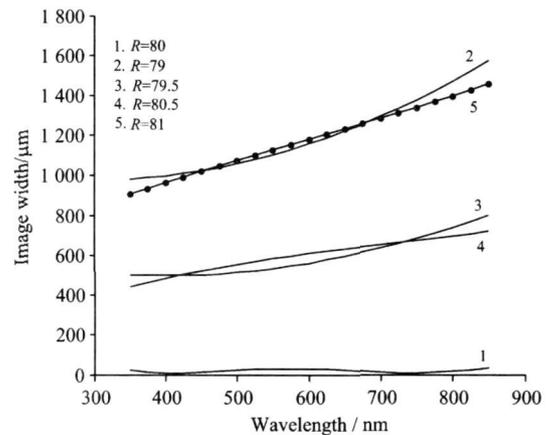


Fig 2 Image widths versus wavelength

图 3 给出的是不同曲率半径下光栅子午焦线的位置, 星点线 1, 2, 3 分别对应  $R = 81, 80, 79$  mm 的情况。由此可以得出结论, 曲率半径变大时光栅的子午焦线偏离接收器向远离光栅的方向移动, 曲率半径变小时子午焦线向靠近光栅的方向移动。只要子午焦线偏离像面位置就会导致像面上光谱像宽度变大, 从而使分辨率变差。值得注意的是, 曲率半径变化时子午焦线的弯曲程度没有明显改变, 只是位置发生偏

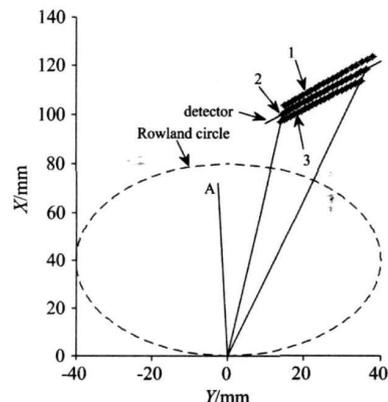


Fig 3 Tangential focal curves for the flat-field grating

The lines 1 to 3 marked by asterisks are for radius 81, 80, 79 mm

移。据此可以推断,能够通过调整光栅的使用结构对子午焦线相对接收器的偏移进行修正,进而改善光栅的成像质量使其达到与设计结果相近的水平。

## 2.2 调整像面位置修正光栅分辨率

从以上分析可知,在相当大的曲率半径误差范围内子午焦线的弯曲度没有明显改变,只是位置发生改变。因此将平面光谱接收器调整至新的子午焦线所在位置可望获得与设计结果相近的光谱分辨率。图 4 给出了曲率半径分别为 79, 79.5, 80, 80.5, 81 mm, 经过调整像面位置所得到的光谱像宽度的曲线,几种误差条件下均获得了与设计结果非常接近的光谱分辨率。另外,曲率半径误差越小,经调整像面位置获得的光谱分辨率越接近设计结果;曲率半径变大时,调整后获得的分辨率更接近设计值。

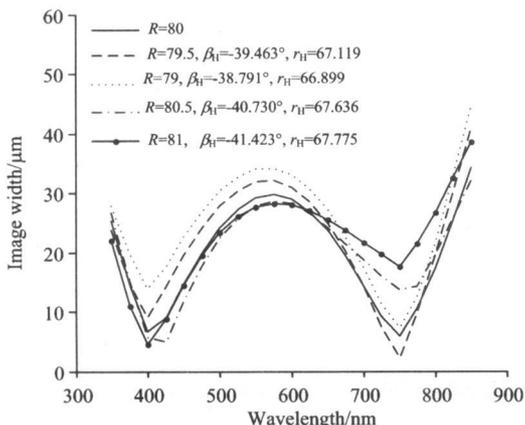


Fig 4 Image widths versus wavelength after adjustment of the detector

## 2.3 调整入臂长度修正光栅分辨率

保持像面位置不变,调整入臂长度即 A 点到光栅中心点的距离同样能够获得很好的误差补偿效果,如图 5 所示。图中给出了曲率半径分别为 79, 79.5, 80, 80.5, 81 mm, 调整入臂长度后得到的光谱像宽度。与像面位置修正情况一致,

曲率半径误差越小,调整入臂后所能达到的分辨率越接近设计结果。通过对比图 5 与图 4 可以看出,利用调整入臂长度补偿曲率半径误差引起的分辨率变差能够获得比调整像面位置更好的结果。

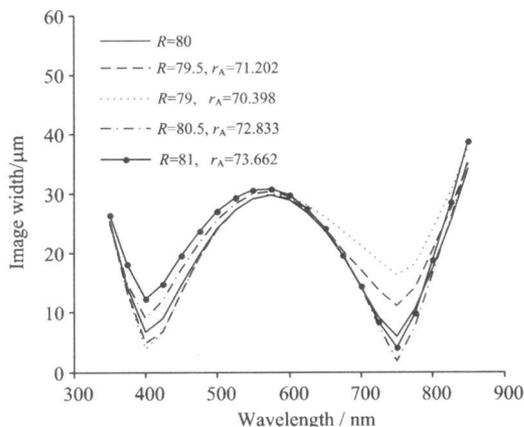


Fig 5 Image widths versus wavelength after adjustment of the entrance slit distance

## 3 结论

在平场凹面全息光栅的设计制作中,光栅曲率半径的误差是不可避免的,曲率半径的变化意味着光栅焦距的变化,从而导致光谱在像面上发生离焦,严重影响光栅的光谱分辨率。本文利用几何光线追迹方法计算并分析了不同曲率半径误差下光谱像宽度的变化规律,发现在一个较大的误差范围内子午焦线的位置随着曲率半径的变化相对光栅发生前后平移,同时其弯曲程度几乎没有改变。通过数值计算发现调整光栅的使用结构能够补偿由曲率半径误差带来的影响,其中一种方法是调整像面位置使其重新与子午焦线重合;另一种方法是调整入臂长度,其目的是使经过光栅的衍射光线重新聚焦在像面上。数值模拟结果显示,经过修正使用结构后的光栅能够达到与设计结果相近的成像质量。

## References

- [1] Hayat G S, Flamand J, Lacroix M, et al. Opt. Eng., 1975, 14(5): 420.
- [2] Lerner J M, Chambers R J, Passereau G. SPIE, 1981, 268: 122.
- [3] LI Xin, ZHANG Guo-wei, XUN Li-na, et al (李新, 张国伟, 寻丽娜, 等). Acta Optica Sinica (光学学报), 2008, 28(5): 902.
- [4] CHENG Liang, CHEN Yan-ping, ZHU Ruo-bo, et al (程梁, 陈燕平, 朱若波, 等). J. Zhejiang University (Engineering Science) (浙江大学学报·工学版), 2008, 42(2): 312.
- [5] Pavlycheva N K. Sov. J. Opt. Technol., 1979, 46: 394.
- [6] McKinney W R, Palmer C. Appl. Opt., 1987, 26: 3108.
- [7] LI Chao-ming, WU Jian-hong, TANG Min-xu et (李明朝, 吴建宏, 唐敏学). Laser Journal (激光杂志), 2005, 26(2): 57.
- [8] PI Dao-rui, HUANG Yuan-shen, ZHANG Da-wei, et al (皮道锐, 黄元申, 张大伟, 等). Acta Phys. Sinica (物理学报), 2010, 59(2): 1009.
- [9] ZHAO Jin-song, LI Li-feng, WU Zhen-hua (赵劲松, 李立峰, 吴振华). Acta Optica Sinica (光学学报), 2004, 24(6): 851.
- [10] ZHAO Jin-song, LI Li-feng, WU Zhen-hua (赵劲松, 李立峰, 吴振华). Acta Optica Sinica (光学学报), 2004, 24(8): 1146.
- [11] KONG Peng, Bayanheshig, LI Wen-hao, et al (孔鹏, 巴音贺希格, 李文昊, 等). Acta Optica Sinica (光学学报), 2010, 30(1): 65.
- [12] MENG Xiang-feng, LI Li-feng (孟祥峰, 李立峰). Acta Optica Sinica (光学学报), 2008, 28(1): 189.
- [13] Bayanheshig, ZHANG Hao-tai, LI Wen-hao (巴音贺希格, 张浩泰, 李文昊). Optics and Precision Engineering (光学精密工程), 2008,

16(2): 229.

[14] Noda H, Namioka T, Seya M. J. Opt. Soc. Am., 1974, 64: 1031.

## Effect of Curvature Radius Error on the Flat-Field Holographic Concave Grating Resolution and Its Compensation

KONG Peng<sup>1,2</sup>, Bayanheshig<sup>1\*</sup>, LI Wen-hao<sup>1</sup>, TANG Yu-guo<sup>1</sup>, CUI Ji-jiang<sup>3</sup>

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

2. Graduate University 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 spectral resolution of the spectrometer will be seriously deteriorated by radius error which is inevitable in the flat-field holographic concave grating fabrication. In order to give theoretical guidance to the design and assembly of the spectrometers, the geometric ray-tracing method was used to calculate and analyze the variation of the spectral image width with different radius error. It was discovered that in a wide range of the radius error, the position of the tangential focal curve moves forward or backward as the radius changes, while the shape of the tangential focal curve remains almost unchanged. As is shown through the calculation, the radius error can be compensated by adjustment of the detector's position or entrance slit distance. The simulation results indicate that with proper modification of the using structure, the grating can have a spectral resolution as good as the designed results.

**Keywords** Spectrometer; Diffraction gratings; Holography; Flat-field; Grating fabrication

(Received Jul. 27, 2010; accepted Oct. 23, 2010)

\* Corresponding author