

Seya-Namioka 单色仪中光栅曲率 半径误差的影响及补偿

孟 竹^{1,2}, 谭 鑫^{1*}, 巴音贺希格¹, 王 玮^{1,2}, 刘兆武^{1,2}, 赵旭龙^{1,2}

(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. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: Seya-Namioka 光栅制作过程中的曲率半径误差会引起离焦像差, 该像差会对光栅单色仪的光谱性能造成极大的影响。本文基于光线追迹理论, 模拟分析了曲率半径误差对 Seya-Namioka 光栅的具体影响。分析结果表明, 出入臂长度对曲率半径误差有很好的补偿作用, 通过调整出入臂长度曲率半径误差的容许范围可增大到 2 mm 左右。总调整量不变的情况下, 任意改变出入臂的长度, 补偿效果相似。随着误差的增加需要调整的出入臂长度值变大, 过大的误差使用出入臂长度无法进行补偿; 出入臂夹角仅能对正向曲率半径误差进行补偿, 且补偿所需调整角过大, 影响单色仪的结构设计, 该方法并不实用。结果可为单色仪的设计和使用提供理论参考。

关 键 词: 曲率半径误差; Seya-Namioka 光栅; 光线追迹; 使用参数; 误差补偿

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20181104.0623

Effect and compensate of grating curvature radius error in Seya-Namioka monochromator

MENG Zhu^{1,2}, TAN Xin^{1*}, Bayanheshig¹, WANG Wei^{1,2}, LIU Zhao-wu^{1,2}, ZHAO Xu-long^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: xintan_grating@163.com

Abstract: The curvature radius error in the Seya-Namioka grating process can cause defocus aberration, which may have a great impact on the spectral performance of the grating monochromator. Based on the theory of ray tracing, we simulate and analyze the impact of curvature radius error on Seya-Namioka grating. The analysis results show that the length of the entrance and exit arm has a good compensating effect on the curvature radius error. By adjusting the length of the entrance and exit arm, the allowable range of the curvature radius error can be increased to about 2 mm. If the total adjustment amount is not changed and the length of the access

收稿日期: 2018-03-11; 修订日期: 2018-05-13

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2011YQ120023)

Supported by National major scientific instruments and equipment development projects(No. 2011YQ120023)

arm is arbitrarily changed, the compensation effect is similar. As the error increases, the length of the arm that needs to be adjusted becomes larger, and the excessive error makes the length of the arm unable to be compensated. In addition, changing the angle between the arm and the arm can only compensate for the error of the positive curvature radius. The adjustment angle needed for compensation is too large, which will affect the design structure of the monochromator, and it is not practical to compensate the curvature radius error by changing the angle of the entrance and exit arm. The research results in this paper show that by adjusting the parameters of the grating, the influence of errors can be reduced and the margin of error can be extended.

Key words: curvature radius error; Seya-Namioka grating; ray-tracing; error compensation

1 引言

随着光谱仪器行业的不断发展,光栅单色仪在很多应用领域占领市场的主导地位。其中以 Seya-Namioka 光栅为核心元件的 Seya-Namioka 凹面光栅单色仪以其小型化、便携化等优点受到了越来越多的关注。对于 Seya-Namioka 凹面光栅的消像差设计及单色仪设计的研究工作十分活跃。Seya-Namioka 光栅是全息光栅技术发展和人们对光栅性能要求不断提高的产物。与传统的平面光栅相比, Seya-Namioka 光栅除了具有色散的功能外,同时具有凹面反射镜将光线聚焦的功能,省略了辅助的聚焦元件,减小了单色仪的体积。因此,分析单色仪的性能好坏,关键在于对凹面光栅的研究,其光谱成像质量直接决定单色仪的性能指标^[1-5]。

T. Namioka 等人提出的基于光程函数的凹面全息光栅光线追迹理论是凹面全息光栅的设计和像质评价的理论基础^[6-7]。2004 年, Sokolova 等人使用光学设计软件对 Seya-Namioka 光栅进行了优化设计,但像差系数与软件中的多项式系数对应关系较为复杂。国内对 Seya-Namioka 光栅的研究起步较晚,相关报道也较少,1994 年到 2004 年期间,合肥国家同步辐射实验室王秋平等人对同步辐射光源所用的单色仪凹面光栅和相关装置的设计、装调等方面进行了分析;2008 年,长春光机所李文昊等人研究了 Seya-Namioka 凹面全息光栅的工艺流程;2012 年,曾瑾等人优化了 Seya-Namioka 光栅的光栅参数,提出了一步法的设计思想并研究了误差分析方法^[8-13]。

Seya-Namioka 光栅的制作过程和使用过程中不可避免会产生各种误差,其中曲率半径误差对光栅的性能影响极大。然而,在现有 Seya-Namioka 凹面光栅消像差设计方法中,曲率半径误差不能作为优化参数进行优化设计,仅能提出理论设计值。而在光栅的制作过程中,基底的加工不当,加之涂胶、镀膜、复制等环节带来的误差,使得最终制得的光栅曲率半径将会偏离理论设计值^[13]。目前,关于 Seya-Namioka 光栅的优化设计、记录参数误差和使用参数误差的分析与补偿、基底定位误差的分析等方面都有了系统的研究,但是并没有针对 Seya-Namioka 光栅的曲率半径误差进行具体分析。鉴于此,本文将在光线追迹的理论基础上,通过计算机仿真模拟定量分析曲率半径误差对 Seya-Namioka 光栅造成的影响,通过调整光栅的使用参数来减小误差的影响,为单色仪的设计和使用提供一定的理论指导。

2 曲率半径误差对单色仪性能的影响

Seya-Namioka 光栅单色仪结构简单,主要由入缝、出缝以及一个可以旋转的凹面光栅组成。单色仪工作时,其入缝和出缝的位置保持不变,通过将光栅 G 绕一根通过凹面光栅刻划面中心且平行于光栅刻槽的固定轴转动不同的角度来实现光谱扫描,具体的转动角度由入射光的波长决定,如图 1 所示。

图中 C、D 为曝光光路中的记录点,它们与光栅法线方向的夹角为 γ 、 δ , A_0 为入射狭缝中心点,到光栅顶点的距离为 r ,与光栅法线方向的夹角为 α ,经过光栅的衍射,衍射光线与像面的交点为

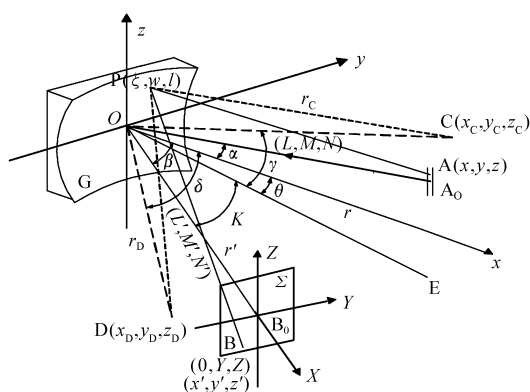


图1 Seya-Namioka 光栅光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Seya-Namioka grating optical system

B_0 距离为 r' , 衍射角为 β 图中 OE 为角 $\angle A_0OB_0$ 的平分线, 即 $2K$ 的角平分线, 角 θ 为 OM 与光栅法线的夹角。光线 AOB 光程函数表达式为:

$$F = F_{000} + \omega F_{100} + l F_{011} + \frac{1}{2} \omega^2 F_{200} + \frac{1}{2} l^2 F_{020} + \frac{1}{2} \omega^3 F_{300} + \frac{1}{2} \omega l^2 F_{120} + \omega l F_{111} + \frac{1}{8} \omega^4 F_{400} + \frac{1}{4} \omega^2 l^2 F_{220} + \frac{1}{8} l^4 F_{400} + \dots \quad (1)$$

光程函数中每一个 F_{ijk} 都代表一种像差, F_{200} 代表离焦, F_{020} 代表象散, F_{300} 代表子午彗差, F_{120} 代表弧矢彗差, 越高阶的像差对光栅成像的影响越小。本文所要研究的曲率半径误差带来的最大像差是离焦。

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

其中,

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

$$H_{200} = \frac{\cos^2 \gamma}{r_C} - \frac{\cos^2 \delta}{r_D} - \frac{\cos \gamma}{R} + \frac{\cos \delta}{R}$$

单色仪实际的接收像面是固定的, 因为曲率半径误差的影响, 使光栅的焦距发生改变, 高斯像面偏离了 CCD 的接收面引起离焦, 导致实际接收到的光斑尺寸很大, 对单色仪的分辨率以及 CCD 能量的接收造成严重的影响。

本文主要采用光线追迹的方法对 Seya-Namioka 凹面光栅的曲率半径误差进行分析。光线追迹是以几何学中的费马原理为基础, 通过对入射

光经过光栅面后的传播路径进行计算, 求出光线与像平面焦点的位置, 即点 B 坐标的 Y 和 Z 的值。

$$\begin{cases} X = 0 \\ Y = (y' - r' \sin \beta_0) \sec \beta_0 \\ Z = z' \end{cases} \quad (4)$$

由上式可以得到点列图上任何一点的坐标值, 在光栅上取不同的点进行追迹, 可以得到不同的衍射光线与像面的交点, 得出点列图。点列图的密集程度就是成像质量的评价标准, 而点列图上光谱的像宽直接反映光谱的分辨率。因此通过分析点列图, 可以直观的看到光谱成像的好坏以及误差对单色仪性能的影响。

本文以一种典型的凹面光栅为例展开研究, 光栅的使用参数: 入臂长度、出臂长度均为 64 mm, 出入臂夹角为 12° , 光栅常数为 1/500 mm, 使用级次为 +1 级, 使用面积为 30 mm $\times$ 30 mm, 入射光响应波段 400 ~ 1 000 nm; 记录参数: 记录点 $r_C = 87.49$ mm, $r_D = 119.78$ mm, $\gamma = 39.305^\circ$, $\delta = 58.676^\circ$, 记录使用波长 441.6 nm, 光栅曲率半径 $R = 63.53$ mm。图 2 给出了曲率半径与离焦像差的关系, 随着曲率半径的改变, 离焦像差呈线性变化。

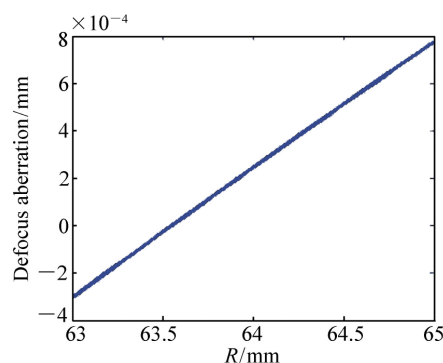


图2 曲率半径与离焦像差的关系

Fig. 2 Relationship of radius and defocus aberration

离焦导致光谱像增宽、光斑弥散程度增大, 大幅度降低 CCD 所能接收的出射光能量。对于一个已经制作完成的凹面光栅, 应该考虑应用使用参数来补偿曲率半径误差, 即如何调整出入臂长度以及出入臂夹角以减少曲率半径误差带来的影响。由于曲率半径误差对单色仪的影响比其他误

差大的多,所以在模拟计算中应给曲率半径误差设定比其他误差更小的误差范围。根据相关文献所给出的使用参数和记录参数误差的设定范围值为 $\pm 1 \text{ mm}^{[14]}$,考虑到在实际的制作与使用过程中容易保证的精度范围,为了能具体的仿真分析误差补偿效果,本文对将要讨论的曲率半径误差进行规定,即以 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 误差为例进行研究。

3 使用参数对曲率半径误差的补偿

3.1 出入臂长度对曲率半径误差的补偿分析

如图 3 所示,离焦像差随曲率半径线性递增,随出入臂长度线性递减,同时增加或同时减小两参数值可以达到互为补偿的作用,适当的调整出入臂长度值,会完全消除曲率半径带来的离焦。说明每一个曲率半径误差值所带来的离焦像差都可以通过改变出入臂的长度值而进行补偿。

进一步分析出入臂长度与曲率半径之间的关系。令公式(2)中 $F_{200} = 0$,得到曲率半径与出入臂长度的关系式,并模拟得到全波段上满足消除离焦像差的关系曲线,如图 4 所示。

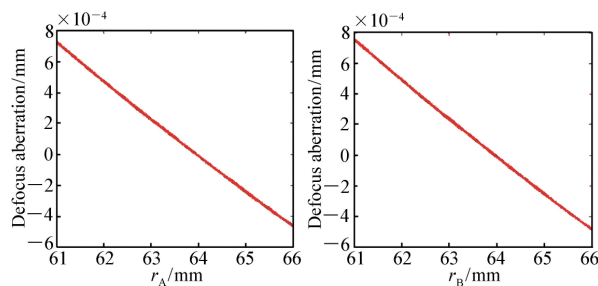


图 3 出入臂长度与离焦像差的关系

Fig. 3 Relationship of exit and entrance slit distance and defocus aberration

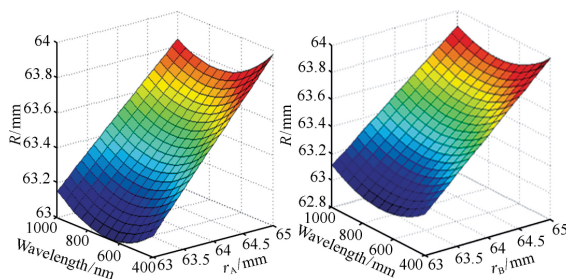
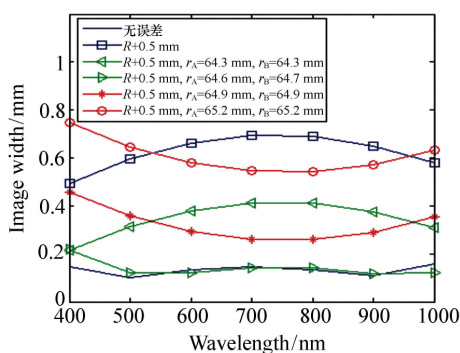


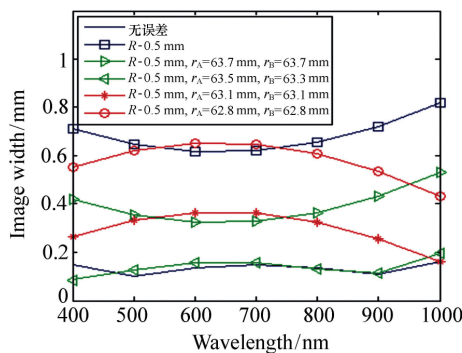
图 4 出入臂长度与曲率半径误差的关系

Fig. 4 Relationship of exit and entrance slit distance and radius

$$R = \frac{\cos\alpha + \cos\beta + \frac{m\lambda}{\lambda_0}(\cos\gamma - \cos\delta)}{\frac{\cos^2\alpha}{r_A} + \frac{\cos^2\beta}{r_B} + \frac{m\lambda}{\lambda_0}(\frac{\cos^2\gamma}{r_C} - \frac{\cos^2\delta}{r_D})} \quad (5)$$



(a) 误差为+0.5 mm的误差补偿图
(a) Error compensation when error is +0.5 mm



(b) 误差为-0.5 mm的误差补偿图
(b) Error compensation when error is -0.5 mm

图 5 同时改变出入臂长度的误差补偿图

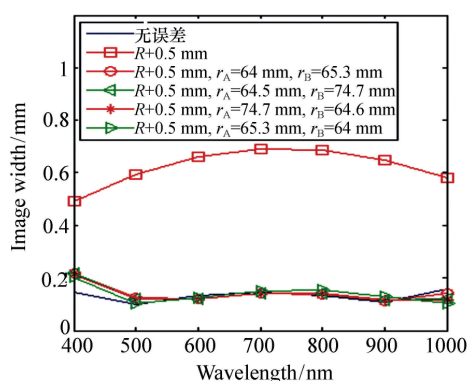
Fig. 5 Error compensation with the change of exit and entrance slit distance

具体分析曲率半径存在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 误差时,不同的出入臂长度调整值对光谱像宽曲线变化的影

响,如图 5 所示,入臂和出臂长度对曲率半径误差都具有补偿作用,不同的调整值对曲率半径误差

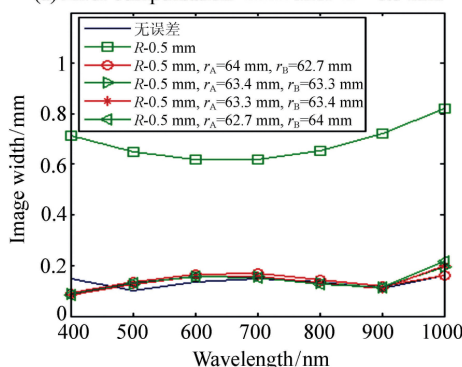
的补偿效果相差很大。随着调整量的改变,光谱像宽先减小后增大,当误差为 $+0.5\text{ mm}$ 时 ($r_A + 0.6\text{ mm}$, $r_B + 0.7\text{ mm}$) 得到与无误差相似的补偿效果;当误差为 -0.5 mm 时 ($r_A - 0.6\text{ mm}$, $r_B - 0.7\text{ mm}$) 对曲率半径误差的补偿效果最好。

图6所示为 r_A 、 r_B 调整值分别为 $(0, 1.3)$ 、 $(0.6, 0.7)$ 、 $(0.7, 0.6)$ 、 $(1.3, 0)$ 时曲率半径对像宽的影响图。可以得出4条曲线的变化趋势基本一致,控制出入臂长度的总调整值在 $\pm 1.3\text{ mm}$ 范围内,任意改变入臂和出臂长度都可以很好的补偿 $\pm 0.5\text{ mm}$ 曲率半径误差。



(a) 误差为 $+0.5\text{ mm}$ 的误差补偿图

(a) Error compensation when error is $+0.5\text{ mm}$



(b) 误差为 -0.5 mm 的误差补偿图

(b) Error compensation when error is -0.5 mm

图6 总调整量 $\pm 1.3\text{ mm}$ 的误差补偿图

Fig. 6 Error compensation for the total adjustment amount of $\pm 1.3\text{ mm}$

表1分析了当曲率半径误差在 $0.1 \sim 2\text{ mm}$ 之间时,补偿所需出入臂长度总调整量与曲率半径误差值的关系。表中所示的数值是通过比较理想的像宽补偿效果给出的,在实际操作时可以根据表中数值有一定的上下浮动。值得注意的是,

随着曲率半径误差的不断加大,需要的调整值也不断的增大。当曲率半径误差值为 2 mm 时,总调整值已达到 5.3 mm ,出入臂的平均调整值为 2.65 mm ,将影响单色仪的设计结构。即使误差之间的补偿可以增大曲率半径的误差容限,但根据实际的设计要求,本文所研究的单色仪的曲率半径误差要严格控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内,否则无法用出入臂长度对其进行补偿。

表1 总调整量与曲率半径误差的关系

Tab. 1 Relationship between the total adjustment amount and radius error

曲率半径误差值/mm	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
总调整量/mm	0.3	0.5	1.3	2.6	5.3

3.2 出入臂夹角对曲率半径误差的补偿分析

图7为 K 存在 $\pm 0.0174\text{ rad}$ ($2K = 2^\circ$) 误差时,单色仪光谱像宽随波长变化的曲线图。当 K 的误差为 $\pm 0.0174\text{ rad}$ ($2K = 2^\circ$) 时,误差对光谱像宽的影响不明显,可见单色仪的分辨率对出入臂夹角 $2K$ 的误差并不敏感。由于曲率半径对光谱的影响十分严重,本文选取较大的 $2K$ 调整值,并得到在这种情况下误差补偿图,如图8所示。从图中可以看出,当 R 增加 0.5 mm 时, K 需要调整 0.08 rad 即 $2K = 9.18^\circ$,才能达到和无误差时相近的像宽曲线;而当 R 减小 0.5 mm 时, K 调整 0.1 rad 即 $2K = 11.46^\circ$,此时只能使光谱的像宽稍微减小,并不能达到很好的补偿作用。将出入臂夹角大幅度的调整,对单色仪的制作结构有很大

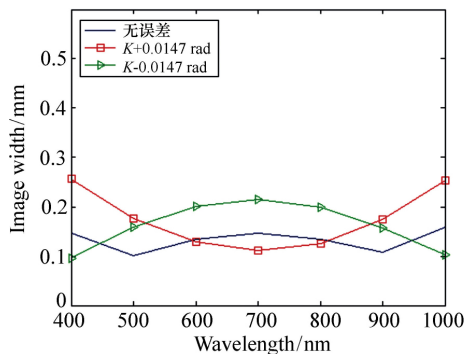


图7 K 误差对像宽的影响

Fig. 7 Influence of K error on image width

的影响,所以,用改变出入臂夹角来补偿曲率半径误差带来的光谱增宽的方法并不实用。

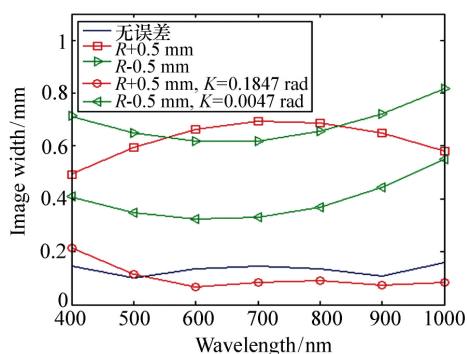


图 8 出入臂夹角对曲率半径误差的补偿图

Fig. 8 Error compensation with the change of exit and entrance slit angle

综上所述,曲率半径误差所造成的离焦像差对单色仪成像质量影响很大,在严重影响光谱像宽的同时,也减小了出射光能量。对于单色仪而言,分辨率好坏和 CCD 所能接收到的能量多少是评价成像质量的重要标准,因此减小曲率半径误差带来的影响是非常必要的。本文提出通过使用参数的调节来补偿曲率半径的误差,并没有对记录参数进行分析,对于使用者而言,记录参数是无法改变的。通过以上的分析可得,出入臂夹角 $2K$

的改变使光谱宽度的曲线变化不大,只能对正向曲率半径误差进行补偿,且补偿需要的调整角过大。而通过适当的调节出入臂的长度,可以有效的达到增大曲率半径误差容限的作用。

4 结 论

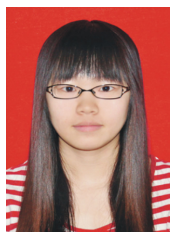
本文在光线追迹理论的基础上,数值仿真了不同曲率半径误差对 Seya-Namioka 单色仪光谱宽度的影响。随着曲率半径误差的不断增大,光谱像宽变化十分明显。严重的降低单色仪分辨率。本文提出通过调节使用参数补偿曲率半径误差,并对补偿效果进行了分析。结果表明,通过改变出入臂夹角大小对曲率半径误差进行补偿的方法并不实用;适当的调节出入臂长度,可以有效的到达减小光谱宽度、提高单色仪分辨率的作用,使曲率半径误差的容许范围增大到 2 mm 左右,总调整量不变的情况下,任意改变出入臂的长度,可以达到相近的补偿效果,有利于 Seya-Namioka 光栅使用过程中的误差装调,降低了光栅在制作过程和使用过程中光路调节的难度,对整个单色仪的研制有重要的理论指导作用。

参考文献:

- [1] 吴国安. 光谱仪器设计 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
WU G A. *Design of Spectroscopic Instruments* [M]. Beijing: Science Press, 1978. (in Chinese)
- [2] 卢启鹏, 宋源, 等. 极高分辨变包含角平面光栅单色器关键技术及检测方法研究 [J]. 中国光学, 2016, 9(2): 281-295.
LU Q P, SONG Y *et al.*. Key technologies and the performance measuring methods in variable included angle plane grating monochromator [J]. *Chinese Optics* 2016 9(2): 281-295. (in Chinese)
- [3] NODA H, NAMIOKA T, SEYA M. Geometrical theory of the grating [J]. *J. Opt. Soc. Am*, 1974, 64: 1031-1036.
- [4] 寇婕婷, 吴娜, 等. 凹面光栅衍射效率测试仪精度分析与优化 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1225-1232.
KOU J T, WU N *et al.*. Precision analysis and optimization on diffraction efficiency instrument for concave gratings [J]. *Opt. Precision Eng.* 2012 20(6): 1225-1232. (in Chinese)
- [5] 姜岩秀, 韩建, 等. 平面全息光栅曝光系统中的分光器件特性分析 [J]. 中国光学, 2015, 8(2): 241-247.
JANG Y X, HAN J *et al.*. Characteristic analysis for different beamsplitters of the plane holographic grating lithography system [J]. *Chinese Optics* 2015 8(2): 241-247. (in Chinese)
- [6] NODA H, NAMIOKA T, SEYA M. Design of holographic concave gratings for Seya - Namioka monochromators [J]. *J. Opt. Soc. Am*, 1974, 64(8): 1043-1048.
- [7] NAMIOKA T, SEYA M, NODA H. Design and performance of holographic concave gratings [J]. *J. Appl. Phys.*, 1976, 15

- (7): 1181-1197.
- [8] MCKINNEY W R, PALMER C. Numerical design method for aberration reduced concave grating spectrometers [J]. *Appl. Opt.*, 1987, 26(15): 3108-3118.
- [9] 包仁, 宋从龙. IV 型消像差全息凹面光栅的设计与实验 [J]. *仪器仪表学报*, 1988, 9: 240-246.
BAO R, SONG C L. A design of type IV aberration - corrected holographic concave grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1988, 9: 240-246. (in Chinese)
- [10] SOKOLOVA E A, KRUIZINGA V, BRUIJN D D *et al.*. Computer modelling of a wavefront diffracted at a concave grating [J]. *Opt. Technol.*, 2003, 70(8): 600-606.
- [11] ELENA SOKOLOVA. Simulation of mechanically ruled concave diffraction gratings by use of an original geometric theory [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(1): 20-28.
- [12] 王秋平, 余小江, 高辉, 等. 光栅单色器及相关技术 [J]. *现代科学仪器*, 2001, 1: 49-52.
WANG Q P, YU X J, GAO H *et al.*. Grating monochromator related techniques [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2001, 1: 49-52. (in Chinese)
- [13] SINGH M, REDDY G P. Seya - Namioka monochromators theory and design of holographic concave gratings [J]. *Optik*, 1986(74): 142-153.
- [14] 孔鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 平场全息凹面光栅结构参量误差之间的补偿作用 [J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0705001-6.
KONG P, TANG Y G, BAYANHESHIG *et al.*. Compensation effects between parameter error of flat - field holographic concave gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0705001-6. (in Chinese)
- [15] 曾瑾, 巴音贺希格, 李文昊, 等. IV 型凹面全息光栅参数误差对光谱性能的影响及补偿 [J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1005005-7.
ZENG J, BAYANHESHIG, LI W H *et al.*. Effect of type - IV concave holographic grating parameter errors on spectral performance and their compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1005005-7. (in Chinese)
- [16] 周倩, 曾理江, 李立峰. 平场全息凹面光栅制作结构与使用结构之间误差补偿作用的数值模拟与实验验证 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(7): 1674-1678.
ZHOU Q, ZENG L J, LI L F. Numerical simulation of error compensation between recording structure and use structure of flat - field holographic concave grating [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(7): 1674-1678. (in Chinese)
- [17] 吕丽军, 石亮. 平面对称光学系统像差理论的扩展 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12): 2975-2982.
LV L J, SHI L. Generalization of aberration theory of plane - symmetric optical systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2975-2982. (in Chinese)

作者简介:



孟 竹(1991—),女,吉林四平人,硕士研究生,2014 年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光栅优化设计、光谱及光谱仪器分析等方面的研究。
E-mail: 13624492750@163.com



谭 鑫(1981—),男,吉林长春人,副研究员,2003 年、2008 年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事离子束刻蚀、光栅设计分析等方面的研究。E-mail: xintan_grating@163.com