

# 宽场平谱面全息凹面光栅光谱仪的设计

郝爱花<sup>1</sup>, 贺锋涛<sup>1</sup>, 李立波<sup>2</sup>, 李芸<sup>2</sup>, 胡炳樑<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121;

<sup>2</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119

**摘要** 全息凹面光栅光谱仪具有平谱面、小型化、大孔径、高分辨率等优点。首先从信息光学的角度推导了全息凹面光栅的成像公式, 在垂直于狭缝和平行于狭缝的平面上系统分析了全息凹面光栅光谱仪的成像性能; 在垂直于狭缝的平面上, 全息凹面光栅光谱仪具有良好的平谱面性; 在平行于狭缝的平面上, 全息凹面光栅光谱仪克服了传统平面光栅的谱线弯曲和色畸变, 实现了谱线平直成像; 此外指出全息凹面光栅光谱仪固有的弧矢场曲对视场扩展的限制。然后根据理论分析结果提出了结构对称消场曲的全息凹面光栅光谱仪的设计思想, 利用 ZEMAX 软件优化设计了像差补偿型全息凹面光栅光谱仪。在保证相对孔径  $F\# = 3$ 、光谱分辨率为  $20 \text{ nm/mm}$ 、空间分辨率小于  $25 \mu\text{m}$  等技术指标不变的前提下, 设计了狭缝长度为  $0.4 \text{ mm}$  的传统单球面镜全息凹面光栅光谱仪和狭缝长度为  $8 \text{ mm}$  的像差补偿型全息凹面光栅光谱仪。结果表明, 改进后的像差补偿型全息凹面光栅光谱仪成功地将视场扩大为单球面镜全息凹面光栅光谱仪的 20 倍。

**关键词** 光谱学; 光谱仪; 对称设计; 全息凹面光栅光谱仪; 宽场; 平谱面

中图分类号 O433.1; O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0230003

## Design of Wide-Field and Flat-Spectrum Holographic Concave Grating Spectrometer

Hao Aihua<sup>1</sup>, He Fengtao<sup>1</sup>, Li Libo<sup>2</sup>, Li Yun<sup>2</sup>, Hu Bingliang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

**Abstract** Holographic concave grating (HCG) spectrometer has many advantages, such as flat-spectrum, miniaturization, large aperture and high resolution. Firstly, the imaging formula of HCG is deduced based on information optics and its imaging characteristics are analyzed in both perpendicular plane to the slit and parallel plane to the slit. In the perpendicular plane, HCG spectrometer has good flat-spectrum; in the parallel plane, HCG spectrometer overcomes the spectral line bending and chromatic distortion of the traditional plane grating and realizes the straight spectral line imaging. In addition, the restriction of the intrinsic sagittal field curvature of HCG spectrometer to the field of view expanding is pointed out. According to the theoretical analysis results, it is proposed that symmetrical structure eliminates field curvature of HCG spectrometer. Then the aberration compensation spectrometer is designed and optimized with the utilization of ZEMAX software. Both traditional single-spherical-mirror HCG spectrometer with  $0.4 \text{ mm}$  slit length and aberration compensation HCG spectrometer with  $8 \text{ mm}$  slit length are designed with the same relative aperture  $F\#$  of 3, spectral resolution of  $20 \text{ nm/mm}$  and spatial resolution of less than  $25 \mu\text{m}$ . The results show that the field of view of the aberration compensation HCG spectrometer is successfully expanded 20 times larger than that of single-spherical-mirror HCG spectrometer.

**Key words** spectroscopy; spectrometer; symmetrical design; holographic concave grating spectrometer; wide-field; flat-spectrum

**OCIS codes** 300.6190; 090.6186; 350.2770

收稿日期: 2017-08-14; 收到修改稿日期: 2017-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(11327303)、中国科学院光谱成像技术重点实验室开放基金(LSIT201604D)

作者简介: 郝爱花(1977—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光信息处理和光谱仪设计方面的研究。

E-mail: haoaihua@xupt.edu.cn

## 1 引 言

近年来,小型化高光谱成像仪被广泛应用在空间遥感、军事侦察、环境监测、生物医学和农业科学等领域<sup>[1-3]</sup>。

变栅距凹面光栅光谱仪具有平场、小型化、低杂光、高分辨率、大孔径、宽光谱等众多优点,其制作方法通常分为两类:机械刻划和全息曝光。与刻划光栅相比,基于离子刻蚀的全息凹面光栅(HCG)具有制作简单、可选基底类型丰富、无鬼线、低杂光等优点。早在20世纪70年代,Noda等<sup>[4-5]</sup>和Takahashi等<sup>[6]</sup>就报道过Seya-Namioka型全息凹面光栅单色仪的设计方法。1974年,Namioka等<sup>[7]</sup>论证了像差校正全息凹面光栅要优于传统机械刻划凹面光栅的成像性能。

平场全息凹面光栅光谱仪可以完成快速平谱面光谱分析,是基于Ⅲ型全息凹面光栅的平场光谱仪<sup>[8]</sup>。Ⅲ型全息凹面光栅的特点是二个记录光源和一个再现光源在过球面曲率中心的一条直线上,且三个点可以同时得到不同波长的消像差像。1983年,Jobin-Yvon公司研制出了Ⅳ型全息凹面光栅光谱仪<sup>[9-10]</sup>,即Seya-Namioka型全息凹面光栅光谱仪。这种光栅的制作参数是根据单色仪的结构性能要求通过计算机求解得出的,它是Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型全息凹面光栅的发展,所需光学元件少,适用范围广。

本文首先基于全息成像原理推导了全息凹面光栅的成像公式,在垂直于狭缝的色散平面和平行于狭缝的成像平面上分析了全息凹面光栅光谱仪的成像性能。在垂直于狭缝的平面上,全息凹面光栅光谱仪具有良好的平谱面性;在平行于狭缝的平面上,全息凹面光栅光谱仪克服了传统平面光栅的谱线弯曲和色畸变,实现了谱线平直成像;全息凹面光栅光谱仪固有的弧矢场曲限制了视场的扩展。接着提出了对称结构的像差补偿光路,利用ZEMAX软件优化设计了1:1成像的消场曲全息凹面光栅光谱仪,成功地将视场扩大到传统1:1成像单球面镜全息凹面光栅光谱仪狭缝视场的20倍。

## 2 全息凹面光栅光谱仪的成像理论

全息凹面光栅是由两相干点源干涉形成的变密度弯曲槽分布,因此槽线走向及疏密变化与两记录光源位置有关,两记录光源位置为结构设计参量。根据全息图的再现原理,再现像的质量与再现点源的位置和波长密切相关,即全息凹面光栅光谱仪的

安装参量也要严格选取。如图1所示,凹球面基底的半径为 $R$ ,当记录点源位于 $XOY$ 平面时,记录点源的位置由 $\theta_C, r_C, \theta_D, r_D$ 四个记录参量确定;狭缝一般垂直 $XOY$ 平面放置,那么狭缝中点和探测器的位置由 $\theta_A, r_A, \theta_H, r_H$ 四个安装参量确定,这样在给定光栅基底曲率半径、光栅孔径、记录波长条件下,整个全息凹面光栅光谱仪的结构和使用参量就确定了。

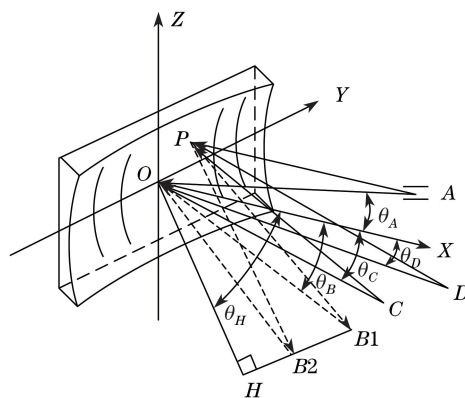


图1 全息凹面光栅光谱仪光路示意图

Fig. 1 Optical path diagram of holographic concave grating spectrometer

## 2.1 全息凹面光栅的几何像差理论

全息凹面光栅光谱仪的理论以基于Beutler光程差函数发展起来的全息凹面光栅几何像差理论为基础。假设全息凹面光栅的记录波长为 $\lambda_0$ ,由相对光程差可以得出 $P$ 点距离原点 $O$ 的槽线数 $n(y, z)$ 应为

$$n(y, z) = \frac{1}{\lambda_0} \{ [\langle CP \rangle - \langle DP \rangle] - [\langle CO \rangle - \langle DO \rangle] \}. \quad (1)$$

如图1所示,点 $A$ 经光栅上任一点 $P$ 衍射到 $B$ 点,其光程为

$$F = \langle AO \rangle + \langle BO \rangle = \langle AP \rangle + \langle BP \rangle + n(y, z)k\lambda, \quad (2)$$

式中 $k$ 为衍射级次, $\lambda$ 为再现光波长。若 $F$ 为与 $P$ 点无关的常数,则 $A$ 点在 $B$ 点无像差成像。

将(1)式代入(2)式,光程函数展开成坐标 $y, z$ 的幂级数:

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

式中 $F_{ij}$ 为凹面光栅的各类像差系数,要想使 $F$ 与 $P$ 点坐标无关,只需 $i+j>0$ 的所有像差系数为零即

可。其中,  $F_{10}$  与光栅衍射方程有关,  $F_{20}$  为子午离焦,  $F_{02}$  为弧矢像散,  $F_{30}$  为子午彗差,  $F_{12}$  为弧矢彗差。每一个  $F_{ij}$  均由两部分构成, 即

$$F_{ij} = M_{ij} + \frac{k\lambda}{\lambda_0} H_{ij}, \quad (4)$$

式中  $M_{ij}$  与凹面光栅装架的几何结构有关, 为球面成像所固有;  $H_{ij}$  与全息记录光源位置有关。

全息光栅衍射方程为

$$\sigma(\sin \theta_A + \sin \theta_B) = k\lambda, \quad (5)$$

式中  $\sigma$  为根据全息光栅记录方程  $\sigma(\sin \theta_C - \sin \theta_D) = \lambda_0$  确定的光栅常数。

尽管根据几何像差理论可以给出各级像差的具体表达形式, 但根据像差分析凹面光栅的成像性质还是很繁琐的, 若根据全息图记录和再现原理分析全息凹面光栅的成像情况, 则会得到较为直观的结果。

## 2.2 全息凹面光栅再现像的成像特性

根据菲涅耳衍射原理, 如图 1 所示的空间任意一点  $(x_j, y_j, z_j)$  在凹球面上的相对相位分布为

$$\varphi_j = k' \left[ \frac{y^2 + z^2 - 2(y y_j + z z_j)}{2r_j} - \frac{y^2 + z^2}{2R} \right], \quad (6)$$

式中  $k'$  为波数,  $r_j$  为该点到球面中心的矢径,  $R$  为凹面镜的曲率半径。全息图再现像的相位关系

$$\varphi_I = \varphi_A + \varphi_C - \varphi_D, \quad (7)$$

式中下角标  $I, A, C, D$  分别表示再现像点、照明点源、记录物点和记录参考点。对比(6)式的二次项和交叉项可以得出凹球面全息光栅的成像公式。当记录点源位于  $XOY$  平面内, 即  $z_C = z_D = 0$  时, 可得

$$\begin{cases} \frac{1}{r_I} = \frac{1}{r_A} + \frac{\lambda_A}{\lambda_0} \left( \frac{1}{r_C} - \frac{1}{r_D} \right) - \frac{2}{R} \\ \frac{y_I}{r_I} = \frac{y_A}{r_A} + \frac{\lambda_A}{\lambda_0} \left( \frac{y_C}{r_C} - \frac{y_D}{r_D} \right) \\ \frac{z_I}{r_I} = \frac{z_A}{r_A} \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $\lambda_A$  为再现波长。从(8)式可以看出再现像的矢径与其在  $XOY$  平面上投影的夹角以及照明光源矢径与其自身投影的夹角相等, 即狭缝成像展开后在同一个平面内, 如图 2 所示。从(8)式还可以看出, 在偏离狭缝中心点的情况下, 根据物像成像关系, 放大倍率为

$$M = \frac{r_I}{r_A} = \frac{f}{r_A + f}, \quad (9)$$

式中  $f$  为等效焦距,  $\frac{1}{f} = \frac{\lambda_A}{\lambda_0} \left( \frac{1}{r_C} - \frac{1}{r_D} \right) - \frac{2}{R}$ 。可以看出,  $M$  随  $r_A$  的增大而减小。弧矢方向的狭缝像并不

能成为平行狭缝的一条直线, 仅在探测器平面上的投影成一条直线, 即全息凹面光栅光谱仪虽然消除了谱线弯曲和色畸变, 但偏离中心视场的点源在探测器平面上成离焦像, 即在弧矢方向存在场曲。

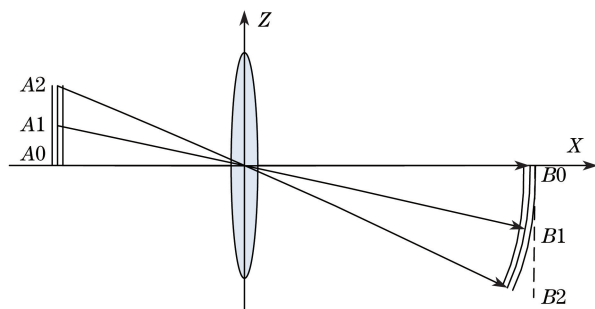


图 2 狭缝成像示意图

Fig. 2 Imaging schematic of the slit

由(8)式可得  $XOY$  子午平面内点源的成像:

$$\frac{y_I - m}{r_I} = n, \quad (10)$$

式中  $m = (y_{CrD} - y_{DrC}) / (r_D - r_C)$ ,  $n = \frac{y_A}{r_A} -$

$\frac{R - 2r_C}{r_C R} m$ 。(10)式表明在  $XOY$  子午平面内点源的成像成一条直线, 即平场成像。

综上所述, 全息凹面光栅光谱仪不仅可以克服平面光栅光谱仪固有的谱线弯曲和色畸变的缺陷, 而且可以实现平场色散成像, 这对平面光电探测器的接收非常有利。但美中不足的是偏离中心视场的点源在探测器平面上离焦成像, 限制了视场的发展, 文献[11]中显示的视场只有 0.4 mm, 文献[12]中显示的视场为 1 mm。

根据上述分析可知边缘视场离焦成像主要源于球面镜的场曲。下面采用光路补偿思想构造对称系统来消除场曲, 扩大系统视场。

## 3 全息凹面光栅光谱仪的优化设计

1:1目标成像光谱仪的技术指标为: 光谱范围 200~500 nm, 相对孔径  $F \# = 3$ , 光谱线色散 20 nm/mm, 空间分辨率小于 25  $\mu\text{m}$ , 狭缝长 8 mm。全息光栅的记录光源选用 488 nm 的  $\text{Ar}^+$  激光器。

### 3.1 传统 1:1 全息凹面光栅光谱仪的设计

表 1 为放大比例为 1:1 的传统单球面镜全息凹面光栅光谱仪的设计参量表, 根据文献[11], 狭缝视场设置为 0.4 mm。图 3 为相应的光路结构。

图 4 为结构补偿前传统全息凹面光栅光谱仪像点均方半径随波长变化的关系曲线图, 图中视场 1、2、3 分别代表 0.4 mm 狭缝视场的中点和边缘点, 均

表 1 传统全息凹面光栅光谱仪的设计参量

Table 1 Designed parameters of the traditional holographic concave grating spectrometer

Parameter	Value	
Mounting parameter	$r_A / \text{mm}$	145.19
	$\theta_A / (^\circ)$	-5.59
	$r_H / \text{mm}$	69.44
	$\theta_H / (^\circ)$	68.44
Recording parameter	$r_C / \text{mm}$	129.00
	$\theta_C / (^\circ)$	7.84
	$r_D / \text{mm}$	125.48
	$\theta_D / (^\circ)$	18.34

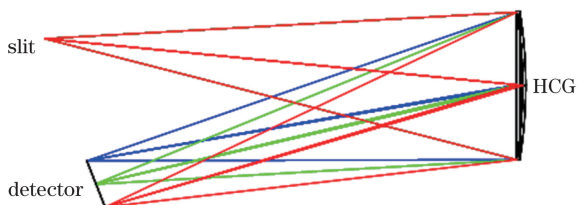


图 3 传统全息凹面光栅光谱仪的设计光路

Fig. 3 Designed optical path of traditional holographic concave grating spectrometer

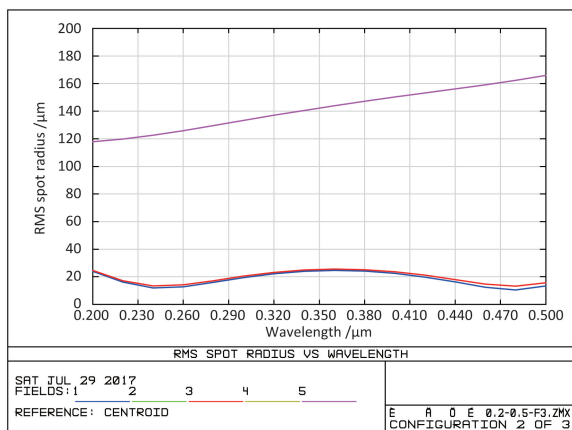


图 4 结构补偿前传统全息凹面光栅光谱仪

均方半径随波长的变化曲线

Fig. 4 Curves of RMS radius changing with wavelength for traditional holographic concave grating spectrometer before structure compensation

方半径随波长的变化范围为  $(20 \pm 5) \mu\text{m}$ , 视场 4、5 为将狭缝长度扩大到 8 mm 时边缘视场的成像, 显然此时离焦弥散太大, 已经无法成像。图 5 为光谱仪的像面轨迹图, 从图中可以计算出光谱仪的线色散为  $19.5 \text{ nm/mm}$ , 满足技术指标的要求。即便扩大了视场也无谱线弯曲和色畸变, 但存在明显的场曲。

### 3.2 像差补偿型 1:1 全息凹面光栅光谱仪的设计

图 6 为基于对称结构像差补偿的全息凹面光栅

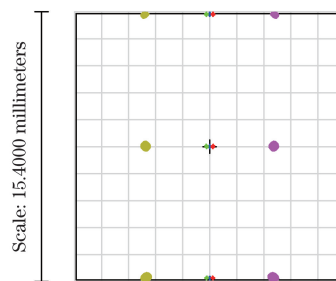


图 5 传统全息凹面光栅光谱仪的传统像面轨迹图

Fig. 5 Imaging foot print of traditional holographic concave grating spectrometer

光谱仪的设计光路, 光路中曲率半径相等的凹球面镜 M 为全息凹面光栅光谱仪的补偿镜。该设计中的其他指标与前面传统单球面镜全息凹面光栅光谱仪的设计指标相同, 但狭缝视场扩大为 8 mm。图 7 为结构补偿后传统全息凹面光栅光谱仪像点均方半径随波长变化的曲线图, 图中视场 1 代表零视场, 视场 2、3 代表 0.7 视场, 视场 4、5 为边缘视场, 从图中可以看出整个视场的均方半径变化范围也为  $(20 \pm 5) \mu\text{m}$ 。图 8 为像差补偿全息凹面光栅光谱仪的像面轨迹图, 从图中可以得出光谱仪的线色散为  $18.5 \text{ nm/mm}$ , 优于技术指标的要求。即在视场扩

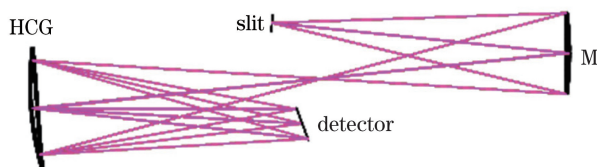


图 6 像差补偿全息凹面光栅光谱仪的设计光路

Fig. 6 Designed optical path of aberration-compensated holographic concave grating spectrometer

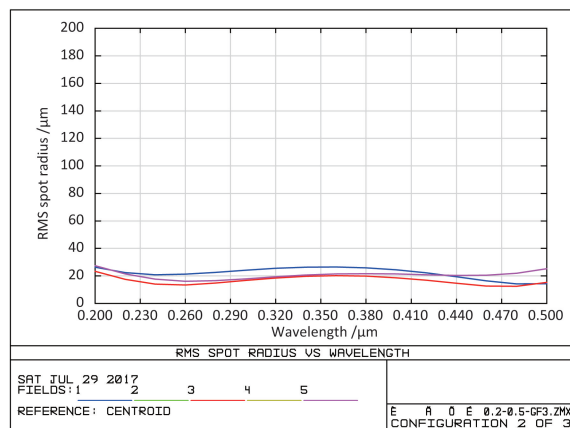


图 7 结构补偿后传统全息凹面光栅光谱仪

均方半径随波长的变化曲线

Fig. 7 Curve of RMS radius changing with wavelength for aberration-compensated holographic concave grating spectrometer after structure compensation

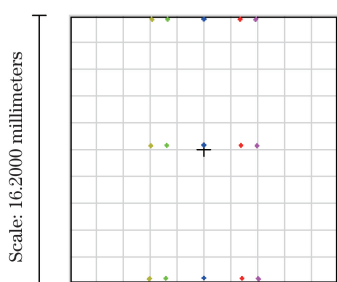


图 8 像差补偿全息凹面光栅光谱仪的像面轨迹图

Fig. 8 Imaging foot print of aberration-compensated holographic concave grating spectrometer

大 20 倍的情况下,除体积有所增加外,线色散、空间分辨都满足技术指标的要求。

## 4 结 论

首先推导了全息凹面光栅的成像公式,分析了全息凹面光栅光谱仪在垂直于狭缝和平行于狭缝平面内的点源成像特性。在垂直于狭缝的平面内,点源的色散谱线为一条直线,实现了平场成像;在平行于狭缝的平面内,在波长一定的情况下狭缝上的各点在垂直于探测器的一个平面内成像,在探测器平面上实现了消谱线弯曲和色畸变,克服了平面光栅光谱仪固有的缺陷,但存在严重的弧矢场曲,狭缝视场通常很小。

为了解决视场受限的问题,提出了对称结构消场曲的思想。通过 ZEMAX 软件对比设计了光谱范围为 200~500 nm、相对孔径  $F \# = 3$ 、空间分辨率小于 25  $\mu\text{m}$ 、狭缝长度为 0.4 mm 的传统单球面镜全息凹面光栅光谱仪以及狭缝长度为 8 mm 的改进型像差补偿全息凹面光栅光谱仪。结果显示,改进型全息凹面光栅光谱仪在满足技术指标要求的前提下,成功地将视场扩大为原来的 20 倍。

与从像差理论分析全息凹面光栅光谱仪的成像情况不同,首先从信息光学的角度推导了全息凹面光栅光谱仪的成像公式,理论分析了光谱仪的成像性能,论证了传统全息凹面光栅光谱仪的色散平场性、消谱线弯曲和消色畸变性,指出了传统全息凹面光栅光谱仪的视场局限性。其次根据前面的理论分析提出了对称结构消场曲的设计思想,并成功设计了像差补偿型全息凹面光栅光谱仪,将视场扩大为原来的 20 倍。

## 参 考 文 献

[1] Li Z, Deen M J, Fang Q, *et al.* Design of a flat field

concave-grating-based micro-Raman spectrometer for environmental applications[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(28): 6855-6863.

- [2] Wei K L, Wen Z Y, Guo J, *et al.* The design and experiment of multi-parameter water quality monitoring microsystem based on MOEMS microspectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 2009-2014.
- [3] Hu S, Wen Z Y, Liang Y Q, *et al.* Microbiochemical analyzer based on continuous spectrum and its test for clinic use[J]. *Spectroscopy Spectral Analysis*, 2006, 26(9): 1769-1773.
- [4] Noda H, Namioka T, Seya M. Design of holographic concave gratings for Seya-Namioka monochromators[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, 64(8): 1043-1048.
- [5] Noda H, Namioka T, Seya M. Aberration-reduced holographic concave gratings for Seya-Namioka monochromators[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1975, 14(s1): 187-191.
- [6] Takahashi A, Katayama T. Automatic design of holographic gratings for Seya-Namioka monochromators[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1978, 68(9): 1254-1256.
- [7] Namioka T, Noda H, Seya M. Performance of aberration-reduced holographic concave gratings designed specifically for Seya-Namioka monochromators[C]// *Proceedings of the Symposium*. Tokyo, 1974: 29.
- [8] Hayat G S, Flamand J, Lacroix M, *et al.* Designing a new generation of analytical instruments around the new types of holographic diffraction grating[J]. *Optical Engineering*, 1975, 14(5): 420-425.
- [9] Bittner R. Optical arrangement having a concave mirror or concave grating: US470756[P]. 1987-11-17.
- [10] Zhu S J. Manufacturing techniques and improvements of holographic gratings[J]. *High Speed Photography and Photonics*, 1990, 19(1): 79-87.  
祝绍箕. 全息光栅的制造技术及其改进[J]. *高速摄影与光子学*, 1990, 19(1): 79-87.
- [11] Kong P, Tang Y G, Bayanheshig, *et al.* Optimization of broad-band flat-field holographic concave grating without astigmatism[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(2): 565-569.  
孔鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 零像散宽波段平场全息凹面光栅的优化设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(2): 565-569.
- [12] Li X H, Ni K, Zhou Q, *et al.* Fabrication of a concave grating with a large line spacing via a novel dual-beam interference lithography method[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10759-10766.