

# 双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计

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>

<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049  
<sup>3</sup> 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** 提出了双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计方法。将使用波段一分为二,由两个使用结构相同的平场全息凹面光栅分别进行光谱成像以达到提高光谱分辨率的目的。根据全息凹面光栅像差理论,对光栅的使用结构和两光栅各自的制作结构进行优化求解以校正离焦、像散、彗差和球差等各种像差。据此原理设计了工作波段为 200~800 nm、探测器长度 25 mm 的双光栅平场光谱仪。两光栅的工作波段分别为 200~400 nm 和 400~800 nm,像面上光谱像的全宽度分别优于 0.83 nm 和 1.68 nm。通过与相同设计指标的单光栅平场光谱仪进行比较,证明采用双光栅的设计方案能够有效地改善平场全息凹面光栅光谱仪的光谱分辨率。

**关键词** 光栅;全息凹面光栅;平场光谱仪;像差校正;优化函数;双光栅

**中图分类号** O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0205001

## Optimization of Double-Grating Flat-Field Holographic Concave Grating Spectrograph

Kong Peng<sup>1,2</sup> Bayanheshig<sup>1</sup> Li Wenhao<sup>1</sup> Tang Yuguo<sup>1</sup> Cui Jinjiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

**Abstract** The optimization method for the double-grating flat-field spectrographs which employ two aberration-corrected holographic concave gratings is described. The spectral range of the spectrograph is divided into two parts which are covered by two gratings respectively. The two gratings have the same using geometry and are fabricated with different recording geometries for the correction of aberrations, such as defocus, coma, astigmatism and spherical aberrations. A double-grating flat-field spectrograph with a wavelength range of 200~800 nm and detector length of 25 mm is designed. The spectral resolution performance is compared with a single-grating flat-field spectrograph which is designed following the same specifications. The results indicate that the spectral resolution performance can be greatly improved when the double-grating spectrograph is used.

**Key words** gratings; holographic concave grating; flat-field spectrograph; aberration correction; optimization function; double-grating

**OCIS codes** 050.0050; 050.1950; 090.0090; 090.1000

收稿日期: 2010-08-17; 收到修改稿日期: 2010-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(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)资助课题。

作者简介: 孔 鹏(1981—),男,博士研究生,主要从事平场全息凹面光栅设计与制作工艺等方面的研究。

E-mail: kongdapeng@yahoo.com.cn

导师简介: 唐玉国(1967—),男,博士,研究员,主要从事光谱技术和光谱仪器等方面的研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

\* 通信联系人。E-mail: bayin888@sina.com

# 1 引 言

近年来, CCD、微通道板等平面阵列探测器的应用技术日益成熟, 应用领域迅速拓展<sup>[1~4]</sup>, 极大推动了平像场型光栅光谱仪的发展和普及, 设计制作具有高成像质量的平场全息凹面光栅成为光谱仪器设计者最为关注的课题<sup>[5~7]</sup>。平场全息凹面光栅的概念最先由 J-Y 公司的 Hayat 等<sup>[8]</sup>于 1975 年提出, 它一般是由两个相干点光源在涂有光刻胶的凹球面基底上进行干涉曝光制作而成<sup>[9]</sup>。平场凹面光栅是将不同波长的光谱成像在一个平面上, 它拥有很多优点: 1) 利用 CCD 等平面探测器能够同时接收所有波长的光谱, 因此能够进行瞬态光谱分析, 大大提高了光谱分析效率; 2) 平场光栅是唯一的色散元件, 也是唯一的成像元件, 光线只经过一次反射, 大大提高了仪器的光通量; 3) 全静态工作方式, 有利于仪器的优化设计。凹面光栅的几何像差理论<sup>[10~12]</sup>是平场全息凹面光栅优化设计的理论基础, 被广泛应用于各种平场全息凹面光栅的优化设计中<sup>[13~17]</sup>。

对于平场全息凹面光栅, 宽波段和高分辨是其固有矛盾, 一般而言使用波段越宽聚焦缺陷越大, 分辨率就越低。为了设计制作出具有高光谱分辨率的宽波段平场全息凹面光栅光谱仪, 本文给出以下设计方案: 将较宽的使用波段分为两段, 设计两块装配在同一台光谱仪中使用结构完全相同的光栅分别对两部分波长的光进行成像; 将两块光栅背靠背安装在一个转台上, 利用步进电机驱动转台实现光栅切换; 在入射狭缝处放置一个高通滤波片, 在对长波进行分析时使用, 以便消除短波二级光谱的干扰。另外, 由于每个光栅的工作波段都被缩短, 整个使用波段的衍射效率也能够得到提高<sup>[18]</sup>。针对本文所要解决的具体问题, 采用光程函数与波像差理论相结合的方法进行优化设计。利用光程函数能够求得像面上光谱像的宽度和高度, 以两个光栅的像高和像宽建立优化函数, 求得最优的使用结构参数和两光栅各自的制作结构参数。据此方法设计一款使用波段为 200~800 nm 的双光栅平场全息凹面光栅光谱仪, 所使用两光栅的工作波段分别为 200~400 nm 和 400~800 nm, 探测器长度为 25 mm。将此设计结果与一个相同设计指标的单光栅光谱仪设计进行比较, 结果表明双光栅光谱仪设计能够显著提高光谱分辨率。

# 2 设计原理

## 2.1 全息凹面光栅像差理论

图 1 所示为平场全息凹面光栅制作与使用结构

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。物点  $A$ , 像点  $B$ , 记录点  $C, D$  均在子午面  $xOy$  内,  $P(x, y, z)$  为光栅上任一点。由  $C, D$  发出的记录光束的中心主光线  $CO, DO$  的长度分别为  $r_C, r_D$ , 与  $x$  轴夹角分别为  $\gamma, \delta$ 。由物点  $A$  发出的光束的中心主光线  $AO$  长度为  $r_A$ , 与  $x$  轴夹角为  $\alpha$ , 经光栅衍射后  $m$  级衍射光成像在探测器  $B_1B_2$  上  $B$  点, 像距为  $r_B$ , 衍射角为  $\beta$ 。  $OH$  为从  $O$  点向光谱面  $B_1B_2$  所作的垂线, 其长度为  $r_H$ , 与  $x$  轴夹角为  $\beta_H$ 。所有的角度遵守以下的符号规则: 在子午面内  $y$  轴正方向一侧为正,  $y$  轴负方向一侧为负。

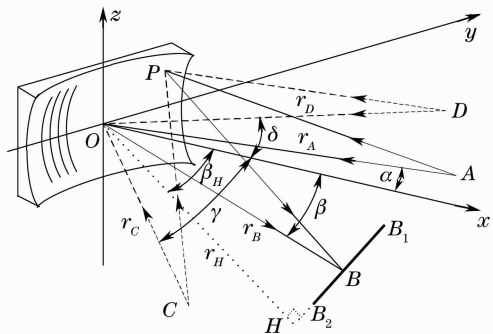


图 1 平场全息凹面光栅制作与使用结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the recording and using geometry of the flat-field holographic concave grating

光线  $APB$  的光程函数  $F$  为<sup>[6]</sup>

$$F = \langle AP \rangle + \langle PB \rangle + nm\lambda, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为波长,  $P$  点所在的刻线数  $n$  由下式表示:

$$n\lambda_0 = (\langle CP \rangle - \langle DP \rangle) - (\langle CO \rangle - \langle DO \rangle), \quad (2)$$

式中  $\lambda_0$  为记录波长。将(2)式代入(1)式, 光程函数  $F$  利用级数展开至四阶为

$$F(y, z) = F_{00} + F_{10} + y^2 F_{20}/2 + z^2 F_{02}/2 + y^3 F_{30}/2 + yz^2 F_{12}/2 + y^4 F_{40}/8 + y^2 z^2 F_{22}/4 + z^4 F_{04}/8, \quad (3)$$

式中  $F_{ij}$  ( $i + j \geq 2$ ) 为像差系数,  $F_{20}$  为离焦,  $F_{02}$  为像散,  $F_{30}$  为子午彗差,  $F_{12}$  为弧矢彗差,  $F_{40}, F_{22}, F_{04}$  为球差。由光程函数  $F$  能够给出像面上子午和弧矢方向光线偏移量  $\delta y$  和  $\delta z$  的表达式<sup>[11]</sup>:

$$\delta y = \frac{r_B - y \sin \beta}{r_B \cos \beta} \left[ (r_B - y \sin \beta) \frac{\partial F}{\partial y} - y \sin \beta \frac{\partial F}{\partial z} \right], \quad (4)$$

$$\delta z = (r_B - y \sin \beta) \frac{\partial F}{\partial z}. \quad (5)$$

在光栅设计中  $F$  可略去高阶像差项, 取到四阶像差即可达到足够的精度。

## 2.2 优化函数

在平场凹面全息光栅的使用结构中,不同波长的像距  $r_B$  可以表示为

$$r_B = r_H / \cos(\beta - \beta_H), \quad (6)$$

式中波长  $\lambda$  处的衍射角  $\beta$  由光栅方程给出:

$$\beta = \arcsin(m\lambda/\sigma - \sin \alpha), \quad (7)$$

式中  $\sigma$  为有效光栅常数。记录角  $\gamma$  和  $\delta$  满足光栅方程

$$\sin \delta - \sin \gamma = \lambda_0/\sigma. \quad (8)$$

对于两块使用结构完全相同的光栅,假设光栅 I 的使用波段为  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ,有效光栅常数为  $\sigma_1$ ;光栅 II 的使用波段为  $\lambda_3 \sim \lambda_4$ ,有效光栅常数为  $\sigma_2$ 。像点  $B_1$ ,  $B_2$  对应的衍射角分别为  $\beta_1, \beta_2$ , 则

$$\sin \alpha + \sin \beta_1 = m\lambda_1/\sigma_1 = m\lambda_3/\sigma_2, \quad (9)$$

$$\sin \alpha + \sin \beta_2 = m\lambda_2/\sigma_1 = m\lambda_4/\sigma_2. \quad (10)$$

因此两块光栅的波段范围和有效光栅常数必须满足关系

$$\sigma_1/\sigma_2 = \lambda_1/\lambda_3 = \lambda_2/\lambda_4. \quad (11)$$

在进行最优化计算时,光栅 I 的优化函数  $W_1$  定义为

$$W_1 = \sum \omega_{i1} \sum (\delta y_1 + f_1 \delta z_1)^2, \quad (12)$$

式中  $\sum (\delta y + f \delta z)^2$  为光栅表面 16 个点的光线偏移量的平方和,  $f$  为弧矢光线偏移量相对于子午光线偏移量的权重因子,由于子午方向的聚焦性能直接决定分辨率,因此  $f$  取值一般小于 1。 $\omega_{i1}$  为不同波长的权重因子,用以平衡整个波段的像差校正效果。与光栅 I 相同,光栅 II 的优化函数  $W_2$  定义为

$$W_2 = \sum \omega_{i2} \sum (\delta y_2 + f_2 \delta z_2)^2, \quad (13)$$

最终的优化函数为  $W = W_1 + W_2$ 。

在平场光栅的优化设计中,调整入缝和探测器的位置能够有效减小像差,因此使用结构参数  $r_A$ ,  $\alpha$ ,  $r_H$ ,  $\beta_H$  在优化过程中设为优化变量,像距  $r_B$  和衍射角  $\beta$  由(6),(7)式表示。光栅 I 的四个记录参数  $\gamma_1$ ,  $\delta_1$ ,  $r_{C1}$ ,  $r_{D1}$  均设为优化变量,光栅常数  $\sigma_1$  在优化程序中由(8)式计算。一旦  $\sigma_1$  确定,光栅 II 的光栅常数  $\sigma_2$  就由(11)式所决定,根据(8)式可知光栅 II 的两个记录角不是独立变量,优化程序中选择  $\gamma_2$ ,  $r_{C2}$ ,  $r_{D2}$  为优化变量。另外两光栅的曲率半径  $R_1$  和  $R_2$  也设为优化变量。

## 3 设计结果

运用以上优化方法设计了使用波段 200~800 nm 的双光栅平场光谱仪,其具体设计参数列在表

1 中。令光栅 I 的使用波段为 200~400 nm,光栅 II 的使用波段为 400~800 nm,探测器长度  $L=25$  mm,光栅直径  $d=30$  mm,光谱级次  $m=+1$ ,记录波长  $\lambda_0=441.6$  nm。表 2 列出了经优化得到的光栅使用结构参数和制作结构参数,图 2 所示为光栅的使用结构。

表 1 双光栅平场光谱仪的设计参数

Table 1 Design specifications for the double-grating flat-field spectrograph

Wavelength range /nm	200~800
Detector length /mm	25
Entrance slit width / $\mu\text{m}$	10
Entrance slit height / $\mu\text{m}$	400
Resolution /nm	5

表 2 双光栅平场光谱仪的优化参数

Table 2 Optimization system parameters of the double-grating flat-field spectrograph

Mounting parameters	Grating I		Grating II		
$r_A/\text{mm}$	77.605	$\gamma_1/(\text{^\circ})$	3.500	$\gamma_2/(\text{^\circ})$	9.945
$\alpha/(\text{^\circ})$	-1.638	$\delta_1/(\text{^\circ})$	25.431	$\delta_2/(\text{^\circ})$	20.909
$r_H/\text{mm}$	103.156	$r_{C1}/\text{mm}$	124.238	$r_{C2}/\text{mm}$	148.352
$\beta_H/(\text{^\circ})$	-15.583	$r_{D1}/\text{mm}$	174.718	$r_{D2}/\text{mm}$	180.795
$R_1/\text{mm}$	89.054	$\sigma_1/\mu\text{m}$	1.199	$\sigma_2/\mu\text{m}$	2.398
$R_2/\text{mm}$	89.056				

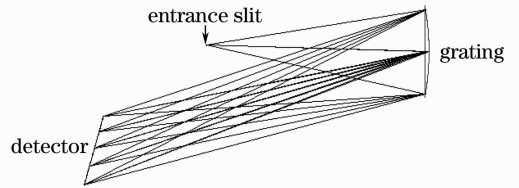


图 2 双光栅平场光谱仪的使用结构

Fig. 2 Use geometry of the double-grating flat-field spectrograph

运用光线追迹方法评价光栅的成像性能,图 3 所示为光栅 I 在 200,300 和 400 nm 的点列图,图 4 所示为光栅 II 在 400,600 和 800 nm 的点列图。所得点列图是通过分别追迹入缝左右两边缘上沿缝高方向等间距分布的 6 个点发出的光线在像面上形成的像斑,入射狭缝宽 10  $\mu\text{m}$ ,高 400  $\mu\text{m}$ 。从点列图可以看出光栅 I 的分辨率远好于 1 nm,光栅 II 的分辨率远好于 2 nm,光栅 I 分辨率比光栅 II 高约一倍主要是因为光栅 I 的刻线密度高于光栅 II。

利用光栅线色散方程

$$\partial\lambda/\partial l = \sigma \cos \beta / m r_B, \quad (14)$$

能够将像的大小由几何尺寸转换为波长单位,(14)式中  $l$  为沿像面上光谱色散方向的距离。表 3 列出了不同波长处狭缝分别经光栅 I 和光栅 II 成像在像

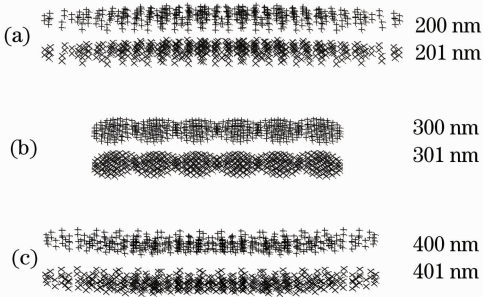


图 3 狭缝经光栅 I 成像在像面上形成的点列图

Fig. 3 Spot diagrams on image plane for the entrance slit when grating I is used

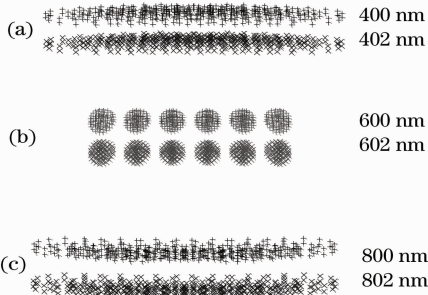


图 4 狭缝经光栅 II 成像在像面上形成的点列图

Fig. 4 Spot diagrams on image plane for the entrance slit when grating II is used

面上形成的像斑的全宽度。

表 3 狭缝经光栅 I 和光栅 II 在像面上所成像斑的全宽度  
Table 3 Full widths at zero height (FWZH) of a given image for the entrance slit at five wavelengths imaged by grating I and grating II, respectively

Grating I		Grating II	
Wavelength / nm	FWZH / nm	Wavelength / nm	FWZH / nm
200	0.83	400	1.60
250	0.60	500	1.23
300	0.83	600	1.68
350	0.60	700	1.26
400	0.83	800	1.66

为了进一步说明双光栅平场光谱仪在光谱分辨率上的改善,依据表 1 所列的设计参数设计了一个使用波段为 200~800 nm、探测器长度 25 mm 的单光栅平场光谱仪,其优化参数列于表 4 中,对入射狭缝所成光谱像的全宽度列于表 5 中。通过对比表 3 和表 5 的计算结果可以看出,使用双光栅平场光谱仪的设计方案能够有效改善光谱仪的光谱分辨率。

表 4 单光栅平场光谱仪的优化参数

Table 4 Optimization system parameters of the single-grating flat-field spectrograph

Mounting parameters		Recording parameters	
$r_A$ / mm	74.383	$\gamma$ / ( $^\circ$ )	5.118
$\alpha$ / ( $^\circ$ )	-1.153	$\delta$ / ( $^\circ$ )	12.493
$r_H$ / mm	100.013	$r_C$ / mm	144.361
$\beta_H$ / ( $^\circ$ )	-23.385	$r_D$ / mm	162.711
$R$ / mm	88.370	$\sigma$ / $\mu\text{m}$	3.474

表 5 单光栅平场光谱仪对狭缝所成像的全宽度

Table 5 FWZH for the entrance slit of the single-grating flat-field spectrograph

Wavelength / nm	FWZH / nm	Wavelength / nm	FWZH / nm
200	2.82	400	2.64
250	1.38	500	3.22
300	1.29	600	2.82
350	2.02	700	1.69
400	2.64	800	2.30

## 4 结 论

给出了双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计方法,通过将使用波段分为两段分别由两个使用结构完全相同的平场全息凹面光栅进行光谱成像以提高仪器光谱分辨率。分别利用双光栅和单光栅两种设计方案设计一款使用在 200~800 nm、探测器长度 25 mm 的平场光谱仪。在双光栅方案中,两光栅的使用波段分别为 200~400 nm, 400~800 nm, 光谱像全宽度分别优于 0.83 nm 和 1.68 nm。与相同设计指标的单光栅平场光谱仪相比,双光栅设计的光谱成像性能有明显提高。虽然这种设计方案会增加仪器结构的复杂性和一定的成本,但通过对光栅切换装置精度的控制完全有可能达到仪器的设计指标。另外,对于宽波段单光栅光谱仪,一般将滤光片放置在接收器前以消除二级光谱,放置滤光片时需要对其进行精确定位。而使用双光栅设计则有可能避免这样的问题,只需在入缝处加一个滤光片即可。本文所给出的优化方法不仅适用于双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计,同样适用于多光栅光谱仪的优化设计。

## 参 考 文 献

1 Yang Yuezhong, Cao Wenxi, Sun Zhaohua *et al.*. Development of real-time hyperspectral radiation sea-observation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 102~107  
杨跃忠, 曹文熙, 孙兆华 等. 海洋高光谱辐射实时观测系统的研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 102~107

- 2 Yao Shunchun, Lu Jidong, Lu Zhimin *et al.*. Influence of sample morphology on laser ablation properties of coal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1126~1130  
姚顺春, 陆继东, 卢志民等. 样品形态对燃煤的激光烧蚀特性影响分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1126~1130
- 3 Gong Zhihua, Chen Min, Wang Yong *et al.*. Measurement of monochromator's angle repeatability by phase plate diffraction collimation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2813~2817  
巩志华, 陈敏, 王勇等. 单色仪转角重复精度的相位板衍射准直方法测量[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2813~2817
- 4 Chen Xinglin, Zheng Yanhong, Wang Yan. Influence of spot noise in inter-satellite optical communications and suppression algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 743~747  
陈兴林, 郑燕红, 王岩. 光斑噪声对星间光通信的影响及抑制算法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 743~747
- 5 J. M. Lerner, R. J. Chambers, G. Passereau. Flat-field imaging spectroscopy using aberration corrected holographic gratings [C]. *SPIE*, 1981, **268**: 122~128
- 6 Jia Hui, Yao Yong. Characteristics of typical optical systems with diffractive gratings of micro-spectrometers and improvement of spectrometer's resolution [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(8): 1653~1656  
贾辉, 姚勇. 微小型光栅光谱仪光学系统的特点与光谱分辨率的提高[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(8): 1653~1656
- 7 Li Xin, Zhang Guowei, Xun Lina *et al.*. Wavelength calibration of shortwave infrared flat spectroradiometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 902~906  
李新, 张国伟, 寻丽娜等. 短波红外平场光谱仪的波长定标[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 902~906
- 8 G. S. Hayat, J. Flamand, M. Lacroix *et al.*. Designing a new generation of analytical instruments around the new types of holographic diffraction grating [J]. *Opt. Engng.*, 1975, **14**: 420~425
- 9 Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *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
- 10 H. Noda, T. Namioka, M. Seya. Geometric theory of the grating [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**: 1031~1036
- 11 M. Chrisp. Aberrations of holographic toroidal grating systems [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**: 1508~1518
- 12 T. Namioka, M. Koike, D. Content. Geometric theory of the ellipsoidal grating [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**: 7261~7274
- 13 N. K. Pavlycheva. Design of flat-field spectrograph employing a holographic grating [J]. *Sov. J. Opt. Technol.*, 1979, **46**: 394~396
- 14 W. R. McKinney, C. Palmer. Numerical design method for aberration-reduced concave grating spectrometers [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**: 3108~3118
- 15 Li Chaoming, Wu Jianhong, Tang Minxue. Design of flat field holographic concave grating [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(2): 57~58  
李朝明, 吴建宏, 唐敏学. 平场全息凹面光栅的设计[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(2): 57~58
- 16 Xiang Xianyi, Wen Zhiyu. Design of flat field holographic concave grating for near-infrared spectrophotometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(7): 1670~1673  
向贤毅, 温志渝. 用于近红外光谱仪的平场全息凹面光栅的模拟与设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(7): 1670~1673
- 17 Zhou Qian, Li Lifeng. Design method of convex master gratings for replicating flat-field concave gratings [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(8): 2281~2285  
周倩, 李立峰. 光谱仪用平场凹面光栅的凸面母光栅的消像差设计思路[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(8): 2281~2285
- 18 E. G. Loewen, E. Popov. *Diffraction Gratings and Applications* [M]. New York: Marcel Dekker, 1997