

双光栅切换微型平场全息凹面光栅光谱仪

孔 鹏¹ 唐玉国¹ 巴音贺希格^{1*} 齐向东¹ 李文昊¹ 崔锦江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 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)

摘要 基于 CCD 的微型平场全息凹面光栅光谱仪, 以其简单紧凑的结构和快速高效的工作方式在光谱分析领域获得了广泛的应用。但是, 由于受限于色散距离, 单纯依靠优化光栅像差很难进一步使光谱分辨率获得大幅提高。提出一种双光栅切换微型平场全息凹面光栅光谱仪的设计方法, 用两个使用结构相同的光栅代替传统的单光栅设计, 给出一个光谱范围为 400~1000 nm 光谱仪的具体设计, 计算显示光谱分辨率最大可提高为原来的 2.5 倍。通过对光栅衍射效率的计算分析, 说明此方法能够显著改善仪器的通光效率。设计制作了原理样机, 进行了装调测试, 实验结果与理论计算相吻合。

关键词 光谱学; 光谱仪; 衍射光栅; 平场; 宽光谱; 分辨率; 通光效率

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0105001

Double-Grating Minitype Flat-Field Holographic Concave Grating Spectrograph

Kong Peng¹ Tang Yuguo¹ Bayanheshig¹ Qi Xiangdong¹ Li Wenhao¹ Cui Jinjiang²

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
(² Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China)

Abstract The minitype flat-field holographic concave grating spectrograph equipped with CCD detectors are widely used for spectral analysis. They are accepted for some remarkable advantages, such as compact structure and rapid and efficient testing process. However, restricted by imaging distance of the spectrometer, it is difficult to improve the spectral resolution greatly just by optimization of the holographic concave grating. A design method of double-grating minitype flat-field holographic concave grating spectrograph is proposed. The single grating in conventional spectrograph is replaced by two gratings which are equipped with the same geometry. A double grating flat-field spectrograph with a wavelength range from 400 nm to 1000 nm is designed. The calculation results show that the resolution of the newly designed spectrograph can be almost two and a half times as great as the conventional spectrograph. The light throughput efficiency can also be greatly improved, which is demonstrated by analyzing diffraction efficiency of the grating. The double-grating minitype flat-field holographic concave grating spectrograph is developed and adjusted. The experimental results agree with the theoretical calculations very well.

Key words spectroscopy; spectrometer; diffraction gratings; flat-field; wide spectrum; resolution; light throughput efficiency

OCIS codes 050.1950; 080.1010; 090.1970; 090.2890; 300.6190

收稿日期: 2012-03-13; 收到修改稿日期: 2012-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(60478034, 61007063)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120023)、国家创新方法工作专项项目(2008IM040700)和中国科学院知识创新项目(100132H100)资助课题。

作者简介: 孔 鹏(1981—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事全息光栅的设计与制作技术等方面的研究。

E-mail: kongdapeng@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: bayin888@sina.com

1 引 言

微型光栅光谱仪从它诞生之日起就以其结构紧凑、轻便、耗耗材少和成本低廉等诸多优点获得了迅速的发展和广泛的应用^[1]。近 20 年来,随着 CCD 等平面阵列光电探测器件及微小光学元件的快速发展和成熟,极大提升了微型光栅光谱仪的性能^[2~6]。

平场全息凹面光栅光谱仪是微型光谱仪的一个主要发展方向。它将使波段内所有波长的光谱成像在一个平面上,利用 CCD 接收光谱,实时快速地进行多通道光谱分析^[7,8]。其突出优点有:1)快速高效的工作方式;2)光线只经过一次光学面反射,大大提高了通光效率;3)结构简单,省去了传统光谱仪中的扫描机构和接受器件所需的复杂电路系统,更有利于仪器的微型化设计。

然而,因为光栅光谱仪的光谱分辨率很大程度上取决于仪器光学系统的色散距离,或者说焦距,所以微型平场全息凹面光栅光谱仪在提高光谱分辨率上受到很大限制。提高光谱分辨率的主要方法是利用全息凹面光栅的几何像差理论^[9~11],对平场全息凹面光栅的像质进行优化^[12~16]。但是,单纯依靠优化光栅像质不可能无限地提高仪器分辨率。特别是对于宽光谱应用,使用光谱范围越宽,光谱分辨率越低。

鉴于此,为了在不增加仪器尺寸的前提下进一步提高微型平场全息凹面光栅光谱仪的分辨率,提出一种设计思路:将仪器的使用光谱范围分为两部分,分别由两块光栅成像。经优化设计后的两光栅具有相同的使用结构,不同的制作结构^[17]。这种优化方法能够使两块光栅在共同的成像面上均达到最优像质。两块光栅采用背靠背的安装方式固定在光栅座上,最大限度地节省了空间。

本文以一款使用光谱范围 400~1000 nm 的光栅光谱仪应用为例,设计制作了双光栅切换微型平场全息凹面光栅光谱仪所用的两块光栅,制作了原理样机,并进行装调测试。第一,利用光栅设计软件 PCGrate 对光栅进行衍射效率计算分析,以证明双光栅平场光谱仪在通光效率上的改善;第二,通过原理样机的装调测试,从理论和实验两方面验证双光栅平场光谱仪在光谱分辨率上的提高。

2 光栅结构参数设计

在图 1 所示的平场全息凹面光栅的制作结构和

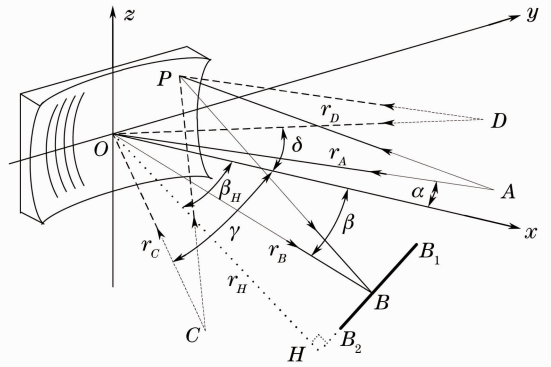


图 1 平场全息凹面光栅的使用结构与记录结构

Fig. 1 Recording and using geometry of the flat-field holographic concave grating

使用结构示意图中,建立直角坐标系。坐标系原点为光栅中心顶点 O ,以过 O 点的光栅表面法线为 x 轴, y 轴为垂直于光栅刻线的方向, z 轴为平行于光栅刻线的方向。 A 为入缝位于子午面 xOy 内的中心点, B 点为中心主光线 AO 经光栅衍射后的成像点。 P 点为光栅表面上任意一点,其坐标为 (x, y, z) 。两个点光源 C, D 在子午面 xOy 内,其发出的中心主光线分别为 CO, DO ,其长度表示为 r_C, r_D , γ, δ 是其与 x 轴的夹角,称为记录角。考虑一条光线,从 A 点发出,波长为 λ ,经过光栅中心 O 点衍射后 m 级衍射光的成像点为 B_1B_2 上 B 点。 AO 长度表示为 r_A , AO 与 x 轴的夹角表示为 α 。 OB 长度为 r_B ,衍射角为 β 。由 O 点向光谱面 B_1B_2 作垂线 OH ,其长度表示为 r_H ,与 x 轴夹角表示为 β_H 。以上定义中的各个角度的符号遵守下述规则:以 x 轴为基准,沿逆时针方向旋转得到的角度为正角度,沿顺时针方向旋转得到的角度为负角度。

在进行光栅结构参数的优化计算时,首先定义一个优化函数,其表达式为^[17]

$$W = W_1 + W_2 = \sum \omega_{1i} \sum (\delta y_1 + f_1 \delta z_1)^2 + \sum \omega_{2i} \sum (\delta y_2 + f_2 \delta z_2)^2, \quad (1)$$

式中 f_1 和 f_2 为弧矢方向聚焦性能相对于子午方向的权重因子,由于子午方向的聚焦决定光谱分辨率,因此 f_1 和 f_2 的值一般都小于 1。为了平衡各个波长处的像差校正效果定义不同波长的权重因子 ω_i ,大多数情况下其值可取为 1。下角标 1 或 2 分别对应双光栅光谱仪的两个光栅。根据文献^[18],像面上子午方向和弧矢方向的光线偏移量 δy 和 δz 分别为

$$\delta y = \frac{r_B - y \sin \beta}{r_B \cos \beta} \left[(r_B - y \sin \beta) \frac{\partial F}{\partial y} - y \sin \beta \frac{\partial F}{\partial z} \right], \quad (2)$$

$$\delta z = (r_B - y \sin \beta) \frac{\partial F}{\partial z}, \quad (3)$$

式中 F 为光线 APB 的光程函数。光栅结构参量的优化过程转化为优化函数 W 的最小化过程。

结合一个具体设计实例分析双光栅切换平场全息凹面光栅光谱仪在光谱分辨率和通光效率上的改善。表 1 给出了具体设计指标,光谱范围为 400~1000 nm,光谱长度为 20 mm,设计分辨率优于 5 nm。

为了使讨论更具意义,将双光栅设计与传统的单光栅设计进行分辨率和衍射效率的全方位对比。需要注意的是,由于光栅光谱仪分辨率很大程度上取决于焦距,所以比较两种设计应满足焦距相当的前提。表 2 给出双光栅平场光谱仪两个光栅(光栅 1 和光栅 2)的结构参数,其中光栅 1 的光谱范围是 400~640 nm,光栅 2 的光谱范围是 625~1000 nm。

表 2 双光栅平场光谱仪的优化参数

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

Mounting parameter		Grating 1		Grating 2	
r_A /mm	109.666	γ_1 /($^\circ$)	11.000	γ_2 /($^\circ$)	12.887
α /($^\circ$)	-5.157	δ_1 /($^\circ$)	25.562	δ_2 /($^\circ$)	22.152
r_H /mm	138.378	r_{C1} /mm	150.675	r_{C2} /mm	146.791
β_H /($^\circ$)	13.506	r_{D1} /mm	162.106	r_{D2} /mm	152.812
R_1 /mm	120.024	σ_1 /μm	1.835	σ_2 /μm	2.867
R_2 /mm	120.024	Wavelength range /nm	400~640	Wavelength range /nm	625~1000

表 3 单光栅平场光谱仪的优化参数

Table 3 Optimized system parameters of the single-grating flat-field spectrograph

Mounting parameter		Recording parameter	
r_A /mm	108.174	γ /($^\circ$)	6.369
α /($^\circ$)	-2.307	δ /($^\circ$)	12.128
r_H /mm	143.706	r_C /mm	162.185
β_H /($^\circ$)	5.730	r_D /mm	165.294
R /mm	122.600	σ /μm	4.453
Wavelength range /nm	400~1000		

下面就两种设计的光谱性能进行对比。首先,利用光线追迹获得所设计光栅成像的几何宽度。由于对光谱仪器而言,狭缝像的光谱宽度比几何宽度更具实际意义,因此利用凹面光栅的线色散公式

$$\partial \lambda / \partial l = \sigma \cos \beta / (m r_B), \quad (4)$$

计算每一波长处光谱像的光谱宽度(即用波长单位表示的光谱像宽度)。(4)式中 l 为像面上沿光谱色散方向的几何距离,计算结果如图 2 所示。图 2 纵坐标为 50 μm 狭缝经光栅所成光谱像的半峰全宽(FWHM),G1、G2、G3 分别代表光栅 1、光栅 2 和光栅 3,光栅 3 为单光栅光谱仪的平场全息凹面光栅。

表 3 给出单光栅光谱仪的光栅结构参数。从表 2 和表 3 可以看出,两组设计结果满足光谱仪结构相近、焦距相当的条件。

表 1 双光栅平场光谱仪的设计指标

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

Parameter	Value
Wavelength range /nm	400~1000
Spectral order	$m = +1st$
Spectrum length /mm	20
Grating aperture /mm	Φ30
Entrance slit width /μm	50
Entrance slit height /μm	400
Resolution /nm	<5

光栅 1 在其工作波段的光谱半峰全宽约为 0.9 nm,光栅 2 在其工作波段的光谱半峰全宽约为 1.4 nm,而光栅 3 的光谱半峰全宽约为 2.2 nm。对比 3 条像宽曲线不难看出,使用光栅 1 和光栅 2 的双光栅切换平场光谱仪光谱分辨率明显超过单光栅平场光谱仪,前者在短波范围所能达到的理论分辨率接近后者的 2.5 倍。

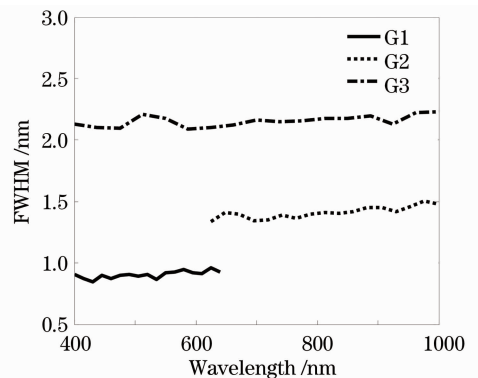


图 2 狭缝像的光谱半峰全宽曲线

Fig. 2 FWHM of a given image for the entrance slit

3 光栅槽形设计

3.1 光栅 1

光栅槽形设计的目的是使光栅获得尽可能高的衍射效率,效率计算时使用的工具是光栅通用设计软件 PCGrate。本文所述槽形设计基于两点前提条件:1)固定工艺条件,所制全息光栅为矩形槽;2)所制光栅槽形占宽比均为 0.5。此时,光栅槽形设计即为槽深设计。

光栅 1 使用波段为 400~640 nm,令衍射效率峰值波长为 450 nm。计算可知,入射角为 -5.157° 、镀铝光栅槽深为 120 nm 时,450 nm 处+1 级衍射效率最高。此时,计算光栅 1 的+1 级衍射效率随波长变化曲线,如图 3 所示。计算结果显示,光栅 1 的衍射效率理论值最高超过 37%,最低为 28%。

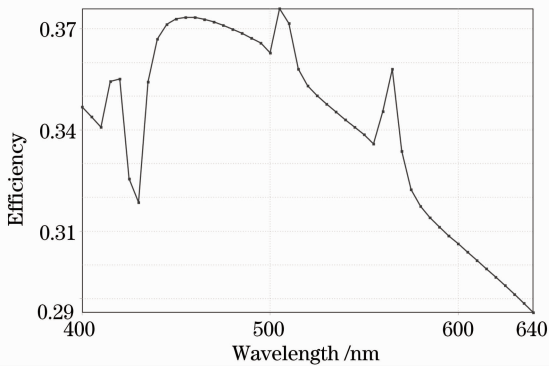


图 3 光栅 1 的+1 级衍射效率曲线

Fig. 3 +1st order diffraction efficiency of grating 1

3.2 光栅 2

光栅 2 使用波段为 625~1000 nm,令衍射效率峰值波长为 700 nm。计算可知,入射角同样为 -5.157° 、镀铝光栅槽深为 190 nm 时,700 nm 处+1 级衍射效率最高。此时,计算光栅 2 的+1 级衍射效率随波长变化曲线,如图 4 所示。计算结果显示,光栅 2 的衍射效率理论值最高超过 36%,最低为 30%。

3.3 透光效率的改善

首先对光栅 3 进行槽形设计。设计方法与光栅 1 和光栅 2 相同。光谱范围是 400~1000 nm,令衍射效率峰值波长为 500 nm,计算显示槽深应为 130 nm。计算光栅 3 的+1 级衍射效率随波长变化曲线,如图 5 所示。其衍射效率理论最大值为 35.5%,最小值为 18%。与光栅 1 和光栅 2 的衍射效率曲线进行对比不难看出,光栅 3 的衍射效率逊色很多。

分析这种差别,有以下主要原因:1)对于光栅来说衍射效率总是存在一个峰值,距离衍射效率峰值波长越远衍射效率越低。双光栅光谱仪恰恰是通过

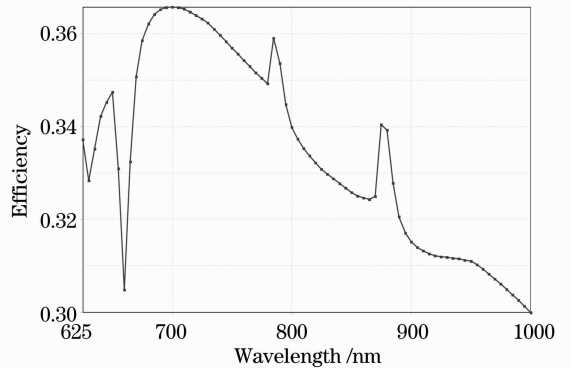


图 4 光栅 2 的+1 级衍射效率曲线

Fig. 4 +1st order diffraction efficiency of grating 2

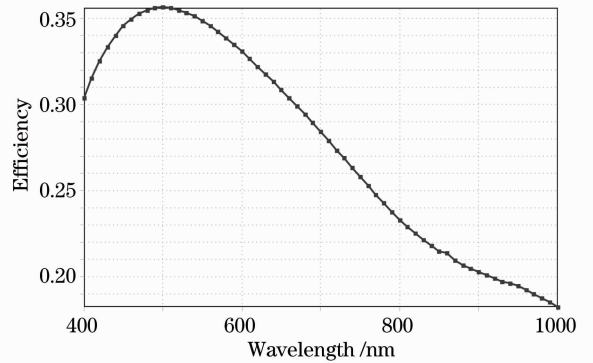


图 5 光栅 3 的+1 级衍射效率曲线

Fig. 5 +1st order diffraction efficiency of grating 3

压缩单块光栅的光谱范围提高了整个波段的衍射效率;2)对于焦距相当、光谱长度相同的双光栅光谱仪和单光栅光谱仪,后者所用的平场全息凹面光栅的刻线密度相比之下会更低,进而导致衍射级次增多,衍射效率必然降低。这两方面原因使得双光栅切换平场全息凹面光栅光谱仪在通光效率上较常规的单光栅光谱仪有显著提高。

4 实验结果与分析

图 6 为所设计双光栅切换平场全息凹面光栅光谱仪的结构图,其中 A 为入缝结构,可调整入缝与光栅的距离;G 为光栅装卡结构,底部与电机相连,两光栅背靠背装于结构 G 上,根据使用波段的不同转动卡具以实现两块光栅的切换,利用机械式定位结构解决光栅切换后的定位问题;D 为 CCD 探测器及其驱动电路。

实验中所使用的接收器件是 TOSHIBA 公司生产的型号为 TCD1208AP 的线阵 CCD,像素尺寸为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$,像素总数为 2160。利用汞灯的特征谱线对光谱仪进行波长标定。

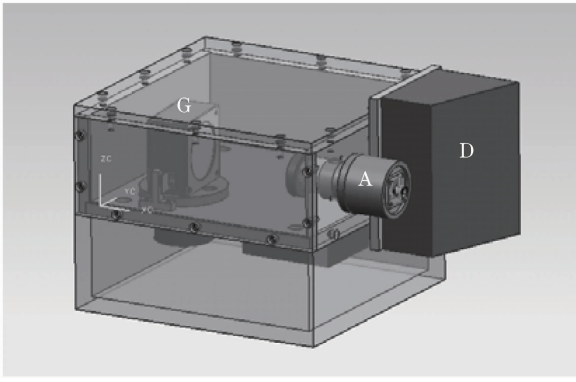


图 6 双光栅切换平场光谱仪结构图

Fig. 6 Geometry of the double-grating switching flat-field spectrograph

4.1 光栅 1 测试结果

实验测得的汞灯 $I-n$ 光谱图如图 7 所示。图中横坐标为 CCD 的像素序数 n ，纵坐标为量化后的相对光强 I 。利用窄带干涉滤光片提取汞灯发射光谱中波长分别为 404.66、546.07、579.07 nm 的 3 条谱线进行测试，表 4 给出此 3 条谱线的波长与 CCD 像素数 n 的对应关系。

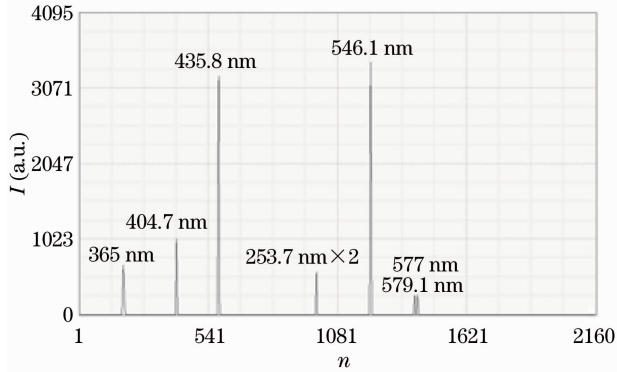


图 7 光栅 1 测到的汞灯谱图

Fig. 7 Measured mercury spectrum for grating 1

表 4 光栅 1 汞灯谱线与 CCD 像素序数对应关系
Table 4 Mercury spectrum versus pixel number for grating 1

Mercury spectrum/nm	Pixel number
404.66	407
546.07	1220
579.07	1415

利用基于最小二乘法的曲线拟合方法对波长 λ 与像素数 n 的函数关系进行二次拟合，所得函数表达式为

$$\lambda = 331.5502 + 0.1815n - 4.6679 \times 10^{-6} n^2. \quad (5)$$

利用(5)式对其他谱线进行定标，如图 7 所示。

分析光栅 1 的光谱成像性能，表 5 为实验测得不同波长处光谱像半峰全宽与几何光线追迹求得的理论值之间的对比。从表中可以看出，实验测量值与理论计算值之间较为接近，达到了较好的调试效果。

表 5 光栅 1 实测光谱像半峰全宽与理论值的比较

Table 5 Experimental and theoretical FWHM of spectral image for grating 1

Wavelength /nm	Experimental image	Theoretical image
	width /nm	width /nm
404.66	1.055	0.843
435.84	1.047	0.880
546.07	1.013	0.927
576.96	1.002	0.924
579.07	1.168	0.917

4.2 光栅 2 测试结果

将使用光栅切换至光栅 2，实验测得汞灯 $I-n$ 光谱图如图 8 所示。利用汞灯波长分别为 546.07 nm、579.07 nm 的 2 条谱线的一级光谱和波长分别为 435.84 nm、546.07 nm 的二级光谱进行波长标定。表 6 为谱线波长与 CCD 像素序数 n 的对应关系。利用二次曲线拟合方法对波长 λ 与像素数 n 的函数关系进行拟合，所得函数表达式为

$$\lambda = 535.8011 + 0.2829n - 7.6349 \times 10^{-6} n^2. \quad (6)$$

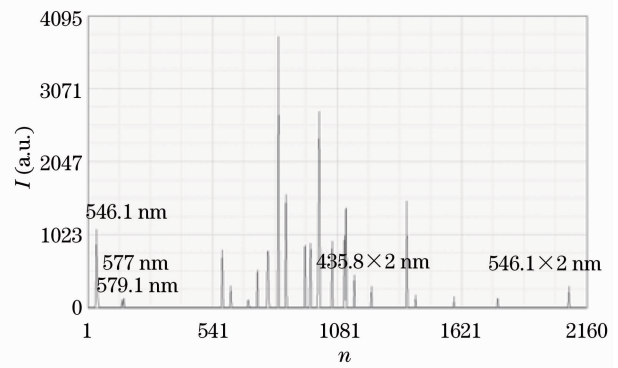


图 8 光栅 2 测到的汞灯谱图

Fig. 8 Measured mercury spectrum for grating 2

表 6 光栅 2 汞灯谱线与 CCD 像素序数对应关系

Table 6 Mercury spectrum versus CCD pixel number for grating 2

Mercury spectrum /nm	Pixel number
546.07	36
579.07	154
435.84 × 2	1228
546.07 × 2	2084

在使用光栅 2 时,为了排除短波二级光谱对光谱分析的干扰,入缝处加一块高通滤光片,将波长小于 600 nm 的光滤掉。图 9 为加高通滤光片后测得的汞灯光谱,对比图 8 与图 9 不难看出,用作波长标定的几个波长的一级与二级光谱被滤光片滤掉。另外,由于滤光片透射率的关系谱线相对强度有所减小。图 9 中标出了光强相对较强的 5 条谱线的波长。

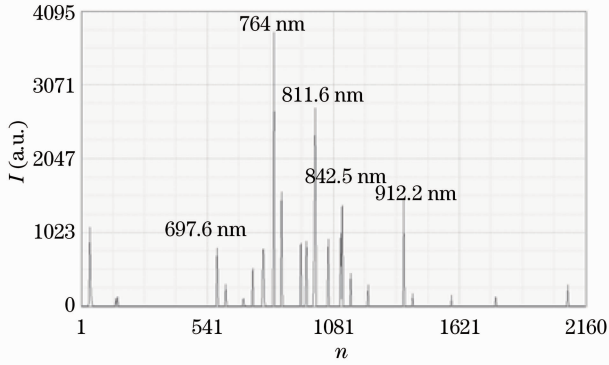


图 9 加高通滤光片后光栅 2 测到的汞灯谱图
Fig. 9 Measured mercury spectrum with high-pass filter for grating 2

分析光栅 2 的光谱成像性能,表 7 为实验测得不同波长处光谱像半峰全宽与几何光线追迹求得的理论值之间的对比。从表中可以看出,实验测量值与理论计算值之间较为接近,亦达到了较好的调试效果。

最后,对波长重复性进行测试。该仪器中光栅转台采用直流电机驱动,机械定位,结构简单可靠,容易保证较高的光栅切换定位精度。实验测得的波长重复性误差小于 2 pixel,约 0.3 nm。

表 7 光栅 2 实测光谱像半峰全宽与理论值的比较
Table 7 Experimental and theoretical FWHM of spectral image for grating 2

Wavelength /nm	Experimental image	Theoretical image
	width /nm	width /nm
697.6	1.632	1.346
764	1.613	1.404
811.6	1.597	1.411
842.5	1.587	1.442
912.2	1.822	1.433

5 结 论

从理论计算和实验两方面研究了双光栅切换平场全息凹面光栅光谱仪在光谱分辨率和通光效率上的改善。

1) 通过优化设计得到两个使用结构相同、光谱

范围不同的平场全息凹面光栅。利用严格的几何光线追迹方法将其与光谱范围相同、光谱长度相同和焦距相当的单光栅平场光谱仪进行了比较,结果显示本文讨论的双光栅平场光谱仪能够显著提高光谱分辨率。设计制作并调试了光谱范围为 400~1000 nm 的双光栅切换微型平场光谱仪,实验结果与理论计算相吻合。该设计方法不仅适用于双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的设计,同样适用于多光栅光谱仪的设计。

2) 基于平场全息凹面光栅的槽形设计,比较了双光栅平场光谱仪两光栅与单光栅光谱仪光栅在衍射效率上的表现。计算结果表明,前者在使用波段均能达到较高衍射效率,后者在远离峰值波长波段衍射效率下降严重。鉴于平场全息凹面光栅是光谱仪中唯一的色散及成像元件,光栅衍射效率的提高无疑将大大改善光谱仪的通光效率。

参 考 文 献

- Jia Hui, Yao Yong. Characteristics of typical optical systems with diffractive gratings of micro-spectrometers and improvement of spectrometer's resolution [J]. *Spectroscopy & 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
- Chen Yuerui, Sun Bin, Han Tao *et al.*. Densely folded spectral images of the CCD spectrometer working in the full 200~1000 nm wavelength range with high resolution [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25): 10049~10054
- Liu Dongmei, Xia Rihui, Pan Yonggang *et al.*. Study of digital spectrometer based on charge coupled device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 84~89
- 刘冬梅, 夏日辉, 潘永刚 等. 基于电荷耦合器件的数字光谱分析仪的研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 84~89
- Cui Jian, Dong Xiaopeng, Wu Zhaoxi *et al.*. A high-precision method for determining the FBG peak wavelength shift based on FBG actual reflection spectrum match [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 152~156
- 崔 剑, 董小鹏, 吴兆喜 等. 基于 FBG 实际反射谱匹配的 FBG 峰值波长偏移量的高精度确定方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 152~156
- Chang Lingying, Zhao Baochang, Yang Jianfeng *et al.*. Optical system design of a two-linear array stereoscopic mapping CCD camera [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 245~249
- 常凌颖, 赵葆常, 杨建峰 等. 两线阵立体测绘 CCD 相机光学系统设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 245~249
- 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
- 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
- J. M. Lerner, R. J. Chambers, G. Passereau. Flat-field imaging microscopy using aberration corrected holographic

- gratings [C]. *SPIE*, 1981, **268**: 122~128
- 9 H. Noda, T. Namioka, M. Seya. Geometric theory of the grating [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(8): 1031~1036
- 10 T. Namioka, M. Koike, D. Content. Geometric theory of the ellipsoidal grating [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(31): 7261~7274
- 11 S. Masui, T. Namioka. Geometric aberration theory of double-element optical systems [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(9): 2253~2268
- 12 N. K. Pavlycheva. Design of flat-field spectrograph employing a holographic grating [J]. *Sov. J. Opt. Technol.*, 1979, **46**(7): 394~396
- 13 W. R. McKinney, C. Palmer. Numerical design method for aberration-reduced concave grating spectrometers [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(15): 3108~3118
- 14 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
- 15 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
- 16 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
- 17 Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Optimization of double-grating flat-field holographic concave grating spectrograph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 29~33
孔 鹏, 巴音贺希格, 李文昊 等. 双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 29~33
- 18 M. Chrisp. Aberrations of holographic toroidal grating systems [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(10): 1508~1518

栏目编辑: 何卓铭