

文章编号 1004-924X(2010)09-1989-07

## 中阶梯光栅光谱仪的光学设计

唐玉国<sup>1</sup>, 宋楠<sup>1,2</sup>, 巴音贺希格<sup>1</sup>, 崔继承<sup>1,2</sup>, 陈今涌<sup>1</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 100039)

**摘要:**为了在更宽波段范围内获得较高的分辨率,实现全谱直读,对中阶梯光栅光谱仪进行了研究。简述了中阶梯光栅及中阶梯光栅光谱仪的基本原理,分析并比较了这种光谱仪与普通平面闪耀光栅光谱仪的区别。利用光学成像原理与消像差理论设计了 Czerny-Turner 结构形式的中型高分辨率中阶梯光栅光谱仪原理样机的光学系统。该光学系统工作在原子谱线最为密集的 200~500 nm 波长处;为简化计算,在设计中消除了 350 nm 波长的所有像差;光线对中阶梯光栅在准 Littrow 条件下入射,以获得高衍射效率;使用折反射棱镜作为交叉色散元件来分离重叠的级次,在 CCD 探测器上获得了二维光谱面。该光学系统有较好的平场特性及点对点成像能力,在整个工作波长分辨率可达到 2 000~15 000,满足设计要求。该仪器可用于原子发射和吸收光谱的研究工作,通过替换不同的探测器及增加外围电路与软件平台,仪器的工作性能可进一步提高。

**关键词:**中阶梯光栅光谱仪;中阶梯光栅;光学设计;交叉色散

**中图分类号:**TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101809.1989

## Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph

TANG Yu-guo<sup>1</sup>, SONG Nan<sup>1,2</sup>, Bayanheshig<sup>1</sup>, CUI Ji-cheng<sup>1</sup>, CHEN Jin-yong<sup>1</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 100039, China)*

**Abstract:** In order to acquire high resolution spectra in a wider spectral range, the echelle based spectrographs were researched. The general theories of the echelle gratings and the echelle spectrographs were introduced briefly, and the distinction between echelle spectrograph and common plane grating spectrograph was analyzed and compared. A high-resolution echelle spectrograph of Czerny-Turner (C-T) structure was designed by using principles of optical imaging and aberration, and its wavelength ranges were set to be 200~500 nm which were the most intensive ranges of atomic spectra. To simplify the calculation work, the aberration of 350 nm wavelength beam was eliminated. Furthermore, the incident beam was set to work at a quasi-Littrow angle to acquire high diffraction efficiency. As a cross-disperser, a catadioptric prism was used to separate the overlapped diffraction orders, therefore, a two-dimensional spectral surface was obtained by CCD. The optical system shows the merits of flat

收稿日期:2009-11-17;修订日期:2009-12-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60478043);“十一五”国家科技支撑计划重大项目(No. 2006BAK03A02);  
国家创新方法工作专项项目(No. 2008IM040700);国家重大科研装备研制项目(No. ZBYZ2008-1);中国科学院  
院重大科研装备研制项目(No. YZ200804);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20070523, No. 20086013)

field and point-to-point imaging, and its resolution could be 2 000–15 000 in the whole wavelength ranges. This instrument is aimed to research on the absorption and emission spectra of atoms, and can improve its performance by replacing different detectors and adding peripheral circuits and software.

**Key words:** echelle grating spectrometer; echelle grating; optical design; cross-dispersion

## 1 引言

普通闪耀光栅用于光谱仪器时,为了避免级次重叠只能使用低衍射级次(如 $-1$ 级或 $-2$ 级)。若要实现光谱仪器高的色散率和光谱分辨率,就需要采用高刻线密度闪耀光栅,加大成像物镜焦距,但由此会加大仪器体积<sup>[1]</sup>。在当今科学仪器普遍向微小化、便携式和实时测量方向发展的形势下,光谱仪器的小型化、高分辨率、快速测量及信号接收方式等是仪器设计者必须考虑的问题。

中阶梯光栅是由美国光栅专家 G. R. Harrison 于 1949 年提出的一种特殊光栅,其刻线密度较低,具有大入射角度和高衍射级次(如几十级到几百级),因而有很高的色散率和分辨率。中阶梯光栅光谱仪在结构方面具有体积小、质量轻、结构简单、无移动部件,面阵接收的特点;在性能方面具有高色散、高分辨率、低检出限、宽波段、全波闪耀和瞬态光谱的特点;有利于实现高度智能化和自动化<sup>[2-3]</sup>,代表了先进光谱技术的发展趋势。

中阶梯光栅光谱仪在 20 世纪 70 年代开始在天文领域率先得到应用。到 80 年代,随着光栅刻划技术的发展,世界上许多 2~4 m 级天文望远镜都配备了中阶梯光栅光谱仪;至 20 世纪末,全世界已有 10 架配备了高分辨率中阶梯光栅光谱仪的 8~10 m 级光学/红外天文望远镜投入使用。除天文应用之外,从 90 年代开始,随着二维阵列探测器技术,尤其是 CCD 技术的发展,欧美发达国家开始将中阶梯光栅光谱仪应用于天文、地矿、化工、冶金、医药、环保、农业、食品卫生、生化、商检和国防等诸多领域<sup>[4]</sup>。

我国于 1995 年研制成功了 2.16 m 望远镜折轴阶梯分光仪,该仪器是我国首次研制的大型中阶梯光栅光谱仪器,配备于北京天文台兴隆观测基地 2.16 m 望远镜,为我国天文界开展高分辨

率光谱研究提供了有效的手段。但是,由于其结构相对复杂,光学装调难度大,成本高,尚无法进入商业领域。在民用方面,国内对中阶梯光栅光谱仪器的研究、开发和应用相对滞后。近几年,中科院长春光机所在中小型中阶梯光栅光谱仪的研发和产品化方面做了一些工作。本文就小型化中阶梯光栅光谱仪的光学系统进行了模拟与性能分析,建立了满足设计要求的光学模型,为中阶梯光栅光谱仪的研制提供了理论基础与设计参考。

## 2 中阶梯光栅光谱仪工作原理

中阶梯光栅光谱仪的光学系统结构如图 1 所示。它由入射针孔、准直镜、中阶梯光栅、反射棱镜、聚焦镜和面阵 CCD 组成,光学系统采用 Czerny-Turner(C-T)结构形式,是最广泛应用的单色器结构形式之一。该结构简单紧凑,无移动部件,光学器件少,入射光和出射光夹角为定值,有利于后端调试和标定,并且通过调整各部件的相对位置,可以有效控制像差及获得二维平像场。C-T 结构有 U 型和 Z 型(交叉束)两种形式。交叉束结构有利于缩小仪器体积,降低杂散光,但是,在消除像差方面不如 U 型结构有利<sup>[5]</sup>,因此,

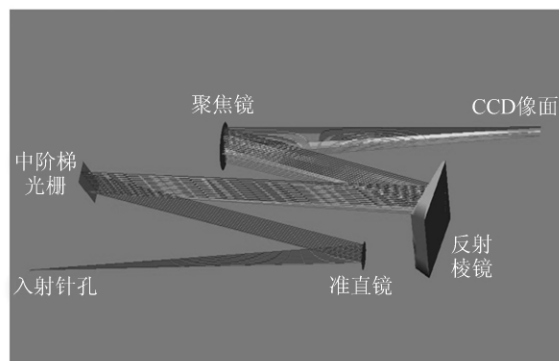


图 1 中阶梯光栅光谱仪基本结构

Fig. 1 Basic structure of echelle spectrograph

本文选择了 U 型 C-T 结构形式。

由光源经针孔和准直镜得到的平行光束入射到中阶梯光栅上进行主方向色散;由于采用了高衍射级次的中阶梯光栅,其衍射谱存在严重的级次重叠,因此需要用一低色散元件(棱镜或平面光栅)将重叠在一起的各级次光谱分离开来,即进行交叉色散(相对于中阶梯光栅的色散方向或被称为横向色散),使入射单束光分解为二维光谱,按波长与级次的顺序由聚焦镜聚焦在 CCD 平面上。由于面阵 CCD 的像素数远大于线阵 CCD 的像素数,因此,中阶梯光栅光谱仪可以在一次曝光中获得很宽波段的光谱信号。

### 3 光学系统的设计

研制的中阶梯光栅光谱仪采用中阶梯光栅/棱镜交叉色散系统,工作波长为 200~500 nm,中阶梯光栅刻线密度为 54.49 g/mm,分辨率为 2 000~15 000。

中阶梯光栅光谱仪的主要色散元件是中阶梯光栅和色散棱镜,可实现两个相互垂直垂直方向的色散,同时使用曲率半径相同的离轴抛物镜作为准直镜和成像物镜,使各波段的光谱成像在面阵 CCD 上。

#### 3.1 中阶梯光栅中心波长和闪耀级次的确定

将经过中阶梯光栅刻槽断面上一点的刻槽斜面与光栅决定的平面定义为中阶梯光栅的法面。若入射光位于法面内,则衍射光也位于法面内。此时若光以闪耀角入射,则衍射角等于入射角,即光栅工作于 Littrow 条件下时,光栅效率最高。但严格的 Littrow 条件将使光路难以合理安排,因此在实际应用中,常使入射光与光栅法面有一不为 0 的夹角  $\gamma$ ,而入射光在法面上的投影为闪耀角,可称为“准 Littrow 条件”。准 Littrow 条件仍然可以达到最高的效率,并且有利于安排光路<sup>[6]</sup>。

在准 Littrow 条件下的光栅方程为

$$d(\sin i + \sin \theta) \cos \gamma = m\lambda, \quad (1)$$

其中,  $i$  为入射角,  $d$  为光栅常数,本项目所选择的中阶梯光栅的刻线密度是 54.49 g/mm,故光栅常数为 1/54.49;  $\theta$  为光栅衍射角,所选中阶梯光栅的闪耀角为 46°;  $m$  为衍射级次;  $\lambda$  为波长。

由于中阶梯光栅光谱仪的工作波段选为 200

~500 nm,因此,将设计参考波长选择为 350 nm,将其代入公式(1)得到相应的衍射级次  $m$  为 75。

综上,根据公式(1)能计算得到不同波长所对应的中阶梯光栅的衍射级次<sup>[7-8]</sup>。

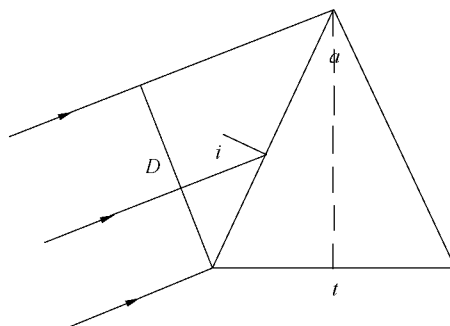


图2 棱镜色散

Fig. 2 Dispersion of prism

#### 3.2 交叉色散元件

由中阶梯光栅进行主方向的色散之后,为将重叠在一起的级次分开,需要由横向色散元件进行与主方向垂直的交叉色散,交叉色散元件选用棱镜。

以  $R = \lambda/d\lambda$  表示棱镜的波长分辨能力,则有:

$$R = \lambda/d\lambda = (\lambda/\Delta\theta)(\Delta\theta/\Delta n)(\Delta n/\Delta\lambda)$$

$$R = D \cdot \frac{2\sin \frac{\alpha}{2}}{\cos i} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta\lambda}$$

由图2可知:

$$\frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{D}{\cos i}$$

即:

$$\frac{2D\sin \frac{\alpha}{2}}{\cos i} = t$$

所以得:

$$R = t \cdot \frac{\Delta n}{\Delta\lambda}, \quad (2)$$

其中,  $t$  为色散棱镜底边之长,为了提高棱镜的分辨率,选择内反射式的利脱尔棱镜,如图3所示。棱镜的材料是石英玻璃,这是一种具有光学晶轴的材料,这种棱镜结构形式对光学晶轴的定向要求比传统三棱镜要低,这是因为在装校仪器时,可以校正部分光学晶轴的误差。

由折反射定律,可得到梯形反射棱镜色散公式:

$$r_\lambda = \arcsin \left[ n_\lambda \times \sin \left( \arcsin \left( \frac{\sin \phi}{n_\lambda} \right) - \alpha \right) \right], \quad (3)$$

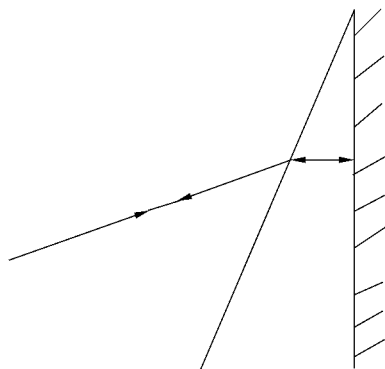


图 3 利脱尔棱镜

Fig. 3 Li Er-off prism

其中,  $\phi$  为光线入射棱镜的角度,  $r$  为棱镜出射光线的角度,  $\alpha$  为棱镜的顶角。

入射光经过两个方向的交叉色散之后即可形成二维光谱, 由聚焦物镜聚焦在出缝的面阵 CCD 上。由于进行了两个方向的色散, 整个系统的光路并不在同一平面上, 因此各元件在仪器高度方向为错层分布<sup>[9]</sup>。

### 3.3 消像差设计

中阶梯光栅光谱仪采用 C-T 结构形式, 其中准直镜和聚焦镜为反射镜, 为了减小彗差的影响, 它们采用相同的光学结构, 即具有相同的曲率半径。

在反射镜的选取上采用离轴抛物镜的结构形式, 这是因为对于两个反射镜如果选用球面镜时, 球差恒存在, 同时使用时会造成球差相加, 而用抛物镜代替球面镜可以消除球差的影响。彗差是非对称像差, 它影响系统的分辨率, 为了减小彗差对于光谱仪分辨率的影响可采用等光程消彗差的方法, Lindblom 给出了 C-T 结构光学系统的消彗差公式:

$$\frac{\tan \epsilon_1 \cos^2 i}{\rho_1} \left[ \frac{\cos \epsilon_1}{l} + \frac{\sin^2 \epsilon_1}{R_1} - \frac{\cos^2 \epsilon_1}{\rho_1} \right] - \frac{\tan \epsilon_2 \cos^2 \theta}{\rho_2} \cdot \left[ \cos \epsilon_2 \left( \frac{2 \cos \epsilon_1}{\rho_1} - \frac{1}{l} \right) \frac{\cos^2 \theta}{\cos^2 i} + \frac{\sin^2 \epsilon_2}{R_2} - \frac{\cos^2 \epsilon_2}{\rho_2} \right] = 0, \quad (4)$$

式中  $\epsilon$  为离轴角,  $R$  为子午面曲率半径,  $\rho$  为弧矢面曲率半径(下角标 1, 2 分别对应准直镜和聚焦镜)。

对于准直镜和聚焦镜的消像散, 可使用式(5)来计算:

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{2}{R \cos \epsilon}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{j} + \frac{1}{j'} = \frac{2 \cos \epsilon}{\rho}, \quad (6)$$

对中阶梯光栅, 可以利用球面光栅的聚焦方程:

$$\frac{\cos^2 i}{r} + \frac{\cos^2 \theta}{r'} = \frac{\cos i + \cos \theta}{R}, \quad (7)$$

令  $R = \infty$  即可<sup>[10-11]</sup>。

### 3.4 光学系统设计结果

通过上述分析及计算, 设计了中阶梯光栅光谱仪, 其光学设计参数如下:

中阶梯光栅常数:  $d = 1/54.49 \text{ mm}$ ;

光栅入射角:  $i = 46.058^\circ$

光栅转角:  $\gamma = 6.7^\circ$

棱镜入射角:  $\phi = 27.76^\circ$

棱镜半顶角:  $\alpha/2 = 12.2^\circ$ 。

准直镜和聚焦镜焦距:  $f = 321.8 \text{ mm}$

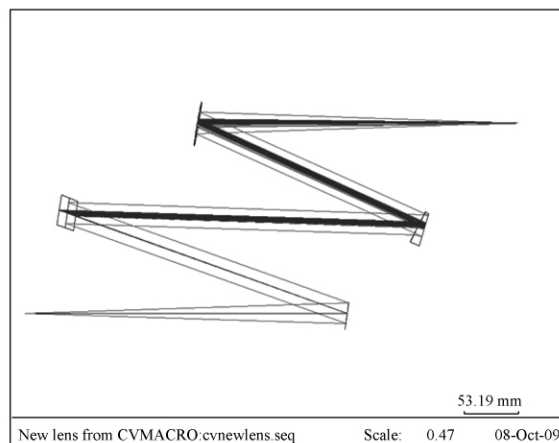


图 4 光学系统对 75 级光线的追迹

Fig. 4 Ray tracing of 75 order

光学系统结构如图 4 所示。

其中参考波长 350 nm 和边缘波长 200, 500 nm 处的点列图如图 5 所示, 从图中可以看出在参考波长位置和边缘波长位置处系统像差校正较好。

为了计算系统的分辨率, 对 200, 350, 500 nm 及其附近的谱线进行光线追迹, 得到点列图, 如图 5 所示。

利用公式计算相对应的分辨率,

$$R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda}, \quad (8)$$

所得理论分辨率数值如表 1 所示。

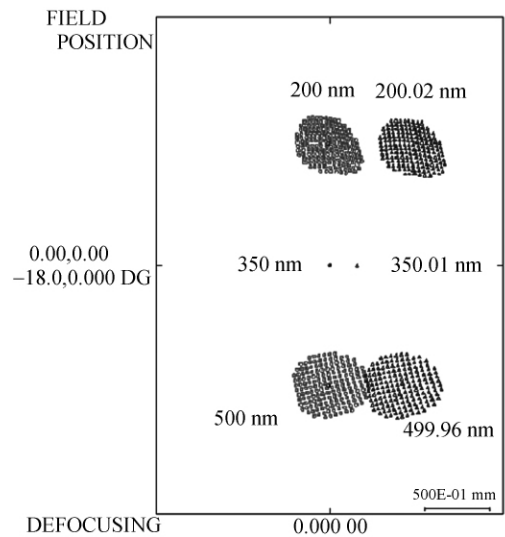


图 5 参考波长与边缘波长点列图  
Fig. 5 Spot diagrams of reference and edge wave-length

表 1 光学系统的理论分辨率  
Tab. 1 Theoretical resolution of optical system

级次	波长	理论分辨率
52	500	12 500
75	350	35 000
131	200	10 000

考虑到各种可能影响分辨率的因素,可以看出系统分辨率的数值是能够满足设计指标要求的。

3.5 入射狭缝对于分辨率的影响

入射针孔直径会影响所测得谱线宽度,从而影响光谱仪的分辨率。设入射针孔直径为  $\xi$ ,针孔上每一点均可看作发光点,可得主截面上光束入射的角宽度:

$$\Delta\theta=\frac{\xi}{f}, \tag{9}$$

将式(1)两端对  $\theta$  求导,由上式可计算出入射针孔直径所引起的谱线宽度变化量:

$$\Delta\lambda=\frac{\xi d\cos\theta\cos\gamma}{mf}, \tag{10}$$

由针孔进入光学系统的光通量:

$$\Phi=(\frac{\pi SD}{4f})^2B, \tag{11}$$

式中  $D$  为准直镜的直径,  $S$  为针孔面积,  $B$  为入射光源亮度<sup>[12]</sup>。

普通平面光栅光谱仪想提高分辨率需要减小

入射针孔直径,由此产生的弊端是到达探测器的光能变弱,检测能力下降,因此,通常光谱仪必须在能量输出和分辨率之间折中,不能同时获得最佳。然而,中阶梯光栅由于色散率和分辨率高,即使入射针孔较大时,也有较强的光能输出和较高的检测能力。在本仪器中初步选用  $45\ \mu\text{m}$  针孔,经前面公式计算其对 200,350 和 500 nm 波长光谱引起的谱线宽度变化分别约为 0.034,0.024,0.015 nm,可以忽略不计,不影响系统的分辨率。

4 实验结果

目前中阶梯光栅光谱仪原理样机已装配完成,图 6 为初步拍摄的汞灯谱图,图中所标出的为汞灯的特征谱线(546.1 nm)。为使光谱仪能够满足实际应用的需要,还需要进一步完善后端电路及软件支撑。

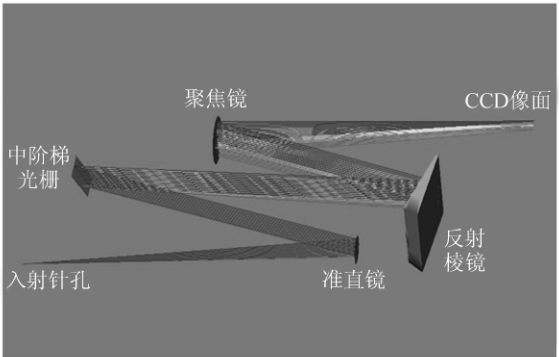


图 6 初步测试中拍摄的汞灯光谱图  
Fig. 6 Spectra of mercury lamp acquired through preliminary test

5 结 论

本文在理论计算及分析的基础上设计了中阶梯光栅光谱仪的光学系统,并对其设计结果进行了分析。初步实验验证表明,该光谱仪可实现对 200~500 nm 波段光谱的一次读取,系统在整个工作波长内分辨率可以达到 2 000~15 000,满足预期指标要求,同时整体结构尺寸简单紧凑,便于实现安装调整,为今后中阶梯光栅光谱仪的设计工作奠定了坚实的基础。该种结构类型的光谱仪,充分发挥了中阶梯光栅的优势,符合光谱仪器

发展趋势,随着其设计技术的进一步成熟会有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] HARRION G R, ARCHER J E, CAMUS J. A Fixed-focus broad-range echelle spectrograph of high speed and resolving power[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1952, 42(10): 706-712.
- [2] ZHU Y, XU W. Optical and IR telescope instrumentation and detectors[M]. *Washington, USA: SPIE*, 2000: 141-147.
- [3] 李娜娜, 安志勇, 崔继承. 中阶梯光栅光谱仪光学系统的安装及检测[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(3), 531-536.  
LI N N, AN Z Y, CUI J C. Aligning and testing of optical system of echelle spectrography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3), 531-536. (in Chinese).
- [4] 武旭华, 朱永田, 王磊. 高分辨率阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(5): 442-447.  
WU X H, ZHU Y T, WAGN L. Optical design of high resolution echelle spectrograph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 442-447. (in Chinese)
- [5] ARTHUR B S, LAWRENCE R M, LEANN D. Optimization of the czerny-turner spectrometer[J]. *JOSA*, 1969, 9(9): 1189.
- [6] 赵复垣. 刻划阶梯光栅的原理和应用特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 1993, 13(3), 101-107.  
ZHAO F Y. The principle and characters for applying of echelle[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1993, 13(3), 101-107. (in Chinese)
- [7] 谢品, 倪争技, 黄元申, 等. 中阶梯光栅的应用研究进展[J]. *激光杂志*, 2009, 30(2): 4-6.
- XIE P, NI Z J, HUANG Y S, *et al.*... Application research progress in the echelle grating[J]. *Laser Journal*, 2009, 30(2): 4-6. (in Chinese)
- [8] 杨德才. 中阶梯光栅及其应用[J]. *现代科学仪器*, 1992, 11(4): 29-31.  
YANG D C. The echelle and its application[J]. *Modern Scientific Instruments*, 1992, 11(4): 29-31. (in Chinese)
- [9] GIL M A, SIMON J M, FANTINO A N. Czerny-Turner spectrograph with a wide spectral range[J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27(19): 4069.
- [10] ENGMAN S, LINDBLOM P. Multiechelle grating mountings with high spectral resolution and dispersion[J]. *Appl. Opt.*, 1982, 21: 4363-4367.
- [11] 胡中文. 广义光栅方程与光栅密度测试及二维 CCD 全谱仪的研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.  
HU Z W. *Study of generalized grating equation, measurement of grating spacings and CCD echelle spectrograph* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005. (in Chinese)
- [12] 杨晓冬, 李正灯. 光栅光谱仪入射与出射狭缝宽度对测量谱线线宽影响研究[J]. *嘉应学院学报*, 2008, 26(6): 38-41.  
YANG X D, LI Z D. Investigation on the entrance slit width and exit slit width of grating spectrometer on the measured spectral line width[J]. *Journal of Jiaying University (Natural Science)* 2008, 26(6): 38-41. (in Chinese)

### 作者简介:



唐玉国(1967—),男,吉林蛟河人,理学博士,研究员,博士生导师,主要从事光谱仪器及医用光谱技术的研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com



宋楠(1985—),男,吉林人,硕士研究生,主要从事光谱仪器光机结构设计的研究。E-mail: kane\_martin@163.com



巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,理学博士,研究员,博士生导师,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术的研究。E-mail: bayin888@sina.com



陈今涌(1942—),男,上海人,研究员,主要从事光谱仪器设计的研究。E-mail: chenjy@ciomp.ac.cn



崔继承(1976—),男,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,主要从事光学设计理论及光谱仪器设计的研究。E-mail: jicheng\_cui@yahoo.com.cn

## ● 下期预告

# 微小型光纤陀螺组合分时复用技术

马东营,宋凝芳,金 靖,宋镜明

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

为了有效减小多轴光纤陀螺组合的功耗、体积和重量,进一步实现光纤陀螺组合微小型化。应用分时复用技术,提出了一种基于  $3 \times 3$  耦合器,工作在 850 nm 短波长的光纤陀螺分时复用组合结构。通过对陀螺输出数据处理方法的分析,得到分时复用光纤陀螺组合相对极限零偏稳定性。同时建立分时复用光纤陀螺切换模型,揭示了分时复用导致光纤陀螺轴向切换必然存在一个过渡过程。分析了过渡过程对陀螺组合静态、动态特性的影响,得到的结果显示,光纤陀螺组合相对零偏稳定性增大了 2.1 倍,最大输入信号检测带宽为 1.1 kHz,标度因数的不对称性和非线性度均小于  $5 \times 10^{-5}$ 。最后通过仿真实验进行了验证,结果表明这种技术可以满足微小型多轴光纤陀螺组合在中低精度领域中应用的需求。