

小型分段式高分辨率中阶梯光栅光谱仪的设计

曹海霞^{1,2*}, 赵英飞², 何淼^{1,2}, 王卫东², 王超³

¹钢铁研究总院, 北京 100081;

²钢研纳克检测技术股份有限公司, 北京 100094;

³长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

摘要 由于棱镜具有色散不均匀的特点,中阶梯光栅光谱仪的二维谱图在长波波段不可避免地存在相邻衍射级次间相互干扰的情况。为了克服这一缺点,同时充分利用探测器像面,设计了一种小型分段式的中阶梯光栅光谱仪。通过对中阶梯光栅和棱镜色散原理的详细分析,确定了二者参数与探测器之间的关系,结合双缝间隔设计方法,采用双狭缝切换的方式,给出分段式的中阶梯光栅光谱仪的设计方法。利用此方法将系统的波段范围 165~800 nm 分为 165~230 nm 和 210~800 nm 两部分,焦距设计为 200 mm,分别采集双波段的二维谱图。使用光学设计软件对光学系统进行仿真,结果表明,200 nm 处的实际光谱分辨率可达 0.015 nm,满足设计指标的要求。

关键词 衍射; 双缝切换; 衍射级次干扰; 中阶梯光栅; 二维谱图

中图分类号 O433.1; TH744.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1105002

Design of Small-Size High Resolution Echelle Grating Spectrometer with Divided Spectral Coverage

Cao Haixia^{1,2*}, Zhao Yingfei², He Miao^{1,2}, Wang Weidong², Wang Chao³

¹Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

²NCS Testing Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China;

³Institute of Space Electro Optical Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The interference between adjacent diffraction orders is unavoidable in the two-dimensional spectrogram of an echelle grating spectrometer in the long wavelength band due to the non-uniform dispersion of prisms. To avoid this drawback and simultaneously take full advantage of the detector's imaging plane, we design a small-size echelle grating spectrometer with a divided spectral coverage is designed. The relationship between the detector and the parameters of the above two is established via the detailed analysis of the dispersion principle of echelle grating and prism. The design approach of the echelle spectrometer with a divided spectral coverage is proposed with the design idea of double-slit interval and by the way of double-slit switching. With this design approach, the wavelength range of 165-800 nm for the system is divided into 165-230 nm and 210-800 nm, the focus length is set as 200 mm, and the two-dimensional spectrograms at the two bands are collected, respectively. The ray tracing simulation to the optical system is carried out and the results show that the true spectrum resolution at 200 nm is 0.015 nm, which meets the design requirements.

Key words diffraction; double-slit switching; diffraction order interference; Echelle grating; two-dimensional spectrogram

OCIS codes 050.1950; 300.6320; 080.2720; 120.4570

1 引言

中阶梯光栅光谱仪以其宽波段、高光谱分辨率、高灵敏度及体积小等优越的特性^[1-8],在电感耦合等

离子体(ICP)光谱、火花光谱、激光光谱、原子吸收光谱等系列光谱分析技术中得到广泛应用^[9-12]。中阶梯光栅光谱仪采用棱镜和中阶梯光栅交叉色散的光路结构,在探测器像面上形成二维谱图,实现了高

收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-07-04; 录用日期: 2018-07-12

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ47078103)、国家自然科学基金青年科学基金(61701045, 61805028)

* E-mail: caohaixia@ncschina.com

分辨率的瞬态成像。但是作为分光元件之一的棱镜,在长波波段色散能力弱,在短波波段色散能力强,故二维谱图衍射级次之间的间隔随着波长的增大而逐渐减小,在长波附近,不可避免地造成衍射级次之间的干扰,对光谱分析的结果产生影响。在现有探测器的基础上,由于相邻衍射级次干扰,利用中阶梯光栅及棱镜交叉色散的结构难以实现 165~800 nm 波段的高分辨率一次性成像。为了实现这一目标,不同的研究机构采用了不同的实现方法,如像面平移法、改变棱镜姿态方式、复合棱镜方式等^[13-15],但是以上方式均存在较大的限制。

鉴于此,本文设计出一种小型分段式中阶梯光栅光谱仪,通过双狭缝切换的方式分别实现 165~230 nm,210~800 nm 波段的二维成像,并在现有探测水平情况下,实现了 165~800 nm 波段内的快速测量。该结构形式虽然不能一次性获得全波段的谱图信息,但是提高了探测器的像面利用率,同时将全波段分为两个波段,两次分别获取谱图信息,能够有效避免长波段相邻衍射级次之间的干扰,极大地提高了中阶梯光栅光谱仪的光谱分辨能力。系统的焦距设计为 200 mm,符合仪器小型化的发展趋势。

2 分段式中阶梯光栅光谱仪的设计方法

中阶梯光栅光谱仪以低色散棱镜进行纵向色散,搭配高色散的中阶梯光栅进行横向色散,在像面上形成二维光谱图像。利用这种分光形式,中阶梯光栅光谱仪有效克服了传统高分辨率光谱仪体积庞大的缺点。本研究利用中阶梯光栅与棱镜相搭配交叉色散系统,设计了一种分段式中阶梯光栅光谱仪。

2.1 中阶梯光栅基本原理及参数设计

中阶梯光栅在光谱仪中使用高衍射级次提高系统的光谱分辨率,所以相较于常规光栅,中阶梯光栅的自由光谱区比较窄,而且各衍射级次极易重叠在一起。为了充分发挥中阶梯光栅光谱仪高色散、高分辨率的优势,必须将重叠的衍射级次分开^[16]。因此需引入另一维度的色散元件进行交叉色散,在交叉色散的结构中,中阶梯光栅工作在锥面衍射状态。根据矢量衍射理论可推导出任意角度入射的光栅方程^[3]

$$\begin{cases} m\lambda = d(\sin\alpha\cos\omega + \sin\beta\cos\omega_m) \\ \sin\beta\sin\omega_m = \sin\alpha\sin\omega \end{cases}, \quad (1)$$

式中: λ 为波长; d 为光栅常数; α 为入射角; β 为衍射角; m 为衍射级次; ω_m 为各衍射级次与主截面的夹角。

结合中阶梯光栅的衍射效率特点,中阶梯光栅通常情况下采用 Littrow 设置,即自准直入射,如图 1 所示, \hat{n} 为中阶梯光栅法线, \hat{n}_\perp 为中阶梯光栅工作截面法线,则 $\beta = \alpha$,由 (1) 式可得 $\omega_m = \omega$ 。因此,准 Littrow 情况下,锥面衍射光栅方程可简化为

$$d(\sin\alpha + \sin\beta)\cos\omega = m\lambda. \quad (2)$$

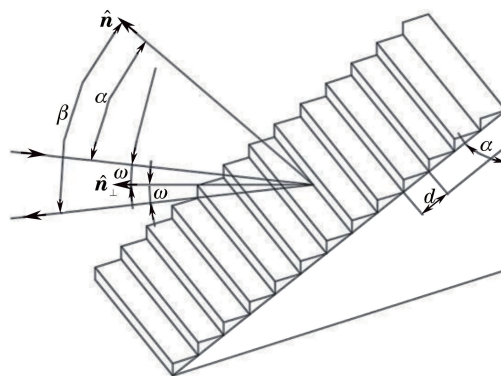


图 1 中阶梯光栅锥面衍射示意图

Fig. 1 Schematic of conical diffraction of echelle grating

根据光栅自由光谱区的性质,若某一衍射级次的上下边缘波长与其相邻衍射级次无重叠,则^[3]

$$m\lambda_{m_max} = (m + 1)\lambda_{m_min}, \quad (3)$$

式中: λ_{m_max} , λ_{m_min} 分别为 m 衍射级次边缘波长的极大值与极小值。由 (3) 式可推导出 m 衍射级次自由光谱区的范围,即

$$\Delta\lambda_m = \lambda_{m_max} - \lambda_{m_min} = \frac{\lambda_{m_min}}{m} = \frac{\lambda_{m_max}}{m + 1}, \quad (4)$$

进而可以推导出中阶梯光栅最大自由光谱区

$$\Delta\lambda_{max} = \frac{\lambda_{max}}{m_{min}}, \quad (5)$$

式中: λ_{max} 为光谱仪最大波长; m_{min} 为最小衍射级次。

为了能够获取中阶梯光栅自由光谱区内的光谱信息,需要考虑探测器的像面尺寸。根据中阶梯光栅的光栅方程,可得中阶梯光栅的线色散公式为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{m \cdot f}{d \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega}, \quad (6)$$

式中: f 为焦距。

为了使自由光谱区内的光谱信息完全被接收,探测器的像面面积需覆盖最大自由光谱区,则应满足

$$\frac{D_{grating}}{\Delta\lambda_{max}} \geq \frac{dl}{d\lambda}, \quad (7)$$

式中: D_{grating} 为探测器在中阶梯光栅色散方向上的尺寸。为了满足系统对光谱分辨率的要求,同时提高探测器像面有效面积的利用率,中阶梯光栅线色散率需要与探测器像面参数进行匹配选择。

根据(7)式,结合中阶梯光栅线色散公式,可得中阶梯光栅参数及探测器在中阶梯光栅色散方向上的尺寸之间的关系

$$D_{\text{grating}} = \frac{f\lambda_{\text{max}}}{d \cos \theta_B \cos \omega}, \quad (8)$$

式中: θ_B 为闪耀角。根据(4)式、(7)式即可确定探测器的像素尺寸

$$p \leq \frac{H_{\text{ccd}}\lambda_{\text{max}}}{R\Delta\lambda_{\text{max}}}, \quad (9)$$

式中: R 为中阶梯光栅光谱仪的分辨率, H_{ccd} 为CCD的高度。通过(7)式和(9)式可得,在设计过程中,中阶梯光栅参数和探测器参数之间存在相互制约关系,并非任意选择,应根据系统指标进行匹配。

目前,国内中阶梯光栅的加工工艺尚不成熟,无法实现中阶梯光栅的定制,故根据光谱仪的性能指标,在现有中阶梯光栅规格表中选择合适参数的中阶梯光栅是设计中阶梯光栅光谱仪的优选途径。其次,根据中阶梯光栅参数和探测器参数之间的关系,选择满足系统指标的探测器。

2.2 棱镜参数设计及双缝间隔的设计方法

2.2.1 色散棱镜的参数设计

色散棱镜的作用是与中阶梯光栅形成二维交叉色散,避免中阶梯光栅多衍射级次的衍射光重叠在一起,其色散能力对系统的光谱产生影响,在对棱镜的参数进行设计计算时,需要考虑系统的光谱范围、衍射级次干扰以及探测器的利用率等因素。

为了更好地优化系统成像质量,控制系统像差,将棱镜的工作方式设计为折反式,如图2所示。

在光学设计中,当系统波长确定后,对于棱镜材料的选择具有一定的限制。折射率、顶角与入射角共同决定了棱镜的色散性能,其出射角 $\hat{\delta}(\lambda)$ 表示为

$$\hat{\delta}(\lambda) = \arcsin \left\{ n(\lambda) \cdot \sin \left\{ 2A - \arcsin \left[\frac{\sin i_1}{n(\lambda)} \right] \right\} \right\}, \quad (10)$$

式中: $n(\lambda)$ 为棱镜折射率; A 为棱镜顶角; i_1 为棱镜入射角。

为了确定色散棱镜的参数,需要确定探测器与棱镜参数之间的关系。根据棱镜的色散性能,可仅计算边缘波长的出射角,结合光谱仪焦距,计算出探测器在棱镜色散方向的参数应该满足

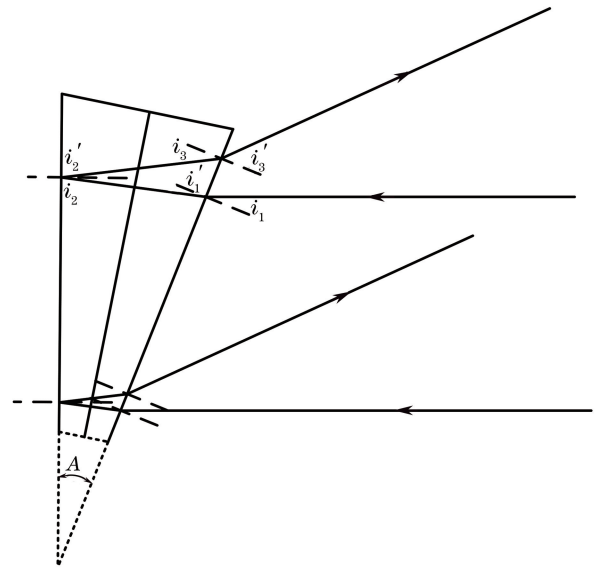


图2 棱镜色散示意图

Fig. 2 Schematic of prism dispersion

$$D_{\text{prism}} \geq \int f \cdot \hat{\delta}(\lambda) d\lambda. \quad (11)$$

长波段边缘波长相邻衍射级次之间的间隔为

$$\Delta d_{\text{prism}}(\lambda) = f \cdot [\hat{\delta}(\lambda_{m_{\text{min}}}) - \hat{\delta}(\lambda_{m_{\text{min}}+1})]. \quad (12)$$

2.2.2 双缝间隔的设计方法

双缝之间的距离与全谱波段分割、棱镜参数设计、双波段分别成像在探测器的利用率密切相关,因此研究双缝之间的距离对上述几点的影响机制至关重要。光束通过不同的狭缝照射到准直镜上的光路如图3所示。图中, O 为准直镜的球心,slit1和slit2分别为短波狭缝和长波狭缝, M 为准直镜, θ 为短波波段离轴角, θ' 为长波波段离轴角, l_{\perp} 为双缝间隔, r 为球面反射镜半径, η 与 l' 为方便计算引入的中间变量。

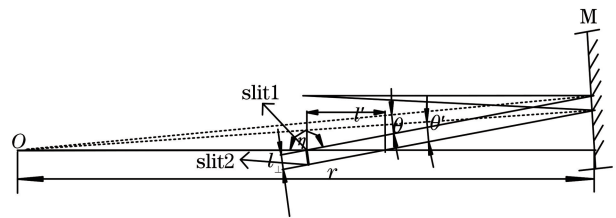


图3 光束通过双缝照射到准直镜的光路示意图

Fig. 3 Schematic of beam passing through double-slit and collimating mirror

根据正弦定理,可得

$$\frac{r}{2\sin \theta} = \frac{r}{\sin \eta} \cdot \frac{l_{\perp}}{\sin \theta} = \frac{l'}{\sin 90^{\circ}} \cdot \frac{\frac{r}{2} + l'}{\sin \theta'} = \frac{r}{\sin \eta}. \quad (13)$$

根据(13)式可得到长波波段离轴角。

图3中,光束通过短波、长波狭缝照射到准直镜

上的不同位置时,对应的准直镜的离轴角发生改变,图中 Δs 为 slit1 和 slit2 之间的狭缝间隔。据此,将全波段分两次分别获取谱图信息,可根据波长范围优化棱镜参数,增大棱镜色散方向的色散能力,进而避免长波段相邻衍射级次的干扰。

结合第 2.2.1 节和第 2.2.2 节综合考虑,棱镜参数及双缝间隔的设计流程图如图 4 所示。

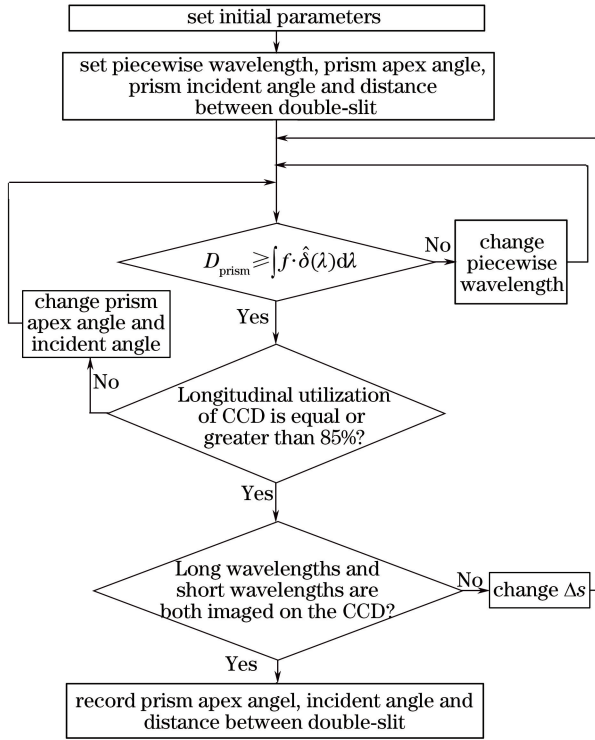


图 4 棱镜结构参数、使用参数及双缝间隔设计流程图

Fig. 4 Flow chart of structure parameters, usage parameters of prism, and double-slit interval design

图 4 中,首先设置初始参数,根据棱镜的色散公式[(10)式],设置分段波长、棱镜的顶角及入射角。根据(11)式,结合探测器的参数,判断长短波的波长范围是否能够均成像在探测器像面内,如果不能成像在探测器像面内,则改变分段波长及棱镜参数;为了充分利用探测器的像面,提出长短波的波长范围在探测器上的纵向利用率均需达到 85% 以上,否则,改变双缝间隔的距离。当长短波波长范围均成像在探测器上,同时探测器的纵向利用率达到 85% 以上时,设计参数完成。

3 光谱仪的光学系统设计

3.1 小型分段式中阶梯光栅光谱仪主要设计参数

根据第 2 节讨论的中阶梯光栅光谱仪的设计思路,设计了一种小型分段式中阶梯光栅和棱镜搭配色散的光学系统,表 1 给出了具体光学元件及结构

设计参数。图 5(a)为 210~800 nm 的光路结构示意图,图 5(b)为 165~230 nm 的光路结构示意图。

表 1 光谱仪设计参数

Table 1 Design parameters of spectrometer

Parameter	Value
Spectral range	165-230 nm, 210-800 nm
CCD parameter	Pixel size: 13 $\mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ Effective pixel number: 1024 \times 2014
Prism apex angle	21.5°
Echelle grating blazed angle	46°
Echelle grating groove density	54.49 line $\cdot \text{mm}^{-1}$
Echelle grating off-axis angle	7°
Distance between double-slit	8.1 mm
Focus length	200 mm

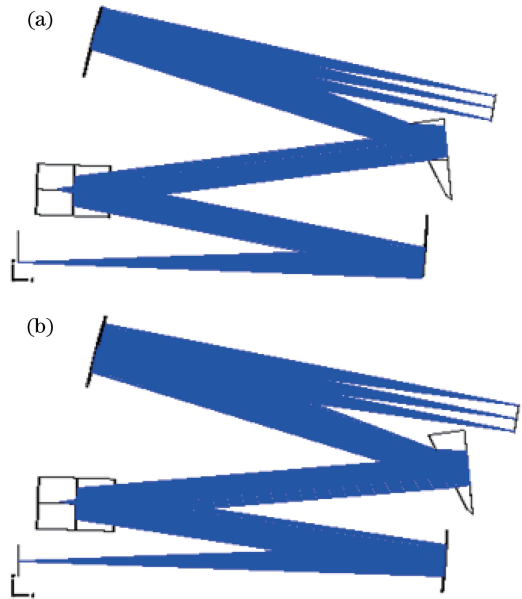


图 5 光路结构示意图。(a)210~800 nm; (b) 165~230 nm

Fig. 5 Schematic of optical path configuration.

(a) 210-800 nm; (b) 165-230 nm

如表 1 所示,波长 165~800 nm 分为 165~230 nm 和 210~800 nm,为了避免波段损失,长短波的波长范围之间有 20 nm 的重合部分。棱镜的顶角设计为 21.5°,双缝间隔距离为 8.1 mm。采用现有规格的中阶梯光栅,刻线密度为 54.49 line $\cdot \text{mm}^{-1}$,闪耀角为 46°,偏置角为 7°;系统的焦距设计为 200 mm,探测器的像素尺寸为 13 $\mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$,像素数为 1024 \times 1024。

3.2 设计结果分析

通过光学设计软件对光谱仪的光学系统进行光线追迹和优化,其光谱范围为 165~800 nm,焦距为 200 mm,在 200 nm 波长处的实际光谱分辨率为

0.015 nm。利用狭缝切换的方式将整个波段范围分为 16~230 nm 和 210~800 nm。从点列图、像差曲线及成像模拟几个方面对该光学系统设计结果进行分析评价。优化后的光谱仪系统的各仿真谱线的点列图如图 6 所示,包括 799, 275.8, 226.8, 200, 185.85, 165 nm, 对应的像差曲线如图 7 所示。200 nm 为分辨率验证波长, 275.8 nm 及 185.85 nm 为两波段分别成像在 CCD 像面中心的参考波长, 799, 226.8, 165 nm 分别为波段边缘波长。由图 6 及图 7 可见, 该光学系统在整个波长范围内的点列图及像差曲线均起伏不大, 基本保持稳定。相邻波

长的光斑的最强位置成像在探测器上的位置间隔达 1 个像素以上, 即认为可以分开。图 8(a) 与图 8(b) 是将探测器设置为像素尺寸 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$, 像素数为 1024×1024 后的仿真二维光谱图。由图 8 可见, 长短波的相邻波长的光斑最强位置之间的间隔均大于等于 1 个像素, 故光学系统在 200 nm 波长处的实际光谱分辨率能够达到 0.015 nm, 满足最初制定的实际光谱分辨率要求。同时, 在 799 nm 波长处的光谱分辨率为 0.06 nm, 在长波波段, 分辨率有所降低, 与中阶梯光栅的色散特性一致, 其长波处分辨率低, 短波处分辨率高。

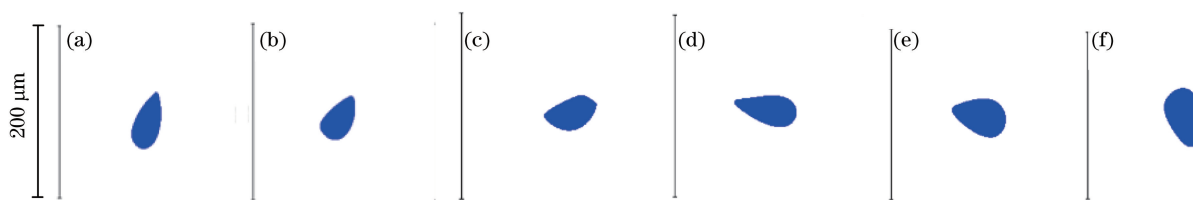


图 6 各参考波长的仿真谱线点列图。(a) 799 nm; (b) 275.8 nm; (c) 226.8 nm; (d) 200 nm; (e) 185.85 nm; (f) 165 nm

Fig. 6 Spot diagrams of simulated spectral lines for different reference wavelengths.
(a) 799 nm; (b) 275.8 nm; (c) 226.8 nm; (d) 200 nm; (e) 185.85 nm; (f) 165 nm

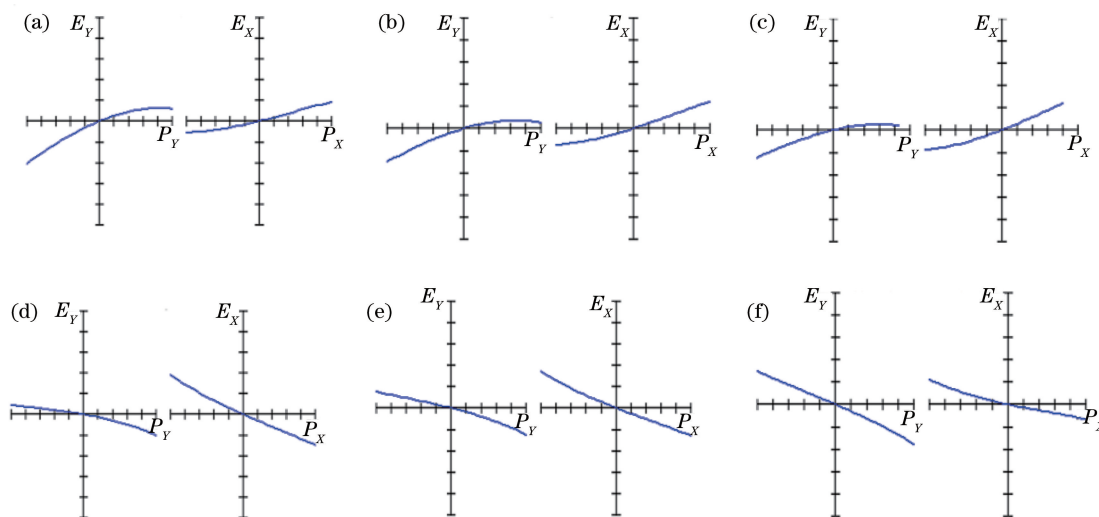


图 7 各参考波长的仿真谱线像差曲线。(a) 799 nm; (b) 275.8 nm; (c) 226.8 nm; (d) 200 nm; (e) 185.85 nm; (f) 165 nm

Fig. 7 Simulated aberration curves for different reference wavelengths.

(a) 799 nm; (b) 275.8 nm; (c) 226.8 nm; (d) 200 nm; (e) 185.85 nm; (f) 165 nm

基于双缝切换的方式设计了小型分段式高分辨率中阶梯光栅光谱仪, 但实际使用过程中需对光谱仪进行全谱标定, 才能解析采集到的谱图信息。课题组编写了相应程序, 实现了整个波长范围的谱图标定, 建立了相应的谱线位置数据库, 图 9(a) 和图 9(b) 为双波段的谱图标定图, 标出各参考波长在像面上的位置, 计算的结果与光学仿真的位置信息小于 1 个像素 ($13 \mu\text{m}$)。如图 9(a) 和图 9(b) 所示,

双缝切换的中阶梯光栅光谱仪的长波波段和短波波段均成像于二维面阵 CCD 上, 长波段 210~800 nm 纵向色散的 CCD 利用率为 88%, 在 800 nm 附近相邻衍射级次之间的间隔为 3.9 个像素, 短波段纵向色散的 CCD 利用率为 99%。光路结构、波长范围、中阶梯光栅、探测器的参数均一致, 改变棱镜的参数, 将 165~800 nm 的波长范围均成像在探测器上, 其谱图标定数据如图 9(c) 所示, 在 800 nm 附近

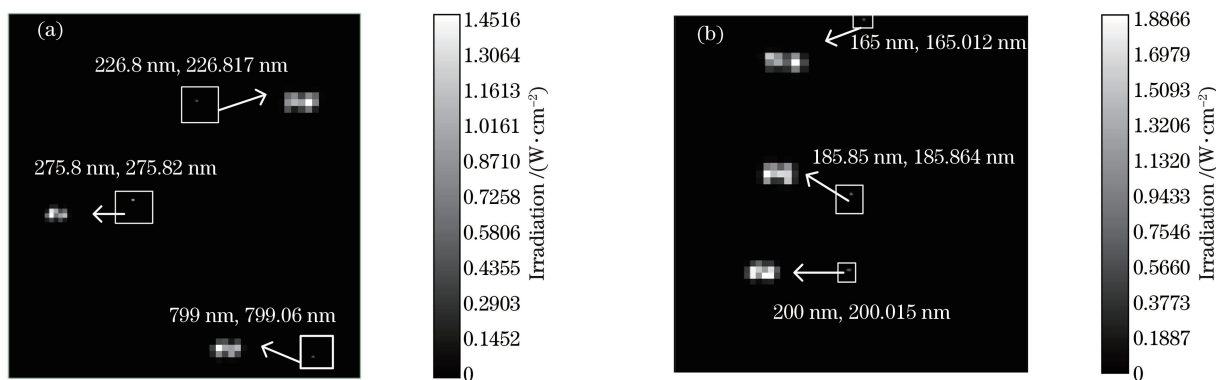


图 8 二维探测器成像面上仿真谱线图。(a) 210~800 nm; (b) 165~230 nm

Fig. 8 (a) Simulated spectra at image plane of two-dimensional detector. (a) 210-800 nm; (b) 165-230 nm

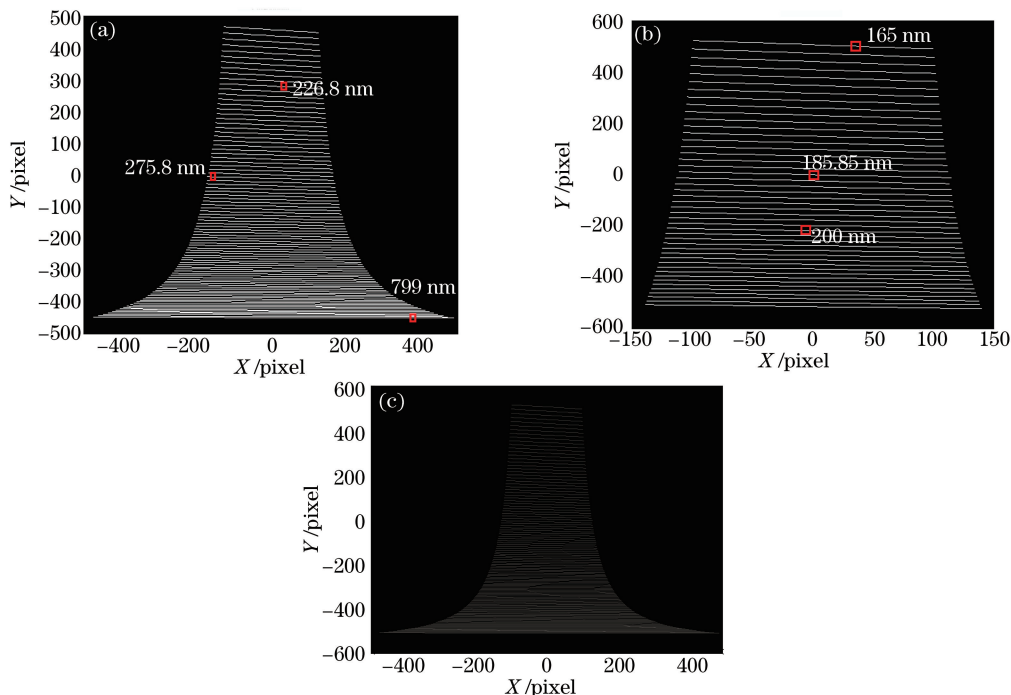


图 9 谱图标定。(a) 210~800 nm; (b) 165~230 nm; (c) 165~800 nm

Fig. 9 Spectral calibration. (a) 210-800 nm; (b) 165-230 nm; (c) 165-800 nm

相邻衍射级次之间的间隔为 2.3 个像素,因波长对应的的光斑基本在 3 个像素以上,故在 800 nm 附近势必产生衍射级次的干扰。因此将全谱波段分为两部分,充分利用探测器像面面积,增大衍射级次之间的间隔,这样在很大程度上避免了长波波段相邻衍射级次的干扰,满足光谱仪的使用需求。

4 结 论

为了实现宽波段中阶梯光栅光谱仪的设计,针对棱镜色散不均匀的特点,提出采用双缝切换的方式,建立了双缝切换分段式高光谱分辨率的中阶梯光栅光谱仪,实现 165~800 nm 的全谱波段的谱图采集。长波段和短波段均能成像在 CCD

像面内,且纵向利用率均大于 85%,光谱仪焦距设计为 200 mm,符合仪器小型化、轻型化的发展趋势。同时得出以下结论:1)中阶梯光栅参数、棱镜结构参数与使用参数、双缝间隔及 CCD 像面大小密切相关,在光学系统具体设计时,需根据指标要求多次核查,优化设计结果;2)由中阶梯光栅色散原理可知,棱镜在长波波段光谱分辨率低,色散能力弱,故在分段设计过程中,需着重考虑长波波段相邻衍射级次间的干扰;3)本文提出的分段式中阶梯光栅光谱仪的设计过程具有普适性,在中阶梯光栅和棱镜交叉色散的光路结构中,当指标要求发生变化时,亦可采用此方法实现分段式中阶梯光栅光谱仪的设计。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y F, Wu J F, Zhu Q S, *et al.* Optical design of high resolution two dimension echelle spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0422005.
张瑜峰, 武建芬, 朱青松, 等. 二维全谱高分辨中阶梯光谱仪光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0422005.
- [2] Yang J, Yin L, Yao X F, *et al.* Optical design and stray light suppression of a new portable echelle spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0812001.
杨晋, 尹禄, 姚雪峰, 等. 新型便携式中阶梯光栅光谱仪光学设计与消杂散光研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0812001.
- [3] Chen S J, Bayanheshig, Pan M Z, *et al.* Efficient algorithms for echelle spectrograph design and cross-dispersed spectra analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1030001.
陈少杰, 巴音贺希格, 潘明忠, 等. 中阶梯光栅光谱仪快速设计与谱图分析的数学模型 [J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1030001.
- [4] Fuxhi O, Marks D L, Brady D J. Echelle crossed grating millimeter wave beam scanner [J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 16393-16407.
- [5] Korablev O, Montmessin F, Trokhimovsky A, *et al.* Compact echelle spectrometer for occultation sounding of the Martian atmosphere: design and performance [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(5): 1054-1065.
- [6] Bykov S V, Sharma B, Asher S A. High-throughput, high-resolution echelle deep-UV Ramam spectrometer [J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(8): 873-883.
- [7] Wood M P, Lawler J E. Aberration-corrected echelle spectrometer for measuring ultraviolet branching fractions of iron-group ions [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(35): 8407-8412.
- [8] Zhang R, Bayanheshig, Yang J, *et al.* Reduction model of the transmission prism echelle spectrometer with the C-T structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0723001.
- [9] Zheng G J, Ji Z H, Yu X. Analysis and application of atomic emission spectrometry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 62-70.
郑国经, 计子华, 余兴. 原子发射光谱分析技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 62-70.
- [10] Xin R X. Analysis of plasma emission spectral [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 85-97.
辛仁轩. 等离子体发射光谱分析 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2010: 85-97.
- [11] Koch J, Okruss M, Franzke J, *et al.* Element-selective detection of gas chromatographic eluates by near infrared echelle optical emission spectrometry on microwave-induced plasmas [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2004, 59(2): 199-207.
- [12] Chen S J, Qi X D, Bayanheshig, *et al.* A portable echelle spectrograph design for laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(5): 672-677.
陈少杰, 齐向东, 巴音贺希格, 等. 用于激光诱导等离子体光谱分析的便携式中阶梯光栅光谱仪设计 [J]. *发光学报*, 2013, 34(5): 672-677.
- [13] Ebizuka N, Yokota H, Kajino F, *et al.* Novel direct vision prism and Wollaston prism assembly for diffraction limit applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7018: 70184S.
- [14] Hagen N, Tkaczyk T S. Compound prism design principles, I [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(25): 4998-5011.
- [15] Zhu W Y, Chen S J, Han P P, *et al.* Echelle-emission spectrometer with divided spectral coverage [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 870-876.
朱文煜, 陈少杰, 撤芑芑, 等. 分波段式中阶梯光栅原子发射光谱仪 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 870-876.
- [16] Liller W. High dispersion stellar spectroscopy with an echelle grating [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(10): 2332-2336.