

文章编号 1004-924X(2017)12-2994-07

## 基于数字微镜器件的中阶梯光栅 光谱仪的光学系统设计

张 锐<sup>1,2\*</sup>, 潘明忠<sup>1</sup>, 杨 晋<sup>1,2</sup>, 巴音贺希格<sup>1</sup>, 崔继承<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. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 研究了一种基于数字微镜器件(DMD)具有新型光路结构的中阶梯光栅光谱仪, 并采用新的谱图信息接收方式来降低其使用成本和数据处理过程的复杂程度。将具有单波长选通功能的 DMD 与一维探测器光电倍增管(PMT)相结合接收中阶梯光栅光谱仪的光谱信息, 在降低仪器成本的同时将中阶梯光栅光谱仪谱图还原算法与 DMD 扫描驱动算法相整合, 提高了算法效率。由于 DMD 的填充因子比 CCD 稍低, 该类光谱仪对成像质量和能量集中度提出了更高的要求。本文根据 DMD 型中阶梯光栅光谱仪特点, 在有限的可挑选的光学材料下, 采用多重优化的方式合理设计中阶梯光栅光谱仪准直镜、中阶梯光栅、棱镜、聚焦镜等各个光学元件的光路结构参数, 并且在 Czerny-Turner 结构中加入校正透镜和场镜, 校正了系统所有像差, 提高了整个光学系统的成像质量和光谱分辨率。最终设计的光谱仪系统分辨率达 0.01 nm, 单个微反射镜内的光斑能量聚集度达到 70%。

**关键词:** 中阶梯光栅光谱仪; 光学设计; 数字微镜器件; 光电倍增管

**中图分类号:** TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172512.2994

## Optical system of echelle spectrometer based on DMD

ZHANG Rui<sup>1,2\*</sup>, PAN Ming-zhong<sup>1</sup>, YANG Jin<sup>1,2</sup>, BAYANHESHIG<sup>1</sup>, CUI Ji-cheng<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangrui\_grating@163.com

**Abstract:** An echelle spectrometer with a new optical path based on a Digital Micro Device (DMD) was proposed and a new spectrum receiving method was used to reduce the cost of the grating spectrograph and the complexity of data processing. The DMD with single wavelength getting function and an one-dimensional photomultiplier (PMT) were combined to receive spectral information of the echelle spectrometer. By which, the cost of the instrument was reduced and the spectral restore algorithm for the echelle spectrometer and the scan driving algorithm for the DMD were integrated to improve algorithm efficiency. Because the fill factor of CCD is lower than that of DMD, this kind of echelle spectrometer

**收稿日期:** 2017-05-18; **修订日期:** 2017-06-26.

**基金项目:** 国家重大科学仪器设备开发专项项目 (No. 2014YQ120351); 国家重大科研装备研制项目 (No. ZDYZ2008-1); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61505204); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20140203011GX)

should be giving a higher imaging quality and higher imaging energy. According to the characteristics of the echelle spectrometer and the limited range of selected optical materials, the multi-optimization method was employed to design the optical path structure parameters of the echelle spectrometers such as quasi-direct mirror, echelle grating, prism and focusing mirror. Moreover, the Czerny-Turner C-T structure was added into the system to correct the asymmetric aberration and three correction lenses was used to correct the spherical aberration astigmatism. Finally, the resolution of the designed spectrometer system has reached 0.01 nm and the system imaging energy in one pixel can be 70%.

**Key words:** echelle spectrometer; optical design; Digital Micromirror Device(DMD); Photomultiplier Tube(PMT)

## 1 引 言

1949年,G. R. Harrison研制出一种具有较大衍射角<sup>[1]</sup>,可在高衍射级次下工作的新型光栅——中阶梯光栅。与一般的平面闪耀光栅相比,该类光栅可同时拥有宽波段、高分辨率、高衍射效率等优点<sup>[2-5]</sup>。因此,Harrison教授在研制出中阶梯光栅后就将其作为主要色散元件设计出中阶梯光栅光谱仪。该光谱仪与当时分辨率最高的凹面光栅光谱仪相比分辨率提高了1倍,光谱探测响应速度提高了5倍<sup>[6]</sup>。自此,中阶梯光栅光谱仪成为先进光谱仪器的代表。

中阶梯光栅光谱仪与常规光谱仪相比具有采集波段宽、检出限低、结构紧凑等优点,但是其主色散元件(中阶梯光栅)工作在高级次状态下,色散后的光谱会产生很严重的级次重叠,需在其后方垂直于光栅色散方向放置二级色散元件,方能最终得到二维光谱;特别在化学分析领域,光谱仪对电感耦合等离子体(ICP)与微波等离子体炬(MPT)激发的原子发射光谱进行接收与分析时,原子特征谱中存在紫外光谱,因此,中阶梯光栅光谱仪需采用具有制冷功能的紫外二维面阵 CCD 探测器来接收光谱信息<sup>[7-12]</sup>。然而,该类面阵 CCD 的造价较高,从而大幅提升了中阶梯光栅光谱仪的成本。同时,二维面阵 CCD 的驱动开发及后端二维谱图的还原也增加了中阶梯光栅光谱仪的研究难度。因此,研究一种造价较低的具有新型光谱信息接收方式的中阶梯光栅光谱仪变得尤为重要。

鉴于此,本文研究了一种基于数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)<sup>[13-17]</sup>的中阶梯光栅光谱仪。该光谱仪利用 DMD 进行单波长

选通,将中阶梯光栅光谱仪的谱图信息按顺序进行单波长输出,后端再配合光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)进行多次快速接收。最后,将 PMT 多次接收的谱图信息整合获得中阶梯光栅光谱仪的完整谱图,在提高算法效率的同时,极大地降低了中阶梯光栅光谱仪的成本,令单像元探测器在中阶梯光栅光谱仪中的使用成为可能。由于 DMD 的单波长选通降低了接收器最终对杂散光的接收,提高了整个仪器的信噪比。但是和 CCD 相比, DMD 的填充因子较低,在 90% 左右<sup>[15]</sup>。因此, DMD 型中阶梯光栅光谱仪的成像光斑要拥有更高的能量集中度,从而提高整个系统的信噪比。本文采用多重优化的方式,很好地控制了系统的 RMS 值;并且在光谱仪系统中加入校正透镜和场镜,在不增加光谱仪体积的前提下提高了中阶梯光栅光谱仪的成像质量和光谱分辨率。整个光谱仪采用折返式光路结构,充分利用光谱仪的内部空间,使光谱仪更加紧凑、便携。

## 2 DMD 型中阶梯光栅光谱仪的基本原理

基于 DMD 的中阶梯光栅光谱仪的光路结构如图 1 所示。光束经过准直镜后在相互垂直的两个方向分别被中阶梯光栅和棱镜色散。光栅在如图 1 所示的弧矢面色散,棱镜在子午面色散。色散后的光线被会聚球面镜会聚至 DMD 上。通过 DMD 单波长选通后,最终被探测器接收。光路中加入的柱面镜及球面镜用来校正系统像差,提高系统的成像质量。

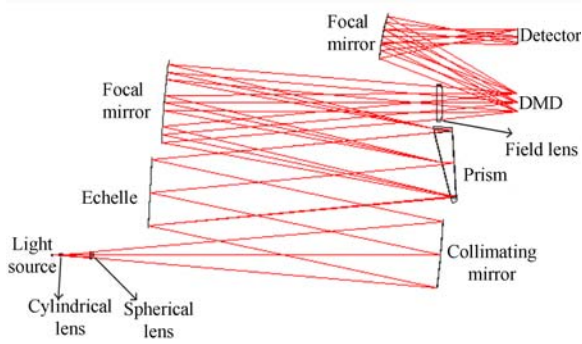


图 1 中阶梯光栅光谱仪的光路结构

Fig. 1 Optical structure of echelle spectrometer

### 2.1 中阶梯光栅设计

作为主色散元件,中阶梯光栅的刻线密度为  $54.5 \text{ g/mm}$ ,闪耀角为  $46.6^\circ$ ,分辨率可达  $2\,000 \sim 15\,000$ 。为防止衍射光与入射光重叠,将光栅在非色散方向上以一定偏置角(入射光与光栅法线的夹角)放置。令光栅工作在准 Littrow 条件下,满足光栅方程:

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

其中: $i$ 为光栅入射角, $d$ 为光栅周期, $\theta$ 为光栅衍射角, $m$ 为衍射级次, $\omega$ 为光栅偏置角, $\lambda$ 为入射光波长。预设计的中阶梯光栅光谱仪波段为  $190 \sim 600 \text{ nm}$ 。因此,参考波长分别选取  $189.43, 190.12, 242.05, 587.44, 594.11, 600.94 \text{ nm}$  进行设计。这些参考波长对应的衍射级次可由式(1)计算得到,分别为  $138, 138, 108, 44, 44, 44$ 。

在准 Littrow 条件下, $i = \theta$ ,角色散满足:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{2 \tan \theta}{\lambda}. \quad (2)$$

光栅的角色散率与入射光波长和光栅衍射角有关。因此,拥有大衍射角的中阶梯光栅具有很高的色散能力。由式(2)可知,不同波长处的色散能力不同,波长越短分辨率越高。所以,其理论分辨率的计算与波长有关,即有:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN, \quad (3)$$

其中: $R$ 为理论分辨率, $m$ 为衍射级次, $N$ 为光栅刻线数。在高衍射级次下工作的中阶梯光栅拥有很高的分辨率。

### 2.2 棱镜设计

为了将重叠在一起的光谱分开,后端采用棱镜作为交叉色散元件。色散分辨率为:

$$R = t \frac{dn}{d\lambda}, \quad (4)$$

其中, $t$ 为通过棱镜内部的上、下边缘光线在子午面的几何长度之差。为了提高交叉色散方向的分辨率,采用光线折返多次经过棱镜的方式增加  $t$  值。在实际使用时,棱镜的实际分辨率远小于理论分辨率。因此,棱镜作为横向色散元件的主要作用是将经过中阶梯光栅色散后严重重叠的各级次光谱分开,其色散能力对整个仪器的分辨率并无影响。在色散元件中,中阶梯光栅光谱仪的分辨率主要由中阶梯光栅的分辨能力决定。

### 2.3 数字微镜器件设计

DMD 是一种被数字化控制的二维微反射镜阵列器件。其上的微反射镜阵列集成于同一芯片,每一个微反射镜下方的转动装置可令其在对角线方向上独立转动。因此,每一个微反射镜可看作一个像元,反射镜数目越多意味着像素点越多,显示分辨率越高。数字微镜器件的工作原理如图 2 所示。其中,每个微反射镜都能独立工作并且变换 3 个角度( $+12^\circ, 0^\circ, -12^\circ$ )。当微反射镜旋转至  $12^\circ$  时, DMD 为“开”态,光线经过该微反射镜反射可入射至像面探测器内;反之,当微反射镜角度设置为  $-12^\circ$  时,此时 DMD 上的微反射镜处于“关”态,经“关”态的微反射镜反射的光线无法被探测器接收;当关闭 DMD 时,反射镜旋转至  $0^\circ$ ,即“平”态,此时 DMD 上的微反射镜阵列处于休眠状态,不受控制。

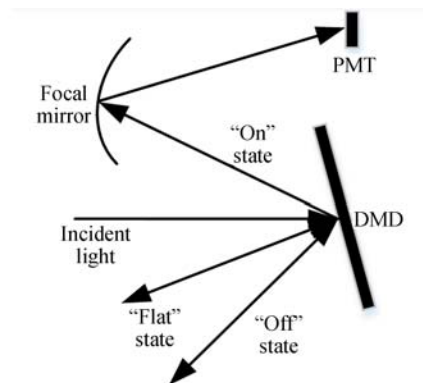


图 2 数字微镜阵列工作示意图

Fig. 2 Schematic of Digital Micromirror Device(DMD)

通过控制特定位置微反射镜的“开”、“关”状态,在纵向(光栅色散方向)依次翻转微反射镜。每次翻转对应一个波长点的测试,最终实现单波长选通的功能。目前该功能已成功应用于成像光谱仪中<sup>[18]</sup>。这里将该功能应用于中阶梯光栅光

谱仪中,实现光谱仪的单波长输出。根据原有的 CCD 型中阶梯光栅光谱仪谱图还原模型<sup>[16]</sup>的思路,建立 DMD 型中阶梯光栅光谱仪谱图还原模型。该模型可确定 DMD 每个微反射镜上所对应的波长值,将该模型算法嵌入至 DMD 驱动软件中,从而令输出的单波长光谱的波长值已知,将 PMT 作为点源能量接收装置放于 DMD 后端依次接收 DMD 输出的光谱能量,整合多次接收的谱图信息,完成中阶梯光栅光谱仪全波段光谱信息的接收。采用该方法将中阶梯光栅光谱仪谱图还原算法与 DMD 扫描驱动算法整合可提高算法效率。并且 DMD 的单波长选通功能降低了仪器杂光,提高了系统的灵敏度。

其中光栅色散方向为 Y 方向,棱镜色散方向为 X 方向。设每次翻转单位为一个坐标单位,用坐标的方式描述特征波长在 DMD 中的位置分布。通过模拟仿真得到 189.43,190.12,242.05,300,400,500,587.44,594.11,600.94 nm 处光谱所对应的 DMD 位置,如图 3 所示。

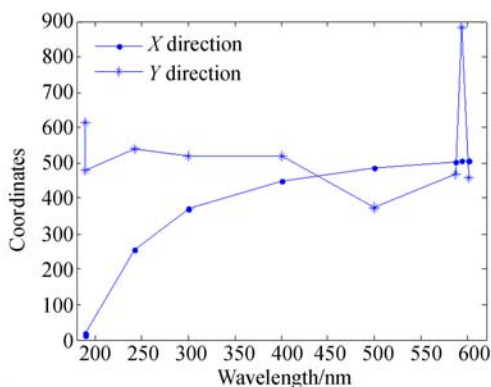


图 3 参考波长在 DMD 上的分布

Fig. 3 Distribution of reference wavelength in DMD

### 3 光学系统设计结果与分析

#### 3.1 光学系统校正像差设计

由于 DMD 较二维面阵探测器(CCD)的有效填充因子小,DMD 型中阶梯光栅光谱仪较 CCD 型中阶梯光栅光谱仪有更高的成像质量要求,即仪器的成像光斑要具有更高的能量集中度。因此,需严格控制光谱仪的光学系统像差。中阶梯光栅光谱仪属于单色成像系统并且物点离轴量较小,所以在像差校正时主要考虑单色初级像差。

为降低整个光谱仪的制作难度及成本,两个反射镜(准直镜及聚焦镜)均选用球面反射镜。球面反射镜会引起系统球差,因此,在光学系统前端放置凹透镜对球差进行校正。整个光谱仪系统采用 C-T 型光路结构,则准直镜在像面上产生的彗差宽度可表示为:

$$\Delta_1 = \frac{r_2}{2} \cos\left(\frac{\varepsilon_2}{2}\right) \delta\theta = \frac{3W^2 r_2 \sin\left(\frac{\varepsilon_1}{2}\right) \cos\left(\frac{\varepsilon_2}{2}\right) \cos^3 i}{8r_1^2 \cos^3\left(\frac{\varepsilon_1}{2}\right) \cos \theta} \quad (5)$$

聚焦镜在像面上产生的彗差宽度可表示为:

$$\Delta_2 = \frac{r_2}{2} \cos\left(\frac{\varepsilon_2}{2}\right) \delta\theta = \frac{3W^2 \sin\left(\frac{\varepsilon_1}{2}\right) \cos^2 \theta}{8r_2 \cos^2\left(\frac{\varepsilon_2}{2}\right)} \quad (6)$$

因此系统总的彗差为:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (7)$$

则彗差校正条件为:

$$\Delta = \frac{\sin\left(\frac{\varepsilon_1}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\varepsilon_2}{2}\right)} - \frac{r_1^2 \cos^3 \theta}{r_2^2 \cos^3 i} = 0 \quad (8)$$

其中: $r_1$  和  $r_2$  分别为准直镜与聚焦镜的曲率半径, $\varepsilon_1$  与  $\varepsilon_2$  分别为准直镜与聚焦镜的离轴角, $i$  为光栅入射角, $\theta$  为光栅衍射角, $W$  为光栅的有效宽度。因此,当准直镜与聚焦镜采用相同的曲率半径及对称的结构参数时,可对非对称像差彗差进行校正。

该系统在子午方向及弧矢方向的光学特性不同,系统存在像散。因此,在系统后端加入场镜,令光学系统在子午与弧矢方向的焦距不同,从而校正像散,提高了整个光学系统的成像质量。

#### 3.2 光学系统参数设计

根据 DMD 的尺寸参数设计了中阶梯光栅光谱仪。准直镜与聚焦镜采用相同的光学结构,以校正非对称像差。为了保证光栅效率不降低的同时各光学元件在系统中仍以最优化组合排列,光栅的偏置角设置为  $8^\circ$ 。由于本文设计的光谱仪的波段范围覆盖紫外光及可见光波段,为降低紫外波段能量的损耗,选用紫外透过率较高的材料作为棱镜材料。根据像面大小,考虑最终光谱在像面的分布确定棱镜顶角。通过上述分析,光学系统参数如表 1 所示。

表 1 光学系统参数

Tab. 1 Parameters of echelle spectrometer

设计参数	参数值
针孔尺寸/ $\mu\text{m}$	16 $\mu\text{m}$
物方数值孔径	0.071 2
波段/nm	190—600
分辨率/nm	0.01@190
系统焦距/nm	261
光栅入射角/ $^\circ$	46.6
光栅刻线密度/ $(\text{g} \cdot \text{mm}^{-1})$	54.5
棱镜顶角/ $^\circ$	12
DMD 尺寸/ $\mu\text{m}$	13.68

3.3 光学系统设计结果

根据上述设计参数,应用光学设计软件对光学系统进行设计及评估。图 4 为系统点列图,系统在全波段范围内的成像质量较好,每一物点光斑都能落在一个微反射镜内。

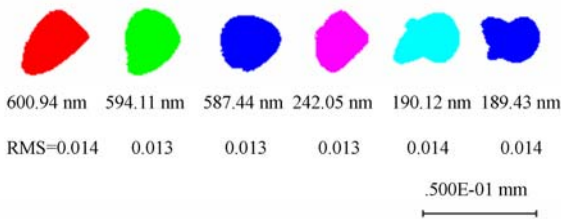


图 4 全波段谱线点列图

Fig. 4 Spot diagram in full-wave band

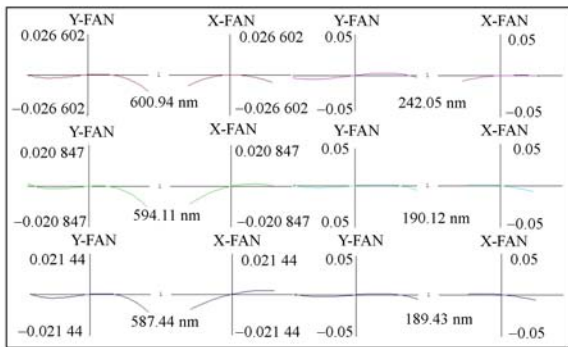
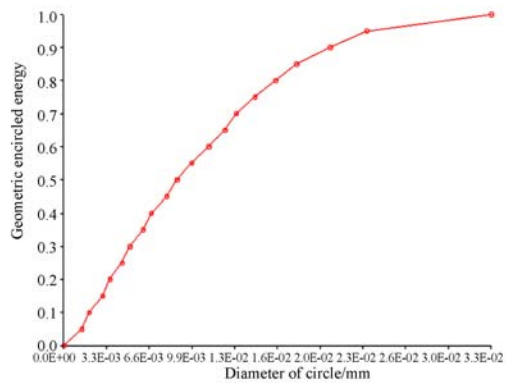


图 5 全波段像差曲线图

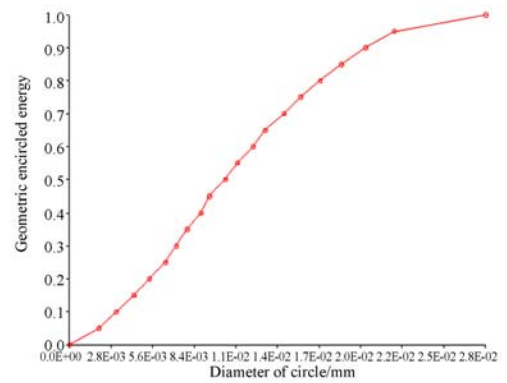
Fig. 5 Aberration curves in full-wave band

图 5 分别为 189.43, 190.12, 242.05, 587.44, 594.11, 600.94 nm 处的像差曲线。中阶梯光谱仪系统在全波段范围内都能很好地校正像差。额外加入的 3 块校正镜使系统像质更高。中阶梯光谱仪单波长像面能量分布如图 6 所示。



(a) 600.94 nm 处的光斑能量分布

(a) Distribution of spot energy at 600.94 nm



(b) 190.12 nm 处的光斑能量分布

(b) Distribution of spot energy at 190.12 nm

图 6 径向能量分布图

Fig. 6 Distribution diagrams of radial direction energy

中阶梯光谱仪的 DMD 中每一个微反射镜 13.68  $\mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$  内的能量分布都可达到 70%。通过加入校正镜,较好地校正了系统像差,提高了整个系统的成像质量。

4 结 论

本文采用将 DMD 与 PMT 相结合的方式对中阶梯光栅光谱仪交叉色散所得的光谱信息进行接收与处理,利用 DMD 可单波长选通的特点,将它应用于中阶梯光栅光谱仪谱图的接收,解决了现有中阶梯光栅光谱仪在化学分析领域由于使用紫外二维面阵 CCD 作为探测器造价较高的问题。由于 DMD 的使用令整个系统对成像质量和能量集中度有了更高的要求,本文根据 DMD 型中阶梯光栅光谱仪的结构特点及现有 DMD 的性能参

数,在有限的可挑选的光学材料下,采用多重优化的方式合理设计了准直镜、中阶梯光栅、棱镜、聚焦镜等光学元件的结构参数。放置的校正透镜和场镜很好地校正了系统中的球差、彗差、像散等像差,提高了整个光学系统的成像质量。该系统的分辨率达 0.01 nm,能量集中度在单像素内达

70%。基于 DMD 的新型中阶梯光栅光谱仪的光谱信息接收方式,令单像元探测器(PMT)在中阶梯光栅光谱仪中的使用成为可能,为高分辨率中阶梯光栅光谱仪的研制提供了新的思路。所设计的高成像质量光学系统,为高质量中阶梯光栅光谱仪的设计提供了理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 冯帆,段发阶,伯恩,等. 一种小型中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光电工程, 2014, 41(7): 20-25.  
FENG F, DUAN F J, BO E, *et al.*. An optical design of small-size echelle spectrograph[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(7): 20-25. (in Chinese)
- [2] FURXHI O, MARKS D L, BRADY D J. Echelle crossed grating millimeter wave beam scanner[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 16393-16407.
- [3] RICHTER M J, ENNICO K A, MCKELVEY M E, *et al.*. Status of the echelon-cross-echelle spectrograph for SOFIA [J]. *SPIE*, 2010, 7735: 77356Q.
- [4] 孙梦至,高劲松,李资政,等. 基底温度对中阶梯光栅厚铝膜质量的影响[J]. 中国光学, 2016, 9(6): 656-662.  
SUN M ZH, GAO J S, LI Z ZH, *et al.*. Influence of substrate temperature on the quality of thick Al films of echelle grating[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 656-662. (in Chinese)
- [5] 毛靖华,王咏梅,石恩涛,等. 基于中阶梯光栅的波长定标方法研究[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 376-382.  
MAO J H, WANG Y M, SHI E T, *et al.*. Spectral calibration based on echelle[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 376-382. (in Chinese)
- [6] 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 ZH J, HUANG Y SH, *et al.*. Application research progress in the echelle grating[J]. *Laser Journal*, 2009, 30(2): 4-6. (in Chinese)
- [7] 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.  
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. (in Chinese)
- [8] 张尹馨,杨怀栋,邓超,等. 高分辨率中阶梯光栅—棱镜交叉色散光路设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1706-1710.  
ZHANG Y X, YANG H D, DENG CH, *et al.*. Optical design of high-resolution echelle-prism cross-dispersion[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(6): 1706-1710. (in Chinese)
- [9] 唐玉国,宋楠,巴音贺希格,等. 中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 1989-1995.  
TANG Y G, SONG N, BAYANHESHIG, *et al.*. Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1989-1995. (in Chinese)
- [10] 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.  
CHEN SH J, BAYANHESHIG, PAN M ZH, *et al.*. Efficient algorithms for echelle spectrograph design and cross-dispersed spectra analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1030001. (in Chinese)
- [11] 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, 38(8): 0812001.  
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. (in Chinese)
- [12] 唐玉国,陈少杰,巴音贺希格,等. 中阶梯光栅光谱仪的谱图还原与波长标定[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2130-2136.  
TANG Y G, CHEN SH J, BAYANHESHIG, *et al.*. Spectral reducing of cross-dispersed echelle spectrograph and its wavelength calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2130-2136. (in Chinese)
- [13] 张颖新,王云萍,侯军燕. 高帧频 DMD 红外景象

- 仿真设备电路与光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0404003.
- ZHANG Y X, WANG Y P, HOU J Y. Circuit and optical system design for high frame rate DMD infrared scene simulation equipment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0404003. (in Chinese)
- [14] 吕伟振, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 基于 DMD 的高动态范围成像光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1167-1171.
- LÜ W ZH, LIU W Q, WEI ZH L, *et al.*. Design of high dynamic range imaging optical system based on DMD[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1167-1171. (in Chinese)
- [15] 陈笑, 颜纷纷, 宋菲君, 等. DMD 光栅的衍射特性及其在可调谐激光中的应用[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0705003.
- CHEN X, YAN B B, SONG F J, *et al.*. Diffractive properties of DMD gratings and its new application in tunable fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0705003. (in Chinese)
- [16] 莫祥霞. 基于 DMD 的微小型近红外光谱仪系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- MO X X. *Research of NIR Miniature Spectrometer System Based on DMD* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [17] 王廷杰, 陈怀章, 刘艳滢, 等. 数字微镜器件在高动态辐射场景成像探测系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2508-2517.
- WANG Y J, CHEN H ZH, LIU Y Y, *et al.*. Application of DMD to high dynamic scene image detection system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2508-2517. (in Chinese)
- [18] ZHANG R, BAYANHESHIG, YIN L, *et al.*. Wavelength calibration model for prism-type echelle spectrometer by reversely solving prism's refractive index in real time[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(15): 4153-4158.

#### 作者简介:



张锐(1990—),女,甘肃兰州人,博士研究生,2013年于兰州大学获得学士学位,主要从事光谱仪器研发及光谱信息处理技术的研究。E-mail: zhangrui\_grating@163.com



巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,研究员,博士生导师,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,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