

# 用于大气遥感的远紫外光栅色散成像光谱仪的研究

于 磊<sup>1,2</sup>, 王淑荣<sup>1</sup>, 林冠宇<sup>1</sup>, 曲 艺<sup>1</sup>, 汪龙祺<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 100049

**摘 要** 远紫外光栅色散型成像光谱仪在空间大气遥感领域主要用于电离层、热层、极光和辉光的探测。文章根据临边与天底结合的大气成像光谱探测原理, 提出了探测方案, 设计了适用于远紫外波段的光栅色散型成像光谱仪的两种光学系统, 并选择了平面光栅结构进行研制集成, 在国内首次获得了原理样机。样机工作波段为 120~180 nm, 望远系统采用离轴抛物镜, 光谱成像系统采用改进型的 Czerny-Turner 结构, 探测器使用远紫外响应背照型增强 CCD。搭建了相应的实验系统对样机的基本性能参数进行了测试, 测得光谱分辨率约为 2 nm, 空间分辨率 0.5 mrad。这种远紫外光栅色散型成像光谱仪的研究对完善我国大气遥感事业具有重要的研究与应用价值。

**关键词** 电离层; 成像光谱仪; 远紫外; 原理样机; 分辨率

中图分类号: TH744.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)03-0844-05

## 引 言

电离层所包含的信息对人类十分重要<sup>[1,2]</sup>。电离层能用来反射和传送高频无线电信号, 能帮助人类更好的进行通讯活动; 电离层内部分布的粒子会干扰卫星载荷电子学系统的遥感信息收集和发送, 实时检测可以帮助我们更有效的进行遥感信息的跟踪; 地磁场的变化会影响电离层, 对这种扰动现象的观察可以作为地震预警的重要参考; 通过对电离层中扰动的监测还可以观察星体的活动周期和进行军事监视。由于电离层极易受到扰动, 实时变化快, 其粒子辐射波长主要分布在远紫外波段, 完全被低层大气吸收, 因此必须使用空间大气遥感探测。目前, 国外已经有很多应用于电离层探测的载荷, 如 AIRS, GUVI, SSULI, SSUSI 和 IMAGER 等<sup>[3-6]</sup>, 这些先进载荷均具有良好的成像能力和光谱分析能力。在我国, 电离层的光谱遥感研究技术虽然尚处于起步阶段, 但正在引起相关研究部门的重视, 因此, 发展我国自主研制的电离层探测仪器, 尤其是成像光谱仪器, 对于我国空间物理科学研究具有非常重要的意义。

成像光谱仪兼具成像仪获取目标景物影像信息的功能和光谱仪获取目标光谱信息的功能, 能以高光谱分辨率获取目标的超多谱段图像<sup>[7]</sup>, 因而正在得到广泛的应用。本工作研究了适用于电离层探测的远紫外成像光谱仪原理样机, 并进

行了初步的实验研究。该样机是国内首次针对电离层探测而开发研制的成像光谱仪器, 将为提高我国大气遥感探测能力, 强化电离层空间业务应用奠定技术基础。

## 1 观测目标与探测原理

电离层远紫外成像光谱仪主要探测的粒子分布及反演参数见表 1<sup>[8]</sup>。

Table 1 Parameters and distribution of particles in the ionosphere

	分布高度/km	临边	天底	极光
H <sup>I</sup> (121.6 nm)	50~120	H	H	H <sup>+</sup>
O <sup>I</sup> (130.4 nm)	120~140	O <sub>2</sub> /O	O/O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
O <sup>I</sup> (135.6 nm)	180~500	O	O/N <sub>2</sub>	电子
N <sub>2</sub> (140~150 nm)	140~180	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sup>I</sup>	O/N <sub>2</sub>	离子
N <sub>2</sub> (165~180 nm)	140~180	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sup>I</sup>	O/N <sub>2</sub>	N/A

空间大气遥感仪器的观测方式按照发展阶段可分为三种, 即天底观测、掩日/月观测和临边观测<sup>[9]</sup>, 天底观测的空间覆盖范围很大, 但垂直分辨率较低; 掩日/月观测的垂直分辨率高, 但只能在特定时间进行观测, 因此时间与空间覆盖率低; 临边探测同时具有高空间、时间覆盖率高垂直分

收稿日期: 2011-06-23, 修订日期: 2011-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41074126)和应用光学国家重点实验室基金项目资助

作者简介: 于 磊, 1984 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生

e-mail: top1gods@email.ustc.edu.cn

分辨率，是目前热门的先进观测使用方式。

拟设计远紫外成像光谱仪工作轨道高度为 830 km，工作模式为临边和天底观测结合(如图 1)，通过扫描镜完成两种观测模式的结合，扫描方向为+Z 方向并与卫星运行方向相垂直；仪器首先完成临边观测功能，对沿地球 50~500 km 的各高度切线方向上的大气进行观测，之后天底观测扫描地球表面上的一个宽带，在卫星绕地球运转一周后将各带拼接从而实现全球的覆盖。最终实现对电离层的光谱探测和覆盖成像。

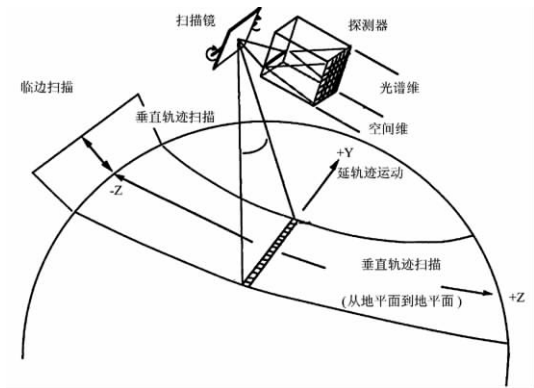


Fig 1 Sketch of the observation modes

为保证对 LBH(即  $N_2$ ) 带的精确探测，需要仪器的光谱分辨率小于 2.5 nm，同时为了实现拼接后的全球成像，仪器至少要在运动方向覆盖  $3.8^\circ$  的视场，根据观测要求可计算出仪器设计指标见表 2。

Table 2 Specification of the imaging spectrometer

参数	Value
轨道/km	830
空间覆盖/km	50~500
光谱覆盖/nm	120~180
空间分辨率/mrad	<1
光谱分辨率/nm	<2.5
视场角/°	$4 \times 0.03$
像元尺寸/ $\mu\text{m}$	26

成像光谱仪原理样机由望远镜，光谱成像系统，探测器，数据采集读出系统(图 2)组成。望远镜对无穷远处的电离层进行成像，光谱成像系统将物镜所成像斑进行分光并入射在探测器表面，最终由数据处理系统获得成像结果并输出到计算机。

## 2 光学系统分析与设计

### 2.1 前置望远系统设计

远紫外波段的特殊性使得几乎没有合适的透射材料可以应用，因此需要选用反射式望远系统。这里采用了离轴抛物镜，它没有球差和色差，且轴上点无像差，适用于较小的入射孔径系统，同时保证了传输效率。设计前置望远系统各视

场在 Nyquist 频率下 MTF 值大于 0.6(如图 3)。

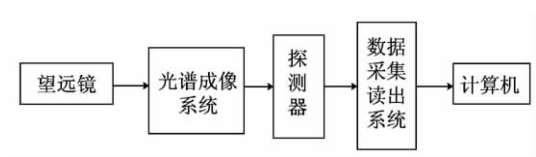


Fig 2 Schematic diagram of the spectrometer

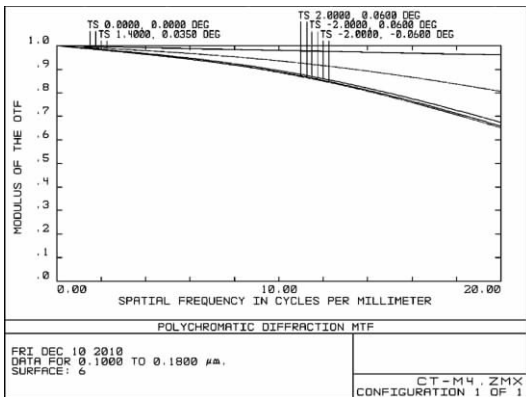


Fig 3 MTF of the telescope

### 2.2 光谱成像系统设计

由于远紫外波段信号微弱，应用于电离层探测的光谱成像系统通常使用适于微弱信号探测的反射式系统，色散元件采用平面光栅或凹面光栅。一般包括两镜结构(如 Elbert-Fastie 系统，Czerny-Turner 系统)，单镜结构(Wadsworth 系统)和单光栅结构。这些光学系统由于可调参数少，因此较难在宽波段上实现很高的成像质量。为满足成像光谱仪的成像使用要求，国外常使用一些非常规技术，如变间距凹面光栅<sup>[10]</sup>和非球面镜，目前实际应用中的系统空间分辨率最优可以达到 0.5 mrad。

这里对两种适用于电离层探测的远紫外光学系统进行研究，一种是单超环面光栅系统，它的好处是能最大程度的保证系统的传输效率，但是像差修正能力较差，目前国内很难进行加工，进口困难；另一种是 Czerny-Turner(C-T)系统，它具有好的像差校正能力，制造简单，但是由于光学元件多，因此传输效率要低于前者。

#### 2.2.1 单超环面光栅系统

根据光栅工作原理和光程理论<sup>[11]</sup>分析，将超环面光栅的光程函数表示如下

$$F = F_{00} + F_{10} + F_{20} + F_{30} + F_{40} + F_{02} + F_{12} + F_{22} + F_{04} + F_{20} + F_{21} + F_{22} + \dots \quad (1)$$

各个系数意义如表 3 所示。

由于上述三种像差不能在代数上同时为零，利用遗传算法进行辅助优化，可以求得该结构的初始参数。将算法优化结构参数输入 ZEMAX 中进行光线追迹和优化可以得到成像光谱仪结构如图 4，光学设计结果图如图 5 所示。

从图 5 中可以看到，设计系统可以在全波段全视场达到点列图 RMS 半径值小于  $9 \mu\text{m}$ ，这表示设计系统的像面上的像斑是小于探测器像元尺寸( $25 \mu\text{m}$ )的。结果证明该设计具

Table 3 Significances of coefficients

像差	系数
基本光程	$F_{00}, F_{20}$
基本光栅方程	$F_{10}, F_{21}$
球差	$F_{40}, F_{22}, F_{04}$
慧差	$F_{30}, F_{12}$
像散	$F_{02}, F_{22}, F_{20}$

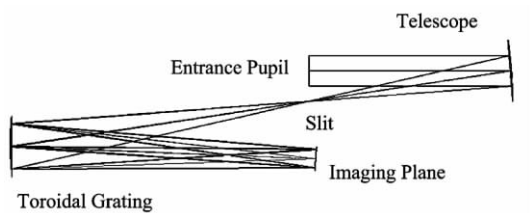


Fig 4 Toroidal grating spectrometer

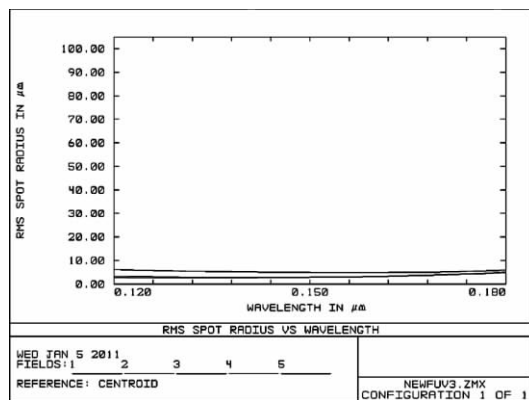


Fig 5 Result of the toroidal grating spectrometer

备在全波段同时实现像差校正的能力, 可以获得良好的成像质量。

### 2.2.2 改进式 Czerny-Turner 系统

传统的 Czerny-Turner (C-T) 系统需要转动光栅以满足不同波长下的最优分辨率。该结构的像差包括谱线扩散产生的慧差和狭缝的视场差引起的像散。由于各个波长校正的最优条件不同, 因此很难在宽波段上同时取得最佳像差校正, 这些缺陷都使得传统 C-T 结构不能满足成像光谱仪的要求<sup>[12]</sup>。

C-T 系统的光学结构如图 6 所示。 $R_1$  和  $R_2$  为准直镜和聚焦镜的曲率半径,  $\delta_1$  和  $\delta_2$  为准直镜和聚焦镜的入射角,  $i$  和  $\theta$  满足光栅方程  $d(\sin i + \sin \theta) = m\lambda$ 。我们将光栅置于准直

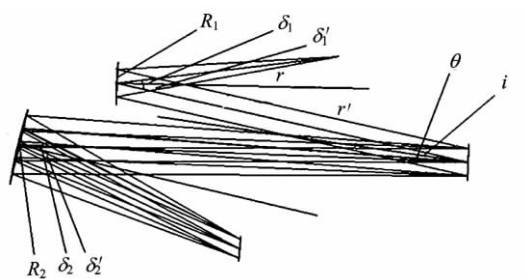


Fig 6 Schematic diagram of the C-T system

光照射中, 并将聚焦镜取为超环面镜形式, 从而有效地消除了慧差和像散的影响, 并获得了宽波段像差同时校正的最优条件

$$\begin{cases} L_{GF} = R_2 \cos \delta_2 \\ L_{FI} = R_2 \cos \delta_2 \left( 1 - \frac{\tan \delta_2}{\tan \alpha} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $L_{GF}$  为光栅到聚焦镜的距离,  $L_{FI}$  为聚焦镜到像面的距离,  $\alpha$  为像面与垂直方向的夹角。用 Zemax 设计得到结果如图 7。

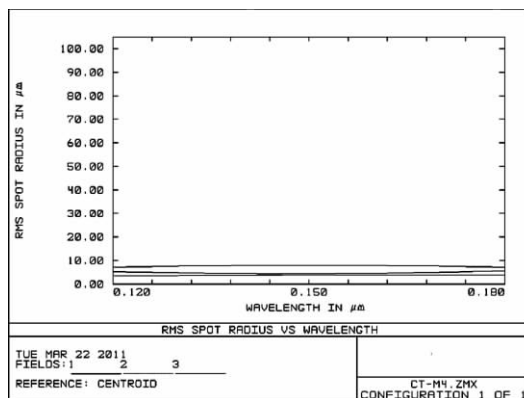


Fig 7 Result of the advanced C-T

图 7 反映了设计系统的像斑可以在全波段全视场达到点列图均方根半径小于  $9.5 \mu\text{m}$ ; 同时全视场的 MTF 值在 Nyquist 频率大于 0.65, 设计结果同样实现了在全波段获得良好的成像质量的能力。由于超环面光栅造价昂贵且难以购买, 在样机系统中我们选择了改进型 C-T 光谱仪结构, 并使用了远紫外响应背照型增强 CCD 做为探测器。

## 3 原理样机主要性能测试

我们主要对原理样机的两个主要性能进行测试, 即光谱分辨率和空间分辨率。这两个主要性能可以清楚反映设计系统的合理性。而原理样机的其他测试, 如像元精确标定, 信噪比测试等将在今后完成。

### 3.1 光谱分辨率测试

光谱分辨率测试的原理是: 利用已知的强度相近的波长差远小于待测仪器分辨率的谱线对仪器进行测定。实验系统图如图 8, 由氘灯光源、单色仪分光系统、远紫外成像光谱仪样机和真空系统<sup>[13]</sup>组成。

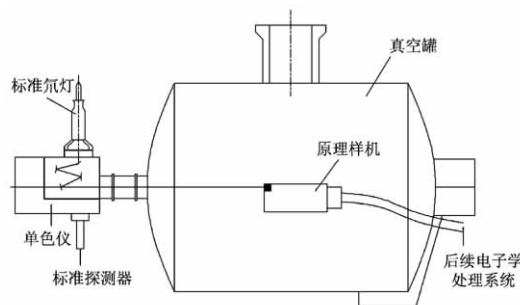


Fig 8 The general view of the experimental instrument

光源光线经单色仪进入成像光谱仪原理样机, 后续处理系统得到相应的光谱响应数据图如图9所示。成像光谱仪原理样机可将159和161 nm的谱线波长半峰宽完全区分开, 由此可知仪器的光谱带宽能达到2 nm, 满足设计指标的要求。

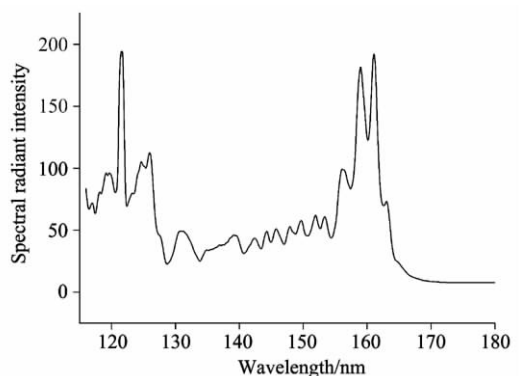


Fig 9 Spectral response data of the prototype

### 3.2 空间分辨率测试

空间分辨率是仪器成像质量的重要评价标准。在远紫外波段下无合适的空间分辨率测试方法, 根据系统的空间分辨率与光谱成像系统和光谱波段无关的原理, 将光栅换为刻线密度为远紫外光栅刻线密度四分之一的可见光光栅, 在保持设计值不变的情况下相当于对系统的四级谱进行成像观测, 从而将观测波段巧妙地挪至可见光处。采用美国空军(US-AF)三条靶来对空间分辨率进行检测, 该标靶空间频率  $N_c$  可以表示为

$$N_c = 2^{(k+\frac{m-1}{6})} \quad (3)$$

其中  $k$  为分组号,  $m$  为单元号。我们搭建空间分辨率检测装置如图10所示。

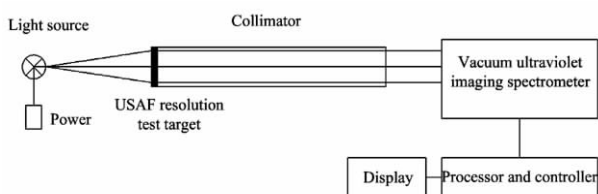


Fig 10 Spatial resolution test system

实验装置主要由光源、分辨率标靶, 准直光系统以及一些辅助装置组成。通过数据处理系统获得 CCD 上一列光谱的强度, 截取可区分最大分辨率部分的数据如图11, 可知仪器能够分辨  $k=3, m=1$  的最大空间频率, 根据式(3)可以计算得到  $N_c = 8 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 而平行光管的焦距为  $f_c = 240 \text{ mm}$ , 仪器焦距为  $f = 111.5 \text{ mm}$ , 故原理样机的空间分辨率为

$$N = N_c f_c / f = 18 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (4)$$

对应空间分辨率为 0.5 mrad, 达到了目前的先进设计水平。

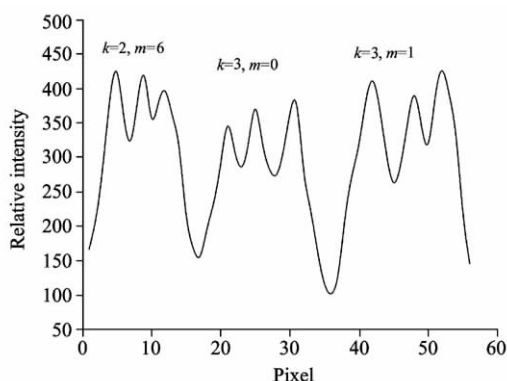


Fig 11 Intensity profile of test target of the prototype

## 4 结 论

(1)在国内首次根据电离层探测应用需求及遥感原理, 提出了合理的探测方案, 得到了相应的仪器指标。

(2)设计了两种光学系统。在光程函数和像差理论的基础之上对超环面光栅系统和 C-T 系统进行了研究, 获得了在宽波段上具有高成像质量和高光谱分辨率的良好设计结果。

(3)对远紫外成像光谱仪原理样机进行了集成, 并搭建了实验系统对原理样机最重要的两个指标: 空间分辨率和光谱分辨率进行了初步测试。得到空间分辨率约为 0.5 mrad, 光谱分辨率 2 nm, 这些性能指标是符合设计要求的, 因此表明这种样机的结构是合理的。

(4)由于目前只是原理样机的研制, 因此只对仪器的两个主要指标进行了初步测试, 以后还需要深化开展更多细致的工作: 包括进行远紫外的辐亮度 and 辐照度定标; 远紫外波段光学件镀膜优化研究; 图像处理 and 杂散光抑制等。这些工作将为后续研究奠定基础。

## References

- [1] Meier R R. Space Sci. Rev., 1990, 91: 1.
- [2] WANG Yong-mei, FU Li-ping, WANG Ying-jian(王咏梅, 付利平, 王英鉴). Progress in Geophysics(地球物理学进展), 2008, 23(5): 1474.
- [3] Schenkel F W, Ogorzalek B S, Larrabee J C, et al. Appl. Opt., 1985, 24(20): 3395.
- [4] Humm D C, Paxton L J, Christensen A B, et al. Proc. of SPIE, 1998, 3445: 2.
- [5] Kenneth F Dymond, Robert P McCoy. Proc. of SPIE, 1993, 1940: 117.
- [6] Phillip C Kalmanson, Janusz Wilczynske, Kent Wood, et al. Proc. of SPIE, 2005, 5901: 5901Q.
- [7] ZHENG Yu-quan, WANG Hui, WANG Yi-fan(郑玉权, 王慧, 王一帆). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2009, 17

- (11): 2629.
- [ 8 ] Daniel Morrison, Larry Paxton, Dave Humm, et al. Proc. of SPIE, 2002, 4485: 328.
- [ 9 ] WANG Shu-rong, LI Fu-tian, QU Yi(王淑荣, 李福田, 曲 艺). Chinese Journal of Optics and Applied Optics(中国光学与应用光学), 2009, 2(1): 17.
- [10] Tatsuo Harada, Hideo Sakuma, Kaoru Takahashi, et al. Appl. Opt., 1998, 37(28): 6803.
- [11] Namioka T. J. Opt. Soc. Am., 1959, 49: 446.
- [12] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LI Fu-tian, et al(薛庆生, 王淑荣, 李福田, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(4): 823.
- [13] YU Lei, LIN Guan-yu, QU Yi, et al(于 磊, 林冠宇, 曲 艺, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(11): 3156.

## Study on Far Ultraviolet Imaging Spectrometer with Grating Dispersion for Atmosphere Remote Sensing

YU Lei<sup>1,2</sup>, WANG Shu-rong<sup>1</sup>, LIN Guan-yu<sup>1</sup>, QU Yi<sup>1</sup>, WANG Long-qi<sup>1</sup>

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

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

**Abstract** The far ultraviolet imaging spectrometer with grating dispersion is mainly used in the detection of the ionosphere, thermosphere, auroral zone and glow zone. It is important for the study and application of the remote sensing of atmosphere in China. We designed two optical systems for the far ultraviolet imaging spectrometer, and obtained the plane grating structure prototype based on the principles of nadir and limb atmospheric sounding. The prototype working at the waveband of 120~180 nm consists of an off-axis parabolic mirror and an advanced Czerny-Turner spectral imaging system. The far ultraviolet response back-illuminating CCD is adopted as the detector. The corresponding experiment system was built to calibrate the basic performances of the spectrometer prototype. The spectral and spatial resolutions are 2 nm and 0.5 mrad respectively. The far ultraviolet imaging spectrometer prototype plays an important role in the study and application of atmospheric remote sensing.

**Keywords** Ionosphere; Imaging spectrometer; Far ultraviolet; Prototype; Resolution

(Received Jun. 23, 2011; accepted Sep. 6, 2011)