

文章编号: 0253-2239(2004)03-393-4

用于 290~450 nm 光谱测量的平场光谱仪

冯志庆 白 兰 李福田

(长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

摘要: 介绍了以自扫描光电二极管阵列 (SPD) 为探测元件的平像场光谱仪。该谱仪采用车尔尼-特纳 (Czerny-Turner) 正交型结构, 光谱分辨力为 0.5 nm/pixel。介绍了使用标准直流汞灯和标准石英卤素钨灯进行波长定标和辐射定标方法。并利用该平场光谱仪对 290~450 nm 太阳紫外/大气光谱进行了测量, 给出了测量结果。讨论了探测器的特性; 为抑制温度对测量结果的影响, 探测器两端侧某些像元被物理屏蔽, 设置其为背景参考像元即哑元, 利用哑元进行实时背景扣除方法来抑制温度漂移、暗电流、暗噪声等因素对测量精度的影响。根据仪器结构讨论了狭缝对谱线的影响, 给出了狭缝宽度和谱线宽度的对应关系, 并对仪器谱面上的相对测量误差进行了分析。

关键词: 光谱学; 辐射定标; 平像场光谱仪; 太阳紫外/大气光谱; 自扫描光电二极管阵列; 哑元

中图分类号: TH744.1 文献标识码: A

A Flat-Field Spectrograph for Measuring 290~450 nm Spectrum

Feng Zhiqing Bai Lan Li Futian

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Changchun 130022)

(Received 28 October 2002)

Abstract: A flat-field spectrograph with self-scanning photodiode arrays detector is introduced. It is Czerny-Turner structure, spectral resolution is 0.5 nm per pixel. Wavelength calibration and radiance calibration method by using standard DC mercury lamp and tungsten lamp are described, with the spectrograph, 290~450 nm solar ultraviolet/atmosphere spectrum is measured and the measured results are given. Characteristics of detector is discussed. In order to restrain influence the temperature drifting on measuring result, some pixels at the two ends of CCD array are masked with mechanic structure, they are looked as background reference pixels, just as dumb elements. Real-time background subtracting restrains the impact of temperature drift and dark current and dark noise. According to the structure of instrument, the influence of the slit width on spectral line is discussed, the relative measurement error of instrument is also analyzed.

Key words: spectroscopy; radiance calibration; flat-field spectrograph; solar ultraviolet/atmosphere spectrum; self-scanning photodiode arrays; dumb element

1 引 言

近年来随着光电阴极阵列器件和 CCD 器件的工艺与应用技术的研究和发展, 平场光谱仪在空间光学、等离子体物理、地面和空间遥感、X 射线激光及时间分辨光谱学等前沿科学和高技术领域得到了广泛的应用。在瞬态光谱的多通道并行测量中, 它

占据了不可替代的位置^[1], 具有精确的光量子计数功能和精确定位功能的探测器阵列的采用, 提高了波长定位精度和辐射能量探测精度。

本文采用较为常用的车尔尼-特纳 (Czerny-Turner) 正交结构设计了一种工作于 290~450 nm 波段的平像场小型光谱仪, 该仪器采用了传统的平面光栅和凹面反射镜结构, 焦面的不平直度小于 0.02 mm, 线色散率非线性因子为 10^{-5} 量级, 分辨力为 0.5 nm (600 线光栅)。为提高仪器太阳紫外波

E-mail: fengzhiqing@eyou.com

收稿日期: 2002-10-28

段的光谱响应,光学元件均采用铝膜外镀 MgF_2 而成,探测器采用了紫外增强型的自扫描光电二极管阵列,实现了 290~450 nm 的太阳紫外波段光谱的瞬态测量,并针对探测器特性提出了提高精度的仪器标定方法和测量方法。本文报道了用该谱仪进行 290~450 nm 太阳紫外/大气光谱部分测量结果。

2 实验装置

2.1 仪器光路及结构

图 1 光线通过入缝 S_1 进入仪器投射到准直镜 M_1 上,使光线投射到光栅 G 上,光栅衍射后的光线经过聚光镜 M_2 会聚到探测器光敏面上。

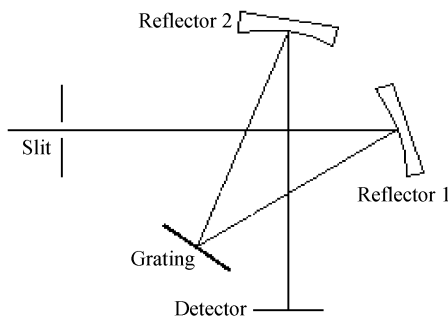


Fig. 1 Schematic diagram of optical path

多色仪采用的是正交排列的车尔尼-特纳变形结构,这种结构比较容易通过内部光阑来抑制杂散光,避免从入缝看见第二反射镜面。聚物镜到谱面中心距离为 152 mm,两反射镜中心线夹角为 25.4° 。光栅常量为 600 line/mm。光栅和两反射镜均采用玻璃溅射铝膜后镀 MgF_2 膜而成。对 290~450 nm 太阳紫外/大气光谱有好于 90% 的反射率。

仪器狭缝入口处有一个可旋入旋出的漫反射板,旋入时用于太阳紫外光谱辐照度的测量,太阳光经过漫反射板进入仪器狭缝,旋出时用于大气光谱辐亮度的测量,大气散射光谱直接进入仪器狭缝。

2.2 系统的电结构

系统的电结构框图如图 2 所示。

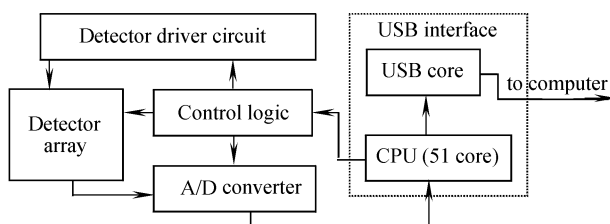


Fig. 2 The principle frame of system electronic structure

在本研究中,探测器采用的是日本滨松公司的线阵自扫描光电二极管阵列 S3921-512Q,它有

512 个像元,像元大小为 $50 \mu m$,光谱响应范围为 200~1000 nm,在紫外波段有较好的光谱响应。满足 290~450 nm 太阳紫外/大气光谱测量的需要。

传感器驱动和放大电路采用滨松公司的 C7885,该电路实现了对传感器信号的大动态范围的线性放大,控制逻辑电路对传感器动作提供时序逻辑控制,如改变积分时间等。由于 C7885 输出信号为 0~7 V,因此 A/D 芯片采用了 ADI 公司的 AD1674,USB 接口芯片为 CYPRESS 公司的 CY7C64613,该接口芯片内部集成了增强型 51 内核,在本文中同时用于时序逻辑控制和数据传送,性能满足连续实时光谱测量的需要。

3 仪器的波长定标与辐射定标

3.1 波长定标

从光栅的衍射方程 $d(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda$ 可得角色散

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta},$$

线色散

$$\frac{dl}{d\lambda} = f_2 \times \frac{m}{d \cos \beta},$$

其中, α 为入射角, β 为衍射角, d 为光栅常量, m 为衍射级次, λ 为光波长, f_2 为焦距。

色散公式中,和波长有关的 $\cos \beta$ 项非线性因子的存在引起谱面上线色散带有轻微的非线性,采用汞灯定标进行线性拟合时出现了 2 nm 左右的误差,在此本文引入了二次曲线拟合方法,误差减小到 0.5 nm 内,保证测量波长精度。

3.2 辐射定标

光路中包括反射镜(两面),光栅,线阵探测器共 4 个影响光谱传输的元件,本文只对仪器整机进行辐射定标(若更换光学元件需重新定标),定标采用中国计量院的石英卤钨灯光谱辐照度传递标准光源。

受探测器势阱深度的限制,探测器在曝光量达到一定程度后会饱和,为了适应不同光强测量,需要改变探测器的积分时间。对于弱光测量可增大探测器积分时间,对于强光测量可缩短积分时间。在理论上,探测器的输出和曝光量是线性关系,但由于暗电流、暗噪声以及信号放大单元的影响,最后的信号输出和积分时间并不是严格的线性关系,本文在进行仪器标定时测量出不同的积分时间的钨灯光谱数据(以 0.5 s 为间隔)。通过插值法得到不同积分时间的光谱辐照度响应度和光谱辐亮度的响应度。

1) 290~450 nm 光谱辐照度标定装置如图 3 所示。

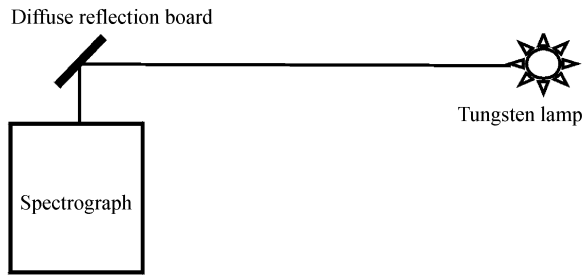


Fig. 3 Schematic diagram of spectral irradiance calibration

多色仪的光谱辐照度响应度 $\kappa(\lambda)$ 为

$$\kappa(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)\rho(\lambda, \theta)}{\Phi_s(\lambda)},$$

其中, $\Phi(\lambda)$ 为标准光源在镜面处的光谱辐照度, $\rho(\lambda, \theta)$ 为漫反射板的双向反射率分布函数(表示漫反射和朗伯余弦特性的偏离), 定标时入射角为 45° , $\Phi_s(\lambda)$ 为探测器光谱测量值。

2) 290~450 nm 光谱辐射亮度标定装置如图 4 所示。

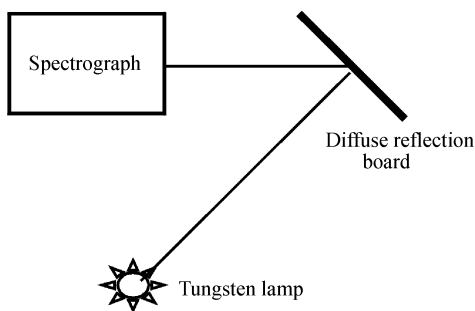


Fig. 4 Schematic diagram of spectral radiance calibration

多色仪的光谱辐射亮度响应度 $\kappa(\lambda)$ 为

$$\kappa(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)\rho(\lambda, \theta)}{\Phi_s(\lambda)},$$

其中, $\Phi(\lambda)$ 为标准光源在 BaSO_4 漫反射板处的光谱辐照度, $\rho(\lambda, \theta)$ 为漫反射板的双向反射率分布函数(表示漫反射和朗伯余弦特性的偏离), $\Phi_s(\lambda)$ 为探测器光谱测量值。

4 实验结果与结论

由于探测器采用前向照明非制冷的线性二极管阵列, 环境温度对暗电流和暗噪声的影响很大, 一般温度每升高 $5\sim 6^\circ\text{C}$, 暗电流要增加一倍, 因而在测量时除了保证较低的环境温度, 同时还要采用实时暗背景扣除的方法来消除温度影响, 在入射狭缝或引导光纤端面处置一黑板来测量背景, 在进行辐射

定标时采用同样的方法, 本文为使测量方便在谱面上用机械方法挡住探测阵列两端的几个像元使其成为哑元, 作为背景扣除时的参考背景, 这样可不用进行单独的背景测量, 便于测量的实时性, 缺点是无法对杂光进行抑制。

背景为 $\Phi_b(\lambda)$, 测量值为 $\Phi(\lambda)$, 则测量结果为

$$R(\lambda) = [\Phi(\lambda) - \Phi_b(\lambda)] \times \kappa(\lambda),$$

暗背景 $\Phi_b(\lambda)$ 是和波长弱相关的量, 主要成分是暗电流和暗噪声, 可认为

$$\Phi'_b(\lambda) = A_i,$$

本文 Φ'_b 取所设哑元输出值。

在上述方法指导下对 290~450 nm 太阳紫外/大气光谱的测量结果如图 5、图 6 所示。

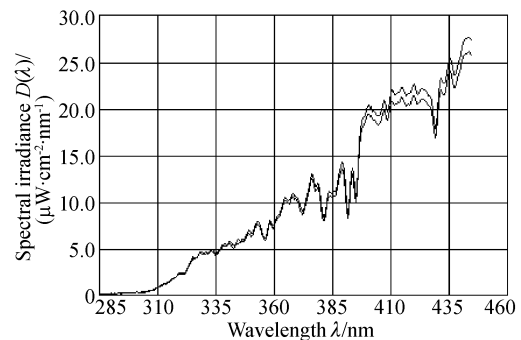


Fig. 5 Solar spectral irradiance of North China (Date: 24 September 2002; Time: 10:00, 10:45 for each curve respectively)

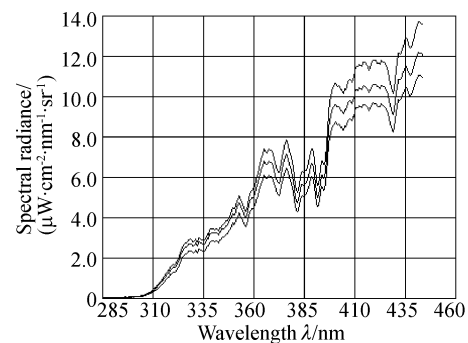


Fig. 6 Atmospheric spectral radiance of North China (Date: 24 September 2002; Time: 15:25, 15:50 and 16:15 for each curve respectively)

5 讨论

1) 狭缝宽度对光谱分辨率的影响: 谱仪的光谱分辨率极限和空间分辨率极限有如下的关系: $\delta_\lambda = \delta_x d\lambda/dl$, 即空间分辨率极限乘以线色散率为谱分辨率极限。而 δ_x 为狭缝在谱面上所成的像。

由于狭缝宽度使入射到光栅表面的平行光束的

扩散角为

$$\Delta\theta = S/f_1,$$

对于单色光有

$$d(\sin\alpha + \sin\beta) = m\lambda, \quad (1)$$

$$d[\sin(\alpha + \Delta\theta) + \sin(\beta + \Delta\beta)] = m\lambda. \quad (2)$$

对于平面光栅,我们可求出单色平行入射光束的微小扩散角 $\Delta\theta$ 与其衍射光束微小扩散角 $\Delta\beta$ 之间的关系。

对(2)式的小量 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\beta$ 求微分得

$$d(\cos\alpha \times \Delta\theta + \cos\beta \times \Delta\beta) = 0,$$

即

$$\Delta\beta = \frac{\cos\alpha}{\cos\beta} \times \Delta\theta,$$

$$\delta_x = f_2 \times \Delta\beta = \frac{f_2 \cos\alpha}{\cos\beta} \times \frac{S}{f_1},$$

$$\delta_\lambda = \frac{\delta_x d\lambda}{dl} = \frac{d \cos\alpha \times S}{f_1},$$

其中 α 为光栅入射角, β 为衍射角, f_1 为第一反射镜焦距, f_2 为第二反射镜焦距, S 为狭缝宽度, d 为光栅常量。

上式表示了谱线宽度和狭缝宽度之间的关系。

2) 量化误差分析: 不考虑定标标准光源和漫反射板误差, 从测量方程可得出测量相对误差表达式:

$$\left| \frac{\Delta R(\lambda)}{R(\lambda)} \right| = \left| \frac{\Delta \Phi(\lambda)}{\Phi(\lambda)} \right| + \left| \frac{\Delta \Phi_b(\lambda)}{\Phi_b(\lambda)} \right| + \left| \frac{\Delta \Phi_s(\lambda)}{\Phi_s(\lambda)} \right|,$$

式中, 第一项为测量相对误差, 第二项为背景相对误差, 第三项为定标相对误差, 对于 12 位, 10 V 满量程的模/数变换来说, 量化误差一般在 2.5 mV 左右, 在特定的温度下, 背景是一常量, 室温下 S3921 经放大后的输出为 800 mV, 背景测量相对误差为 0.3%。用于辐射定标的钨灯光源从 290~450 nm 的能量分布呈 2 次曲线的递增关系, 故标定相对误差倒数在

谱面上分布亦为 2 次曲线递增关系, 290 nm 处的输出为 200 mV, 相对误差为 1.25%, 450 nm 为 5200 mV, 相对误差为 0.05% (1 s 积分时间), 进行大气辐射测量时, 若 290 nm 处输出为 200 mV, 450 nm 处输出为 4.5 V, 总的相对误差为

$$\left| \frac{\Delta R}{R}(290 \text{ nm}) \right| = \frac{2.5}{150} + \frac{2.5}{800} + \frac{2.5}{200} = 3.22\%$$

$$\left| \frac{\Delta R}{R}(450 \text{ nm}) \right| = \frac{2.5}{4500} + \frac{2.5}{800} + \frac{2.5}{5200} = 0.42\%$$

因此, 为提高短波段测量精度, 在保证探测器像元未达到饱和的情况下, 应尽量增加探测器积分时间以满足能量要求, 像元饱和可能会殃及相邻像元^[3], 故在设计仪器时尽量选用高势井深度的阵列探测器以适应大动态范围信号的测量。

参 考 文 献

- 1 Zhang Jiyan, Yang Guohong, Zhang Baohan *et al.*. Design of a small-sized flat field grating spectrograph. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(9):1009~1102 (in Chinese)
- 2 Wu Baoning, Liu Jianping, Song Yibing *et al.*. Quantum analysis and measurement for transient spectrum. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7):825~828 (in Chinese)
- 3 Peckerar M C, Baker W D, Nagel D J *et al.*. X-ray sensitivity of a charge-coupled-device array. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(6):2565~2569
- 4 Hu Song, Chen Weimin, Wen Zhiyu *et al.*. Influence of photo-detector array on resolution and wavelength accuracy of spectrometer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(2):190~195 (in Chinese)
- 5 Li Zhigang, Wang Shurong, Li Futian. Fourier transform spectrometer for ultraviolet and vacuum ultraviolet regions. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(4):459~462 (in Chinese)