

文章编号 1004-924X(2007)10-1534-06

高精度光谱辐射计测量超低光谱透过率

薛庆生^{1,2}, 王淑荣¹, 宋克非¹, 李福田¹

- (1. 中国科学院 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, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:设计并研制了一种基于光栅双单色仪的高精度全自动单光束光谱辐射计。该仪器主要由高稳定氙灯、带有快门的单光阑屏、石英透镜、中性减光片、紫外光栅双单色仪、光电探测器及电控系统组成,测量光谱范围为200~400 nm,可以实现 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 量级光谱透过率高精度测量,测量过程由自行编制的计算机软件进行自动控制,能实现全自动单光束测量。给出了该仪器的测量原理、测量方法及数据处理方法。利用该仪器测量了紫外滤光片样品的光谱透过率,分析了测量不确定度。实验结果表明,该仪器测量精度高、速度快、测量合成标准不确定度 $< 3.16 \times 10^{-3}$,完全满足测量精度要求,可应用于对精度要求高的紫外滤光片光谱透过率的测量。

关键词:光谱辐射计;双单色仪;透射率测量;滤光片;日盲

中图分类号: TP722.3 **文献标识码:** A

Measurement of ultralow spectral transmissivity by high-precision spectral radiometer

XUE Qing-sheng^{1,2}, WANG Shu-rong¹, SONG Ke-fei¹, LI Fu-tian¹

- (1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: Based on a grating double-monochromator, a high-precision, automated and single-beam spectral radiometer was designed for the high-accuracy measurement of ultralow spectral transmissivity of ultraviolet filter. It mainly consists of a xenon arc lamp with high stabilization, a one-aperture screen with shutter, quartz lenses, a neutral density degradation plate, an ultraviolet grating double-monochromator, a photodetector and an electronic control system, and the spectral transmissivity is $10^{-6} \sim 10^{-8}$ in spectral ranges from 200 nm to 400 nm. Measurement process can be controlled by a computer with special software. The principle, measurement method and datum processing method of the instrument were provided, and measurement uncertainty was analyzed. A filter sample was measured with this instrument, the measured results demonstrate that the spectral instrument has high precision, fast speed, and the measurement combined standard uncertainty is less than 3.16×10^{-3} , which meets the requirements of measurement precision. This instrument can be used to measure the

收稿日期:2007-05-21;修订日期:2007-06-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40675083)

spectral transmissivity of ultraviolet filter with high precision requirement.

Key words: spectral radiometer; double-monochromator; transmissivity measurement; optical filter; solar blindness

1 引 言

空间紫外遥感是除可见、红外及微波遥感以外的一个具有突出优势的遥感领域,在大气物理、环境科学、气象学、目标/背景信息等方面有重要应用^[1-4],近年来发展十分迅速。但在紫外-真空紫外空间光学传感器、卫星姿态敏感器^[5-6]等装备的研制中,人们遇到一个共同的问题,即太阳/大气长波杂散辐射严重影响短波紫外辐射探测,太阳和大气的可见-红外辐射比紫外辐射强很多,且覆盖波段宽,会引起强烈的光谱杂光。早期人们采用“日盲”型探测器(如“日盲”型光电管或光电倍增管)简单解决这一问题,能使紫外探测系统中可见、红外杂散辐射的影响降低到 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 量级,但还远不能满足需求。

目前,人们着手研制对工作波长外深度截止的紫外“日盲”型带通滤光片,该类滤光片在工作波长外具有 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 量级的超低光谱透过率,用在紫外探测器系统中能够更好地抑制杂散辐射,从而大大提高紫外探测的能力。该类滤光片的研制成功,对空间紫外传感器、卫星姿态敏感器、紫外预警等紫外探测仪器的研制具有重大意义。研制深度截止紫外“日盲”型带通滤光片不仅涉及材料、设计及工艺问题,而且涉及高精度超低光谱透过率测试问题。商业用的测量光谱透过率的仪器很难满足测量要求,并且很难估算由于各种仪器参数引入的系统不确定度。针对以上现实情况,基于紫外光栅双单色仪研制了这套高精度光谱辐射计来测量超低光谱透过率。测量波长为 $200 \sim 400 \text{ nm}$,可实现 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 量级光谱透过率的高精度测量。

2 测量原理

通常,光谱透过率定义为透射光与入射光之比,表示为:

$$T(\lambda) = \frac{I_f(\lambda) - I_0}{I_{uf}(\lambda) - I_0}, \quad (1)$$

式中, $T(\lambda)$ 为滤光片的光谱透过率, $I_f(\lambda)$ 为光路中加载滤光片时光谱辐射计的读出值, $I_{uf}(\lambda)$ 为光路中不加载滤光片时光谱辐射计的读出值, I_0 为光谱辐射计背景噪声的读出值。但深度截止紫外“日盲”型带通滤光片的高精度测试要求测量系统具有 10^8 的动态范围,只依靠光电探测器很难实现这么大的动态范围,对此,本文提出了采用中性减光片与大动态范围光电探测器相结合的方法在光路中将中性减光片与待测滤光片互换以实现 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 量级光谱透过率的高精度测试。中性减光片的减光比 $\alpha(\lambda)$ 表示为:

$$\alpha(\lambda) = \frac{I_d(\lambda) - I_0}{I_{uf}(\lambda) - I_0}, \quad (2)$$

式中, $I_d(\lambda)$ 为光路中加载中性减光片时光谱辐射计的读出值。这样,紫外滤光片光谱透过率 $T(\lambda)$ 可由式(1)与式(2)联立求出:

$$T(\lambda) = \frac{I_f(\lambda) - I_0}{I_d(\lambda) - I_0} \times \alpha(\lambda). \quad (3)$$

从工作原理上看,这种测量滤光片光谱透过率的方法是利用双单色仪对滤光片波段进行光谱扫描的方法。从式(3)可以看出,测试前,先测出光谱辐射计的本底噪声 I_0 ,然后依次测出加载中性减光片和加载待测滤光片时的探测器值,最后由式(3)求得光谱透过率。

3 高精度光谱辐射计系统组成

高精度光谱辐射计系统,主要由光源、入射光路、Ebert-Fastie型光栅双单色仪、光电探测器及电控系统组成,系统结构示意图如图1所示。

高稳定性氙灯经带有快门的单光阑屏、石英透镜、中性减光片或待测滤光片成像在光栅双单色仪的入射狭缝上,经Ebert-Fastie型光栅双单色仪色散,在单色仪出射狭缝平面形成谱带。当单色仪光栅转动时,不同波长的单色辐射依次通过出射狭缝,从出射狭缝射出的光入射到探测器上,从探测器输出的光电流经Keithley 617型静电计放大器,然后经GPIB接口上传到计算机,由计算机采集与处理。

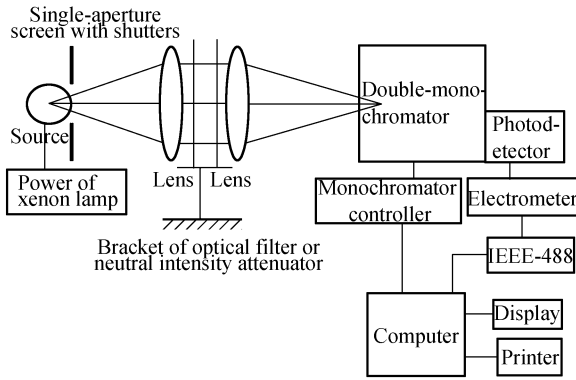


图 1 光谱辐射计系统结构示意图

Fig. 1 Scheme of spectral radiometer system

3.1 系统光源

光源的波段、功率和稳定性是设计中必须首先给予考虑和关心的。氙灯具有宽的波段范围,且在 200~400 nm 波段为连续谱,没有线状谱^[7]。因此,在综合分析的基础上选用日本滨松公司研制的 1~3 kW 高温定性氙灯作为仪器的光源。

3.2 入射光路的选择

照明部分采用什么形式的光学结构,对系统的入射效率以及后面的出射效率影响都很大,在光学结构选型时,主要考虑以下几种方式。

3.2.1 光纤导入方式

通常使用多根光纤组成的光纤束。一端通过耦合装置将光源发出的光线耦合进光纤,另一端将光纤排列成入射狭缝的形状。光纤选择时考虑与单色仪的 $F\#$ 匹配,该方式显著的优点是结构简单、使用方便。但同时存在光纤传输损耗,出射效率不高;光纤与狭缝的配合对机械调整的要求很高,难以保证高精度的耦合重复性等不足。

3.2.2 双抛物面反射镜方式

抛物面反射镜具有如下特性:对于从焦点射来的光线,经抛物面反射镜后平行出射;对于平行入射的光线,经抛物面反射镜后会聚到焦点处。这种照明方式选用的是一对完全相同的离轴抛物面反射镜,光源位于第一个反射镜的焦点处,经过第一个镜面反射成平行光并传递给第二个反射镜,平行光的出射方向和抛物镜的光轴平行,第二个抛物反射镜将光线会聚到焦点处,也就是单色仪的入射狭缝处。该方式的优点在于光路中均采用反射式结构,不会引入像差,且效率较高;缺点是由于离轴抛物反射镜属于非球面镜,加工难度

大,成本高,光路调整困难。

3.2.3 双透镜式

第一个透镜起准直作用,光源置于第一个透镜的焦点处,经第一个透镜后变成平行光;第二个透镜按照系统的 $F\#$ 进行设计,并将平行光聚焦到入射狭缝处。该结构的特点是:结构简单,光能量利用率高,易于调整,且能量稳定。

综合比较这三种方式的优缺点,根据使用要求最终选择了第三种。光路如图 1 所示。

3.3 Ebert-Fastie 紫外光栅双单色仪

系统中紫外光栅双单色仪采用由两个相对孔径为 $f/5$ 的 Ebert-Fastie 型单色仪串接成的色散相加的光栅双单色仪设计方案,光路如图 2 所示。

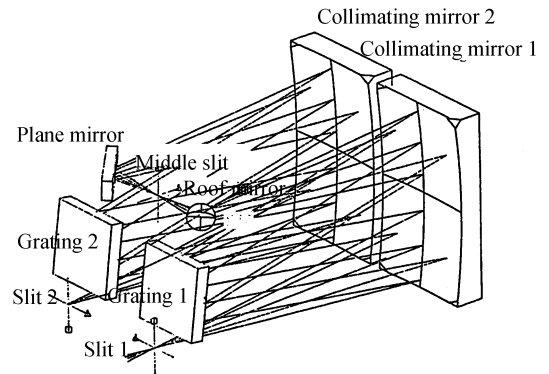


图 2 Ebert-Fastie 光栅双单色仪结构图

Fig. 2 Scheme diagram of Ebert-Fastie grating double-monochromator

为使结构紧凑、色散相加,亦为使两个单色仪的光栅可以同轴驱动,在两个单色仪之间采用了屋脊反射镜和平面镜进行光学传递。球面准直一聚光镜焦长 250 mm,熔融石英材料,镜表面镀 $Al+MgF_2$ 膜,200~400 nm 波段镜面光谱反射率高于 80%。光栅采用的是全息光栅,光栅刻线面积 $52\text{ mm}\times 52\text{ mm}$,刻线密度 2 400 l/mm,表面镀 $Al+MgF_2$ 膜,工作波段 200~400 nm。色散相加的光栅双单色仪消杂光能力按平方增加,通常单个单色仪的杂光水平在 10^{-3} ,用两单色仪串接并加中间狭缝其杂光水平在 $10^{-3}\times 10^{-3}=10^{-6}$ 左右,杂光分析及实验证明所选用的光栅双单色仪方案杂光抑制能力优于 10^{-6} 量级,从而扩大了系统光谱透过率测量的动态范围,提高了测量的精度。光栅双单色仪的波长扫描驱动器由计算机

控制,可在 200~400 nm 范围内进行波长扫描,光谱分辨率 0.15 nm,300 nm 处光谱带宽 1.0 nm。

3.4 中性减光片和光电探测器

采用的探测器为日本滨松公司研制的 R1689-02Mod 型光电倍增管。双碱光阴极,光阴极有效直径为 25.4 mm,为端窗式,窗口材料为蓝宝石,外形为 $\Phi 35\text{ mm} \times 108\text{ mm}$,具有 10^6 量级的动态范围,且在此动态范围内具有高线性度。为实现 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 量级深度截止紫外“日盲”型带通滤光片光谱透过率的高精度测试,提出了通过将中性减光片与待测滤光片在光路中互换的方法。在仪器研制过程中,先后采用了孔径可变光阑、毛玻璃及丝织减光板作为衰减片进行减光比测试,并做了比对。孔径可变光阑和毛玻璃的减光比随波长变化较大,不适合作中性减光片;丝织减光板的减光比随波长变化很小,如图 3 所示,在 200~400 nm 波段内,减光比变化在 1‰ 以内,可作为中性减光板。

点数,给出测量值、均值及标准偏差。纵坐标还具有档位调节功能,图像纵坐标设三档:1 000 nA、100 nA、10 nA,具有光谱透过率计算及图像显示、保存、回放功能。

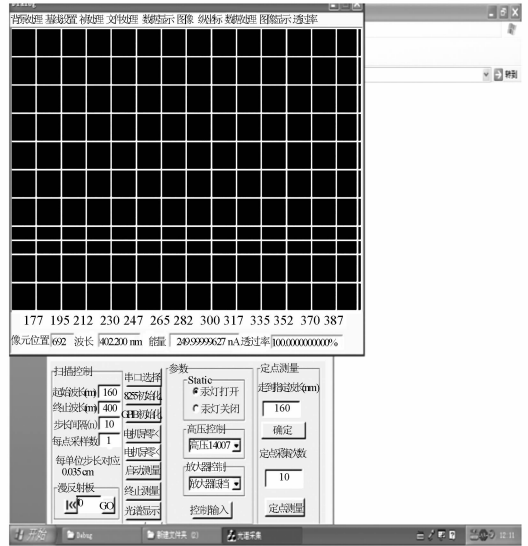


图 4 测量程序界面

Fig. 4 Interface of measuring software

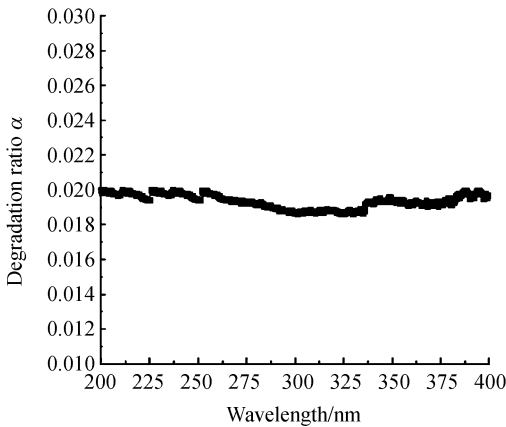


图 3 丝织减光板减光比随波长变化关系曲线

Fig. 3 Degradation ratio of silk plate

3.5 装置自动测量程序设计

为实现测量的自动化,利用计算机对测量的各个环节的操作进行自动控制,如快门的开合、波长扫描、数据采集与处理、文件存储等。采用 VC++ 编制了在 Windows 操作环境下的自动测量程序。程序软件具有良好的界面,丰富的菜单选择,如图 4 所示。可进行连续扫描和单点测量,连续扫描设定了起始波长、终止波长、间隔点数(电机步数,每步 0.035 nm)及积分次数(每点采集次数)。单点测量功能可走到指定波长处,输入采集

4 实验

本文利用该高精度光谱辐射计系统对滤光片样品进行了光谱透过率测量。测量实验之前,系统整体预热 30 min,包括氙灯和探测器预热。在测量过程中,先测出光谱辐射计本底噪声 I_0 ,然后将中性减光片置入光路,高稳定性氙灯辐射的光经石英透镜聚光通过中性减光入射到紫外光

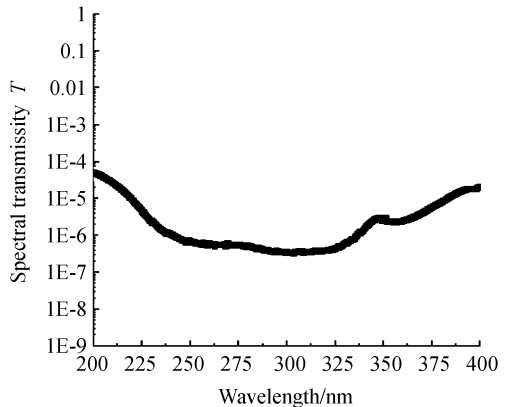


图 5 滤光片样品光谱透过率

Fig. 5 Spectral transmissivity of filter sample

栅双单色仪的入射狭缝上,从出射狭缝出射后由光电倍增管探测器接收,采用 Keithley 617 型高精度静电计放大器测量光电倍增管的输出,输出的读出值为 $I_d(\lambda)$,通过 GPIB 接口输入计算机中,由计算机采集、保存、处理。把中性衰减片换成待测滤光片,光电倍增管的输出的读出值为 $I_f(\lambda)$,运行编好的程序可以输出待测滤光片的光谱透过率 $T(\lambda)$,测得滤光片样品的光谱透过率曲线如图 5 所示。

5 不确定度分析

测量装置可能的不确定度来源有:光源的稳定性、光栅双单色仪波长重复性、杂散光、放大器及光电探测器的线性。光源采用高稳定性电源给氙灯供电,氙灯稳定性达到 0.01%。经过多次测试,光栅双单色仪的波长重复性为 0.3%。探测器前加了光栅双单色仪,杂光分析及实验表明,光栅双单色仪的杂散光抑制能力优于 10^{-6} 量级,故杂散光干扰的影响被抑制到可以予以忽略的程度。放大器及光电探测器线性测量采用双光阑叠加法,通过该方法测得的放大器及光电探测器线性不确定度为 0.1%。

根据以上不确定度源分析及 NIST1297 综合不确定度公式^[8-9]得:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot u(x_i, x_j), \quad (4)$$

由于每个分量不确定度之间并不相关,因此式(4)改为:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i). \quad (5)$$

参考文献:

- [1] 王淑荣,邢进,李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(2): 185-190. WANG SH R, XING J, LI F T. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 185-190. (in Chinese)
- [2] LEITCH J W, RODRIGUEZ J V, DITIMAN M, et al.. Limb scatter ozone profiling sensor for the NPOESS ozone mapping and profiler suite (OMPS)[J]. *SPIE*, 2003, 4891: 13-21.
- [3] NEELE F, SCHLEIJPEN R. Electro-optical missile plume detection[J]. *SPIE*, 2003, 5075: 270-280.
- [4] DITTMAN, MICHAEL G, JAMES, et al.. Limb broad-band imaging spectrometer for the NPOESS ozone mapping

根据式(5)得出滤光片光谱透过率测量合成标准不确定度为 $u_c = 0.316\%$ 。测量近似服从正态分布,置信水平 $p = 99\%$ 时,包含因子 $k_p = 3$,扩展不确定度 $U_p = k_p u_c = 9.48 \times 10^{-3}$ 。表 1 是滤光片光谱透过率测量的不确定源以及合成标准不确定度和扩展不确定度。

表 1 光谱透过率测量的不确定度源

Tab. 1 Uncertainty components for spectral transmissivity measurements

| Uncertainty component | Uncertainty |
|----------------------------------|----------------------------------|
| Stability of source | 1×10^{-4} |
| Reproducibility of monochromator | 3×10^{-3} |
| Linearity of photodetector | 1×10^{-3} |
| Combined standard uncertainty | 3.16×10^{-3} |
| Expanded uncertainty | $9.48 \times 10^{-3} (p = 99\%)$ |

6 结 论

设计并研制了一种高精度光谱辐射计来测量深度截止紫外“日盲”型带通滤光片超低光谱透过率,其光谱覆盖 200~400 nm,可实现 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 量级超低光谱透过率的高精度测量。分析了测量不确定度,测量合成标准不确定度为 0.316%,完全满足测量精度要求。测量过程由自行编制的计算机软件进行自动控制,并在软件设计中采用了数据处理技术,提高了测量速度和准确度。实验结果表明,该高精度光谱辐射计系统具有测量范围大、精度高、速度快等特点,可应用于对精度要求高的紫外滤光片超低光谱透过率的测量。

and profiler suite (OMPS)[J]. *SPIE*, 2002,4814:120-130.

- [5] 李春艳,李怀峰,孙才红,等. 高精度星敏感器天文标定方法及观测分析[J]. *光学精密工程*, 2006,14(4):558-563. LI CH Y, LI H F, SUN C H, *et al.* . Astronomical calibration method and observation analysis for high accuracy sensor[J]. *Opt. Precision Eng.* , 2006,14(4):558-563. (in Chinese)
- [6] 刘金国,李杰,郝志航. APS星敏感器探测灵敏度研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4):553-557. LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on detection sensitivity of APS star tracker[J]. *Opt. Precision Eng.* , 2006, 14(4):553-557. (in Chinese)
- [7] 车念曾,阎达远. 辐射度学和光度学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1995. CHE N Z, YAN D Y. *Radiometry and Photometry*[M]. Beijing:The Publishing Board of Beijing University of Science and Technology, 1995. (in Chinese)
- [8] TAYLOR B N, KUYATT C E. Guidelines of NIST measurement results[C]. *NIST Technical Note 1297*, Washington, DC: Government Printing Office, 1994.
- [9] JJF1059-1999. 测量不确定度评价与表示[S]. 北京:中华人民共和国国家质量技术监督局,1999. JJF1059-1999. *Appraise and express of uncertainty of measurement*[S]. Beijing:Administration of Quality technique Supervision of the People's Republic of China,1999. (in Chinese)

作者简介:薛庆生(1979—),男,山东梁山人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要研究方向为空间紫外遥感仪器及光学系统设计。E-mail:qshxue2006@163.com

王淑荣(1961—),女,吉林长春人,中国科学院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研究员,博士研究生导师,主要从事空间紫外-真空紫外遥感仪器方面的研究。

(本栏目编辑 严寒)