

高精度紫外标准辐射计

王 锐^{1,2} 王淑荣² 郭 劲^{1,2} 王挺峰^{1,2} 张振铎²

¹激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130031
²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031

摘要 以美国国家标准研究院(NIST)标准探测器为核心,加入分光系统,数据采集系统,共同构建一套具有自身响应度标准的高精度紫外标准辐射计。并对其内部核心元件进行了性能测试,在 NIST 标准探测器响应度已知的情况下,经过理论推导并加入相应的修正因子,最终得到高精度紫外标准辐射计的响应度标准。并对高精度紫外标准辐射计进行了精度(达 1.3%)分析,证明了该辐射计具有良好稳定性,较高精度及自身响应度标准。

关键词 探测器;标准辐射计;响应度;不确定度

中图分类号 0432 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0404001

High-Accuracy Ultraviolet Standard Radiometer

Wang Rui^{1,2} Wang Shurong² Guo Jin^{1,2} Wang Tingfeng^{1,2} Zhang Zhenduo²

¹State Key Laboratory of Laser Interaction with Mater, Changchun, Jilin 130031, China
²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130031, China

Abstract After adding the beam-splitting and data-acquisition system, a set of high-accuracy ultraviolet standard radiometer (HAUSR) with self responsibility standard is constructed by using the standard detector of National Institute of Standards and Technology(NIST) as core element. The core elements of HAUSR have been tested. With the responsibility of the standard detector known, the responsibility standard of HAUSR had been deduced by theoretical derivation and adding corresponding correction factor. The accuracy (to 1.3%) of HAUSR is analyzed. It proves the HAUSR system has fine stability, high accuracy and self responsibility standard.

Key words detectors; standard radiometer; responsivity; uncertainty

OCIS codes 040.0040; 300.6540

1 引 言

近年来,随着空间技术的发展,太阳紫外(UV)光谱研究日益活跃,大量的测试结果给出了太阳紫外光谱及其随时间的变化,为太阳物理、高层大气物理和气候学研究提供了资料。空间紫外遥感领域的发展也对紫外波段辐射定标的精度提出了更高的要求^[1]。从理论上讲,实现绝对光谱辐射定标的途径有两个:一是基于标准光源,二是基于标准探测器。目前,标准光源定标方法已作为成熟技术普遍应用于辐射定标工作中^[2],然而,由于标准光源自身不确定度较大(与标准探测器相比高出 50%),且在定

标过程中引入了较多不确定度因素,因此,定标精度难以进一步提高。

为了提高紫外波段定标精度及进一步验证标准光源定标方法的有效性,以美国国家标准研究院(NIST)标准探测器为核心,构建一套高精度紫外标准辐射计(HAUSR),与国内目前所研制的辐射计相比,该辐射计具有更好的稳定性,更高的精度,并具备自身响应度标准,利用这种高精度紫外标准辐射计,可以实现对待测光源,待测遥感仪器的高精度辐射定标^[3]。本文主要针对高精度紫外标准辐射计的构建,性能评价及响应度标准推导展开讨论,为其

收稿日期: 2010-07-21; 收到修改稿日期: 2010-11-22

基金项目: 国家 863 计划(2002AA2Z9999,2004AA99)资助课题。

作者简介: 王 锐(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事目标特性测量方面的研究。

E-mail: darui9999@yahoo.com.cn

在具体辐射定标工作中的应用奠定基础。

2 高精度紫外标准辐射计装置

高精度紫外标准辐射计的设计理念是以结构紧凑,便于安装携带,内部构造简单,性能稳定为主。并且不加入任何其他光学元件,可实现高精度紫外标准辐射计响应度标准的准确推导。

结合以上要求,以 NIST 标准探测器 S2281 为核心,加入滤光片分光系统,电机驱动系统及数据采集系统共同构建一台高精度紫外标准辐射计。其结构如图 1 所示。

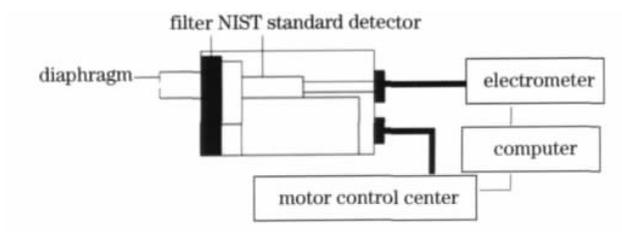


图 1 高精度紫外标准辐射计结构
Fig. 1 Structure of high-accuracy UV standard radiometer

入射光阑孔径为 11 mm,保证探测器接受面 10 mm² 范围内全部接受到光辐射。滤光片轮上装有 4 个波段的紫外滤光片,分别为 280, 313, 352 和 365 nm。通过电机控制系统控制滤光片轮转动,使不同波段的单色光入射到 NIST 标准探测器接受面上,静电计将标准探测器信号值采集到计算机中。根据高精度辐射计自身响应度标准即可得到入射的相应波段光辐射。

3 高精度紫外标准辐射计核心元件性能测试

3.1 探测器性能测试

作为高精度辐射计的核心器件—探测器,其性能的优劣直接决定高精度辐射计的精度和稳定性。探测器的选择显得尤为重要。根据高精度辐射计的设计要求,需要找到一种具有良好稳定性及较高线性,结构紧凑,光谱响应波段覆盖较宽,并具有自身响应度标准的探测器。综合考虑以上因素,硅探测器成为不二选择^[4]。而 NIST 标准探测器 S2281 即为携带探测器响应度标准的硅探测器。通过以下一系列的性能测试,将 NIST 标准探测器及日本滨松硅探测器加以比较,即可明显看出 NIST 标准探测器的优势。

3.1.1 探测器接收面空间均匀性测试

空间均匀性是硅探测器的重要特性,理想的光辐射探测器具有良好的空间响应均匀性,即入射光照射在探测器光敏面上的不同位置时,得到的输出信号相同。但是受光敏面材料和制造工艺的限制,以及落在光敏面上的细小灰尘等影响,实际上探测器的响应度是空间非均匀性的。光敏面不同区域在相同的入射条件下的响应都会存在差异,而这种差异直接影响到探测器的测量精度^[5]。

探测器扫描波长为 350 nm,光斑直径为 1 mm,扫描区域为 10 mm×10 mm,间隔为 1 mm。延迟 5 s,测试装置如图 2 所示。图 3,图 4 及图 5 给出了相应的测试结果。

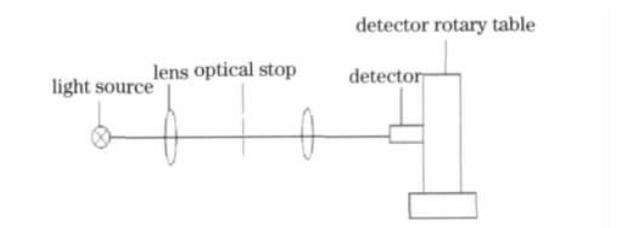


图 2 探测器接收面灵敏度均匀性测试装置
Fig. 2 Testing instrument of sensitivity uniformity of the detector area

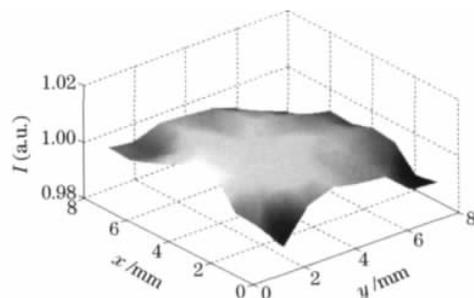


图 3 NIST 标准探测器接收面空间均匀性曲面图
Fig. 3 Curved surface of spatial uniformity of the NIST standard detector's receiving area

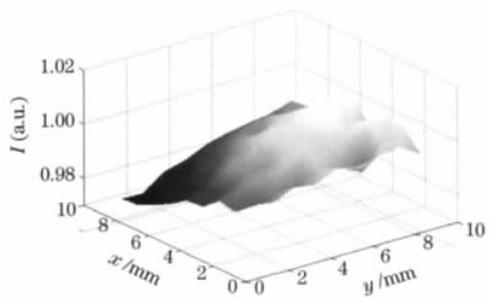


图 4 日本滨松硅探测器 1 接收面空间均匀性曲面图
Fig. 4 Curved surface of spatial uniformity of the Japanese Hamamatsu silicon detector 1's receiving area

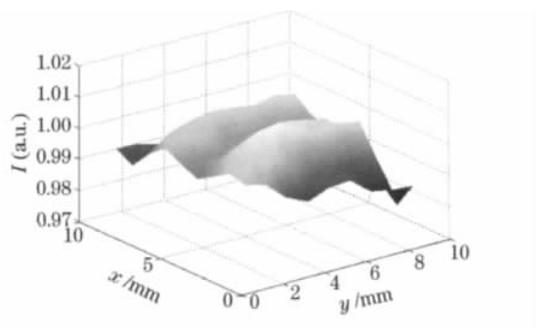


图 5 日本滨松硅探测器 2 接收面空间均匀性曲面图

Fig.5 Curved surface of spatial uniformity of the Japanese Hamamatsu silicon detector 2's receiving area

由以上 3 幅图可以看出, NIST 标准探测器响应度空间均匀性明显好于另外两个日本滨松硅探测器。通过计算可得到其空间均匀性如表 1 所示。

表 1 3 种探测器接收面空间均匀性

Table 1 Spatial uniformity of the three detector's receiving area

Detector	Spatial uniformity
NIST standard detector	$\leq 1.5\%$
Hamamatsu silicon detector 1	$\leq 2.7\%$
Hamamatsu silicon detector 2	$\leq 2.4\%$

在后面章节中将利用探测器接收面空间均匀性数据对探测器响应度进行修正。

3.1.2 探测器接线性测试

线性是探测器的基本性质之一, 当探测器响应度恒定时, 即探测器的响应度不随入射光功率的变化而变化时, 探测器是线性的。线性测量是辐射度学研究和光电传感器性能评价不可缺少的环节之一^[6]。

现有的探测器线性测量方法, 有距离平方反比法, 偏振片法等。这里采用的是一种易于实现, 并且精度较高的方法: 中性减光板法加双光阑法。

线性测量装置如图 6 所示, 采用中性减光板法加双光阑法的方法。减光梯度为 0.01%, 0.1%, 1%, 10%, 31.62%, 50.12%, 79.43%, 100%。

测试结果表明, NIST 标准探测器在 10^4 动态范

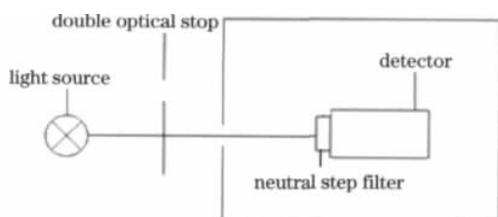


图 6 探测器线性测试装置

Fig.6 Instrument of detector linearity testing

围内线性远远小于 0.6%。而滨松硅探测器线性远远小于 0.7%。NIST 标准探测器的线性完全符合高精度紫外标准辐射计的设计要求。

3.1.3 探测器稳定性

利用 UV-LED 对 NIST 标准探测器及两个滨松硅探测器的信号稳定性进行了长时间的测试, 并对测试结果进行归一化处理, 如图 7 所示。由图中可以看出, 标准探测器信号稳定性在 0.6% 左右, 明显好于另外两个滨松硅探测器, 符合高精度紫外标准辐射计设计要求。

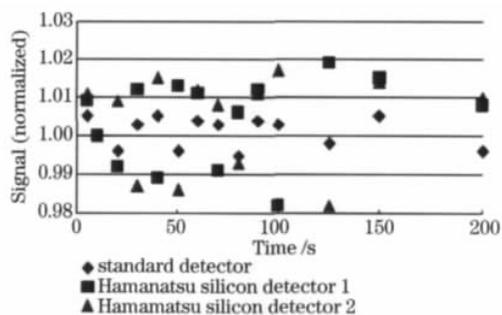


图 7 三种探测器稳定性测试结果

Fig.7 Stability testing of the three detector

3.2 滤光片选择及稳定性、均匀性测试

作为高精度辐射计的另一核心元件——滤光片的选择也很重要, 根据高精度辐射计设计要求, 需要所选滤光片具备以下特性:

- 1) 窄带宽, 较窄的带宽更利于高精度辐射计自身响应度标准的计算;
- 2) 高稳定性, 滤光片透射率的稳定性直接决定了高精度辐射计的稳定性;
- 3) 较好的均匀性, 滤光片表面透射率均匀性的优劣会直接影响高精度辐射计的精度。

根据以上要求, 对国内不同厂家的滤光片进行了一系列性能测试。最终选出的滤光片, 完全符合要求。

对于滤光片的稳定性, 进行了长达一年的定期监视性测试。测试结果如表 2 所示。

测试结果显示, 所选用的滤光片在一年的时间内其中心波长、带宽和峰值透射率变化细微, 完全符合高精度辐射计的设计要求。

由于滤光片现有镀膜工艺所限, 其透射率均匀性不可避免的会存在一定差异^[7], 采用前文所介绍的探测器接收面空间均匀性测试装置, 对滤光片均匀性进行测试。以滤光片圆心为基准向外径方向, 选取 9 个点进行测试, 如图 8 所示, 光斑直径为 1 mm。测试结果如表 3 所示。

表 2 滤光片长期稳定性测试

Table 2 Long-term stability testing of the filter

Filter	Central wavelength		
	2008.6	2009.6	change
280	280.15	280.25	0.1
313	314.3	314.45	0.15
352	353.5	353.35	0.015
365	364.95	364.75	0.02

Filter	Central wavelength		
	2008.6	2009.6	change
280	25.5	24.3	1.2
313	10.6	9.8	1.1
352	10.1	8.9	1.2
365	11.4	10.4	1

Filter	Central wavelength		
	2008.6	2009.6	change
280	0.277	0.271	0.006
313	0.648	0.643	0.002
352	0.551	0.549	0.002
365	0.438	0.432	0.006

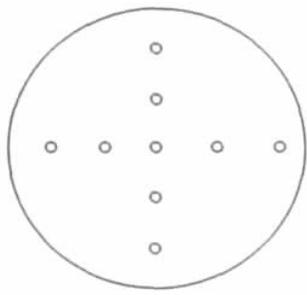


图 8 滤光片透射率均匀性测试

Fig. 8 Transmittance uniformity testing of the filter

表 3 滤光片透射率均匀性测试结果

Table 3 Test result of the filter transmitted uniformity

Filter	Transmitted uniformity
280	0.06%
313	0.05%
352	0.07%
365	0.04%

从测试结果中可以看出,滤光片透射率均匀性较好,其对于高精度辐射计的影响可忽略。

4 高精度紫外标准辐射计响应度标准推导

作为高精度辐射计内部核心元件 NIST 标准探测器,其光谱响应度是由 NIST 进行标定的。但其标定结果为光谱辐通量响应度。而在实际应用中需要利用高精度辐射计进行辐照度及辐亮度定标。因此,需要经过理论推导并加入滤光片对光辐射传输

特性的影响,最终得到高精度紫外标准辐射计辐照度响应度及辐亮度响应度标准。

4.1 辐照度响应度及辐亮度响应度推导

根据辐射度学理论可知,光谱辐通量响应度与光谱辐亮度响应度及辐照度响应度间存在以下关系^[8]:

$$R_E = R_\phi A, \quad (1)$$

$$R_L = R_\phi \Omega A \cos \theta. \quad (2)$$

式中 R_L 为辐亮度响应度, R_E 为辐照度响应度, R_ϕ 为辐通量响应度, Ω 为辐射立体角, θ 为辐射传播方向与表面法线夹角, A 为辐射面面积。

4.2 滤光片窄带宽内辐射能量透过比例系数推导

由于辐射计内装有离子镀干涉滤光片,其带宽及峰值透射率均会影响到辐射计光谱响应度。因此,在推导过程中需要加入滤光片修正因子。

所采用滤光片带宽分别为 25.5, 10.6, 10.1 和 11.4 nm, 而 NIST 标准探测器定标数据经过插值运算后,带宽为 1 nm。这就需要对滤光片带宽进行修正,给出其在窄带宽内辐射能量透过的比例系数^[9]。

首先,利用 Lambda950 分光光度计对各滤光片进行透射率测试,波长间隔为 0.5 nm。滤光片各波段透射率为 $T_{(\lambda)}$, 入射光辐射能量为 $I_{(\lambda)}$, 探测器响应度为 $R_{(\lambda)}$ 。则探测器接收到的带宽内的光辐射强度为

$$I_d = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{(\lambda)} T_{(\lambda)} d\lambda, \quad (3)$$

探测器信号值可表示为

$$S_d = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{(\lambda)} T_{(\lambda)} R_{(\lambda)} d\lambda, \quad (4)$$

而对于所需要的中心波长,其信号值可表示为

$$S_m = I_{(\lambda_m)} T_{(\lambda_m)} R_{(\lambda_m)}, \quad (5)$$

则滤光片窄带宽内辐射能量透过比例系数为

$$f = \frac{S_m}{S_d} = \frac{I_{(\lambda_m)} T_{(\lambda_m)} R_{(\lambda_m)}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{(\lambda)} T_{(\lambda)} R_{(\lambda)} d\lambda}. \quad (6)$$

4.3 探测器接收面均匀性修正系数推导

作为光辐射接收装置,探测器接收面均匀性将直接影响到高精度辐射计测量精度。因此,在使用 NIST 标准探测器定标数据时,需要加入探测器接收面均匀性修正系数。

根据前面对探测器接收面均匀性的测试结果,得到 NIST 标准探测器表面各点相对于中心点的非均匀性归一化值 B_i , 非均匀性修正系数可表示为

$$\gamma = \frac{R(B_1 + B_2 + \dots + B_m)}{mR} = \frac{(B_1 + B_2 + \dots + B_m)}{m} \quad (7)$$

根据以上各修正因子推导结果,最终得到高精度紫外标准辐射计辐照度及辐亮度响应度推导结果。

高精度紫外标准辐射计辐照度响应度为

$$R_E = \frac{R_\phi \gamma A \tau}{f} \quad (8)$$

高精度紫外标准辐射计辐亮度响应度为

$$R_L = \frac{R_\phi \Omega \gamma A \tau}{f} \quad (9)$$

4.4 高精度紫外标准辐射计自身不确定度

根据(8)式得到高精度紫外标准辐射计自身不确定度为

$$\frac{\Delta R_s(\lambda)}{R_s(\lambda)} = \left\{ \left| \frac{\Delta R_\phi(\lambda)}{R_\phi(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\gamma(\lambda)}{\gamma(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{f(\lambda)}{f(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\tau(\lambda)}{\tau(\lambda)} \right|^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

具体不确定度来源如表 4 所示。

表 4 高精度紫外标准辐射计不确定度

Table 4 Uncertainty of the HAUSR

Source of uncertainty	Relative uncertainty / %
Uncertainty of standard detector	1.10
Testing and calculating error of the γ factor	0.50
Testing and calculating error of the f factor	0.50
Testing error of the filter transmittance τ	0.50
stray light	0.30
Association uncertainty	1.30

NIST 标准探测器不确定度由 NIST 定标结果给出,为 1.1%。

探测器接受面灵敏度均匀性修正因子 γ 测量及计算不确定度主要来源于测量点多少的选择及测量装置精度,其误差在 0.3%左右。

滤光片窄带宽内辐射能量透过比例系数 f 测量及计算误差主要来源于 Lamda950 测试结果及比例系数计算过程中波段选择与波段内节点数的选择。通过适当增加计算波段内节点数,得到其误差为 0.3%。

滤光片透射率 τ 测量误差,主要来源于 Lamda950 测试精度,约为 0.5%。

4.5 高精度紫外标准辐射计性能测试

在高精度紫外标准辐射计各核心元件进行的性能评价基础上,对高精度辐射计整机进行稳定性测试。

首先进行信号重复性测试,由于高精度紫外标准辐射计内 NIST 标准探测器及滤光片稳定性均会影响高精度紫外标准辐射计整机稳定性^[10],紫外标准辐射计输出信号的稳定性直接影响到其测量精度。因此,需要针对高精度紫外标准辐射计进行整机信号重复测试。

利用辐射输出稳定的标准光源 F08,在 3 个月时间内,对高精度辐射计进行了 20 次 4 通道信号采集,并对数据进行求标准偏差处理。其信号重复性结果如图 9 所示,4 通道信号值标准偏差优于 0.6%。

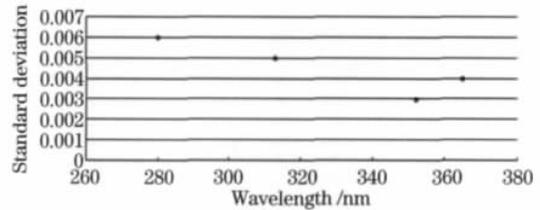


图 9 高精度紫外标准辐射计信号重复性

Fig.9 signal repeatability of the HAUSR

对高精度辐射计还进行了不同环境温度下信号重复性测试,所用光源同样是标准光源 F08,环境温度变化为 15°~32°。测试结果如图 10 所示。

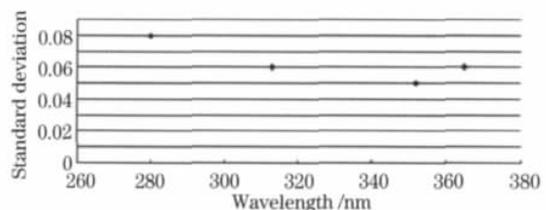


图 10 不同环境温度下高精度辐射计信号重复性

Fig.10 Signal repeatability of the HAUSR under different environmental temperature

通过以上测试,证明了高精度紫外标准辐射计良好的稳定性,应用该辐射计标准探测器定标方法,可实现对于待测光源和待测遥感仪器的高精度标定^[11]。

5 结 论

利用标准探测器响应度标准已知且不确定度较

小这一特点,以 NIST 标准探测器为核心,加入离子镀膜光片,共同构建一套高精度紫外标准辐射计。并对其内部核心元件(NIST 标准探测器和离子镀膜光片)进行了一系列性能测试,在此基础上,准确推导出高精度紫外标准辐射计的响应度标准,同时进行了不确定度分析,进而研制出一台具有自身响应度标准及高精度(1.3%)的辐射计,应用该标准辐射计可以实现对待测光源及待测遥感仪器的高精度标定,对于提高定标精度及新的定标方法的探索,有着重要意义。

参 考 文 献

- 1 Wang Shurong, Li Futian, Song Kefei *et al.*. Measurement of extraterrestrial solar ultraviolet spectrum[J]. *Opt. Precision Engng.*, 2010, **18**(6): 1271~1277
王淑荣,李福田,宋克非等. 地外太阳紫外光谱测量[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(6): 1271~1277
- 2 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Futian *et al.*. Study on calibration method of spectral irradiance responsivity for space ultraviolet remote sensing instrument[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1816~1821
张振铎,王淑荣,李福田等. 空间紫外遥感仪器光谱辐照度响应度定标方法研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1816~1821
- 3 Donald F. Heath, Z. Wei, E. Hilsenrath *et al.*. Calibration and characterization of remote sensing instruments using ultra stable interference filters[C]. *SPIE*, 1997, **3221**: 300~308
- 4 Wu Haoyu, Wang Guangyuan, Gou Yulong. Calibration study of trap radiation of Si photodiode[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **19**(2): 1~4
吴浩宇,王光远,苟毓龙. 硅光电二极管陷阱辐射定标研究[J]. 应用光学, 1998, **19**(2): 1~4
- 5 Wang Rui, Song Kefei. High-accuracy radiance calibration system for ultraviolet detector[J]. *Opt. Precision Engng.*, 2009, **17**(3): 470~474
王锐,宋克非. 高精度紫外探测器辐射定标系统[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(3): 470~474
- 6 Sun Quanshe, Chen Kunfeng, Li Yanhui. Study on nonlinearity measurement of ultraviolet photodetectors by superposition method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1881~1884
孙权社,陈坤峰,李艳辉. 叠加法测量紫外探测器非线性的技术研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(7): 1881~1884
- 7 Xu Zhihuang, Zhuang Xinxin, Su Genbo. Study on ultraviolet spectrum property of ultraviolet filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1918~1920
许智煌,庄欣欣,苏根博. 有机紫外滤波材料的紫外光谱性质研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(7): 1918~1920
- 8 Che Nianzeng, Yan Dayuan. Radiometry and Photometry[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. 68~69
车念曾,闫达远. 辐射度学与光度学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1990. 68~75
- 9 Tang Jifa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2007. 102~115
唐晋发,顾培夫,刘旭等. 现代光学薄膜技术[M]. 浙江:浙江大学出版社, 2007. 102~115
- 10 D. Cabib, A. Gil, R. A. Buckwald. High performance spectroradiometer for very accurate radiometric calibrations and testing of blackbody sources and EO test equipment[C]. *SPIE*, 2006, **6207**: 62070L-1~10
- 11 Wang Shurong, Li Futian, Song Kefei *et al.*. Ultraviolet ozone vertical profile probe for FY-3A meteorological satellite[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2590~2593
王淑荣,李福田,宋克非等. FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2590~2593