

大气/真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱 辐照度定标研究

杨小虎^{1,2} 王淑荣¹ 黄煜¹

(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 为进一步提高紫外臭氧垂直探测仪(SBUS)在轨探测及数据反演精度,提出了 SBUS 地面定标的一系列改进方案,其中为实现地面定标与在轨工作环境一致的全波段真空辐射定标是改进的第一项。通过构建 SBUS 大气/真空光谱辐照度响应度比对测试装置,实测了两种环境下 SBUS 整机对同一光源的光谱辐照度响应。结果显示,在 250~300 nm 波段,真空/大气相对偏差约 0.8%;在 300~400 nm 波段,真空/大气比对结果随波长变化,最大偏差略高于 15%。而仪器 250~400 nm 波段定标环境引入的单项不确定度,真空定标比以往大气定标减小了 1.8%。理论分析及实验验证后发现 SBUS 反射元件 Al+MgF₂ 膜层在真空/大气下光谱反射率会发生变化,从而证实了 SBUS 在真空环境下定标的必要性。

关键词 遥感;辐射定标;光谱辐照度定标;Al+MgF₂ 膜;紫外臭氧垂直探测仪

中图分类号 TP722.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0101004

Spectral Irradiance Calibration Research of the Solar Backscattered Ultraviolet Spectroradiometer in Air/Vacuum Conditions

Yang Xiaohu^{1,2} Wang Shurong¹ Huang Yu¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A group of improving methods for the on-ground calibration of solar backscattered ultraviolet spectroradiometer (SBUS) has been put forward to increase its precision of on-board detection and data inversion. The full-wavelength radiometric calibration in vacuum, which can attain correspondence match of condition between on-ground calibration and on-board detection, is the first item. A spectral irradiance responsibility comparing measurement setup is built and the spectral irradiance response of SBUS to a same source is measured in air and vacuum, respectively. The result shows a 0.8% relative deviation between air and vacuum in 250~300 nm and a wavelength dependent deviation, among which the maximum is a little more than 15%, in 300~400 nm. The individual uncertainty caused by calibration condition of SBUS in vacuum is 1.8% smaller than that in air. After theoretical analysis and confirmatory testing, it is found that the spectral reflectivity of Al+MgF₂ coating of SBUS reflecting element would be different in air and in vacuum, which proves the necessity of SBUS calibration in vacuum condition.

Key words remote sensing; radiometric calibration; spectral irradiance calibration; Al+MgF₂ coating; solar backscattered ultraviolet spectroradiometer

OCIS codes 010.0280; 350.5610; 150.1488

收稿日期: 2011-07-14; **收到修改稿日期**: 2011-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(41074126)和吉林省青年科研基金(20090118)资助课题。

作者简介: 杨小虎(1986—),男,博士研究生,主要从事空间紫外遥感仪器辐射定标方面的研究。

E-mail: yangxiaohu861106@163.com

导师简介: 王淑荣(1961—),女,研究员,博士生导师,主要从事空间紫外遥感仪器方面的研究。

E-mail: srwang@ciomp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

紫外臭氧垂直探测仪(SBUS)是我国第二代极轨气象卫星风云三号上的有效载荷,2008年5月及2010年11月分别随FY-3A星和FY-3B星入轨作业,它主要包括铝漫反射板、消偏器、Ebert-Fastie型光栅双单色仪、光电倍增管、电控系统和接口电路几大部分。在轨运行期间SBUS每天进行一次160~400 nm波段太阳光谱辐照度测量,通过与国外其他同类仪器测量结果相互比较获得SBUS自身的工作状态及变化趋势。SBUS无内置辐射定标单元,需要在地面实验室进行160~400 nm光谱辐照度响应度定标,定标精度直接影响仪器在轨探测及数据反演精度^[1,2]。

FY-3A星SBUS光谱辐照度定标分别在大气环境下250~400 nm波段和真空环境下160~300 nm波段进行,光谱辐照度标准为美国国家标准技术研究院(NIST)标定的1000 W标准石英卤钨灯和德国物理技术研究院(PTB)标定的标准氙灯。由于12个臭氧吸收波长全部位于250~340 nm波段范围内,因此FY-3A星SBUS光谱辐射定标主要以大气环境定标为主。SBUS光谱辐照度响应度在两波段重叠区域250~300 nm存在差异,考虑到真空和大气环境下定标光源、定标装置和定标介质等方面的差异以及真空定标的目的主要是将SBUS波段下延到250~160 nm真空紫外波段,因此真空定标只被认为是相对精确的,通过在定标重叠区域将真空定标数据向大气定标数据归一将其绝对化。FY-3A星SBUS测得的地外太阳紫外光谱辐照度同国际上的观测结果相比偏差在±10%以内,初步验证了大气辐射定标方法的准确性^[3~8]。

随着工程任务的深入,定标精度的要求也不断提高。通过分析FY-3A星SBUS定标的各个环节,提出了FY-3B星SBUS地面定标的改进方案,其中为实现地面定标与在轨工作环境一致的全波段真空辐射定标是改进的第一项。为此,构建了SBUS大气/真空光谱辐照度响应度比对测试装置,通过实测两种环境下SBUS整机对同一光源的光谱辐照度响应,分析环境对仪器光谱辐照度定标的影响。

2 装置原理及介绍

SBUS大气/真空光谱辐照度响应度比对测试装置如图1所示,该装置由真空测试室、无油高真空机组、高稳定辐射光源、离轴抛物面镜、熔石英窗口、SBUS及计算机等辅助设备组成^[9]。

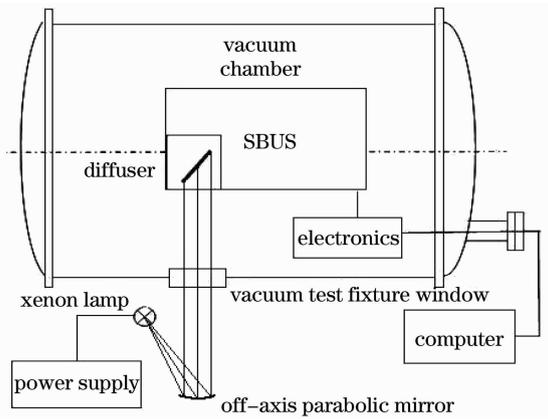


图1 SBUS大气/真空光谱辐照度响应度比对测试装置
Fig. 1 Spectral irradiance responsibility comparing measurement setup of SBUS in air and vacuum

真空室为卧式结构,外形尺寸 $\Phi 1200\text{ mm} \times 1500\text{ mm}$,内空间净尺寸 $\Phi 900\text{ mm} \times 1200\text{ mm}$,选用法国ALCTEL公司11 L ACP40干泵和美国APD公司4000 L M16低温泵,极限真空度可达 10^{-5} Pa 。辐射光源选用日本滨松公司300 W高稳定氙灯。测试前用He-Ne激光器调节光路,使离轴抛物面镜中心、熔石英窗口几何中心以及SBUS漫反射板几何中心三者共轴且与SBUS自身光轴垂直。测试过程中,氙灯位于离轴抛物面镜焦点处,产生的平行光经熔石英窗口辐照SBUS自身漫反射板,由漫反射板反射进入仪器入射狭缝,通过消偏器、Ebert-Fastie光栅双单色仪,在单色仪出射狭缝平面形成光谱带。单色仪光栅转动选择不同波长的单色辐射依次通过仪器出射狭缝,经探测器、放大器,然后由232接口上传到计算机,进行采集与处理。

实验分为真空前大气实验和真空实验。按图1所示装调实验系统,使真空测试室保持在大气状态,通过SBUS自身汞灯监测其波长机构,并考察氙灯辐照下SBUS 250~400 nm波段的光谱辐照度响应。保持测试系统位置不变,SBUS断电,对真空室抽真空至 10^{-5} Pa ,开SBUS并重复监测其波长机构以及氙灯辐照下SBUS 250~400 nm波段的光谱辐照度响应。

表1列出了大气/真空环境下SBUS对自身汞灯光谱读出值及测量重复性。在两种环境下,SBUS都满足波长重复性优于 $\pm 0.02\text{ nm}$ 、波长精度优于 $\pm 0.04\text{ nm}$ 的任务书指标,说明SBUS波长机构在两种环境下都具有良好的稳定性。而由大气状态到真空状态,波长机构同一位置对应的波长读数则是向长波方向移动约0.1 nm。

表 1 汞灯波长重复性、波长精度测量结果(单位: nm)
Table 1 Results of wavelength reproducibility and accuracy (unit: nm)

Measuring condition	Standard wavelength	Measured wavelength				Average	Wavelength reproducibility		Wavelength accuracy
		1	2	3	Maximum uncertainty		Standard deviation	Difference between average and standard wavelength	
Air	253.652	253.634	253.634	253.646	253.638	-0.008	0.006	-0.014	
	296.728	296.695	296.695	296.695	296.695	0	0	-0.033	
	365.016	364.970	364.982	364.982	364.978	0.008	0.006	-0.038	
Vacuum	253.721	253.721	253.732	253.721	253.725	0	0.005	0.004	
	296.809	296.793	296.805	296.793	296.797	-0.007	0.006	-0.012	
	365.115	365.090	365.090	365.090	365.090	-0.008	0	-0.025	

两种环境下, SBUS 对氙灯光源的光谱辐照度响应及比对结果分别如图 2 和图 3 所示, 在 250~300 nm 波段, 真空/大气相对偏差约 0.8%; 在 300~400 nm 波段, 真空/大气比对结果随波长变化, 最大偏差略高于 15%。由图 2 可知, 从大气到真空, SBUS 光谱辐照度响应曲线向短波方向移动

且移动量与波长有关。SBUS 光谱辐照度响应曲线向短波方向移动量较大加上 300~400 nm 波段曲线本身起伏大是产生该波段高偏差的主要原因, 而 250~300 nm 波段曲线起伏小且移动量小, 而引起的大气/真空响应比值偏差较小并趋于恒定值。

3 理论分析与实验验证

影响 SBUS 光谱辐照度响应曲线的因素主要包括光源的光谱辐照度、反射光学元件的光谱反射特性、熔石英窗口的光谱透射特性、介质的折射率以及探测器光电倍增管的量子效率。

光源、离轴抛物面镜以及熔石英窗口始终位于大气环境, 在比对实验中其性质不发生变化; 探测器为光电倍增管, 其量子效率在真空和大气中也是恒定不变的。

此外, 由图 1 可知, 大气/真空环境下最明显的区别是真空室内大气/真空折射率的改变, 理论上会引起如表 1 所示的波长移动, 而该波长移动方向与图 2 给出的光谱辐照度响应曲线实际移动方向正好相反, 因此介质折射率的变化不是 SBUS 光谱辐照度响应曲线在大气/真空环境下变化的主要因素^[10]。

另一方面, 为了提高 SBUS 自身的光学传输效率, SBUS 全部采用反射式结构, 整机共有包括前置铝漫反射板、反射镜及光栅等在内的 9 个光学反射元件, 入射辐射在仪器内部共进行 11 次反射, 所有反射元件均镀有在这一波段具有较高反射能力的铝+氟化镁(Al+MgF₂)膜作为增反膜。由于 Al+MgF₂ 膜层在制备及蒸镀过程中极易受到包括铝的

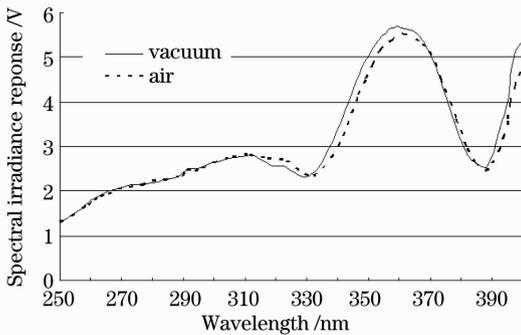


图 2 大气/真空环境下 SBUS 对氙灯光谱辐照度响应
Fig. 2 Spectral irradiance response of SBUS to Xenon lamp in vacuum/air condition

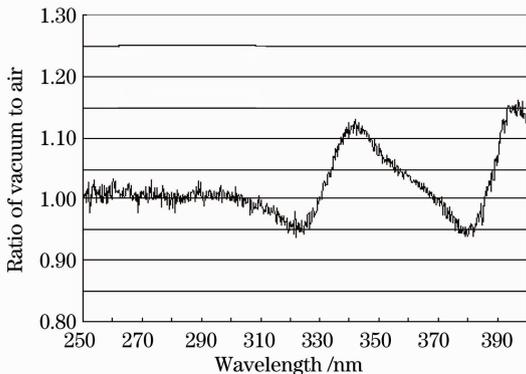


图 3 真空/大气比对结果
Fig. 3 Result of vacuum/air comparison

纯度、基片的粗糙度、蒸发速率、镀膜系统的真空度以及沉积过程中基片的温度等因素的影响,膜层蒸镀后不可避免地留下一些空隙,如图 4 中的黑色部分^[11,12]。在真空环境下,空隙的折射率为 1,但在大气环境下,空隙会被空气中的水汽填充,折射率变为 1.33,该项变化必然会导致 Al+MgF₂ 膜层在两种环境下整体反射率值的差异。

用美国 McPherson 3m 单色仪改进的光谱反射率测试装置(如图 5 所示)对 FY-3B 星 SBUS 同批次镀膜 4 片平面反射镜进行测试研究,分别得到该反射镜组在大气/真空两种环境下的光谱反射率结果,如图 6 所示。由图 6 可知,不同环境下,平面镜组的光谱反射率确实存在差异,在 250~400 nm 整个波段,光谱反射率测试结果真空比大气高

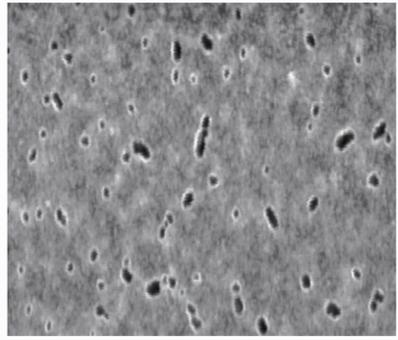


图 4 铝+氟化镁膜层微观形貌图

Fig. 4 Microscopic view of Al+MgF₂ coating

0.9%~3.1%,这也说明了 Al+MgF₂ 膜在两种环境下的光学不稳定性。

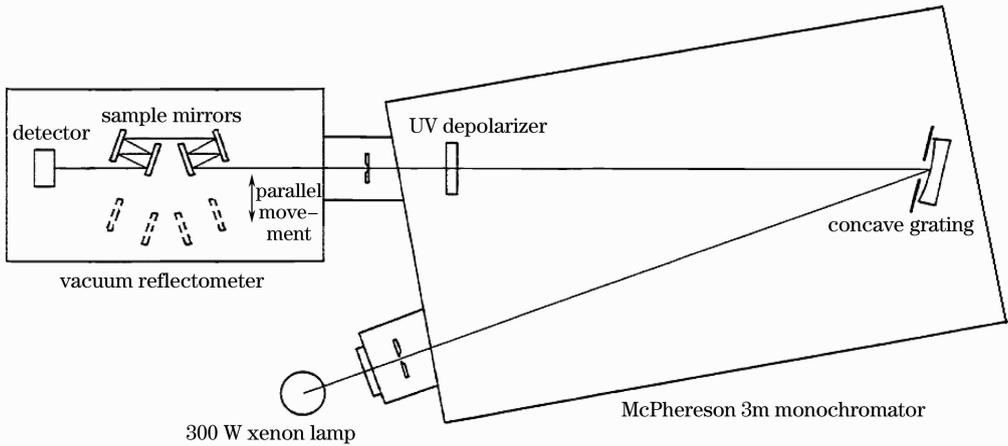


图 5 光谱反射率测试装置

Fig. 5 Spectral reflectivity measurement setup

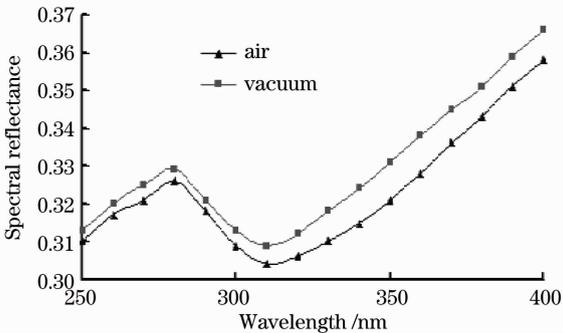


图 6 Al+MgF₂ 膜反射镜组在两种环境下的光谱反射率测试结果

Fig. 6 Spectral reflectivity measurement results of reflector assembly with Al + MgF₂ coating in vacuum/air conditions

图 6 所示的平面反射镜组在大气/真空两种环境下的光谱反射率测试结果表明,同样的变化也必然发生在 SBUS 整机所有的反射元件上,从而改变

SBUS 整机的光谱辐照度响应度,导致在大气/真空两种环境下 SBUS 对同一氙灯光源光谱辐照度响应的不一致性。由于 SBUS 整机反射元件数量、相对位置以及存在光栅、漫反射板等非平面反射镜元件,这些不同之处均不能通过样品实验完全模拟出来,这也是图 2 所示的 SBUS 整机辐照度响应和图 6 所示的反射镜组光谱反射率在大气/真空环境下变化不完全相同的原因。

4 不确定度分析

SBUS 真空环境相比以往大气环境光谱辐照度响应度定标不确定度不同之处主要包括:定标环境引入的测量不确定度、定标装置安放位置引入的测量不确定度、石英窗口透射率测量不确定度。而两种环境定标相同的不确定度源包括:光谱辐照度标准灯自身不确定度、光谱辐照度标准值插值不确定

度及 SBUS 自身读出值测量不确定度等。

在真空环境下实现了地面定标与在轨实测环境的一致性,而大气环境下 SBUS 的光谱响应度相比真空中会发生一定的变化,由图 2 和图 3 得到,在 250~400 nm 波段,大气环境引入的测量不确定度平均为 3.8%。

在大气环境下进行辐照度定标,所有定标设备均置于精密实验台上,2 mm 距离偏差相对 500 mm 测量距离引入的不确定度为 0.4%。而真空定标时,受制于真空设备对距离测量的影响及石英窗口玻璃折射率引入的光程差,距离偏差可达 5 mm,引入的测量不确定度为 1%。

在大气环境下定标不存在石英窗口透过率测量问题,石英窗口透射率通过 SBUS 测量光路中加上和不上石英窗口两种情况下的信号求比值给出,这样真空环境下石英窗口透射率测量不确定度仅涉及 2 次 SBUS 读数测量不确定度 1% 和 2 次光源的稳定性 0.5%,按不确定度合成公式求得为 1.6%。

光谱辐照度标准灯为 NIST 提供的标准石英卤

钨灯,250~400 nm 波段最大不确定度位于 250 nm 处且该波长处标准不确定度为 0.78%。

由于 NIST 对标准灯辐照度值的定标点有限,难以满足 SBUS 太阳工作模式下连续波长定标的要求,而三次样条插值法的插值原理并不符合钨灯光源的辐射原理,其拟合不确定度约为 0.3%^[13]。

SBUS 自身读出值测量不确定度通过重复测量同一信号 11 次并求标准偏差得出为 0.5%。NIST 的 TN1297 综合不确定度公式^[14]为

$$\mu_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \mu^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \mu(x, y), \quad (1)$$

由于各不确定度不相关联,(1)式改为

$$\mu_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \mu^2(x_i), \quad (2)$$

由(2)式计算可得总的大气/真空环境定标合成标准不确定度,如表 2 所示,合成标准不确定度为按不确定度修约法则及有效数字修约以后的结果。

表 2 大气/真空环境定标不确定度比较

Table 2 Uncertainty comparison of calibration in air/vacuum conditions

Source of uncertainty	Calibration in air	Calibration in vacuum
Calibration conditions /%	3.8	/
Position of calibration setup /%	0.4	1
Transmission of quartz window /%	/	1.6
Spectral irradiance standard lamp (250 nm) /%		0.78
Cubic spline fitting /%		0.3
Readout of SBUS /%		0.5
Combined standard uncertainty /%	4.0	2.2

5 结 论

本文关于 SBUS 定标环境的研究表明仪器在真空环境下定标的必要性,仪器在 250~400 nm 波段定标环境引入的单项不确定度,真空定标比以往大气定标减小了 1.8%。而 FY-3B 星 SBUS 地面定标方案的一系列改进使得其测得的地外太阳紫外光谱辐照度同国际上的观测结果相比偏差减小到±5%,反过来也验证了定标方案改进的必要性和精确性,为后续在轨仪器定标提供了参考^[15]。

参 考 文 献

1 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

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 Wang Shurong, Song Kefei, Li Futian *et al.*. Radiometric calibration on ground of satellite borne solar ultraviolet spectral monitor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2256~2261
王淑荣,宋克非,李福田等. 星载太阳紫外光谱监视器的地面辐射定标[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2256~2261
4 Huang Yu, Wang Shurong, Zhang Zhenduo *et al.*. Spectral irradiance calibration of remote sensing ultraviolet spectral radiometer in space[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(4): 466~469
黄煜,王淑荣,张振铎等. 空间遥感紫外光谱辐射计辐照度定标研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(4): 466~469
5 Huang Yu, Wang Shurong, Zhang Zhenduo *et al.*. Spectral irradiance calibration of space remote sensing spectral radiometer in range of UV and VUV[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(B6): 187~191
黄煜,王淑荣,张振铎等. 空间遥感光谱辐射计紫外/真空紫

- 外光谱辐照度定标技术[J]. 光子学报, 2007, **36**(B6): 187~191
- 6 J. H. Walker, R. D. Saunders, J. K. Jackson *et al.*. NBS Measurement Services: Spectral Irradiance Calibrations [M]. Washington: U. S Government Printing Office, 1987. 1~101
- 7 Huang Yu. Study on Radiometric Calibration of Ozone Vertical Detector [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007. 14~36
- 黄煜. 臭氧垂直探测仪辐射定标的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2007. 14~36
- 8 M. T. DeLand, Liangkang Huang, C. A. McKay. NOAA-17 SBUV/2 (FM # 6) Activation and Evaluation Phase (A&E) Report[R]. Science Systems and Applications, Inc.: Document # SSAI-2015-180-MD-2002-02, 1~102
- 9 Zhang Zhenduo. High-Accuracy Irradiance Responsivity Calibration of Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. 17~34
- 张振铎. 臭氧垂直探测仪高精度辐照度响应度定标研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010. 17~34
- 10 W. K. Fowler, K. W. Kelly, D. F. Heath. Implications of measured differences in the spectroradiometric sensitivity of SBUV/2 instruments in air and vacuum on long term measurements of stratospheric ozone and solar irradiance variations from space[C]. *SPIE*, 1996, **2815**: 69~83
- 11 Liu Ying, Li Futian. MgF₂-overcoated aluminium films for ultraviolet and vacuum ultraviolet [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(4): 165~168
- 刘颖, 李福田. 紫外-真空紫外波段的 Al+MgF₂ 膜[J]. 光学精密工程, 2001, **9**(4): 165~168
- 12 Zhigang Li, Futian Li. Simple UV-VUV beamsplitter coatings for Fourier transform spectrometers [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, **11**(1): N11~N14
- 13 L. K. Huang, R. P. Cebula, E. Hilsenrath. New procedure for interpolating NIST FEL lamp irradiances[J]. *Metrologia*, 1998, **35**(4): 381~386
- 14 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu *et al.*. Wavelength dependence of the spectral irradiance of standard lamp and bi-reflection distribution function of diffuser based on standard detectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0612008
- 杨小虎, 王淑荣, 黄煜等. 基于标准探测器研究标准灯光谱辐照度和漫反射板双向反射分布函数随波长的变化[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0612008
- 15 Wang Shurong, Li Futian, Song Kefei *et al.*. Measurement of extraterrestrial solar ultraviolet spectrum [J]. *Optics and Precision Engineering*, 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

栏目编辑: 谢婧