

文章编号 1004-924X(2007)08-1215-05

用 150 W 氘灯标定 200~300 nm 光谱辐照度

黄煜^{1,2}, 王淑荣¹, 张振铎^{1,2}, 林冠宇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:采用 150 W 大功率氘灯标定光谱仪器的紫外波段光谱辐照度响应度, 解决了大多数光谱辐射计由于在紫外波段响应度低、信噪比小导致的定标困难。在此基础上以氘灯加球面反射镜构建了平行光光谱辐照度定标单元, 满足了某些遥感类光谱辐射计辐照度响应度定标要求, 该单元通过照度标准传递的方式获得标准光谱辐照度值, 避开了球面反射镜光谱反射率的测量难点。与美国 NIST 的 FEL 标准灯标定同一台光谱辐射计, 其结果最大偏差为 3%, 200~300 nm 定标误差为 4.7%。

关键词:氘灯; 光谱辐射计; 照度传递; 照度定标

中图分类号:TM923.32; TP73 **文献标识码:**A

Calibration of 200~300 nm spectral irradiance using 150 W deuterium lamp

HUANG Yu^{1,2}, WANG Shu-rong¹, ZHANG Zhen-duo^{1,2}, LIN Guan-yu¹, 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: A calibrating method for the irradiance responsivity of 200~300 nm spectral instruments using 150 W deuterium was introduced in detail. This method overcame the troubles caused by the weak ultraviolet response of most spectral radiometer and poor signal-to-noise ratio. A spectral irradiance calibration unit based on parallel light was established to meet the calibration conditions of some remote sensing spectral radiometers. The calibration unit got the standard value of spectral irradiance by irradiance transfer, which avoided the difficulty of spectral reflectance measurement of the concave mirror. Using the unit and a FEL lamp from NIST to calibrate the same ultraviolet radiometer, the results show that the bias between them is 3%, and the error of spectral irradiance calibration is 4.7% in range 200~300 nm.

Key words: deuterium lamp; spectral radiometer; irradiance transfer; irradiance calibration

1 引言

250 nm 以上光谱辐照度定标光源一般选取石英卤钨灯,它具有很好的重复性和长期稳定性。160~250 nm 中国国家绝对光谱辐照度标准尚未建立,长春光机所近几年在合肥 800 MeV 同步辐射装置上开展了利用同步辐射建立紫外-真空紫外光谱辐射标准的研究,用同步辐射建立的紫外-真空紫外光谱辐射标准精确、稳定、重复性好、可靠性高,但是同步辐射装置规模庞大,造价昂贵,运转与维护费用高,在实验室中的应用受到限制。所以,实际工作中非常需要稳定、重复性好并且易于使用的传递标准光源。

160~300 nm 波段各国通用的光谱辐射传递标准光源为英国 Cathoden 公司制造的 V03 型或 V04 型熔石英窗口或氟化镁窗口的 30 W 氙灯^[1-6]。绝大多数光谱仪器在紫外波段响应度较低,如果直接采用 30 W 氙灯定标,由于氙灯本身不确定度大,再加上信号较弱、信噪比低,导致定标误差较大,因此提高定标光源的功率对于紫外波段光谱辐照度定标具有重要的现实意义。另外,还有一些光谱仪器特别是空间遥感类光谱辐射计,它们的待观测信号是平行光,为了使定标条件与待观测条件相一致,需要构建平行光定标单元来标定仪器光谱辐照度响应度^[7-9]。

2 定标方法与装置

2.1 定标方法

160~300 nm 波段各国通用的光谱辐射传递标准光源为英国 Cathoden 公司制造的 V03 型或 V04 型熔石英窗口或氟化镁窗口的氙灯。氙灯的工作电流为 300 mA,工作电压约 70 V,直热式阴极,发光点直径约 1 mm,功率 30 W。为了提高紫外波段定标信噪比,本实验选用日本 Hamamatsu 生产的 150 W 高稳定性水冷氙灯 L1835, MgF₂ 窗口,工作波段 115~400 nm,预热 0.5 h 后,稳定性可优于 0.03% h⁻¹。

传统的光谱辐照度定标是将定标光源置于待标定仪器入瞳一定距离处进行标定,即采用点光源发散光照明方式定标,标定光谱辐照度响应度可表示为

$$R_E(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{\bar{E}(\lambda)} = \frac{V(\lambda)}{E_D(\lambda) \cdot \bar{\epsilon}}, \quad (1)$$

式中 $V(\lambda)$ 是待标定仪器在特定波长 λ 处的输出电压(也可是电流值); $\bar{E}(\lambda)$ 是在仪器入瞳处接收的平均光谱辐照度; $E_D(\lambda)$ 是标准光源的光谱辐照度值; $\bar{\epsilon}$ 是角度加权因子。标准光源的光谱辐照度值随角度有一定的变化,以此来修正仪器入瞳处的光谱辐照度值,即

$$\bar{E}(\lambda) = E_D(\lambda) \cdot \bar{\epsilon}, \quad (2)$$

实际应用中,一些光谱仪器特别是空间遥感类光谱辐射计,它们的待观测信号是平行光,为了使定标条件与待观测条件相一致,需要以平行光标定仪器光谱辐照度响应度。因此,本实验以标准光源+球面镜构建了平行光光谱辐照度定标单元。该单元由 150 W 氙灯及焦长 500 mm、口径 60 mm × 60 mm 反射镜构成,镜表面镀 Al+MgF₂。氙灯处于反射镜焦点,形成 60 mm × 60 mm 准直光束。氙灯与反射镜中心高度及角度装调好后固定于同一基座以保证两者相对位置不再改变。

此定标单元中,由于氙灯与反射镜之间存在夹角,轻微的像散即会被引入准直光束中,导致接收面上照度不均匀。理论上两者夹角越小越好,实际上由于氙灯本身有一定的尺寸,角度太小会挡光,所以使用中夹角为 15°。为了考察此定标单元输出的均匀性,用硅探测器和峰值波长为 254 nm 的滤光片所构成的辐射计实测了准直光束中心 $\phi 40$ mm 光斑面积内 8 个采样点的相对照度值,测量结果表明,其照度均匀性优于 0.3%,因此像散的影响可以忽略不计。

考虑到氙灯与球面反射镜焦点的距离 D 装调误差(± 2 mm),利用 ZEMAX 软件分别计算了 $D=498$ mm、500 mm 和 502 mm,距球面反射镜 $L=690$ mm、700 mm 和 710 mm 处准直光束弥散斑的 RMS,结果均为 22 mm,可见在装调误差范围内,此定标单元输出对距离不敏感。实际测量值也证明了这一点,在 20 mm 的变化范围内,照度一致性优于 0.5%。

准直光束的光谱辐照度值可表示为:

$$E_c(\lambda) = E_D(\lambda) \cdot \bar{\omega}_m(\lambda), \quad (3)$$

式中 $E_c(\lambda)$ 是准直光束的光谱辐照度; $\bar{\omega}_m(\lambda)$ 是球面反射镜的光谱反射率。

2.2 照度传递

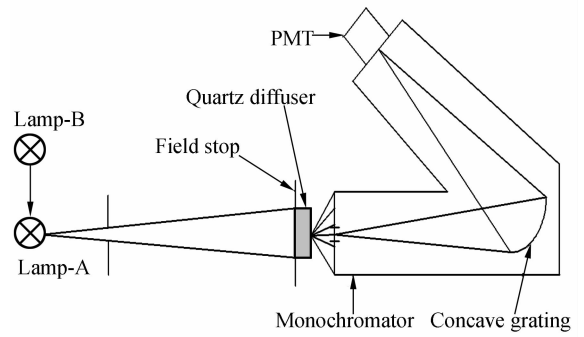
由式(3)可知,只要知道 $E_D(\lambda)$ 和 $\bar{\omega}_m(\lambda)$ 就可以确定准直光束的光谱辐照度,其中定标光源的光谱辐照度已知,但要准确测定球面反射镜的光谱反射率则是相当困难的事。美国太阳后向散射紫外光谱辐射计(Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer, SBUV)定时采用的方法是测量准直镜有效使用面积上10个采样点的光谱反射率,每点间隔3 cm,每点大小约1 cm,以其平均值作为整个准直镜的光谱反射率。SBUV这种光谱反射率测量方法对于本项实验不仅测量难度大,而且对镀 $Al+MgF_2$ 膜的准直镜加工要求高,实际应用中会存在很大测量偏差。因此采用了照度传递的方法得到准直光的光谱辐照度,避开球面镜光谱反射率的测量难点。

本项实验以 Mcpherson 2253M5 紫外—真空紫外单色仪为基础构建了光谱辐照度传递系统,所用凹面光栅曲率半径为3 m,刻线密度为1 200 lines/mm,刻线面积 $65\text{ mm} \times 104\text{ mm}$,光栅在220 nm处闪耀,波长准确度为 $\pm 0.01\text{ nm}$,波长重复性为0.01 nm,探测器是美国EMR公司的541 N-05M-13型蓝宝石窗口光电倍增管。单色仪狭缝前50 mm处安置石英透射漫射板,用来补偿标准光源与待标定光源由于几何尺寸不同导致的照明条件差异。石英漫射板前加 $\phi 8\text{ mm}$ 视场光阑,用来限制接收立体角。标准光源与待标定光源均位于石英漫射板前500 mm处。

30 W 标准氙灯经过德国物理技术研究院(PTB)在同步辐射 BESSY II 上标定了光谱辐亮度和辐强度^[10]。如图1所示,lamp-A代表标准光源,lamp-B代表待传递光源,可以将标准光源定标数据直接传递给150 W氙灯 L1835 或由 L1835+准直镜构成的平行光辐照度定标单元,以后者为例详述传递过程。分别以30 W氙灯如图1(a)和平行光光谱辐照度定标单元如图1(b)照明单色仪狭缝前石英透射漫射板,得到整个传递系统的照度响应度

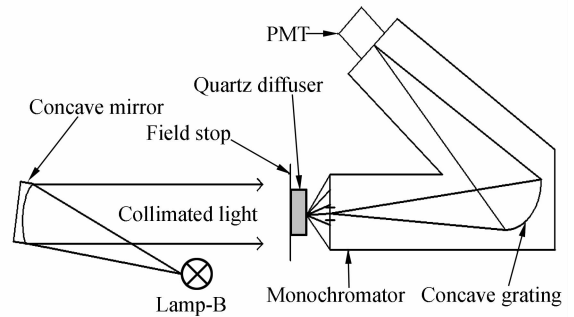
$$R_i(\lambda) = \frac{E_d(\lambda)}{V_d(\lambda)} = \frac{E_c(\lambda)}{V_c(\lambda)}, \quad (4)$$

式中 $E_d(\lambda)$ 和 $E_c(\lambda)$ 分别是30 W氙灯和平行光定标单元在石英透射漫射板处的照度值; $V_d(\lambda)$ 和 $V_c(\lambda)$ 分别是照度传递系统在两种照明方式下对应波长处的读出值。



(a) 使用标准光源的照度定标单元

(a) Irradiance calibration unit using standard lamp



(b) 使用平行光的照度定标单元

(b) Irradiance calibration unit using parallel light

图1 照度标准传递

Fig. 1 Transfer of irradiance standard

其中:

$$E_d(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{l^2}, \quad (5)$$

式中 $I(\lambda)$ 是标准氙灯的光谱辐强度; l 是标准氙灯距离石英透射漫射板距离(500 mm)。

由式(4)和式(5)即可得出平行光定标单元光谱辐照度值:

$$E_c(\lambda) = \frac{I_d(\lambda) \cdot V_c(\lambda)}{l^2 \cdot V_d(\lambda)}. \quad (6)$$

照度传递过程中150 W水冷氙灯窗口前需加风扇。因为随着氙灯功率的增大,大量的臭氧聚集在出射窗口附近,而臭氧对紫外辐射有一定的吸收作用,再加上周围环境空气流动使得臭氧浓度随时变化,最终导致仪器接收到的紫外辐射存在一定的波动,测量重复性不好,尤其在240~250 nm波段,输出信号起伏约2%,照度传递精度受到很大影响。加装风扇后,可以使氙灯窗口附近臭氧浓度大大降低,从而减弱臭氧对紫外辐

射的吸收影响。实际测量中重复性优于 0.3%。

2.3 光谱辐射计标定

获得氙灯+准直镜构成的平行光光谱辐照度定标单元光谱辐照度值后,即可用来标定仪器的光谱辐照度响应度。本次用来标定的是一台空间遥感紫外光谱仪初样机,它是 Ebert-Fastie 型结构的双光栅光谱辐射计,工作波段 160~400 nm,光谱分辨力 0.15 nm。初样机狭缝入口处安装一可旋入旋出的铝制漫反射板,铝漫反射板法线与仪器光轴成 45°。光谱辐照度观测时,铝漫反射板移入光路,入射辐射经过铝漫反射板进入仪器的入射狭缝完成紫外光谱辐照度测量。将图 1 中 Mcpherson 2253M5 紫外-真空紫外单色仪的位置由该光谱辐射计代替即可进行光谱辐照度定标。这样仪器的光谱辐照度响应度可表示为

$$R(\lambda) = \frac{E_c(\lambda)}{V_c'(\lambda)} = \frac{I_d(\lambda) \cdot V_c(\lambda)}{l^2 \cdot V_d(\lambda) \cdot V_c'(\lambda)}, \quad (7)$$

式中 $V_c'(\lambda)$ 是光谱辐射计对应波长处的读出值。

以美国国家标准局(NIST)标定的 1 000 W 石英卤钨灯作为标准光源,在相同实验室条件下标定了这台光谱辐射计 250~400 nm 光谱辐照度响应度,两次标定在 250~300 nm 波段有重叠

$$\frac{\Delta R(\lambda)}{R(\lambda)} = \left(\left| \frac{\Delta V_d(\lambda)}{V_d(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_c(\lambda)}{V_c(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_c'(\lambda)}{V_c'(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta I_d(\lambda)}{I_d(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{2\Delta l}{l} \right| \right)^{1/2}, \quad (8)$$

其中 $V_c(\lambda)$ 和 $V_c'(\lambda)$ 引入的读数误差只有 1%,这是由于氙灯 L1835 信号强、信噪比高;由于 $V_d(\lambda)$ 信噪比低,所以引入的读数误差约为 2.5%; l 定标距离偏差约为 2 mm,引入的误差计算为 0.8%;30 W 标准氙灯光谱辐强度的标定不确定度为 3.5%;总的标定误差见表 2。

表 2 光谱辐照度定标误差

Tab. 2 Error of spectral irradiance calibration

误差来源	百分比
光谱辐射强度 $I(\lambda)$ 标定不确定度	3.5%
l 距离误差	0.8%
仪器读数误差 $V_c(\lambda)$	1%
仪器读数误差 $V_c'(\lambda)$	1%
仪器读数误差 $V_d(\lambda)$	2.5%
探测系统漂移、线性和重复性	1%
总计(平方相加开平方)	4.7%

部分。重叠部分响应度最大偏差 3%,如表 1 所示。

表 1 光谱辐照度响应度标定数据

Tab. 1 Data of irradiance response calibration

波长 (nm)	光谱辐照度响应度		比值
	$V \cdot \mu W^{-1} \cdot cm^2 \cdot nm$ 平行光定标单元	石英卤钨灯	
200	33.50		
210	40.08		
220	46.29		
230	52.21		
240	67.22		
250	70.11	72.16	0.972
260	72.31	71.48	1.012
272	66.22	68.17	0.971
280	58.70	58.49	1.004
290	52.37	52.54	0.997
300	50.63	50.95	0.994

3 定标误差分析

由式(7)得到误差公式:

4 结 论

采用大功率氙灯及平行光照明方式标定仪器特别是空间遥感类光谱辐射计的光谱辐照度响应度,虽然在照度标准传递的过程中引入误差,导致定标不确定度增大,但是一方面提高了定标光源的功率,使定标信噪比增大,解决了紫外波段光谱辐射计由于信号弱导致的定标困难;另一方面平行光定标单元的构建也使定标条件与某些遥感类光谱辐射计实际观测条件一致,该单元与美国 NIST 的 FEL 标准灯标定同一台光谱辐射计时,两者标定结果最大偏差为 3%。

参考文献:

- [1] SPERFELD P, STOCK K D, RAATZ K H, *et al.*. Characterization and use of deuterium lamps as transfer standards of spectral irradiance[J]. *Metrologia*, 2003, 40: 111-114.
- [2] KIEDRON P W, MICHALSKY J J, BERNDT J L, *et al.*. Comparison of spectral irradiance standards used to calibrate shortwave radiometers and spectroradiometers[J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(12):2432-2439.
- [3] 刘金元, 薛凤仪. 紫外和真空紫外光谱辐射标准灯—氘灯[J]. 计量技术, 2002, 3(3):19-21.
LIU J Y, XUE F Y. Spectral irradiance standard for the ultraviolet and vacuum ultraviolet: the deuterium lamp [J]. *Measurement Technique*, 2002, 3(3):19-21. (in Chinese)
- [4] 刑进, 王淑荣, 李福田. 紫外-真空紫外辐射标准光源的比对[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4):373-379.
XING J, WANG SH R, LI F T. Comparisons between radiometric scales on UV-VUV radiant standard light sources [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4):373-379. (in Chinese)
- [5] 唐玉国, 李福田. 200~350 nm 石英窗口氘灯光谱辐照度的绝对定标[J]. 光谱学与光谱分析, 1996, 16(4):7-10.
TANG Y G, LI F T. Spectral irradiance absolute calibration of deuterium lamp in range from 200 nm to 350 nm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1996, 16(4):7-10. (in Chinese)
- [6] 刑进, 王淑荣, 李福田. 空间紫外遥感光谱辐射计光谱辐亮度定标三种方法的比较[J]. 中国激光, 2006, 33(4):509-515.
XING J, WANG SH R, LI F T. Comparison of spectral radiance calibrations of spectroradiometer for ultraviolet space remote sensing using three calibration techniques [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(4):509-515. (in Chinese)
- [7] 刑进, 王淑荣, 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.
XING J, WANG SH R, 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)
- [8] 李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5):822-828.
LI Y P, YU B X, WANG Y P, *et al.*. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):822-828. (in Chinese)
- [9] 方伟, 王玉鹏. 紫外辐照对绝对辐射计锥腔吸收率的影响[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5):775-780.
FANG W, WANG Y P. Influence of UV radiation on absorptivity of cavity of absolute radiometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):775-780. (in Chinese)
- [10] RICHTER M, HOLLANDT J, KROTH U. Source and detector calibration in the UV and VUV at BESSY II[J]. *Metrologia*, 2003, 40: 107-110.

作者简介:黄煜(1979—),男,山西朔州人,现为中科院长春光机所应用光学国家重点实验室在读博士研究生,主要从事空间紫外遥感技术与辐射定标方面的研究。E-mail:ssshycn@yahoo.com.cn

通讯作者: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研究员, FY-3 卫星紫外臭氧垂直探测仪主任设计师,主要从事光学检测、紫外辐射计量测试及空间紫外光谱遥感技术研究。E-mail:srwang@ciomp.ac.cn