

文章编号: 0253-2239(2010)04-1026-05

# 真空紫外探测器辐射定标研究

王 锐<sup>1,2</sup> 王淑荣<sup>1</sup> 李福田<sup>1</sup> 刘海波<sup>1</sup> 汪龙祺<sup>1,2</sup> 黄 煜<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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)

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 为了满足紫外光学遥感信息定量化发展的要求,构建了一套高精度真空紫外探测器辐射定标系统,以美国国家标准技术研究院(NIST)真空紫外标准探测器为标准,在120~220 nm波段上,对量子效率未知的EMR541-09-17紫外光电管进行了定标。按照国际通用不确定度评估规范,对测量结果进行不确定度分析和评估,总的传递不确定度小于2.4%。达到了在真空紫外波段对紫外探测器进行高精度定标的要求。

**关键词** 辐射定标;真空紫外;标准探测器;不确定度

中图分类号 TP70 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1026

## Investigation on Radiation Calibration System of Vacuum Ultraviolet Detector

Wang Rui<sup>1,2</sup> Wang Shurong<sup>1</sup> Li Futian<sup>1</sup> Liu Haibo<sup>1</sup> Wang Longqi<sup>1,2</sup> Huang Yu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** A high-accuracy radiation calibration system of vacuum ultraviolet (VUV) detector is established, to meet the development of the ultraviolet (UV) and VUV remote quantification. In 120~220 nm spectral range, the absolute responsivity was transferred to EMR541-09-17 ultraviolet phototube detector, on the basis of national institute of standards and technology (NIST) ultraviolet standard detector. According to the guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement, the relative uncertainty of transferring is less than 2.4%. The aim of high accuracy radiation calibration of ultraviolet detector in VUV region has been obtained.

**Key words** radiation calibration; vacuum ultraviolet; standard detector; uncertainty

## 1 引 言

近年来,随着科学技术和边缘学科快速发展,真空紫外光学在空间科学、材料、生物物理和等离子物理等领域越来越显示出巨大的应用前景,空间紫外光学遥感更是成了人类了解自然界的一条重要途径<sup>[1]</sup>,随着定量化遥感研究的深入及测量精度的不断提高,需要真空紫外波段高精度探测器标准来标定各类传感器,评估其测量精度、长期稳定性以及数据可比较性。从理论上讲,实现绝对光谱辐射测量

的途径有两个<sup>[2]</sup>:1)基于辐射源,2)基于辐射探测器,其中基于辐射探测器的定标技术在近几年来发展十分迅速。

美国国家标准技术研究院(NIST)在探测器定标方面的研究拥有国际领先水平,其利用稀有气体电离室所建立的探测器定标系统,成了极紫外-远紫外探测器的定标标准。NIST所提供的经过稀有气体电离室定标的真空紫外光电管探测器(即真空紫外标准探测器),具有良好的稳定性,较小的不确定度等优点。为

收稿日期: 2009-03-23; 收到修改稿日期: 2009-06-05

基金项目: 国家863计划(2002AA2Z9999, 2004AA99)和吉林省青年科研基金(20090118)资助课题。

作者简介: 王 锐(1982—),男,博士研究生,主要从事紫外-真空紫外探测器定标方面的研究。

E-mail: darui9999@yahoo.com.cn

导师简介: 王淑荣(1964—),女,研究员,博士生导师,主要从事空间紫外光学遥感技术及光学检测、紫外辐射计量测试等方面的研究。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

为了适应我国真空紫外光学遥感技术研究的需要,长春光机所于 2005 年引进了 NIST 真空紫外标准探测器。并在此基础上构建了一套高精度真空紫外探测器光谱响应度定标系统。实现了以标准探测器为基准,在真空紫外波段对探测器定标目的。

## 2 真空紫外探测器辐射定标系统

建立的定标系统由真空系统、氙灯光谱辐射源、前置超环面聚光镜、Seya-Namioka 紫外-真空紫外单色仪、后置反射准直光学系统、分束器、X-Y 精密位移台、紫外标准探测器、静电计、波长扫描控制器、数据采集器及计算机控制系统组成,结构示意图如图 1 所示。

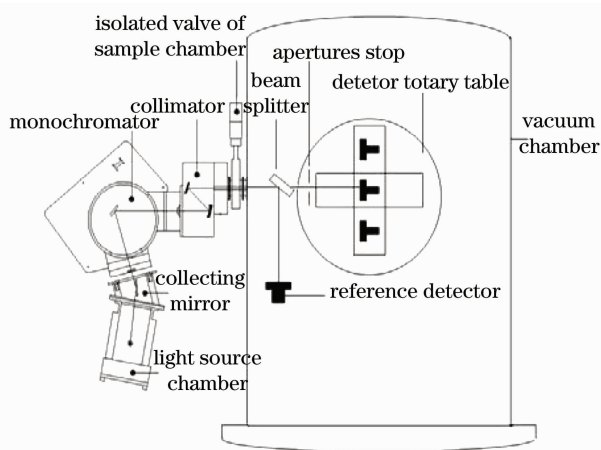


图 1 真空紫外探测器定标系统结构图

Fig.1 Schematic of VUV detector calibration

前置聚光系统采用超环面聚光镜将氙灯光源成像于 Seya-Namioka 紫外-真空紫外单色仪的入射狭缝。为充分利用单色仪凹面光栅的色散,保证 Seya-Namioka 单色仪的光谱分辨率,要求入射光束充满光栅的通光口径。氙灯光源发光点直径 1 mm,凹面光栅面积 40 mm×45 mm,根据几何关系计算求得物方数值孔径  $NA$  为 0.06。

后置反射光学系统用于将 Seya-Namioka 紫外-真空紫外单色仪的出射光准直,准直光束直径为 10 mm。

Seya-Namioka 凹面光栅单色仪覆盖的光谱范围宽,结构尺寸小,只要转动凹面光栅,保持入射和出射狭缝不动,在出射狭缝处便可获得所需波长的聚焦像,单色仪波长重复性为 0.02 nm,波长精度为 0.03 nm,光谱分辨率优于 0.4 nm。

前置高效超环面聚光反射镜将氙灯光源成像于单色仪入射狭缝,由单色仪内凹面光栅色散后,经过

单色仪后置反射准直光学系统入射到探测器接收面上。在探测器接受面前装有直径为 2 mm 的孔径光阑,由于光斑中心 2 mm 范围内的光斑均匀性能够保证在 0.3% 以内,因此,对定标精度不会产生影响。

## 3 NIST 真空紫外标准探测器定标基准

由于真空紫外探测器辐射定标系统以 NIST 真空紫外探测为标准进行定标。因此,有必要对美国 NIST 标准探测器的定标基准及原理进行阐述。

美国 NIST 利用稀有气体电离室为基准建立了一套相当成熟稳定的真空紫外波段探测器标准。下面介绍稀有气体电离室工作原理及标准传递过程。

### 3.1 稀有气体电离室

稀有气体电离室结构如图 2 所示, $L_1, L_2$  为 2 块 10.16 cm 的离子流收集板,分别接独立的数据采集系统,与其相对的是阳极板,接 22 V 电压。

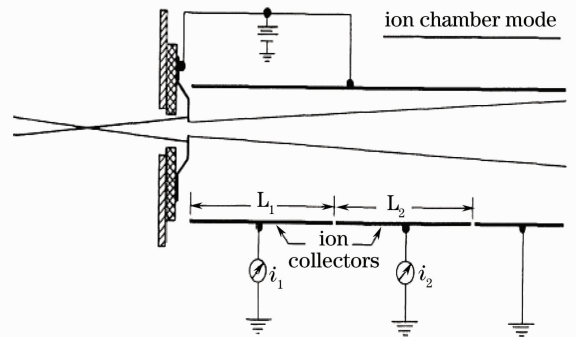


图 2 稀有气体电离室结构图

Fig.2 Structure of rare gas ion chamber

稀有气体电离室对一定能量的光子具有吸收能力,当吸收光子的能量大于气体电离能时,就会发生光电效应,产生光电离子和电子,通过测量光电离子流的大小得到入射光谱辐射通量的值。

入射到电离室的光通量可表示为<sup>[3]</sup>

$$E = \frac{i_1^2}{e(i_1 - i_2)}, \quad (1)$$

式中  $i_1$  为第一块离子流采集板采集到的信号值,  $i_2$  为第二块离子流采集板采集到的信号值,  $e$  为基本电荷,  $E$  为入射的光通量。在 2~92 nm 波段上,可以直接用稀有气体电离室对极紫外探测器进行定标,利用(1)式可得到其光谱响应度。但在 116~254 nm 需要对远紫外探测器进行定标时,由于入射光子的能量不足以激发稀有气体分子产生电离,稀有气体电离室无法正常工作,因此需要用热电偶来进行标准的传递。

### 3.2 热电偶

热电偶结构如图 3 所示,利用镀有金黑的薄片及铋碲合金共同构成一个  $1\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  的灵敏区域,使其工作效率远大于其它种类的热电偶,且能够保证其灵敏度的一致性。利用热电偶对于真空紫外波段的反射率不具有波长选择性的特性,在  $2 \sim 92\text{ nm}$  波段上,利用电离室对热电偶进行标定,然后在  $116 \sim 254\text{ nm}$  波段上,用标定后的热电偶对真空紫外光电管进行标定,完成由真空电离室到真空紫外光电管的标准传递过程。

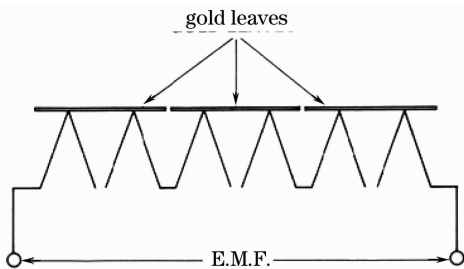


图 3 热电偶结构图

Fig. 3 Structure of thermopile

入射到热电偶上的光通量可表示为<sup>[4]</sup>

$$E = \frac{FR\lambda}{k} = \frac{i_1^2}{e(i_1 - i_2)}, \quad (2)$$

式中  $k$  为单色仪气体吸收修正系数,  $l$  为热电偶电子修正系数,  $F$  为热电偶定标因子,  $\lambda$  为波长,  $R$  为热电偶信号与测试信号的比率。交流热电偶与直流电离室的信号采集方式不同,因此在定标系统中加入一个汞电池,使两个探测器的信号能够统一到一个表达式中。

### 3.3 真空紫外标准探测器

在  $116 \sim 254\text{ nm}$ , 用标定过的热电偶对真空紫外探测器(即真空光电管)进行定标,真空紫外探测器窗口接收到的光辐射通量

$$E = \frac{S}{\epsilon} = FR'\lambda, \quad (3)$$

真空紫外探测器的量子效率

$$\epsilon = \frac{S}{FR'\lambda}. \quad (4)$$

通过以上方法完成稀有气体电离室对真空紫外探测器的标准传递,定标后的真空紫外探测器即为 NIST 真空紫外标准探测器。具体的量子效率曲线如图 4 所示。

## 4 真空紫外探测器辐射定标原理

### 4.1 替代法基本原理

以真空紫外标准探测器为标准,构建了一套真

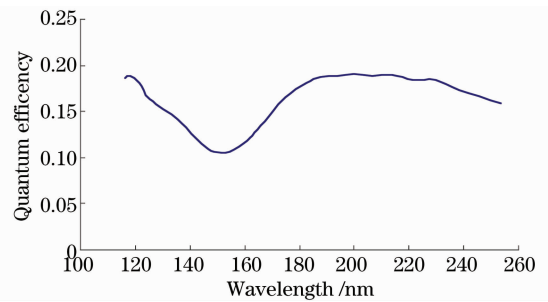


图 4 真空紫外标准探测器量子效率曲线

Fig. 4 Quantum efficiency of VUV standard detector

空紫外探测器对比定标系统。其定标原理采用替代法,即用标准探测器的量子效率值和所采集的信号值代替入射光的照度值,进行待测探测器辐射定标。因此标准探测器及待测探测器的输出信号  $S_x, S_s$  可表示为<sup>[5]</sup>

$$S_x = R_x E_x, \quad (5)$$

$$S_s = R_s E_s, \quad (6)$$

式中  $R_x, R_s$  为待测探测器及标准探测器的未知量子效率,  $E_x, E_s$  为待测探测器及标准探测器所接受到光辐射。

将(5)式与(6)式相除得

$$\frac{S_x}{S_s} = \frac{R_x E_x}{R_s E_s}. \quad (7)$$

假设两个探测器接受到的光辐射是一致的(这也正是替代法的理论基础),得到待测探测器的未知量子效率为

$$S_x = \frac{R_x}{R_s} S_s. \quad (8)$$

### 4.2 定标系统原理

考虑到紫外探测器定标系统光源稳定性及光学系统传递效率,对最后测量结果的影响,(5)式表示为<sup>[5]</sup>

$$S_x = R_x \tau_x \phi_x + V_{d,x}, \quad (9)$$

式中  $\phi_x$  为光源处发出的光通量,  $\tau_x$  为系统内部光学系统的传递效率

$$\tau_x = \tau_f \tau_g \tau_{sm1} \tau_{sm2} \tau_t, \quad (10)$$

式中  $\tau_f$  为单色仪前置聚光镜反射率,  $\tau_g$  为单色仪光栅效率,  $\tau_{sm1}$  为后置光学系统球面反射镜 1 的反射率,  $\tau_{sm2}$  为后置光学系统球面反射镜 1 的反射率。  $\tau_t$  为分束器透射率。

考虑到由于整套定标系统在真空条件下工作,而氙灯辐射光源真空下存在光源稳定性问题,给定标结果带来较大不确定度。为了消除光源稳定性的影响,在真空紫外探测器定标系统中加入了参考探测器。参考探测器的信号值

$$S_m = R_m \tau_m \phi_m + V_{d,m}, \quad (11)$$

同理

$$\tau_m = \tau_f \tau_g \tau_{sm1} \tau_{sm2} \tau_r, \quad (12)$$

式中  $\tau_r$  为分束器反射率。完全由于光源辐射产生的信号输出  $\Delta S_x$  及  $\Delta S_{mx}$  可表示为

$$\Delta S_x = S_x - S_{d,x} = R_x \tau_{bsx} \tau_x \phi_x, \quad (13)$$

$$\Delta S_{mx} = S_{mx} - S_{d,mx} = R_{mx} \rho_{bsx} \tau_x \phi_x. \quad (14)$$

式中  $S_{d,x}$  为暗电流。 $S_{mx}$  为待测探测器进行测量时参考探测器的信号输出,  $S_{d,mx}$  为待测探测器在进行测量时参考探测器的暗电流。待测探测器与参考探测器信号比率<sup>[7]</sup>

$$B_x = \frac{\Delta S_x}{\Delta S_{mx}} = \frac{R_x \tau_{bsx} \tau_x \phi_x}{R_{mx} \rho_{bsx} \tau_x \phi_x}. \quad (15)$$

标准探测器和参考探测器信号比率

$$B_s = \frac{\Delta S_s}{\Delta S_{ms}} = \frac{R_s \tau_{bss} \tau_s \phi_s}{R_{ms} \rho_{bss} \tau_s \phi_s}. \quad (16)$$

在参考探测器及分束器相对稳定的条件下, (15)式与(16)式相除

$$\frac{B_x}{B_s} = \frac{R_x}{R_s}. \quad (17)$$

因此待测探测器的量子效率

$$R_x = \frac{B_x}{B_s} R_s = \frac{(S_x - S_{d,x}) / (S_{mx} - S_{d,mx})}{(S_s - S_{d,s}) / (S_{ms} - S_{d,ms})} R_s, \quad (18)$$

(18)式即为真空紫外探测器辐射定标系统中标准传递的最终表达式。由于参考探测器及分束器的加入,已经消除了光源稳定性对定标结果的影响。

## 5 量子效率定标及结果

对整套系统抽真空,当真空度达到  $10^{-6}$  Pa 时,开始进行定标。定标方法如下,氙灯光源发出的光经过前置光学系统进入 Seya-Namioka 单色仪,通过计算机控制光栅转动,使不同波段的单色光从单色仪出缝发出,经过后置光学系统后,成像在探测器转台上的接收面上,NIST 真空紫外标准探测器和待测探测器置于转台上,通过计算机控制探测器转台转动,可使两探测器分别移入光路。将标准探测器移入光路,在单色仪扫描过程中,对标准探测器和监视探测器同时进行数据采集,并采集零点信号,将数据存储。然后将待测探测器移入光路,同样进行数据采集,存储数据。将得到的数据代入(18)式,求出待测探测器的光谱响应度。完成光谱响应度的标定。

图 5 为 EMR541-09-17 光电管的量子效率曲线图。测量波段为 120~220 nm,峰值位置在 220 nm。

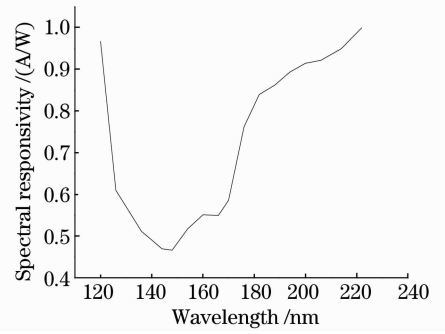


图 5 EMR541-09-17 光电管量子效率曲线图

Fig. 5 Quantum efficiency of EMR541-09-17 phototube

## 6 不确定度分析

通过对紫外探测器定标过程中的不确定度进行分析<sup>[8]</sup>,给出影响定标精度的几个因素。如表 1 所示。

表 1 真空紫外探测器定标相关不确定度

Table 1 Relative uncertainty of detector calibration

Source of uncertainty	Relative uncertainty / %
Uncertainty of standard detector	2.0
Reading error of standard detector signal	0.2
Reading error of unknown detector signal	0.8
Reading error of reference detector signal	0.8
Association uncertainty	2.4

1) 标准探测器不确定度: NIST 标准紫外探测器不确定度由 NIST 定标数据给出,在整个定标波段上其最大不确定度为 2%

2) 标准、待测及参考探测器信号读数误差包含探测器本身稳定性、单色仪波长重复性及探测器转台位置重复性,对标准、待测及参考探测器进行信号重复性测量(每次采样 100 次,每周进行 1 次,连续测量 8 周),得到其读数误差分别为 0.2%,0.8%及 0.8%。

3) 光源稳定性,由于参考探测器的加入,排除了真空条件光源稳定性对传递结果的影响。

将上述几个因素代入(19)式<sup>[9]</sup>,最后求得定标过程的组合不确定度为 2.4%。

$$u_c = \left[ \left| \frac{\Delta S_s}{S_s} \right|^2 + \left| \frac{\Delta S_x}{S_x} \right|^2 + \left| \frac{\Delta R_s}{R_s} \right|^2 + 2 \left| \frac{\Delta S_m}{S_m} \right|^2 \right]^{1/2}. \quad (19)$$

## 7 结 论

针对真空紫外波段探测器定标原理及定标方法

进行了深入研究,在完成理论研究的基础上,构建高精度真空紫外探测器定标系统。实现了在 120~220 nm 波段上,以标准探测器为基准,对待测探测器进行标准传递的工作。很好地解决了基于辐射探测器定标方法在实际应用中的一些问题,对于探测器定标技术的发展及真空紫外光学遥感技术的研究有着重要的意义。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Shurong, Xing Jin, Li Futian. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, **14**(2): 186~190  
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): 186~190
- 2 Xing Jin, Wang Shurong, Li Futian. Comparison of spectral radiance calibrations of spectroradiometer for ultraviolet space remote sensing using three calibration techniques[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 509~515  
邢进, 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
- 3 J. A. R. Samson. Absolute intensity measurements in the vacuum ultraviolet[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, **54**(1): 6~14
- 4 Cao Guagyu, Zhang Zhiwei, Zhang Cunlin. Technology of Photoelectricity Testing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005  
曹光宇, 张志伟, 张存林. 光电检测技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- 5 R. G. Johnston, R. P. Madden. On the use of thermopiles for absolute radiometry in the far ultraviolet[J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(12): 1574~1580
- 6 E. F. Zalewski, J. Geist. Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(8): 1214~1216
- 7 E. F. Zalewski. The NBS Photodetector Spectral Response Calibration Transfer Program, Natl [M]. Bur. Stand., Spec. Publ., 1988
- 8 Fei Yetai. Theory of Error and Precision and Analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004  
费业泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- 9 Wang Shurong, Song Kefei, Li Futian. 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. 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