

紫外-真空紫外光电倍增管量子效率定标

李寒霜^{1,2**}, 李博^{1*}, 王淑荣^{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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了考察光电倍增管的性能, 以使其满足空间遥感仪器在轨应用需求, 利用氘灯、真空紫外单色仪、光电倍增管等构建了一套基于标准真空光电管的量子效率定标系统, 依据光电倍增管的阴极量子效率测量原理, 将光电倍增管改造成无电子束倍增的光电管, 实现了由标准真空光电管到光电管 R2078 的标准传递; 并在此基础上, 在国内首次实现了 150~300 nm 紫外-真空紫外波段光电管量子效率的直接测量。测量结果表明: 由于光电管 R2078 的窗口材料为融石英, 其在 155 nm 处的透过率最小, 因此在 155 nm 处获取的量子效率最小, 在 230 nm 波长处量子效率最大。最后对测量结果进行不确定度分析与估计, 得到总的合成不确定度为 3.4%。

关键词 探测器; 紫外-真空紫外; 定标; 量子效率; 光电倍增管; 不确定度

中图分类号 TP73

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0804005

Quantum Efficiency Calibration of UV-VUV Photomultiplier Tube

Li Hanshuang^{1,2**}, Li Bo^{1*}, Wang Shurong^{1***}

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to investigate the performance of photomultiplier tube to meet the needs of on-orbit application requirements of the space remote sensing instruments, we construct a set of quantum efficiency calibration system based on standard vacuum phototube with deuterium lamp, vacuum ultraviolet monochromator, photomultiplier tube, and so on. According to the principle of the cathode quantum efficiency measurement about photomultiplier tube, the photomultiplier tube is transformed into phototube without electron beam multiplying, and the standard transferring from the standard vacuum phototube to the phototube R2078 is realized. On this basis, direct measurement of the quantum efficiency of phototube in ultraviolet-vacuum ultraviolet (UV-VUV) range of 150-300 nm is realized for the first time in China. The measurement results show that, owing to the window material is fused silica, the phototube R2078 has the lowest transmissivity at 155 nm, so the quantum efficiency obtained at 155 nm is the smallest, and the quantum efficiency at 230 nm is the largest. Finally, the uncertainty of the measurement results is analyzed and estimated, and the total synthetic uncertainty is 3.4%.

Key words detectors; ultraviolet-vacuum ultraviolet; calibration; quantum efficiency; photomultiplier tube; uncertainty

OCIS codes 040.1345; 040.5250; 040.7190

1 引 言

近年来,随着空间应用需求的不断深入,紫外-真空紫外波段在空间科学、大气物理学、等离子物理等领域具有广阔的应用前景^[1]。而量化遥感信息的发展使得对测量精度的要求不断提高,对高精度

标准探测器测试遥感仪器^[2]的需求也越来越大。在探测器定标技术方面,拥有先进设备与技术的美国国家标准技术研究院(NIST)利用稀有气体电离室^[3]、热电偶实现了真空光电管的标准传递(完成了电离室到真空光电管的标准传递)。

目前,探测器已被广泛应用于光谱学、荧光测

收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-03-12; 录用日期: 2018-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(11573025)

* E-mail: libo0008429@163.com; ** E-mail: lihanshuang06@163.com; *** E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

量、激光测距以及微弱信号探测等领域,而探测器量子效率定标以其低的不确定度在宽光谱范围内被广泛需要^[4]。1980年,Klyshko^[5]第一次提出光子计数模式与电流模式下的探测器量子效率绝对定标方法——自发参量下转换^[6];之后,NIST等实验室通过大量实验证明了这种方法的可行性^[7]。2010年,Brida等^[8]提出了基于多模式空间纠缠的探测器绝对定标新方法,获得的相对不确定度为0.3%,这种方法无需依赖某种传递过程,能够实现模拟探测器量子效率无溯源性的定标。这种方法适合低光子通量,且在弱光通量情况下光子计数模式转换成探测器的电流输出模式存在较大波动。安徽光学精密机械研究所提出的双光子技术新模式克服了这种方法的缺陷,并且建立了一套实验室定标系统,用以标定光电倍增管的量子效率^[9-11]。长春光学精密机械与物理研究所于2005年引进NIST标准真空光电管,并在此基础上构建了一套真空紫外探测器定标系统,在真空紫外波段实现了探测器响应定标。

光电倍增管作为遥感仪器探测的核心部件,对仪器的信噪比、积分时间以及遥感仪器的整体性能指标均有影响。考察光电倍增管的性能有助于优化仪器的性能,而其阴极量子效率可表征光电倍增管阴极的灵敏度特性,对其量子效率定标可以获取光电倍增管的灵敏度特性参数,从而进一步为遥感仪器在轨测试提供参考。本文构建了一套基于NIST标准真空光电管的量子效率定标系统,将光电倍增管改造成无电子束倍增的光电管,并利用该系统实现了光电倍增管量子效率的直接测量,其测量结果满足仪器的在轨应用需求。

2 量子效率定标原理

光电倍增管的光阴极面将入射光子转换成光电子,其转换效率(阴极灵敏度)与入射光波长的对应关系为光谱灵敏度,光谱灵敏度特性用辐射灵敏度与量子效率来表示^[12]。辐射灵敏度(S_k)是光照射时光阴极面的发射电流与某一波长入射光的辐射功率之比。量子效率(η)是光阴极面发射的光电子数与入射光子数的比值。辐射灵敏度与量子效率的计算公式为

$$S_k = \frac{I_k}{L_p}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{hc}{\lambda e} S_k \times 100\%, \quad (2)$$

式中: L_p 为入射光辐通量,单位为W; I_k 为阴极光

电流,单位为A; h 为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; c 为真空中的光速, $c = 3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; e 为电子的元电荷, $e \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; λ 为入射光波长,单位为nm。

光电倍增管的工作原理为:光透过入射窗到达光阴极面,激励光阴极面的光子向真空中放出光电子,光电子经聚焦极会集到各个倍增极(二次电子),最后由末倍增极发射的二次电子通过阳极输出。

光电倍增管正常工作时经过电子束倍增,阳极端可以达到 10^6 增益,而标量子效率需要测量光阴极电流。从能量的角度考虑,标准光电管未加高压,需要的光信号强;定标过程中需保证两次入射的能量相同;光电倍增管加高压倍增后,则要求输出信号不能过大。可见,相同的入射能量不能同时满足标准光电管与光电倍增管。所以,需要对光电倍增管进行改进,使其没有增益。

实验过程中的待测光电管选用日本滨松公司生产的光电倍增管(型号为R2078),光阴极材料为Cs-Te^[13],窗口材料为融石英。改进的光电管线路图如图1所示,光阴极串联一个 $1 \text{ M}\Omega$ 的保护电阻(电阻值为 R_L),后接静电计输出光电流,阳极端与各倍增极并联,加+100 V电压,同时阴极及阳极均接地,此时由静电计读取的光电流为未经倍增的阴极端输出电流。

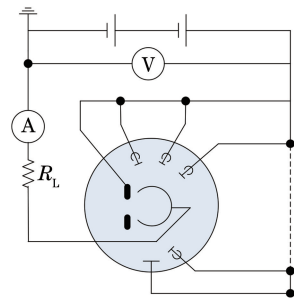


图1 光电管线路连接图

Fig. 1 Electrical connection diagram of phototube

3 量子效率定标及结果

量子效率定标实验的标准光电管采用NIST提供的紫外标准探测器(即定标后的真空光电管),它具有良好的稳定性和较小的不确定度。量子效率定标真空系统光路图如图2所示,由20 W氙灯A0508(MgF₂窗口)、紫外-真空紫外单色仪(内部含超环面聚光镜、凹面光栅,出入缝尺寸为1.5 mm)、NIST标准光电管/改进的光电倍增管R2078组成。由于真空紫外波段在空气中会被氧气强烈吸收,故

选择紫外-真空紫外单色仪,量子效率定标系统同时由波长扫描控制器、静电计 6485(采集数据)、静电计 617(输出+100 V 电压)、计算机控制系统组成。

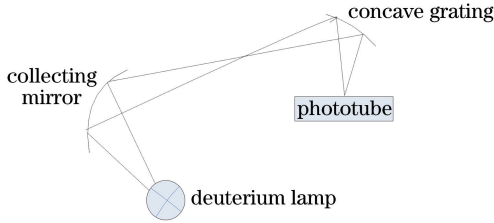


图 2 真空系统光路图

Fig. 2 Light path diagram of vacuum system

首先对整套系统抽真空,当真空度达到 1.3×10^{-3} Pa(依据《环境实验规范》及实验室实际情况确定)时,利用汞灯在紫外-真空紫外波段发出的特征谱线(184.950, 253.728, 296.815 nm)标定紫外-真空紫外单色仪(单色仪为单光栅单色仪,其杂散光水平为 10^{-3} 量级,对测试结果影响较小,故未记录);然后更换光源为氘灯,系统重新抽真空,待真空度达到 1.3×10^{-3} Pa 后,首先测试 150~300 nm 波段的暗电流,波长扫描间隔为 1 nm,测试三次;然后开氘灯稳定 20 min,待氘灯、探测器均稳定且真空系统真空度达到 1.3×10^{-3} Pa 时,测试 150~300 nm 波段下标准真空光电管的光电流,每组数据均测试三次。标准真空光电管对应波长的量子效率已知,根据(1)、(2)式可以计算出不同波长对应的入射光通量,测试结果如表 1 所示。表 1 中所列的电流值均为测试的光电流扣除暗电流部分后三次数据的平均值。

表 1 标准真空光电管数据

Table 1 Data of standard vacuum phototube

λ /nm	$I_k / (10^{-10} \text{ A})$	$L_p / (10^{-10} \text{ W})$	η /%
150	2.4251	1.8872	10.643
170	3.5335	1.7360	14.875
190	6.4835	2.2544	18.805
210	7.9854	2.4991	18.904
230	8.2438	2.4206	18.396
250	6.4642	1.9800	16.225

更换标准真空光电管为光电管 R2078,更换过程中需要保证单色仪出缝距光电管阴极面的距离相同,并且光源氘灯充满光电管的整个光阴极面。保持其他实验条件不变,重复以上实验,测试 150~300 nm 波段下光电管 R2078 的光电流,两次实验过程中入射光通量保持不变,根据(1)、(2)式以及表 1 中不同波长对应的入射光通量数据,可以计算出光电管 R2078 在不同波长下的量子效率,测试结果如表 2 所示。

表 2 光电管 R2078 的数据

Table 2 Data of phototube R2078

λ /nm	$I_k / (10^{-10} \text{ A})$	$L_p / (10^{-10} \text{ W})$	η /%
150	0.1878	1.8872	0.824
170	1.8287	1.7360	7.698
190	3.6779	2.2544	10.668
210	4.8237	2.4991	11.419
230	5.6916	2.4206	12.701
250	4.6918	1.9800	11.776

由表 1、表 2 的测试数据绘制出标准真空光电管及光电管 R2078 在不同波长下的量子效率曲线,如图 3 所示。

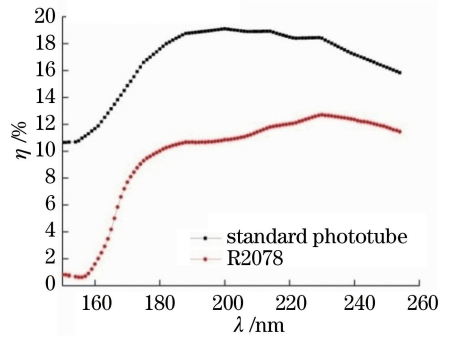


图 3 标准光电管与光电管 R2078 的量子效率曲线

Fig. 3 Quantum efficiency curves of standard phototube and phototube R2078

图 3 表明,由于窗口材料为融石英,光电管 R2078 在 155 nm 波长处的透过率最小,因此在 155 nm 处获取的量子效率最小,在 230 nm 波长处的量子效率最大,这符合光阴极材料 Cs-Te 光电管的特性。另外,在整个测试波段,标准真空光电管的量子效率大于光电管 R2078 的量子效率。

4 不确定度分析

定标过程中的定标不确定度源主要包括光氘灯的不确定度、单色仪重复性的不确定度、标准真空光电管的不确定度以及光电管 R2078 引入的不确定度。光源氘灯在 150~300 nm 波段的相对不确定度为 2.5%,单色仪波长重复性的不确定度为 0.5%,NIST 标准真空光电管在 150~300 nm 波段的不确定度为 2%,光电管 R2078 的不确定度为 1%,如表 3 所示。由于各不确定度源互不相关^[14],故而合成不确定度的表达式为

$$u_c = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

式中: N 为不确定源的个数;当各个不确定源互不相关时, f/x_i 为 1; $u(x_i)$ 为每个不确定源。将各个

不确定源引入的不确定度代入(3)式,计算得到合成不确定度为 3.4%。

表 3 光电管 R2078 定标不确定度的估算值

Table 3 Estimated calibration uncertainty of phototube R2078

Source of uncertainty	Uncertainty estimation /%
Deuterium stabilization	2.5
Monochromator repeatability	0.5
Uncertainty of standard phototube	2
Uncertainty of phototube R2078	1
Association uncertainty	3.4

5 结 论

为了考察光电倍增管的灵敏度特性,构建了一套基于标准真空光电管的量子效率定标系统。依据其光阴极量子效率的测量原理,将光电倍增管改造成无电子束增益的光电管,并利用已构建的定标系统在国内首次实现了真空紫外-紫外光电管的量子效率直接测量。测量结果表明:由于其窗口材料为融石英,故而光电管 R2078 在 155 nm 波长处的透过率最小,在 155 nm 处获取的量子效率最小,在 230 nm 波长处的量子效率最大,这符合光阴极材料 Cs-Te 光电管的特性。此外,对测量结果进行了不确定度分析,得到总的合成不确定度为 3.4%,满足空间遥感仪器在轨应用需求。

参 考 文 献

[1] Wang R. Researching on the calibration technology of UV-VUV detector [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010: 1-5.
王锐. 紫外-真空紫外探测器定标技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010: 1-5.

[2] Xing J, Wang S 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.
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] Kohler R, Goebel R, Pello R. Experimental procedures for the comparison of cryogenic radiometer at highest accuracy [J]. Metrologia, 1996, 33(6): 549-554.

[4] Chen X H, Zhai Y H, Zhang D, *et al.* Absolute self-calibration of the quantum efficiency of single-photon detectors[J]. Optics Letters, 2006, 31(16): 2441-

2443.

[5] Klyshko D N. Use of two-photon light for absolute calibration of photoelectric detectors [J]. Soviet Journal Quantum Electronics, 1980, 10(9): 1112-1117.

[6] Feng Y, Zheng X B, Li J J, *et al.* Research in absolute calibration of single photon detectors by means of correlated photons [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(6): 315-317.

[7] Polyakov S V, Migdall A L. High accuracy verification of a correlated-photon-based method for determining photon-counting detection efficiency[J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1390-1407.

[8] Brida G, Degiovanni I P, Genovese M, *et al.* Detection of multimode spatial correlation in PDC and application to the absolute calibration of a CCD camera[J]. Optics Express, 2010, 18(20): 20572-20584.

[9] Gao D Y, Xia M P, Li J J, *et al.* Absolute quantum efficiency calibration of analog detectors with twin photon current [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 22(4): 411-416.

[10] Xia M P, Li J J, Gao D Y, *et al.* Detection of multimode spatial correlation of entangle photons to calibrate photomultiplier quantum-efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0612006.
夏茂鹏, 李健军, 高冬阳, 等. 基于相关光子的多模式空间相关性定标光电倍增管的量子效率[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0612006.

[11] Lü L, Zhang Y C, Lin Y D. Research on absolute calibration of photodetector quantum-efficiency using entangled photons[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0112004.
吕亮, 张寅超, 林延东. 纠缠光子法绝对定标光电探测器量子效率的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0112004.

[12] Wang R, Song K F. High-accuracy radiance calibration system for ultraviolet detector[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 469-474.
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): 469-474.

[13] Wei Y L, Zhao B S, Sai X F, *et al.* Development of cesium telluride UV cathode with high quantum efficiency and solar-blind characteristics [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(7): 555-558.
韦永林, 赵宝升, 赛小峰, 等. 高量子效率碲化铯紫外日盲阴极研制[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(7): 555-558.

[14] Mao Y T. Theory of error and precision analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982.
毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.