

紫外-真空紫外光谱辐照度校准系统

陈应航, 隋左宁, 孙红胜, 魏建强, 李敬峰, 李世伟, 孙广尉

(北京振兴计量测试研究所, 北京 100074)

摘要: 为了适应紫外探测技术的迅速发展, 满足对紫外光源和紫外探测器校准的需求, 建立了紫外-真空紫外光谱辐照度校准装置。装置由标准光源(氘灯)、标准探测器(增强型硅光二极管探测器)、紫外单色仪、真空仓等组成。装置采用双标准比对的方式对被测仪器和器件进行校准。即用标准光源和标准探测器分别对被检紫外光源和被检探测器进行量值传递。校准的光谱范围为 110~400 nm。对探测器校准的不确定度最大为 12%($k=2$), 对光源的校准不确定度最大为 20%($k=2$)。

关键词: 紫外; 真空紫外; 辐照度; 光谱辐照度; 校准

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-0998-05

Facility for calibration of ultraviolet and vacuum ultraviolet spectral irradiance

Chen Yinghang, Sui Zuoning, Sun Hongsheng, Wei Jianqiang, Li jingfeng, Li Shiwei, Sun Guangwei

(Beijing Zhenxing Metrology and Measurement Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to adapt the fast development of ultraviolet detection and fitting the requirements for the calibration of ultraviolet optical sources and ultraviolet detectors, a facility for calibration of ultraviolet and vacuum ultraviolet spectral irradiance was set up. The facility was composed of standard optical source (deuterium lamp), standard detector (intensive silicon diode), ultraviolet monochromator, vacuum chamber and so on. The double standards and compared method were adopted in the facility to calibrate the equipments. As well as the value of the standard detector and source were transferred to the detector and the source which were calibrated. Spectral range is 110 -400 nm. The maximum uncertainty for calibrating the detector is 12%($k=2$), and for the optical source is 20%($k=2$).

Key words: ultraviolet; vacuum ultraviolet; irradiance; spectral irradiance; calibration

收稿日期: 2012-08-01; 修订日期: 2012-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(40905011)

作者简介: 陈应航(1956-), 男, 研究员, 主要从事光学计量方面的研究。Email: guangweisun@163.com

0 引言

近些年,随着国际和国内空间技术的发展,紫外探测技术应用的越来越广泛。对紫外探测系统测量和标定技术的需求也越来越迫切。针对这种情况,紫外辐射计量标准的建立及量值的传递对紫外探测技术的发展起着至关重要的作用。

在紫外波段(400 nm 以下),特别是真空紫外波段(200 nm 以下),各国均用同步辐射建立紫外计量基准。美国 NIST 的紫外计量基准已发展到第三代同步辐射紫外辐射装置(SURF III)。该装置可对标准紫外探测器和紫外光源进行校准。校准的波段一般在 110~400 nm^[1-2]。1994 年,美国的海军实验室为了空间防卫气象卫星项目的紫外探测器的标定,也建立了相应的紫外测量标准装置,为美国的军事工业在真空紫外波段提供测量标准^[3-4]。

中国计量院和中国科技大学国家同步辐射实验室合作建立了我国的紫外辐射计量国家基准^[5-6]。该装置在 115~350 nm 对氙灯光谱辐亮度校准的标准不确定度为 11%~14%。西安应用光学研究所也建立了紫外波段的光谱辐照度计量标准装置,作为国防工业的紫外计量标准^[7]。工作波段在 200~400 nm。

根据国内空间探测技术发展的需要,北京振兴计量测试研究所于 2008 年建立了紫外-真空紫外光谱辐照度校准装置,工作波段为 110~400 nm。可作为国防工业的紫外-真空紫外光谱辐照度和探测器光谱响应率的计量标准。

1 工作原理

1.1 探测器真空紫外相对光谱响应率校准工作原理

校准原理图如图 1 所示。图中 1 为真空紫外光源及会聚镜系统;2 为真空紫外单色仪;3 为标准法兰;4 为真空紫外准直光学系统;5 为标准真空紫外探测器及被测真空紫外探测器;6 为精密电动转台。标准探测器光谱响应率经标定后,函数曲线为 $R(\lambda)$ 。对紫外探测器光谱响应率进行校准时,用标准法兰将真空紫外光源及会聚镜系统和真空紫外单色仪的人射狭缝连接。光源经单色仪分光后,照射到标准探测器上,标准探测器的输出信号为 $B(\lambda)$ 。控制电动转台,将标准探测器切换为被测探测器后,被测探测

器的输出信号为 $A(\lambda)$,则被测探测器在该紫外波段内的相对光谱响应率 $S(\lambda)$ 可以表示为:

$$S(\lambda)=k \cdot R(\lambda) \cdot A(\lambda) / B(\lambda) \quad (1)$$

式中: k 为两个探测器接收面积不同导致接收能量不同而引入的常数因子,一般情况下,若出射光为绝对均匀,且不考虑两个探测器自身响应的非均匀性,则 k 为两个探测器光敏感面积之比。在进行相对光谱响应率测试时, k 可不予考虑。

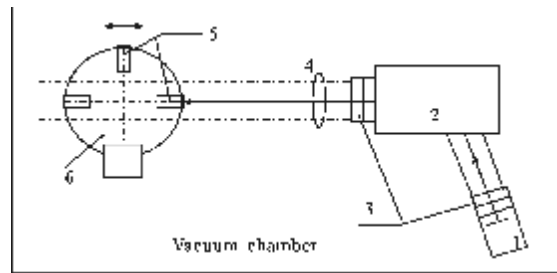


图 1 探测器真空紫外相对光谱响应率校准工作原理图
Fig.1 Working principle diagram of calibrating the vacuum ultraviolet spectral responsivity of detector

1.2 光源真空紫外光谱辐照度校准工作原理

校准原理示意图如图 2 所示。图中 1 为真空紫外探测器;2 为真空紫外单色仪;3 为标准法兰;4 为真空紫外会聚光学系统;5 为真空紫外漫射器;6 为标准真空紫外光源及被测真空紫外光源;7 为精密电动转台。该系统中已经标定过的标准光源(氙灯)的标

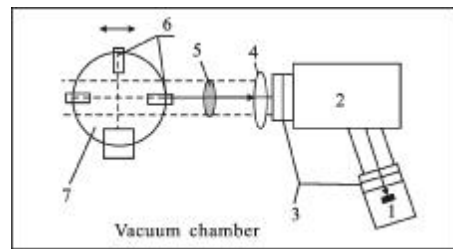


图 2 光源真空紫外光谱辐照度校准原理图
Fig.2 Principle diagram of calibrating the vacuum ultraviolet spectral irradiance of optical source

准紫外光谱辐亮度曲线为 $L_{lamp}(\lambda)$,经过一定的计量数学模型计算后,可得到标准紫外光谱辐照度曲线为 $E_{lamp}(\lambda)$ 。标准光源(氙灯)放置在真空仓的电动转台上,真空紫外探测器通过法兰和单色仪出射狭缝相连,真空紫外探测器工作于紫外-真空紫外波段(50~500 nm)。标准光源点亮稳定后,照射到漫射器

上,漫射后的真空紫外辐射经真空紫外会聚镜会聚到单色仪入射狭缝中心处,经单色仪分光后单色光照射到单色仪出射狭缝处的真空紫外探测器上,探测器输出信号为 $S_{lamp}(\lambda)$ 。通过控制电动转台转动,将标准光源切换成被测光源,测试出此时真空紫外探测器的输出信号为 $S(\lambda)$,则被测真空紫外光源的光谱辐照度为:

$$E(\lambda) = E_{lamp}(\lambda) \cdot S(\lambda) / S_{lamp}(\lambda) \quad (2)$$

1.3 光源真空紫外光谱辐亮度校准工作原理

校准工作原理示意图如图 2 所示(但此时要除去紫外漫射器)。该系统中已经标定过的标准紫外光源(氘灯)的光谱辐亮度曲线为 $L_{lamp}(\lambda)$ 。标准光源放置在真空仓的电动转台上,标准光源和被测光源的前端都设定有相应的光阑孔。在某一特定光阑孔状态下,调整标准光源使得标准光源的辐射通过会聚镜后会聚在单色仪入射狭缝中心处。真空紫外探测器输出信号为 $S_{lamp}(\lambda)$ 。通过控制电动转台转动,将标准光源切换成被测紫外光源后,真空紫外探测器的输出信号为 $S(\lambda)$,则被测紫外光源的光谱辐亮度可以表示为公式(3)。

$$L(\lambda) = L_{lamp}(\lambda) \cdot S(\lambda) / S_{lamp}(\lambda) \quad (3)$$

2 系统的构成

紫外辐照度及光谱辐照度校准系统主要由紫外标准光源、紫外标准探测器、紫外单色仪、紫外光学系统、真空仓系统、主光轨、精密二维电动转台、电动平移台等组成,如图 3 所示。

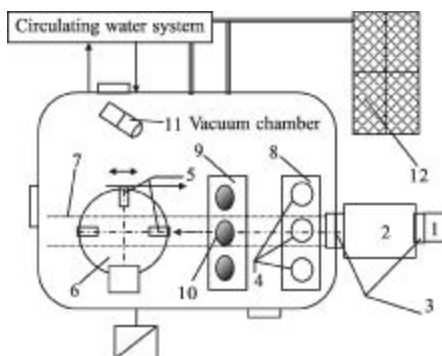


图 3 校准系统布局示意图

Fig.3 Schematic diagram of calibration system

图中,1 为氘灯及会聚镜系统(或硅光二极管探测器);2 为紫外单色仪;3 为标准法兰;4 为真空紫外

准直透镜组(或真空紫外会聚镜);5 为标准紫外探测器及被校紫外探测器(或标准紫外光源及被测紫外光源);6 为电动转台;7 为主光轨;8 和 9 为电动平移台;10 为紫外漫射透镜组;11 为监控器;12 为液氮系统。

2.1 标准紫外-真空紫外光源

采用氘灯作为标准紫外光谱辐照度光源。氘灯的主要辐射波长范围在 115~400 nm,其中在 165~400 nm 的光谱辐射连续且没有尖峰,适合做紫外和真空紫外光谱测量的标准灯。标准紫外光源主要技术指标:

(1) 光谱分布范围为 115~400 nm;(2) 窗口材料为 MgF_2 ;(3) 氘灯功耗为 30 W。

2.2 标准紫外探测器

选用紫外增强型硅光电二极管探测器。硅光电探测器灵敏度高,波长响应范围宽,暗电流小,输出信号稳定,重复性好,非常适合作为紫外校准装置中的标准探测器。标准紫外探测器的主要技术指标如下:

(1) 波长范围为 50~550 nm;(2) 敏感面积为 100 mm^2 ;(3) 响应度为 0.4 A/W 。

标准紫外探测器共两个,便于进行自校准。

2.3 紫外-真空紫外单色仪

紫外单色仪的技术指标将在很大程度上影响紫外光谱辐照度和紫外探测器光谱响应率校准的准确度,包括波长允差、波长分辨率等参数。为了减小系统传输的能量损失,需要尽量减少紫外单色仪中光学部件的数量,提高透过率,同时要使得紫外单色仪中的光栅满足波长应用的范围,该真空紫外单色仪选用的是 1200 G/mm 的光栅。单色仪的主要技术指标如下:

波长范围为 30~550 nm;分辨率为 0.1 nm ;波长精度为 0.1 nm ;波长重复性为 0.05 nm 。

2.4 真空紫外光学系统

该校准系统中,波长覆盖范围较宽,从 115 nm 到 400 nm,覆盖了极紫外到部分可见光波段。光学系统设计中材料选择方案采用组合式设计。在 110~130 nm 波段选用 LiF 材料;在 130~400 nm 波段选用 CaF 材料。

测量紫外探测器光谱响应率时,为了保证空间紫外辐射的均匀,减小光路对准的偏差,减小被校紫外探测器不均匀性带来的测量误差,设计从单色仪出射的紫外辐射经过一个真空紫外准直光学系统

(此时,图3中4表示为准直透镜组,并去除漫射透镜组10),形成一个均匀的辐射光,照射到标准探测器和被测探测器上。由于所覆盖的波段较宽,采用多片组合式设计,即每片紫外准直透镜工作在一个紫外波段,按照设计及加工难度,紫外准直透镜分为3组,分别工作于110~130 nm、130~200 nm和200~400 nm波段。

测量紫外-真空紫外光源的光谱辐照度时,需要将紫外-真空紫外光源的辐射经过漫射透镜漫射后,再经过会聚透镜(此时,图3中4表示会聚透镜组,并应有4个透镜。)汇聚到单色仪的入射狭缝上,以提高光能利用的效率。与探测器光谱响应率校准考虑的因素相同,为提高汇聚效果,汇聚透镜也采用分片式设计,紫外汇聚透镜分为4组,分别工作于110~130 nm、130~150 nm、150~200 nm和200~400 nm波段。

漫射器(图3中10)是测量光谱辐照度中的一个重要器件。该项目采用了一种平凸漫射透镜,即一面做成凸面,起光线收集并形成平行光的作用,另一面磨成毛玻璃形式,保证较好的余弦校正效果。通过这种设计形式,既保证了光源发射的余弦效果,又增强了信号强度。为优化设计结果,漫射器也分为3组,分别对应110~130 nm、130~200 nm和200~400 nm波段。

图4为紫外-真空紫外光谱辐照度标准装置。

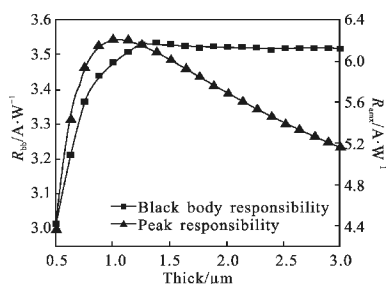


图4 紫外-真空紫外光谱辐照度校准装置

Fig.4 Facility for calibration of ultraviolet and vacuum ultraviolet spectral irradiance

2.5 真空仓系统

真空仓的结构成圆筒形,外形尺寸为: $\varphi 1800\text{mm} \times 2200\text{mm}$ 。真空仓筒壁为双层结构,可充液氮致冷,圆筒仓有机械泵和分子泵两级抽真空系统,使仓的真空度达到 10^{-4}Pa ,在圆筒的两个顶端为全开门,每个门上分别有一个窗口,其中一个窗口通过标准法兰,和真空紫外单色仪相连,而另一个窗口可以入射准直激光束,用于准直光路。

真空仓内安装有主光轨。主光轨上装有一个精

密二维电动转台和两个电动平移台以及光学调节支撑架、光栏、分束镜和透镜等各种光学元件,组成各种测试光路。

3 校准程序和方法

在国外,对紫外光源和探测器的测量和校准一般都分为两套装置。在该校准系统建立过程中,遵循一套装置兼顾多参数测量原则,利用光路可逆原理,将单色仪设计成出射狭缝和入射狭缝的功能可以互换的形式,这样单色仪的一个狭缝可固定连接在真空仓的一个窗口上,另一个狭缝可以分别连接光源或探测器。结果使装置的探测器室和光源室合二为一。即真空仓内的电动转台上既可以放置探测器,也可以放置光源。此方案实施后解决了利用一个真空仓进行多参数校准的难题。使其在一套装置上,可以实现紫外光源的光谱辐照度、光谱辐亮度和探测器的光谱响应率等多个参数的校准。

该装置采用双标准的体制和比对的方法进行校准。即氘灯和硅光二极管探测器均可作为标准。它们均可溯源到国家的最高标准或国际的有关标准。而对被校设备和器件的量值传递采用比对的方式进行。

紫外-真空紫外探测器光谱响应率的不确定度主要取决于标准探测器标定的偏差、分光系统(单色仪)的偏差的影响。

标准探测器光谱响应率经国家计量机构和国际有关计量机构标定。标定的不确定度在110~125 nm波段为9%($k=2$);在125~250 nm波段为2%($k=2$);在250~300 nm波段为6%($k=2$);在300~400 nm波段为5%($k=2$)。

单色仪波长允许误差为 $\pm 0.1\text{nm}$,实测准确度为 $\pm 0.1\text{nm}$,根据在几个点的实际测试值,估算由单色仪的波长误差引起的校准不确定度分量为0.5%。

测量系统的稳定性在各个波段范围内随着信噪比的变化而有所变化,经实际测试,所带来的不确定度估算在110~125 nm波段为3.5%,在125~300 nm波段为1%,在300~400 nm波段为1.5%。

经过实际测试,由光路引起的不确定度小于1%。

上述各项为主要误差源,同时考虑其他因素,经合成后,探测器光谱响应率校准的扩展不确定度在110~125 nm波段范围内为11.4%($k=2$),在125~250 nm波段范围内为3.6%($k=2$),在250~300 nm波

段范围内为 6.8%($k=2$), 在 300~400 nm 波段范围内为 6.4%($k=2$)。

光源光谱辐照度测量的不确定度主要取决于标准光源标定的偏差、分光系统(单色仪)的偏差以及光源定位的偏差的影响。

经有关国际计量机构标定, 标准光源光谱辐照度标定的不确定度在 200~400 nm 波段最大为 15% ($k=2$); 在 110~200 nm 波段最大为 18% ($k=2$)。

测量系统的稳定性在各个波段范围内随着信噪比的变化而有所变化, 经实际测试, 所带来的不确定度估算在 110~125 nm 波段为 3.5%, 在 125~300 nm 波段为 1.5%, 在 300~400 nm 波段为 2%。

和探测器测量相同, 考虑到其他误差因素, 合成后, 光源光谱辐照度测量的扩展不确定度在 200~400 nm 波段范围内为 16% ($k=2$), 在 110~200 nm 波段范围内为 20% ($k=2$)。

4 校准系统测试验证

选择长春光学精密机械与物理研究所提供的紫外-真空紫外透射式窗口氙灯进行了光谱辐照度测量。

其中, 光谱辐照度的单位为 $W/(m^2 \cdot nm)$, 在 110~200 nm 波段范围内波长测试间隔为 5 nm, 在 200~400 nm 波段范围内波长测试间隔为 10 nm。测试结果已经扣除了探测器输出的暗电流, 测试结果如图 5 所示。

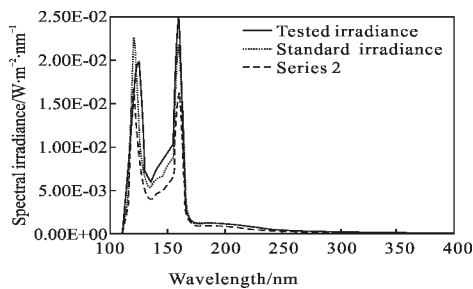


图 5 紫外光源光谱辐照度

Fig.5 Spectral irradiance of ultraviolet optical source

选择北京控制工程技术研究所提供的紫外增强型硅探测器进行探测器响应率的测量。其中, 光谱响应率为相对光谱响应率, 经过归一化计算, 波长测试间隔为 10 nm, 测试结果已经扣除了探测器输出的暗电流, 测试结果如图 6 所示。

对几个氙灯和探测器进行了测量, 对数据进行

了认真的验证和分析。确定测量结果的不确定度均在文中前面提出的不确定度范围之内。

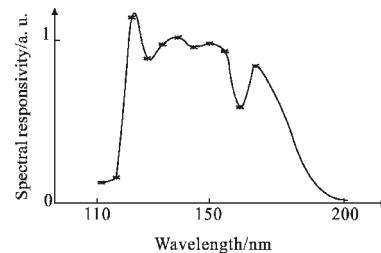


图 6 真空紫外探测器光谱响应率

Fig.6 Spectral responsivity of vacuum ultraviolet detector

5 结论

2008~2012 年还对一定数量的紫外光源和紫外探测器进行了测量和校准。通过大量的数据证实, 该装置可以对各种紫外探测器和紫外光源进行校准。校准结果的不确定度完全达到要求。

参考文献:

- [1] Shaw Pingshine, Iarason Thomas C, Rajeev Gupta, et al. The new ultraviolet spectral responsivity scale based on cryogenic radiometry at Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility III [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(5): 2242-2247.
- [2] Li Zhigang, Shaw Pingshine, Uwe Arp, et al. Long-term monitoring of the ultraviolet irradiance scale at the facility for irradiance calibration using synchrotrons [J]. Metrologia, 2010, 47: 429-434.
- [3] Boyer C N, Osterman S N, Thonnard S E. An EUV and FUV calibration facility for SSULI[C]//SPIE, 1994, 2282: 107-115.
- [4] Kalmanson Phillip C, Charles Sarnar, Stefan Thonnard. Facility for the calibration, construction, and environmental testing of instruments and detectors in the EUV and FUV [C]//SPIE, 2002, 4485: 303-315.
- [5] Xiong Limin, Liu Jinyuan, Xue Fengyi, et al. Ultraviolet and vacuum ultraviolet spectral radiance standard with synchrotron radiation source[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(4): 547-550. (in Chinese)
- [6] Lin Jinyuan, Xue Fengyi, Liao Ningfang. A UV -VUV radiation calibration facility based on synchrotron radiation [J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(9): 807-810. (in Chinese)
- [7] Zhan Chunlian, Li Zhengqi, Liu Jianping, et al. Measurement of spectral irradiance [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 1245-1249. (in Chinese)