

轻量化真空紫外光谱辐射计技术研究

刘 豪*, 赵天琦, 占春连, 邹艳霞, 金尚忠

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

摘 要: 对真空紫外光谱辐射计的探测系统、光学系统、真空舱开展了研究和设计, 研制了一台轻量化、小型化的高灵敏真空紫外光谱辐射计, 并对真空紫外辐射计的光谱范围、中心波长、光谱辐射亮度等性能进行了测试。测试结果表明辐射计光谱范围覆盖了115 nm~200 nm的真空紫外波段, 实现了最大响应度分别在121.2 nm、135.6 nm、160 nm、180 nm、200 nm五个工作波长附近, 且中心波长的相对示值误差均小于3%, 利用定标氘灯测量辐射计在全波段的真空紫外光谱辐射亮度在0.006 4~3.923 9 $\mu\text{W}/\text{cm}^2\cdot\text{nm}\cdot\text{Sr}$ 之间, 实现了对真空紫外光谱辐射亮度0.01量级以下的测量。

关键词: 真空紫外; 高精度; 光电倍增管; 辐射计; 微通道板

中图分类号: TN23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)03-0269-07

Research on High Precision Vacuum Ultraviolet Spectroradiometer Technology

LIU Hao, ZHAO Tianqi, ZHAN Chunlian, ZOU Yanxia, JIN Shangzhong

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, CHN)

Abstract: Through the research and design of the detection system, optical system and vacuum chamber of the vacuum ultraviolet spectral radiometer, a lightweight, miniaturized and highly sensitive vacuum ultraviolet spectral radiometer was developed. The spectral range, central wavelength and spectral radiance of the vacuum ultraviolet radiometer were tested. The test results showed that the spectral range of the radiometer covered the vacuum ultraviolet band of 115 nm~200 nm, and the maximum responsivity was around five working wavelengths of 121.2 nm, 135.6 nm, 160 nm, 180 nm and 200 nm, respectively. The vacuum ultraviolet spectral radiance of the radiometer in the full band was measured by using a calibrated deuterium lamp at 0.006 4~3.923 9 $\mu\text{W}/\text{cm}^2\cdot\text{nm}\cdot\text{sr}$, and the measurement accuracy could reach 0.01 $\mu\text{W}/\text{cm}^2\cdot\text{nm}\cdot\text{Sr}$.

Key words: vacuum ultraviolet; high precision; photomultiplier tube; radiometer; microchannel plate

收稿日期: 2023-03-09

作者简介: 刘 豪(1997—), 男, 硕士, 研究方向为光学计量; (E-mail: lh051997@163.com)

赵天琦(1990—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为硅基单光子探测器件的研究, 光谱检测弱光探测;

占春连(1969—), 女, 研究员, 研究方向为光学计量测试技术及光学精密测试仪器研发。

** 通讯作者

引 言

在 10 nm~200 nm 波段的电磁波辐射由于被大气中的氧气、氮气以及水蒸气等的强烈吸收,需要在真空条件下才能应用和探测,因此被称为真空紫外辐射(光)。真空紫外辐射本身并不能存在于地球表面,只能存在于真空。但真空紫外辐射在水污染治理^[1-3]、大气监测、观测电离层气辉现象、分析土星大气成分^[4]以及监测太阳风暴的演变和预测等多个科学领域都有着非常重要的研究价值和意义^[5],例如通过监测太阳耀斑和太阳风暴有助于应对其对地球无线电通讯的影响^[6];通过对电离层气辉辐射进行观测,以了解电离层的昼夜环境信息;利用特定波段的真空紫外光实现对水污染的治理;因此需要特定的载荷,来对真空紫外信号进行探测和处理。

由于真空紫外波段只存在于真空中,因此需要特定的环境和探测技术对真空紫外光子信号进行探测。在国际上,2008年欧洲航天局开展的SolACES实验(Solar EUV Irradiance Measurements by the Auto-Calibrating EUV Spectrometers)用以检测16 nm~150 nm的太阳光谱辐照度^[7]。在国内,2008年5月由长春光机所研制的紫外臭氧垂直探测仪发射升空,用于对160 nm~400 nm的太阳连续光谱进行光谱辐亮度和辐照度的测量^[8-9];2017年中国科学院自研的电离层光度计随“风云三号”发射入轨,主要对电离层高浓度氧135.6 nm日间和夜间气辉辐射强度以及日间氮气分子辐射强度进行观测^[10]。

对于真空紫外辐射的测量仪器,大多用于外太空,如电离层、臭氧层以及太阳系的真空紫外辐射探测;对于地表的真空紫外探测,多依托于大型实验室,如德国PTB建立的紫外同步辐射源^[11]、美国NIST建立的同步辐射源和低温辐射计^[12],对于真空紫外辐射的研究和测量只能依托于大型的实验室。缺少便携化的真空紫外计量仪器,难以在外场对真空紫外光源进行测量和研究。针对这一问题,设计了基于微通道板型光电倍增管(MCP-PMT)轻量化、小型化的高精度真空紫外辐射计,通过对MCP-PMT、双反射光学系统的设计实现了真空紫外光谱辐射计的轻量化、小型化以及对真空紫外波段范围内的不同特定波长范围进行光谱辐射亮度的高精度测量。

1 真空紫外辐射计的设计

本设备是基于MCP-PMT的真空紫外光谱辐射计,如图1所示。该设备用以测量真空紫外波段范围内特定波长的辐射参数,通过收集检测到的真空紫外信号,应用于天文学、物理化学和电子工业等不同科学领域。

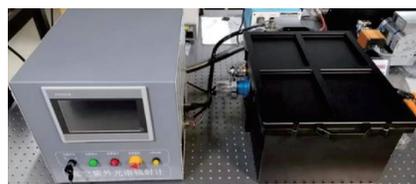


图1 真空紫外光谱辐射计外形图

Fig.1 Outline diagram of vacuum ultraviolet spectroradiometer

1.1 光学系统

为满足小型化、便携化和对特定真空紫外波长探测的需求,考虑到透射式光学系统对真空紫外辐射有强烈的吸收问题,本设备采用离轴非球面双反射镜紫外光学系统,如图2所示,尽可能在缩小光学系统焦距的同时利用反射镜调节光路来实现仪器的小型化。被测紫外目标经过光阑调整光斑大小,经过离轴非球面反射镜1和平面反射镜2聚焦后,进入由五片设计波长的滤光片组成的分光系统进行分光,最后进入VUV MCP-PMT。为了解决光栅分光具有较大程度光强损耗的问题,同时实现小型化、便携式,采用了滤光片分光设计,这样不仅具备较高的特定波长的透过率,也解决了真空紫外光栅分光仪信噪比差的问题。此外,针对真空紫外波段设计加工了五块滤光片来覆盖115~200 nm的波长范围,对真空紫外带通滤光片的性能进行了测试,结果如图3所示。

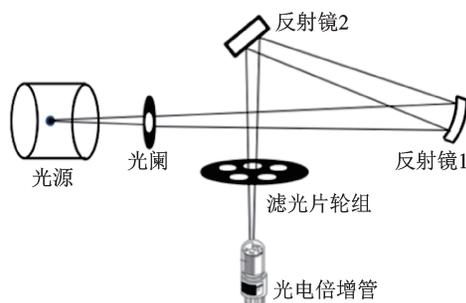


图2 离轴非球面双反射式紫外光学系统

Fig.2 Off-axis aspherical double reflection ultraviolet optical system

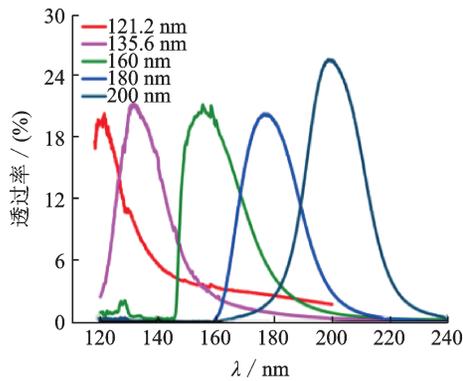


图3 真空紫外带通滤光片的性能测试
Fig.3 Performance test of vacuum ultraviolet filter

在光学系统中,两个反射镜的反射率直接决定了MCP-PMT对光子的采集效率,在真空紫外波段具有较高的反射率。理论计算表明在200 nm波长以下,当铝膜厚度大于50 nm,115 nm~200 nm波段范围内反射率达到饱和状态;对于单层高反射镜,铝膜厚度选取60 nm。铝非常活泼,大气中铝膜极易被氧化成 Al_2O_3 ,因此需要对铝膜上方加一层 MgF_2 保护层。通过对 MgF_2 保护层对铝镜反射率的影响进行了仿真实验,图5显示了 MgF_2 保护膜过厚会造成120 nm附近反射率急剧下降,过薄又会造成铝镜反射率降低,最终选取 $Al(60\sim 100\text{ nm})/MgF_2(20\sim 25\text{ nm})$ 。工艺采用热蒸发方法制备,在石英基板上蒸镀一层约60 nm的铝膜,保护层采用分步的方式,先在铝膜上迅速蒸镀一层 MgF_2 ,以减少铝膜在加工过程中的被氧化和被污染。具体过程为在室温石英基板上,蒸镀一层厚度约为5 nm的 MgF_2 薄膜,再加热石英基板到250 °C蒸镀一层厚度约为20 nm的 MgF_2 薄膜,控制薄膜厚度在20~25 nm左右。根据光源入射角度的不同,对研制的真空紫外反射镜分别测量入射角(AOI)15°和45°时的光谱反射率,图4显示了光谱反射率都大于54%。

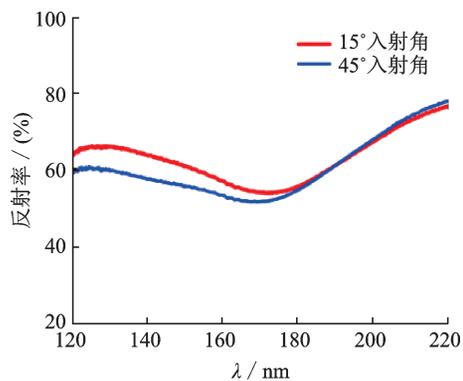


图4 入射角15°和45°时反射镜反射率
Fig.4 Reflectivity of the mirror at incident angles of 15° and 45°

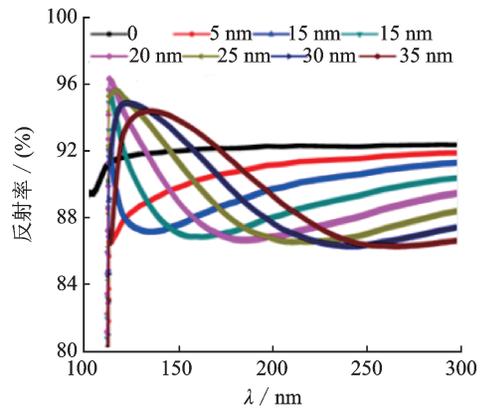


图5 MgF_2 保护层厚度对铝镜反射率影响的仿真曲线
Fig.5 Simulation curves of influence of MgF_2 protective layer thickness on aluminum mirror reflectivity

1.2 微通道板型真空紫外光电倍增管

对于极弱真空紫外光的精密探测,通常利用PMT和MPPC进行光电探测。目前滨松S13370-3050CN型MPPC主要应用于对中微子和暗物质的探索,且在充氮条件下进行低温物理实验^[13, 14],要求探测环境苛刻。

与之相比较,所设计的微通道板型真空紫外光电倍增管在真空紫外波段有较宽的光谱响应范围,通过对电子倍增系统和阴极材料的设计,使管长缩小4倍的同时解决了真空紫外光电倍增管的拖尾问题,实现了在200 nm以上范围低于0.02%的量子效率,具体VUV MCP-PMT结构如图6。真空紫外光源从光窗入射,进入光阴极表面,价电子吸收光能向表面扩散,当能量大于光电发射阈值时产生外光电效应,向真空中发射电子,光窗和光电阴极共同决定了VUV PMT探测的光谱范围和光阴极的量子效率,六支VUV PMT测试结果如图10。光窗采用 MgF_2 晶体,其短波界限为115 nm,与传统的光窗相比较,为了提高光窗透过率,在降低光窗厚度的同时改进了钢封夹具的结构,减去传统的台阶部分,采用热钢封技术进行封接,光窗玻璃封接电极层使用Cr/Cu/Ag。光电阴极组件选取 $MgF_2/Ni/Cs-I$,三层分别为基底、导电层、阴极材料。镀膜工艺方面相对真空热蒸发法,电子束蒸发法能够形成颗粒较小、结构更致密的薄膜,在空气中有更好的稳定性^[15]。根据软X射线光能区(0.1~10 keV)Cs-I二次电子产出与膜厚关系^[16],对50 nm~80 nm膜厚进行测试,确定最优Cs-I膜厚约为60 nm,Cs-I阴极基底的导电层Ni膜厚约为5 nm, MgF_2/Ni 的透过率约为68%。光电子经过聚焦汇聚到电子倍增系统,倍增系统采用双层MCP型结构,为了使VUV MCP-PMT正常工作,对分压器回路进行了

电压配比,微通道板与两级之间的电压过大会造成放电,过小会影响器件的电子增益。根据微通道板的工作电压结合不同分压比下阴极分压和微通道板分压随总电压变化规律,得出比较合适的分压比1:10:1。利用同样的原理和工艺自研了六支VUV MCP-PMT,对VUV MCP-PMT在115 nm~200 nm光谱内的性能做了相应的测试。首先在高真空环境暗室条件下,调节偏压测试VUV MCP-PMT的暗电流如图7,该器件在1300V以下具有1 nA左右的噪声;然后固定偏压观察随真空度降低暗电流变化如图8。接着对比光暗电流比、增益系数随偏压的变化,找出VUV MCP-PMT的最佳工作电压,如图9,发现在1300 V附近发生拐点,对1300 V附近偏压进一步测试,找出最佳偏压。

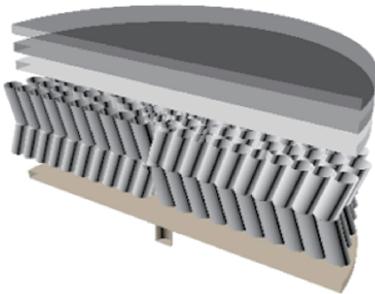


图6 MCP-PMT 内部结构图

Fig.6 Internal structure diagram of MCP-PMT

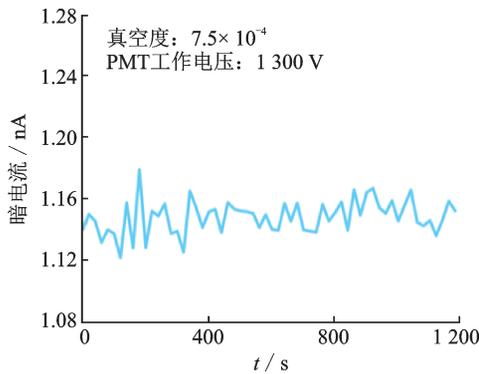


图7 MCP-PMT 随时间变化暗电流曲线图

Fig.7 Dark current curve of MCP-PMT over time

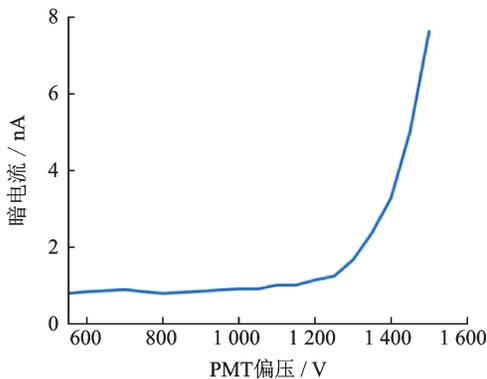


图8 随真空度变化的暗电流曲线图

Fig.8 Dark current graph as a function of vacuum

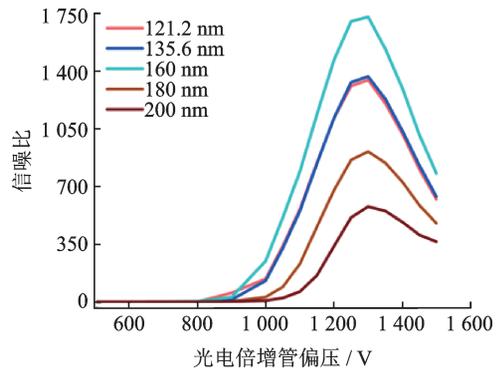


图9 随偏压变化的信噪比曲线图

Fig.9 Curve chart of signal to noise ratio as a function of bias voltage

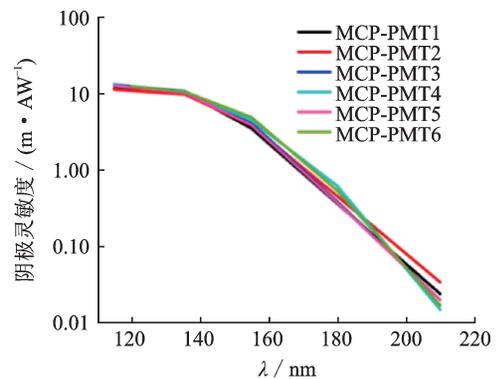


图10 光阴极灵敏度曲线图

Fig.10 Photocathode sensitivity curves

1.3 精密调节机构

精密调节机构主要分为真空舱和光学调节机构,真空舱主要为真空紫外光谱辐射计提供真空系统,光学调节机构用于辅助调节光学系统,真空舱实物图如图11。通常真空系统包括了真空舱、分子泵、真空规、监测与控制系统,为满足轻量化、小型化的需求,在同等强度下,选用铝合金材料代替传统的不锈钢作为舱体的材料,通过对真空舱舱体和舱体上盖进行稳态力学仿真如图12和图13,在一个标准大气压压力下,最大等效应力远小于铝合金材料的屈服应力,考虑到真空舱重量及舱体上盖受力问题,设计十字加强筋结构,减少真空舱重量的同时加强结构面的强度。

精密调节机构的设计对真空紫外光谱辐射计的结构大小和光路的调节有很大影响,通过调节支撑杆和调节板,对光学镜片进行俯仰角改变和旋转找出最佳光路,让光斑正好完整照在VUV MCP-PMT的感光面上。同时此调节结构能够使光路更加紧凑,提升了空间利用率,进一步减小了仪器的体积。

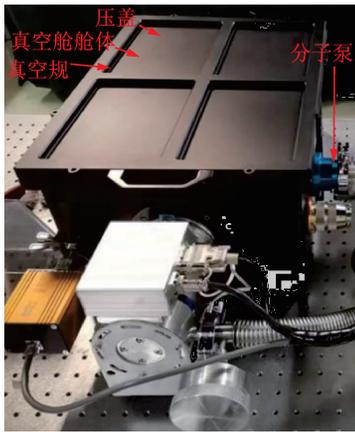


图 11 真空舱实物图

Fig.11 Photo of vacuum chamber

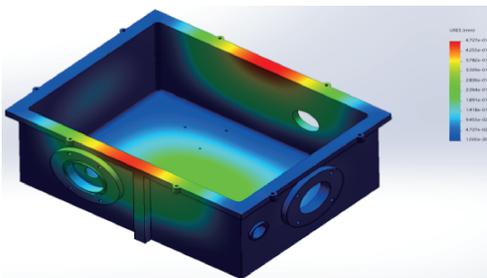


图 12 真空舱舱体应力静态位移仿真云图

Fig.12 Simulation nephogram of static displacement and stress of vacuum chamber

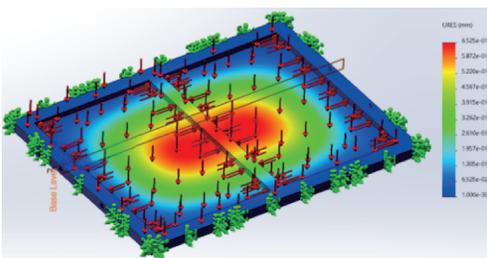


图 13 舱体上盖应力静态位移仿真云图

Fig.13 Simulation nephogram of stress and static displacement of upper cover of cabin

2 真空紫外辐射计性能测试

由于真空紫外光谱辐射计的响应度在不同波段差异很大,例如 135.6 nm 和 200 nm 之间响应度相差了 20 000 倍,因此很难同时实现全波长范围内的 0.01 量级测试,根据不同波段的响应度差异,选取响应度最大的 200 nm 波段进行测试,而真空紫外光谱辐射计的噪声是表征的关键参数之一,噪声的大小直接决定了信号是否会被噪声淹没,因此应尽量扣除噪声带来的影响。而 PMT 是噪声的主要来源,在没有光入射的情况下,光阴极材料的热电子发射,阳极和其他管脚的漏电电流等都会造成暗电流

噪声的产生,因此需要对真空紫外光谱辐射计进行 PMT 暗电流的扣除和噪声消除,测量在暗室环境中真空紫外光谱辐射计的光谱辐射亮度。本次选取的真空紫外光源为 634 型汞灯光源,利用不同真空紫外滤光片,测量不同波长的真空紫外信号,对于真空紫外光谱辐射亮度的计算可以使用公式(1):

$$L(\lambda) = \frac{V(\lambda) - V_{\text{noise}}(\lambda)}{R(\lambda)} \quad (1)$$

其中 $V(\lambda)$ 表示被测光源输出电压, $V_{\text{noise}}(\lambda)$ 表示噪声输出电压, $R(\lambda)$ 表示真空紫外光谱辐射计的光谱辐射亮度响应度, $L(\lambda)$ 表示被测光源的光谱辐射亮度。真空紫外光谱辐射亮度测试结果如图 14,真空紫外光谱辐射亮度在 0.006 4~3.923 9 $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{Sr})$ 之间,且在五个中心波长的相对示值误差分别为 0.99%、1.7%、2.7%、0.522 6%、0.468 8%,反映了仪器测量真空紫外辐射亮度的准确性。

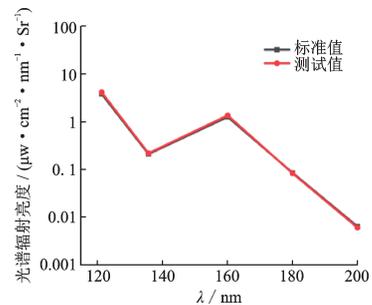


图 14 光谱辐射亮度测试结果图

Fig.14 Chart of spectral radiance test result

同时针对真空紫外光谱辐射计在五个中心波长附近的响应度和工作光谱范围进行测试,测试结果如图 15~20,说明了最大响应度均在工作波长附近且真空紫外辐射计工作波长覆盖了 115 nm~200 nm 之间。

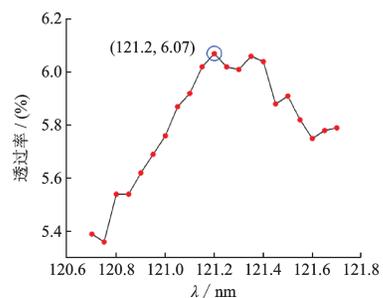


图 15 121.2 nm 中心波长附近响应度曲线图

Fig.15 Responsiveness curve near the center wavelength of 121.2 nm

3 结 论

文章描述了对真空紫外光谱辐射计光学系统、

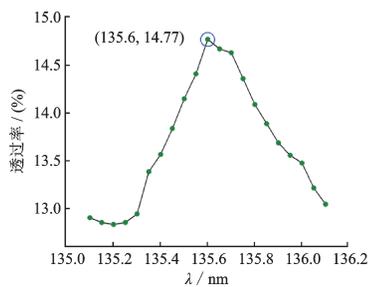


图 16 135.6 nm 中心波长附近响应度曲线图

Fig.16 Responsiveness curve near the center wavelength of 135.6 nm

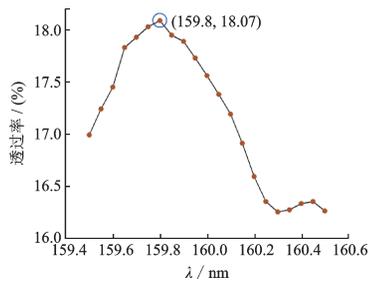


图 17 160 nm 中心波长附近响应度曲线图

Fig.17 Responsiveness curve near the center wavelength of 160 nm

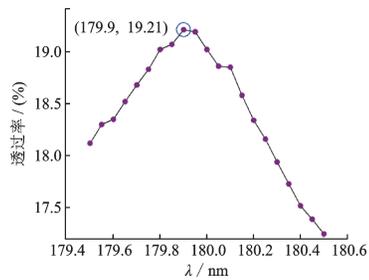


图 18 180 nm 中心波长附近响应度曲线图

Fig.18 Responsiveness curve near the center wavelength of 180 nm

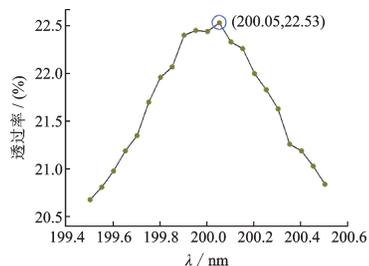


图 19 200nm 中心波长附近响应度曲线图

Fig.19 Responsiveness curve near the center wavelength of 200 nm

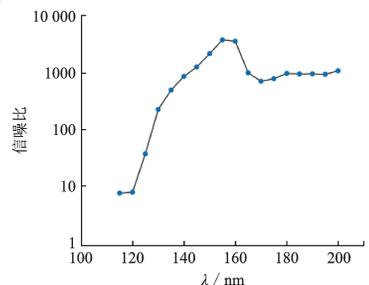


图 20 光谱辐射计工作波长信噪比曲线图

Fig.20 Spectroradiometer working wavelength signal-to-noise ratio curve

真空紫外探测系统、结构系统的设计方案,并对仪器的参数特性进行了表征。通过对紫外光学系统和 MCP-PMT 器件的结构、工艺的改进与设计,将仪器的真空紫外光谱辐射响应度分别在 121.2 nm、135.6 nm、160 nm、180 nm 和 200 nm 工作波长从 $V/(mW/cm^2 \cdot nm \cdot Sr)$ 量级提升到了 0.37、1.12、0.43、0.05 和 0.16,单位为 $V/(\mu W/cm^2 \cdot nm \cdot Sr)$;仪器在 200 nm 工作波长附近所测量的真空紫外光谱辐射亮度达到了 $0.01 \mu W/cm^2 \cdot nm \cdot Sr$ 以下,实现了仪器真空紫外光谱辐射亮度 0.01 量级的高精度测量。通过对滤光片膜厚及材料的设计,实现了在 121.2 nm、135.6 nm、160 nm、180 nm、200 nm 五种不同波段的真空紫外信号采集,覆盖了从 115 nm 到 200 nm 的真空紫外波段。此外,通过对真空舱的材料进行选型和加工,结合光学系统的设计,将仪器的重量控制在了 50 kg 以下,体积控制在了 $0.5 m \times 0.5 m \times 0.8 m$ 以下,相较于专业实验室仪器有了显著降低,实现了真空紫外光谱辐射计的轻量化、小型化和便携化,解决了传统仪器只能在专业实验室使用而无法满足在外场进行现场化测量和校准的需求^[15,16]。

参 考 文 献

- [1] Chang Y, Yu Y, An F, et al. Three body photodissociation of the water molecule and its implications for prebiotic oxygen production[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 2476-2480.
- [2] Moussavi G, Hossaini H, Jafari S J, et al. Comparing the efficacy of UVC, UVC/ZnO and VUV processes for oxidation of organophosphate pesticides in water[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2014, 290: 86-93.
- [3] Oppenlander T. Mercury-free sources of VUV/UV radiation: Application of modern excimer lamps (excilamps) for water and air treatment[J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2007, 6(3): 253-264.
- [4] Cruden B A, Bogdanoff D W. Shock radiation tests for Saturn and Uranus entry probes[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2017, 54(6): 1246-1257.
- [5] Zheng W, Jia L, Huang F. Vacuum-ultraviolet photon detections[J]. IScience, 2020, 23(6): 101145.
- [6] Guerrero M A, Demarco O. Analysis of far-UV data of central stars of planetary nebulae: Occurrence and variability of stellar winds[J]. Astronomy & Astrophysics, 2013, 553: 126-126.
- [7] Schmidtke G, Nikutowski B, Jacobi C, et al. Solar EUV irradiance measurements by the auto-calibrating EUV spectrometers (SolACES) aboard the International Space Station (ISS) [J]. Solar Physics, 2014, 289: 1863-1883.
- [8] 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.
- [9] 杨小虎, 王淑荣, 黄煜. 大气/真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱辐射度定标研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 30-35.
- [10] 付利平, 彭如意. “风云三号”D 星电离层光度计[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(3): 305-310.
- [11] Beckhoff B, Gottwald A, Klein R, et al. A quarter-century of metrology using synchrotron radiation by PTB in Berlin [J].

- Physica Status Solidi (b), 2009, 246(7): 1415-1434.
- [12] Bonesini M, Cervi T, Menegolli A, et al. Detection of vacuum ultraviolet light by means of SiPM for high energy physics experiments[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 912: 235-237.
- [13] Arneodo F, Benabderramane L, Conicella V, et al. One to one preliminary comparison between R11410 photomultiplier tube and VUV4 multi-pixel photon counter[J]. Springer Proc. Phys., 2017, 2: 259-262.
- [14] Pershing T, Xu J, Bernard E, et al. Performance of Hamamatsu VUV4 SiPMs for detecting liquid argon scintillation [J]. Journal of Instrumentation, 2022, 17(4): 4017-4017.
- [15] Xie Y, Liu H, Zhang A, et al. Quantum efficiency measurement of CsI photocathodes using synchrotron radiation at BSRF [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, 664(1): 310-316.
- [16] Fraser G W. The characterisation of soft X-ray photocathodes in the wavelength band 1 - 300 Å: I. Lead glass, lithium fluoride and magnesium fluoride[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1983, 206(1): 251-263.

征 稿 启 事

《光电子技术》创刊于1981年,季刊。由中国电子科技集团公司第五十五研究所独立主办,是国家级科技类学术期刊,连续被WJCI数据库收录,是中国科技核心期刊,中国学术期刊综合评价数据库来源期刊,中国科技论文统计源期刊,中国科学引文数据库来源期刊。

期刊征稿范围主要是具有原创性、先进性和应用价值的光电子和光学相关领域的创新性科学技术报告和论文,包括但不限于:光学信息获取、显示和处理,光子和光电子器件,传输与交换光子器件,应用光学,微纳光子学,光子集成技术与器件等,光学与光电子学技术。

投稿方式:请发电子稿(word版本)至邮箱:gdjs@chinajournal.net.cn和gdjstg@163.com。请作者在投稿时注明联系信息(邮寄地址,电话)。

本刊未与任何网站合作征稿。

根据相关国家标准及数据库入编要求,作者投稿时请注意以下要求:

(1)标题:中文标题控制在20个汉字以内,英文标题最多为400个字符;

(2)摘要:学术论文、研究报告的摘要应写明研究目的、方法、新的结果和结论。综述、评论性文章的摘要应简要说明论文内容的要点。摘要中不要使用多余的词语,尽量减少背景信息、工作意义,不希望出现公式、矩阵。英文摘要的长度不超过150个单词(含介词);

(3)关键词:3~8个。中文关键词应使用中文全称表示,尽量不采用英语缩略语。中、英文各关键词之间用分号隔开。在中、英文关键词的下方分别给出论文的中图分类号与EEACC(或PACC);

(4)基金项目:按照国家有关部门规定的正式名称写明基金项目,并在圆括号内注明其项目编号。多项基金项目应依次列出,其间用分号隔开;

(5)作者及其工作单位:作者姓名汉语拼音的写法为姓在前,名在后,姓氏的全部字母均大写,名字的首字母大写。工作单位需给出所有作者的工作单位全称、所在省市及邮政编码,英文部分还应在邮编之后加上国别代码“CHN”;

(6)电子信箱:应给出第一作者或联系人的E-mail。

(7)插图与表格:应安排在文中的相应位置。图题、表题需中、英文对照,图、表内的中文词均改为英文,插图希控制在10幅以内;

(8)参考文献:请按GB/T 7714—2005 著录并标明文献类型:

a. 期刊:作者. 篇名(文题)[J]. 期刊名称, 出版年; 卷号(期号): 起止页

b. 专著:作者. 书名[M]. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页

c. 会议录、论文集:作者. 文题[C]. 文集编者. 会议录或论文集名, 出版地: 出版者, 出版年: 起止页

d. 学位论文:作者. 文题[D]. 学位授予单位, 编号或缩微制品序号, 年份

e. 文献中作者项:①姓在前,名在后,去缩写点;②3人以下应全列出,4人以上则只列出3人后再加上“等”(et al.)

f. 文献类型标识:

参考文献类型	专著	论文集	报纸文章	期刊文章	学位论文	报告	标准	专利	联机网络
文献类型标识	M	C	N	J	D	R	S	P	OL