

文章编号: 1002-2082 (2020) 03-0548-05

紫外像增强器辐射灵敏度测量系统

王生云, 解 琪, 史继芳, 孙宇楠, 俞 兵, 康登魁

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 紫外像增强器是紫外探测系统的核心器件, 是一种电真空成像器件, 可将微弱的紫外光图像转换并增强为肉眼可见、亮度可见的光图像, 其研制与应用是微光夜视技术的重要发展方向。辐射灵敏度是评价紫外像增强器的重要参数, 直接决定了紫外探测系统的性能。介绍了紫外像增强器辐射灵敏度的测量原理, 采用紫外辐射光源、光栅单色仪系统、测试暗箱、微电流计、计算机及测量软件组建了辐射灵敏度测量系统。对3只紫外像增强器在260 nm、280 nm及320 nm波长下的辐射灵敏度进行了测量, 并分析了其测量不确定度。该测量系统的建立, 将辐射灵敏度测量系统的光谱范围拓展至200 nm~400 nm, 弥补了现有系统的不足, 具有广泛的应用前景。

关键词: 紫外像增强器; 辐射灵敏度; 原理; 测量

中图分类号: TN23

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0303001

Measurement system of radiation sensitivity for UV image intensifier

WANG Shengyun, XIE Qi, SHI Jifang, SUN Yunan, YU Bing, KANG Dengkui

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The ultraviolet (UV) image intensifier is the core device of the UV detection system, which is a kind of electric vacuum imaging device, and can transform and enhance the weak UV images into the optical images that can be detected by eyes. The development and application of the UV image intensifier is an important orientation of the low-light-level night vision technology. The radiant sensitivity is a key parameter to evaluate the UV image intensifier, which directly determines the performance of the UV detection system. The measuring principle of the radiant sensitivity for UV image intensifier was introduced, and the measuring system was constructed by the UV radiation source, grating monochromator system, testing dark box, micro galvanometer, computer and measuring software. The radiant sensitivity of three UV image intensifier at wavelengths of 260 nm, 280 nm and 320 nm was measured, respectively, and the measurement uncertainty was analyzed. The spectral range of the radiant sensitivity measuring system is extended to 200 nm~400 nm by the establishment of the measuring system, which makes up for the deficiency of the existing system and has broad application prospects.

Key words: UV image intensifier; radiant sensitivity; principle; measurement

引言

微光夜视技术是光电子高新技术的重要组成部分, 加快进行紫外像增强器的研制与应用是其重要发展方向。紫外像增强器是一种电真空成像紫外器件, 可将微弱的紫外光图像转换并增强为

肉眼可见、亮度可见的光图像, 是整个紫外探测系统的核心器件, 广泛应用于军用和民用领域^[1-5]。辐射灵敏度是评价紫外像增强器的重要参数, 直接决定了紫外探测系统的性能。因此, 紫外像增强器辐射灵敏度的测量十分必要^[6-9]。

收稿日期: 2019-10-30; 修回日期: 2020-03-21

基金项目: 国防军工计量技术基础项目 (JSJL2016208A003)

作者简介: 王生云 (1972-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事成像光学及微光夜视计量测试方面的研究。E-mail: wsyun-2008@163.com

本文研究了紫外像增强器辐射灵敏度的测量原理, 组建了相应的测量系统。对 3 只紫外像增强器在 260 nm、280 nm 及 320 nm 波长下的辐射灵敏度进行了测量, 并对测量装置进行了溯源, 分析了其测量结果不确定度, 保证了测量结果的准确性。

在国内, 北方夜视公司、中电集团南京电子器件研究所等单位建立了光谱范围在 200 nm~300 nm 之间的紫外像增强器辐射灵敏度测量系统。本测量系统的建立, 将原有的光谱范围拓展至 200 nm~400 nm, 弥补了现有系统的不足。

1 紫外像增强器辐射灵敏度测量原理

紫外像增强器的光谱响应是指紫外光阴极发射光电子的能力随波长变化的关系, 紫外光阴极发射光电子的能力通常用辐射灵敏度来表示。紫外像增强器的辐射灵敏度是指紫外像增强器的光阴极在具有一定辐射功率的单色光照射下, 所产生的光电流被称为光阴极在该波长下的辐射灵敏度^[10-12]。其测量公式如下:

$$S(\lambda) = \frac{I}{\Phi} \quad (1)$$

式中: $S(\lambda)$ 为波长 λ 时的辐射灵敏度; I 为光电流; Φ 为入射辐射功率。

紫外像增强器辐射灵敏度的测量原理: 由紫外辐射光源输出的光经光栅单色仪系统输出质量良好的单色光, 并将其衰减为规定的辐照度, 采用紫外辐射计测量其光阴极输入端的辐射功率。单色光入射到被测紫外像增强器, 在信号处理模块中对紫外像增强器输出的光电流信号进行处理, 从而测量出不同波长下的辐射灵敏度^[13-16]。

2 紫外像增强器辐射灵敏度测量系统

紫外像增强器辐射灵敏度测量装置由紫外辐射光源、光栅单色仪系统、测试暗箱、微电流计、计算机及测量软件等组成。该测量系统原理框图如图 1 所示。

紫外光源发出的复合紫外光呈发散状, 利用石英透镜进行汇聚, 并通过入射狭缝入射至光栅单色仪。在光栅单色仪内光栅衍射的作用下, 复合紫外光被分解为各个波长的单色紫外光。其中指定波长的单色紫外光将通过出射狭缝输出, 利用传光光纤将光栅单色仪输出的指定波长的单色紫外光传输至被测紫外像增强器阴极面上, 获得指定波长下被测紫外像增强器阴极光电流信号, 从

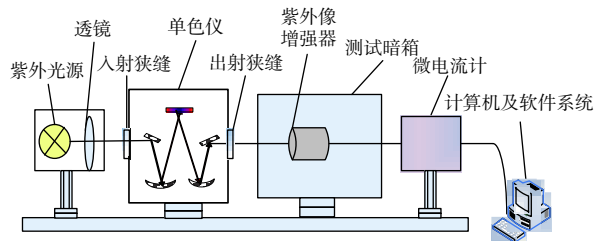


图 1 紫外像增强器辐射灵敏度测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of radiant sensitivity measurement for UV image intensifier

而计算出辐射灵敏度值。

紫外像增强器辐射灵敏度测量装置立体图如图 2 所示。

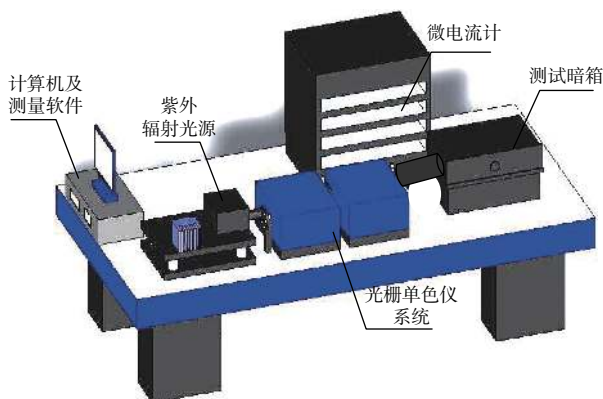


图 2 紫外像增强器辐射灵敏度测量装置立体图

Fig. 2 Stereogram of radiant sensitivity measuring device for UV image intensifier

2.1 紫外光纤输出单色光源

紫外光纤输出单色光源用于为紫外像增强器辐射灵敏度测试提供所需指定波长的单色紫外光, 要求输出单色波长可调、输出光功率稳定。紫外光纤输出单色光源系统输出光谱的范围为 200 nm~400 nm, 最小波长间隔为 0.1 nm, 输出单色紫外光斑直径为 5 mm。

紫外光纤输出单色光源的基本结构包括紫外光源、光源电源、光栅单色仪和传光光纤。紫外光纤输出单色光源构成示意图如图 3 所示。

紫外光源采用氙灯, 波长范围为 200 nm~400 nm, 管内充有高纯度的氙气, 外壳是由透紫外率高、光洁度好的气炼石英管制成。氙灯紫外辐射较强, 发射特性稳定, 光源电源采用稳流电源, 具有输出电流漂移小、电流稳定度高等优点, 能够满足紫外像增强器辐射灵敏度参数的测量需求。氙灯光源及其供电电源的主要指标为: 光谱范围 200 nm~400 nm 高强度紫外光谱辐射; 输出功率 30 W; 输出

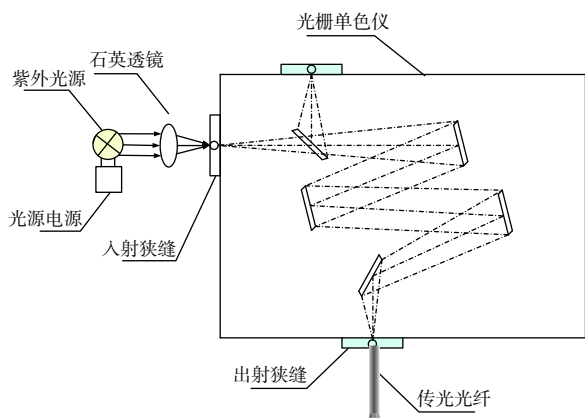


图3 单色紫外光源构成示意图

Fig. 3 Schematic diagram of monochromatic UV source

光强稳定性 $\leq 0.5\%$; 电流稳定度 $\leq 0.5\%/h$ 。

光栅单色仪由2个焦距相同的色散分光结构经特殊调校组合而成,采用色散相减模式,能有效降低单色仪杂散光,进行极微弱信号探测。其技术指标为:焦距150 nm、300 nm、500 nm等多种规格可选;光谱范围180 nm~400 nm、350 nm~1 100 nm、800 nm~2 200 nm,具体根据所选光栅确定,可实现180 nm~2 200 nm全波段光谱输出;分辨率0.1 nm;波长准确度 ± 0.2 nm;狭缝宽度0.01 mm~3 mm,连续可调。

传光光纤用于将单色仪输出的单色紫外光传输至被测紫外像增强器阴极面。采用传光光纤替代传统准直光路,可有效降低单色紫外光在空气传播中所产生的损耗以及杂散光的影响。传光光纤为圆柱型结构,外表为黄铜铠装结构,纤芯为石英传光束。纤芯一端呈长方形,与光栅单色仪出射狭缝相连,可提高单色紫外光源输出单色紫外光利用率;另一端为圆形,使单色紫外光源输出单色紫外光呈圆形光斑入射到被测紫外像增强器阴极面上。

紫外光源发出的复合紫外光呈发散状,利用石英透镜进行汇聚,并通过入射狭缝入射至光栅单色仪。在光栅单色仪内光栅衍射的作用下,复合紫外光被分解为各个波长的单色紫外光。其中指定波长的单色紫外光将通过出射狭缝输出,利用传光光纤将光栅单色仪输出的指定波长的单色紫外光传输至被测紫外像增强器阴极面上,获得指定波长下被测紫外像增强器阴极光电流信号。

2.2 测试暗箱及夹具

测试暗箱为紫外像增强器辐射灵敏度测试提

供了所必须的暗室环境,可降低对测量装置所处实验室环境的照度要求。测试暗箱与三维调节机构协调作用,确保在测量过程中测量装置光轴一致。测试夹具用于固定被测器件,以确保在测量过程中被测器件位置不发生移动,同时具备接电装置,以方便测量过程中器件供电连接及信号输出。

2.3 微电流计

微电流计为紫外像增强阴极和MCP输入端间施加一个正向电场,以收集紫外像增强器阴极因光电效应所产生的光电子,同时需对紫外像增强器因单色紫外光入射所产生的极微弱光电流信号进行检测。紫外像增强器阴极所加电压范围通常为-600 V~-100 V,阴极所产生电流信号可能低至10 A~11 A。

在测量系统中,微电流计的电源输出范围为-1 000 V~0 V,电流检测精度为0.01 nA,电流测试重复性优于3%。微电流计包括放大滤波模块、A/D转换模块、电压输出模块、控制单元模块和显示输出模块五部分,其示意图如图4所示。

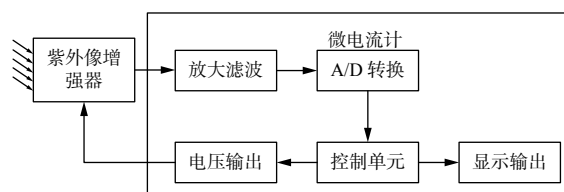


图4 微电流计示意图

Fig. 4 Schematic diagram of micro galvanometer

通过微电流计控制单元控制电压输出模块为被测紫外像增强器提供阴极工作所需电压;在单色紫外光照及正向电场作用下,阴极发射光电子形成微弱电流信号;微弱电流信号经过放大滤波电路放大、滤波后为模拟电压信号;放大后的模拟电压信号经A/D转换模块后产生数字电压信号,并输入控制单元;控制单元计算所探测微弱电流信号值,并通过显示输出模块将其显示在仪器显示屏上,最后输入计算机。

2.4 测量软件

测量软件将实现紫外像增强器阴极输入光功率标定、阴极光电流采集、单色紫外光源输出波长控制、紫外像增强器光谱响应曲线绘制和存储等功能。

利用光谱响应测试模块,可以对紫外像增强器的辐射灵敏度进行测试。通过控制紫外光纤输出单色光源系统的输出波长,检测对应输出波长下

紫外像增强器的光电流数据及输入光功率, 获得紫外像增强器阴极在单一波长下的辐射灵敏度。将所设定波长范围内的辐射灵敏度数据绘制成曲线, 即为被测紫外像增强器的光谱响应曲线。数据库模块用于完成对测试信息的保存和查询, 主要包括指定波长下的辐射灵敏度、量子效率、测试人员、测试时间等相关信息。通过连接 Access 数据库, 可以实现数据的查询、修改、添加和删除等功能。

3 紫外像增强器辐射灵敏度测量结果

3.1 紫外像增强器辐射灵敏度测量结果

在辐射灵敏度的测量过程中, 被测紫外像增强器被放置于测试暗箱内, 由紫外光源经光栅单色仪进行分光; 光栅单色仪在计算机测量软件的控制下, 转动光栅, 利用光栅衍射输出指定波长的紫外单色光; 微电流计对紫外像增强器阴极产生的光电流信号进行检测, 并将光电流数据输入计算机; 计算机利用光电流数据及存储的对应波长下的光功率数据进行计算, 获得被测紫外像增强器的辐射灵敏度。

在光源波长为 260 nm、280 nm 及 320 nm 的情况下, 对编号为 517323220、517333211 和 515503259 的紫外像增强器辐射灵敏度参数进行了测量, 其测量结果如表 1 所示。

表 1 紫外像增强器辐射灵敏度测量结果

Table 1 Measurement results of radiant sensitivity for UV image intensifiers

光源波长 编号	辐射灵敏度/(mA/W)		
	260 nm	280 nm	320 nm
517323220	38.92	20.77	0.09
517333211	36.58	22.05	0.54
515503259	40.21	24.63	1.59

3.2 测量结果不确定度评定

为了保证测量结果的准确性, 根据(1)式, 需将紫外辐射计和微电流计溯源。因此, 紫外像增强器辐射灵敏度测量不确定度的来源主要有: 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1 ; 紫外辐射计引入的标准不确定度分量 u_2 ; 微电流计引入的标准不确定度分量 u_3 。

1) 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1
测量重复性用多次实验结果的标准偏差表示,

用贝塞尔公式进行计算。在校准装置中, 由测量重复性引入的相对标准不确定度为

$$u_1=2.4\%$$

2) 紫外辐射计引入的标准不确定度分量 u_2

紫外辐射计用于测量紫外像增强器光阴极面的辐射功率, 其扩展不确定度由计量部门给出, 其值为 5.0% ($k=1$)。按 B 类标准不确定度评定, 由紫外辐射计引入的相对标准不确定度为

$$u_2=5.0\%$$

3) 微电流计引入的标准不确定度分量 u_3

微电流计用于对紫外像增强器输出的光电流信号进行处理和分析, 由微电流计引入的相对标准不确定度为

$$u_3=0.4\%$$

由于各分量之间独立不相关, 所以相对合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 5.6\%$$

要求置信水平为 95%, 取 $k=2$, 则相对扩展不确定度为

$$U_{rel}=ku_c=12\%。$$

4 结论

介绍了紫外像增强器辐射灵敏度的测量原理和测量方法, 组建了由紫外辐射光源、光栅单色仪系统、测试暗箱、微电流计、计算机及测量软件等组成的测量系统, 并对 3 只紫外像增强器在 260 nm、280 nm 及 320 nm 波长下的辐射灵敏度进行了测量和不确定度分析。本测量系统将辐射灵敏度测量系统的光谱范围拓展至 200 nm~400 nm, 弥补了现有系统的不足, 具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] WILCOX P G, SAFRONOVA A S, KANTSYREV V L, et al. Extreme ultraviolet spectroscopy of low-Z ion plasmas for fusion applications[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 10F543.
- [2] SOUKHANOVSKI V A, STUTMAN D, FINKENTHAL M, et al. Compact collimated vacuum ultraviolet diagnostics for localized impurity measurements in fusion boundary plasmas[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(8): 3270-3276.
- [3] YANG Jie. The application and development of UV detection technology[J]. *Optoelectronic Technology*, 2011,

- 31(4): 274-278.
- 杨杰. 紫外探测技术的应用与进展[J]. *光电子技术*, 2011, 31(4): 274-278.
- [4] TENG Hesong. UV imaging technology and its applications[J]. *Optoelectronic Technology*, 2001, 21(4): 294-297.
- 滕鹤松. 紫外成像技术及其应用[J]. *光电子技术*, 2001, 21(4): 294-297.
- [5] WU Xinglin, QIU Yafeng, QIAN Yunsheng, et al. Relationship between voltage of MCP and signal-to-noise ratio of UV image intensifier[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(3): 494-497.
- 吴星琳, 邱亚峰, 钱芸生, 等. 紫外像增强器信噪比与 MCP 电压的关系[J]. *应用光学*, 2013, 34(3): 494-497.
- [6] SONG Yajun, HAN Fang. Analysis and application of solar blind ultraviolet imaging technology[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2019, 35(1): 53-60.
- 宋亚军, 韩放. “日盲”紫外成像技术分析及应用展望[J]. *航天电子对抗*, 2019, 35(1): 53-60.
- [7] CHENG Hongchang, DUANMU Qingduo, SHI Feng, et al. Characterization of solar blind double micro-channel plate ultraviolet image intensifier[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2013, 33(6): 524-527.
- 程宏昌, 端木庆铎, 石峰, 等. 双微通道板紫外像增强器工作特性研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2013, 33(6): 524-527.
- [8] LI Xiang, WANG Hengmao, CAO Xun, et al. Application of solar blind UV detection technology in space warning[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2014, 35(4): 1-8.
- 李想, 王恒茂, 曹汛, 等. 日盲紫外探测技术在空间预警中的应用[J]. *航天返回与遥感*, 2014, 35(4): 1-8.
- [9] YANG Cheng, ZENG Qinyong, ZHU Dayong, et al. Theoretical and experimental study on detection range model of solar blind ultraviolet detection system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(9): 133-139.
- 杨承, 曾钦勇, 朱大勇, 等. 日盲型紫外探测系统的探测距离模型及实验研究[J]. *光电工程*, 2010, 37(9): 133-139.
- [10] ZHANG Xuanni, WANG Yijun, ZHANG Yuye. New developments of UV-detection technology[J]. *Value Engineering*, 2010, 29(17): 3-5.
- 张宣妮, 王益军, 张玉叶. 紫外探测技术的新发展[J]. *价值工程*, 2010, 29(17): 3-5.
- [11] ZHANG Zhenzhong, LI Qixiang. Development of low light night vision technology and appraisals[J]. *Shanxi Science and Technology*, 2007, 22(3): 110-111.
- 张振中, 李其祥. 微光夜视技术的发展及评价[J]. *山西科技*, 2007, 22(3): 110-111.
- [12] CHEN Xue, LI Zongxuan, YAN Feng, et al. Test system for absolute spectral response of SBUV image intensifier[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(5): 8-14.
- 陈雪, 李宗轩, 闫丰, 等. 日盲紫外像增强器绝对光谱响应测试系统[J]. *光电工程*, 2016, 43(5): 8-14.
- [13] FU Liping, WANG Yongmei, TAO Ye, et al. Spectral response measurement of FUV image intensifier[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(5): 1375-1377.
- 付利平, 王咏梅, 陶冶, 等. 远紫外像增强器光谱响应特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(5): 1375-1377.
- [14] HE Yingping, YIN Lei, BAI Xiaofeng, et al. Testing method of radiation gain about UV image intensifier[J]. *Vacuum Electronics*, 2013, 302(1): 56-58.
- 贺英萍, 尹雷, 拜晓锋, 等. 紫外像增强器辐射增益测试方法研究[J]. *真空电子技术*, 2013, 302(1): 56-58.
- [15] LIU Tao, QIU Yafeng. Testing system of radiation gain in UV image intensifiers[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(5): 723-727.
- 刘涛, 邱亚峰. 紫外像增强器辐射增益测试系统设计[J]. *应用光学*, 2015, 36(5): 723-727.
- [16] CHENG Hongchang, SHENG Liang, SHI Feng, et al. Spectral response measurement of UV image intensifier[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(3): 305-308.
- 程宏昌, 盛亮, 石峰, 等. 紫外像增强器光谱响应特性测量方法研究[J]. *应用光学*, 2007, 28(3): 305-308.