

文章编号 1004-924X(2008)09-1572-05

## 紫外 ICCD 的辐射定标

赵玉环<sup>1,2</sup>, 闫 丰<sup>1</sup>, 周 跃<sup>1,2</sup>, 娄洪伟<sup>1</sup>, 隋永新<sup>1</sup>, 杨怀江<sup>1</sup>, 曹健林<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为保证紫外探测所得数值结果的准确性并为电力电晕探测等应用提供直接的技术支持, 对 UV-ICCD 的辐射定标技术进行了研究, 以建立靶面输入辐照度和探测器数字化输出之间的响应特性关系。推导了辐射定标的原理, 并基于标准氙灯对 UV-ICCD 探测器进行了辐射定标, 其标准光源由美国国家标准和技术研究所(NIST)标定, 不确定度为 5%。在固定积分时间和固定 MCP 增益情况下, 实验标定了 UV-ICCD 探测器的响应以及 UV-ICCD 探测器响应与 MCP 增益之间的关系。初步的定标数据显示, UV-ICCD 探测器的响应是线性的, MCP 增益与输出图像的平均灰度值成正比。最后, 对影响定标结果不确定度的来源进行了分析, 结果表明, 辐射定标的最大不确定度约为 7.94%, 满足 <10% 的定标要求。

**关键词:** 辐射定标; UV-ICCD 探测器; 标准氙灯

**中图分类号:** TN23; TN386.5 **文献标识码:** A

## Radiometric calibration of ultraviolet ICCD detector

ZHAO Yu-huan<sup>1,2</sup>, YAN Feng<sup>1</sup>, ZHOU Yue<sup>1,2</sup>, LOU Hong-wei<sup>1</sup>,  
SUI Yong-xin<sup>1</sup>, YANG Huai-jiang<sup>1</sup>, CAO Jian-lin<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** The radiometric calibration for UV-ICCD was investigated to build the relationship between the input irradiance and the digital output. The theory of radiometric calibration was derived and the radiometric calibration of the UV-ICCD was implemented based on spectral irradiance standard deuterium lamp with uncertainty of 5% calibrated by NIST in a laboratory. Under the conditions of fixed MCP gain and fixed integration time, the response of the UV-ICCD was tested and the relationship of the response and the MCP gain was studied. The preliminary analysis of calibration data shows that the response of UV-ICCD is linear and the MCP gain is directly proportion to the average grey value of image. Finally, the uncertainty influencing the calibration results was analyzed, the analysis shows the maximal uncertainty is 7.94%, which can meet the calibration requirement less than 10%.

**Key words:** radiometric calibration; UV-ICCD detector; standard deuterium lamp

收稿日期: 2007-11-23; 修订日期: 2008-01-15.

基金项目: 中科院长春光学精密机械与物理研究所创新基金资助项目

# 1 引言

随着紫外探测技术的广泛应用,出现了一系列性能优良的紫外探测器,特别是用于微弱紫外光探测的 UV-ICCD 在空间目标的观测、捕获、跟踪<sup>[1]</sup>和高压电线电晕的检测<sup>[2]</sup>以及火灾预警等科研和生产领域发挥了重要作用。但是,由于 UV-ICCD 探测器组件众多及制备工艺复杂等原因,器件的性能参数离散度较大,为保证成像测量数值结果的可靠性和准确性,在 UV-ICCD 探测器使用前十分有必要对其进行辐射定标。研究 UV-ICCD 靶面处输入辐照度和数字化输出信号之间的定量关系,是提高 UV-ICCD 探测系统可靠性的关键技术环节之一。定标的目的是在典型工作条件下建立 UV-ICCD 数字化输出与对应的输入辐射能的相应关系,为 UV-ICCD 采集的数字化信号变换成入射辐射能的分布提供转换基准。

等离子体辐射源和同步辐射源以其本身具有的优点而作为紫外波段的标准辐射源使用,其量值通过氙灯进行传递<sup>[3]</sup>。氙灯作为紫外波段范围的常用次级标准光源则能发出较强的紫外辐射,而且稳定性、复现性好,寿命长、体积小,使用方便。因此,本文基于标准氙灯对 UV-ICCD 辐射定标的实验方法进行了研究。对 UV-ICCD 探测器在不同增益下进行了实验室条件下的辐射定标,并就不确定度来源进行了分析讨论。通过对 UV-ICCD 的辐射定标可为实际应用中如何选择微通道板(MCP)放大器增益提供依据,进而提高探测的可靠性和准确性。

## 2 UV-ICCD 辐射定标原理

### 2.1 UV-ICCD 的工作原理

UV-ICCD 相机主要由光电阴极、MCP 放大器、荧光屏、光纤光锥、可见光 CCD 及其驱动电路组成。成像的基本过程为<sup>[4]</sup>:辐射源所发出的紫外光通过滤光片后照射到对紫外光敏感的光电阴极上进行光电转换,生成的光电子再经由高压电场加速后通过 MCP 进行电子倍增,从而实现

弱目标信号的放大,倍增后的电子轰击荧光屏实现光电子到光子的转换,光子经光纤光锥耦合到可见光 CCD 的光敏面上,最后经驱动电路、读出电路和 A/D 转换输出数字信号。

### 2.2 定标原理

图 1 即为 UV-ICCD 辐射定标的实验原理框图。

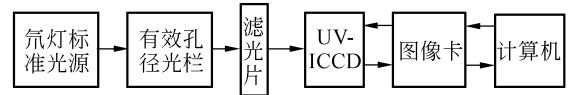


图 1 UV-ICCD 辐射定标原理图

Fig. 1 Block diagram of principle for radiometric calibration of ultraviolet ICCD

标准氙灯的光谱辐亮度  $B(\lambda)$  值由 NIST 标定,不确定度为 5%,则标准光源的光谱辐射强度  $I(\lambda)$  为:

$$I(\lambda) = B(\lambda)S, \quad (1)$$

其中,  $S$  为有效孔径光阑的开口面积。

把 UV-ICCD 探测器共轴置于离标准氙灯有效孔径光阑的  $L$  处,则入射到 UV-ICCD 光电阴极光敏面处的光谱辐照度<sup>[5]</sup>  $E(\lambda)$  为:

$$E(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{L^2} = \frac{B(\lambda)S}{L^2}, \quad (2)$$

依据 UV-ICCD 成像的基本原理,可推出在光谱范围  $\lambda_2 \sim \lambda_1$  内探测器的一个像元产生的电子数,用公式表示为:

$$N_e(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda A_d}{hc} \cdot \eta(\lambda) \cdot \tau \cdot G \cdot t_{int} \cdot E(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

式中,  $N_e(\lambda)$  为探测器一个像元产生的电子数;  $A_d$  为探测器像元面积;  $h = 6.624 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  为普朗克常数;  $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$  为光速;  $\eta(\lambda)$  为 UV-ICCD 探测器的量子效率,包括光电阴极的光电转换效率、荧光屏转换效率和可见光 CCD 的量子效率;  $\tau$  为光纤光锥的透过率;  $t_{int}$  为探测器的积分时间;  $G$  是 MCP 放大器的增益(可调)。

式(3)中除了  $E(\lambda)$ ,  $G$  和  $t_{int}$  外的其它项是与目标无关的量,完全是由 UV-ICCD 探测器的参数决定,可以看作是 UV-ICCD 探测器在波长  $\lambda$  处,窄带  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$  的响应度:

$$R(\lambda) = \frac{\lambda A_d}{hc} \cdot \eta(\lambda) \cdot \tau, \quad (4)$$

而在一定波长范围  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  内,探测器产生的

电子数为在该波段内的积分:

$$N_e(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R \cdot G \cdot t_{\text{int}} \cdot E(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

探测器的像元产生的电子数可由图像的灰度值来代替,因为图像的灰度值也线性地反映了探测器的输出信号。这样就可以在 UV-ICCD 能接受的光谱内(240~280 nm)进行辐照度响应度和响应度线性的定标。

### 2.3 实验方案

基于上述定标原理的分析,本文对 UV-ICCD 探测器的定标方案进行了设计,定标实验设备布置如图 2 所示。

(1)首先把标准氙灯的有效孔径光阑中心和 ICCD 光敏面中心用激光光束调节共轴,其次从精密位移平台上读出氙灯与 ICCD 光敏面的距离  $L$ ,然后将整个装置用屏蔽罩封闭,以避免环境杂散光辐射的影响。

(2)开启氙灯和 UV-ICCD 的工作电源,待设备得到充分预热后(约 30 min),打开氙灯有效光阑前的快门,入射光照到 UV-ICCD 光敏面上,待 UV-ICCD 输出的灰度信号  $N_i(\Delta\lambda)$  稳定后,经由图像采集卡和计算机采集  $N_i(\Delta\lambda)$  值。

(3)关闭光阑前的快门,此时 UV-ICCD 光敏面上无光照射,采集 UV-ICCD 的暗输出灰度信号  $N_{i0}(\Delta\lambda)$ 。可得 UV-ICCD 在标准氙灯辐照时的净输出灰度信号:  $AUT = N_i(\Delta\lambda) - N_{i0}(\Delta\lambda)$ 。

(4)调节有效光阑孔径大小及光源与 UV-ICCD 光敏面的距离进而改变 UV-ICCD 接收到的辐照度。然后重复操作步骤(2)和(3),得到 11 组辐照度值  $E_i(\Delta\lambda)$  及相应的 UV-ICCD 净输出灰度信号,从而完成 UV-ICCD 的辐射定标。

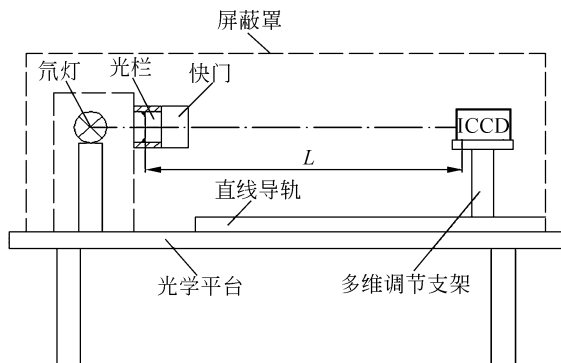


图 2 UV-ICCD 定标的实验装置图

Fig. 2 Experiment equipment for radiometric calibration of ultraviolet ICCD

## 3 实验内容

### 3.1 在固定增益和固定积分时间下 UV-ICCD 探测器的响应

设置固定增益为 MCP 满增益( $10^6$ )的 10%,积分时间固定为 960 ms。在辐照度不同的情况下连续采样 100 次,记录辐照度和相应图像灰度值,采集和处理的数据如表 1 所示。

表 1 应用标准氙灯获得的 UV-ICCD 积分辐照度响应数据  
Tab.1 Integration irradiance responsivity of UV-ICCD by standard deuterium lamp

积分辐照度 ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )	图像灰度 净输出值 AUT	UV-ICCD 的辐照度响应度 AUT/ ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )
$5.16 \times 10^{-3}$	7	1 356.58
$2.06 \times 10^{-2}$	28	1 359.22
$3.49 \times 10^{-2}$	48	1 375.36
$4.669 \times 10^{-2}$	62	1 327.62
$6.099 \times 10^{-2}$	82	1 344.28
$7.49 \times 10^{-2}$	102	1 361.82
$1.04 \times 10^{-1}$	142	1 365.38
$1.23 \times 10^{-1}$	167	1 357.72
$1.35 \times 10^{-1}$	182	1 348.15
$1.59 \times 10^{-1}$	216	1 358.49
$1.85 \times 10^{-1}$	252	1 362.16

从表 1 中可以看出,不同积分辐照度情况下 UV-ICCD 的响应度变化不大。数据经最小二乘法曲线拟合后,得到 UV-ICCD 靶面辐照度变化与图像灰度平均值之间的关系曲线,见图 3。其中:横坐标  $X$  为入射到 UV-ICCD 光敏面的辐照度( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ),纵坐标  $Y$  为探测器输出灰度值 (ADU)。即  $256(H) \times 256(L) \times 100(F)$  的总平均

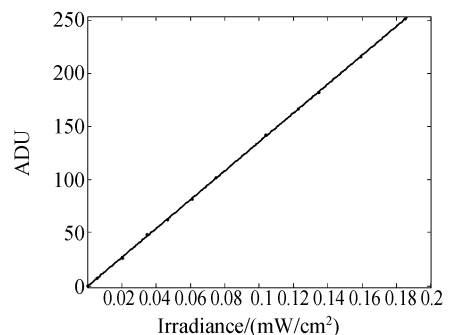


图 3 辐照度与图像输出灰度的线性变化曲线

Fig. 3 Relationship between irradiance and ADU

值。从拟合曲线中可以看出 UV-ICCD 光敏面接收的辐照度与图像灰度值成正比。

### 3.2 UV-ICCD 的响应与 MCP 增益的关系

设置固定积分时间为 960 ms、积分辐照度为  $7.49 \times 10^{-2} \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时,改变 UV-ICCD 的 MCP 增益值,记录图像数据。绘出增益变化与图像灰度平均值之间的变化曲线,如图 4 所示。经曲线拟合后得到不同增益与输出灰度值的关系式为:  $Y=1.15 \times 10^{-3} X - 1.059$ ,其中  $X$  为 MCP 增益值, $Y$  为输出图像的平均灰度值。从拟合方程和图示曲线中都可以看出在固定积分时间和积分辐照度下,图像平均灰度值与 MCP 增益成正比。在线性范围内,增益越大,图像的平均灰度值也越大。

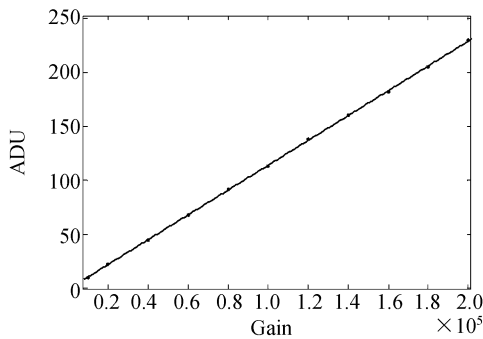


图 4 灰度值随增益的线性变化曲线

Fig. 4 Relationship between gain and ADU of UV-ICCD

## 4 误差分析

在辐射定标系统中,其准确性是至关重要的。而在实验过程中,不可避免地要带来误差。为了提高并能准确估算出辐射定标精度,需要考虑多方面的因素。对于 UV-ICCD 辐射定标实验,可从以下几个方面对误差加以分析:

(1)与定标源包括标准光源氙灯、有效孔径光阑和精密位移平台等辐射定标装置本身所提供的精度有关。标准光源采用 NIST 标定的氙灯,不确定度为 5%。有效孔径光阑由国家计量部门标定,可调范围为 0~3 mm,绝对不确定度为 3  $\mu\text{m}$ ,所以测量过程中因调节孔径大小引起的不确定度可予忽略。精密位移平台的移动范围为 0~250 mm,定位精度为  $\pm 0.1$  mm,此项的不确定度约为

0.08%。实验测量过程中套上屏蔽罩,杂散光的影响可以忽略。氙灯到 UV-ICCD 阴极光敏面的距离最远为 250 mm,并且该传输过程中介质吸收、散射等的影响又很小,因此也可把介质吸收的影响忽略不计。综合考虑与定标源相关的各项所引起的总不确定度约为 6%。

(2)探测器的数字化输出信号不确定度大小约为 1%。

(3)探测器面响应非均匀性引起的不确定度约为 5%。

(4)探测器暗电流噪声。实验中每次测量都专门记录了暗电流噪声图像数据,在最后处理过程中已经被扣除,因此这一因素的影响可以忽略不计。

(5)所用算法对定标数据的处理也会产生一定的不确定度,约为 1%。

由上述因素所决定的 UV-ICCD 探测器辐射定标的最大不确定度为:

$$\sqrt{0.06^2 + 0.01^2 + 0.05^2 + 0.01^2} \approx 7.94\%$$

从不确定度来源分析结果可知,这种 UV-ICCD 辐射定标方法比较可靠,满足辐射定标  $\leq 10\%$  的基本要求。

另外,国外有关 UV-ICCD 在紫外目标探测和跟踪方面的报道<sup>[7-8]</sup>及真空紫外辐射定标的文献<sup>[9-10]</sup>比较多,但 UV-ICCD 定标技术方面的文献却极少看到,故本文没有与国际上的定标不确定度进行对比。

## 5 结论

为了提高 UV-ICCD 在紫外目标检测及跟踪中的准确性,本文研究了基于 NIST 标准氙灯的 UV-ICCD 的辐射定标方法,并应用该方法标定了 UV-ICCD 靶面处辐照度值与灰度输出值之间的线性关系,及辐照度值固定时 MCP 增益与 UV-ICCD 响应的定量关系。最后,分析了影响 UV-ICCD 辐射定标的各种不确定度来源,结果显示 UV-ICCD 辐射定标的最大不确定度为 7.94%,基本满足了紫外探测器件定标的需求。同时,为紫外探测中如何设置 MCP 增益等参数提供了依据,并奠定了对测量结果进行必要数值校正的基础。

## 参考文献:

- [1] 姜颖,白廷柱,高雅允,等. 紫外告警系统探测距离的估算[J]. 光学技术,2005,31(3): 473-475.  
LOU Y, BAI T ZH, GAO ZH Y, *et al.*. Estimation of detectable distance for ultraviolet warning system [J]. *Optical Technique*, 2005,31(3): 473-475. (in Chinese)
- [2] 闫丰,于子江,于晓,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学 精密工程,2006,14(4): 709-713.  
YAN F, YU Z J, YU X, *et al.*. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4): 709-713. (in Chinese)
- [3] 刘金元,薛凤仪. 紫外和真空紫外光谱辐射标准灯[J]. 计量技术,2002(3):19-21.  
LIU J Y, XUE F Y. Ultraviolet and vacuum ultraviolet spectral irradiance standard lamp - deuterium lamp[J]. *Metrological Technique*, 2002(3):19-21. (in Chinese)
- [4] PROXITRONIC Company. Introduction to Image Intensifier Tubes[S]. ROXITRONIC. Bensheim, Germany, 7th, Feb. , 2000.
- [5] 车念曾,闫达远. 辐射度学和光度学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1990.  
CHE N C, YAN D Y. *Radiometry and Photometry* [M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 1990. (in Chinese)
- [6] PROXITRONIC Company. High Performance Image Intensifiers[S]. ROXITRONIC. Bensheim, Germany, 05, 06, 2001.
- [7] MALKAL, SHIMON E, PINHAS L. Solar blind and bispectral imaging with ICCD, BCCD and EBCCD cameras [J]. *SPIE*, 1998, 3434: 22-31.
- [8] FILIP N, RIC S. Electro-optical missile plume detection[J]. *SPIE*, 2003, 5075: 270-280.
- [9] HEATH D F. Large aperture spectral radiance calibration source for ultraviolet remote sensing instruments[J]. *SPIE*, 2003, 4891: 335-342.
- [10] 熊利民,刘金元,李平,等. 用同步辐射源建立紫外及真空紫外光谱区光谱辐射度基准的研究[J]. 光学学报,2006, 26(4): 547-550.  
XIONG L M, LIU J Y, LI P, *et al.*. Ultraviolet and vacuum ultraviolet spectral radiance standard with synchrotron radiation source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006,26(4): 547-550. (in Chinese)

作者简介:赵玉环(1980—),女,山东菏泽人,博士,主要从事 ICCD 定标技术及信息处理等方面的研究。E-mail: yhzh0505@163.com

杨怀江(1966—),男,辽宁丹东人,研究员,主要从事多光谱信息融合和信息安全方面的研究。E-mail: yanghj@sklao.ac.cn