

文章编号: 1003-501X(2008)08-0088-04

## 紫外 ICCD 的线性测量

赵玉环<sup>1,2</sup>, 闫 丰<sup>1</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, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 以辐射度学为理论基础, 研究了紫外 ICCD(UV-ICCD)的线性测量技术, 提出了比较测量方法。参考探测器的光纤端面 and UV-ICCD 的光敏面置于同一截面内, 首先使用线性参考探测器测量辐照度的衰减变化, 然后将被测 UV-ICCD 置于辐照度场中心, 记录不同辐照度下 UV-ICCD 的输出。最后, 直线拟合给出 UV-ICCD 的灰度输出与输入辐照度关系曲线。参考探测器线性度的好坏直接决定线性测量的精度。为此, 采用了非线性度不高于 0.2% 的科研级光谱仪。测量装置主要由标准氙灯、光学衰减器、积分球、参考探测器、电移台和计算机等组成, 测量过程由计算机配套专用软件进行自动控制。实验结果表明, 所测 UV-ICCD 的非线性度不高于 3%, 比较法测量的不确定度小于 5%。

**关键词:** 紫外 ICCD; 线性; 比较测量; 参考探测器; 不确定度

**中图分类号:** TN23, O434.12

**文献标志码:** A

## Linearity Measurement for Ultraviolet ICCD Detector

ZHAO Yu-huan<sup>1,2</sup>, YAN Feng<sup>1</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 School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China )

**Abstract:** Based on the theory of radiometry, the measurement technique for linear response of ultraviolet ICCD (UV-ICCD) detector was studied and a comparative measurement method was presented. The surface of photocathode in the UV-ICCD was set in the same section with the end of fiber belonging to the reference detector. Firstly, the attenuation of irradiance was measured via reference detector. Then, UV-ICCD was set in center of the irradiance field. The outputs of UV-ICCD were recorded according to the corresponding irradiance at that time. At last, relationship curve between output gray value of UV-ICCD and input irradiance was given. Scientific-grade spectrometer with low non-linearity, which was less than 0.2%, was adopted in this project because the accuracy of the measure results depends on the accuracy of the spectrometer. Measurement instrument consists of standard deuterium lamp with high stabilization, optics-attenuator, integrating sphere, reference detector and computer. Auto control is realized via special software during the test. Experimental results show that non-linearity of UV-ICCD is less than 3%, and the uncertainty of comparison measurement method is less than 5%.

**Key words:** UV-ICCD; linearity; comparative measurement; reference detector; uncertainty

收稿日期: 2007-12-29; 收到修改稿日期: 2008-03-15

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新基金资助项目

作者简介: 赵玉环(1980-), 女(汉族), 山东菏泽人, 博士研究生, 主要研究工作是 ICCD 参量的测量及信息处理。

通信作者: 闫丰(1975-), 男(汉族), 吉林长春人, 博士后, 主要从事紫外辐射定标及信息融合技术研究。E-mail: yan.feng@126.com

## 1 引言

目前, UV-ICCD 应用技术在空间目标的检测、捕获、跟踪<sup>[1-2]</sup>和高压电线电晕的检测<sup>[3-4]</sup>以及火灾预警等科研生产和领域发挥了重要作用。当 UV-ICCD 用于探测目标的辐射特性等定量分析时, 其线性度就显得特别重要。只有知道探测器在工作范围内的线性情况, 才能准确给出被测目标的辐射特性, 因此线性是评价 UV-ICCD 性能的关键技术指标之一, 精确确定其线性度是十分重要的。

## 2 测量方法

### 2.1 设计思想

测量光电探测器线性度最为常见的方法是基于平方反比定律<sup>[5]</sup>, 在光度导轨上通过改变光源与探测器光敏面之间的距离, 实现不同辐射能量照射来测量探测器的线性度。这种测量方法的前提是测试的距离必须足够长或光源线度足够小, 使测量光源可以看成是点光源; 必须进行距离测量, 且有足够的准确度; 而且, 在任意测试点上, 探测器表面上接收到的光辐射必须均匀。实际测量中, 因为测试距离不可能太长, 所以探测器的线性测试范围不会太大, 因而使此方法受到一定的限制。基于对距离平方反比方法的改进, 我们提出了比较测量法对面阵 UV-ICCD 的线性进行了测量。该方法的具体设计思想如下:

首先, 考虑到即使一个 5 m 光度导轨上实现的辐照度变化也只有几十倍, 再加上光源与探测器间距很大时, 杂散光的影响也将十分明显。仅依靠光度导轨实现大范围的线性测量比较困难, 而且精度难以保证。因此, 我们在光源前面加设了一个 FVA 光学衰减器, 其内部光片可在 0 ~ 100% 改变衰减率, 这样就增大了接收面上辐照度的变化范围。

其次, 为保证任意测试点上, UV-ICCD 光敏面上接收到的辐射均匀, 在光学衰减器之后我们放置了一个积分球, 用于匀光。

由于光源和探测器之间增设了光学衰减器和积分球, 所以受光面辐照度的变化不仅和光源与探测器间的距离有关, 也和光学衰减器的衰减比例以及积分球的透射比有关。这时, 仅依据距离平方反比定律不能准确推算出入射到探测器光敏面上辐照度的变化。为此, 我们使用标准氙灯, 先定标紫外响应能力较强和线性度大于 99.8% 的科研级光谱仪, 以定标后的科研级光谱仪作参考探测器来测量接收面处的辐照度变化。

参考探测器和 UV-ICCD 安装在电移平台上, 使参考探测器的光纤端面 and UV-ICCD 光敏面位于同一截面内。通过计算机软件精确控制电移台, 交替地将光纤端面和 UV-ICCD 光敏面准确地调节到辐照度场中心。逐渐调节光学衰减器的衰减率及探测器与光源的距离, 改变 UV-ICCD 光敏面上接收的辐照度值。最后, 基于最小二乘法原理给出 UV-ICCD 的实测灰度值与输入辐照度值的拟合直线, 并依据式(1)计算出关系曲线偏离拟合直线的程度<sup>[6]</sup>, 即非线性度  $D_{nl}$ :

$$D_{nl} = \frac{|A_{ICCD} - A|}{A} \times 100\% \quad (1)$$

其中:  $A_{ICCD}$  表示 UV-ICCD 的实测灰度值,  $A$  表示线性回归后的灰度值。其非线性误差为

$$\Delta A_{ICCD} = A_{ICCD} - A \quad (2)$$

### 2.2 实验装置

线性测量的装置如图 1 所示。光源为在 200 ~ 400 nm 紫外区域常用的次级标准光源氙灯, 它结构简单, 使用方便, 其光谱辐照度已经过美国国家标准和技术研究院(NIST)标定。光源发出的光经过光学衰减器和积分球后, 均匀入射到参考探测器光纤端面和 UV-ICCD 光敏面上, 从 UV-ICCD 输出的信号通过图像采集卡输入到计算机, 由计算机采集与处理, 参考探测器的输出信号则直接通过 USB 接口输入到计算机进行处理。电动位移台用于交替地使参考探测器和 UV-ICCD 光敏面位于辐照度场中心, 它由计算机通过运动控制器控制。实验装置套有屏蔽罩, 用来减少杂散光的影响。

参考探测器结合了探测器、光学工作台和电子器件的功能, 提供了较高的系统灵敏度和线性度。图 2 为参考探测器线性标定的结果<sup>[7]</sup>, 其线性度可到 99.87%, 从图中也可直接看出其良好的线性度。另外, 薄

型背照式的二维检测器不仅使参考探测器具有优异的紫外光响应能力,而且使其灵敏度得到了提高。而低噪声检测器与 16 位的 A/D 转换器则使得参考探测器的动态范围达到 25 000:1,信噪比大于 1 000:1,从而扩大了测量的动态范围,提高了线性测量的精度。

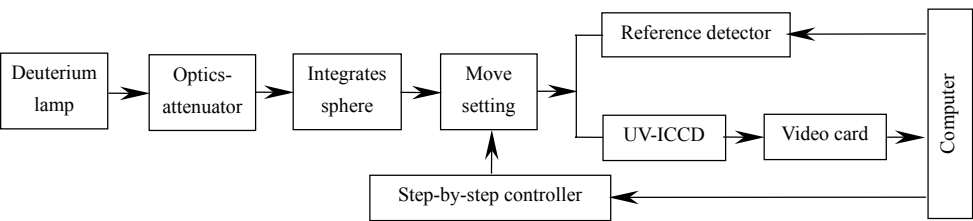


图 1 线性测量装置结构示意图

Fig.1 Scheme diagram of linearity measurement instrument

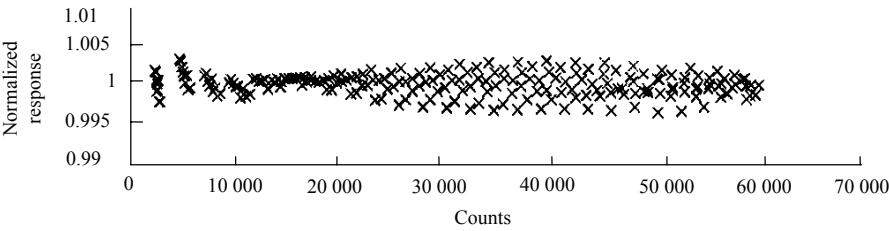


图 2 参考探测器的线性

Fig.2 Linear response from the reference detector

3 实 验

利用此装置对 UV-ICCD 紫外探测器进行了线性测量,UV-ICCD 为碲化铯光阴极,光阴极直径为 25 mm,具有对可见光不灵敏、暗电流小的特点,窗口材料为石英玻璃。测量条件为:环境温度  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;积分时间为  $t=960\text{ ms}$ ;MCP 增益为  $10^4$ 。在不同辐照度  $E$  下测得的 UV-ICCD 的输出灰度值  $A_{\text{ICCD}}$  数据如表 1 所示,并对数据点进行直线拟合,得直线方程  $Y=1\,363X-0.591\,9$ 。其中,  $X$  为辐照度值,  $Y$  为图像的灰度平均值。其线性度拟合曲线如图 3 所示。

实验结果表明,所测 UV-ICCD 的线性度比较好,可达 97% 左右,保证了 UV-ICCD 在目标辐射特性测量等定量分析应用中采集数据的可靠性。

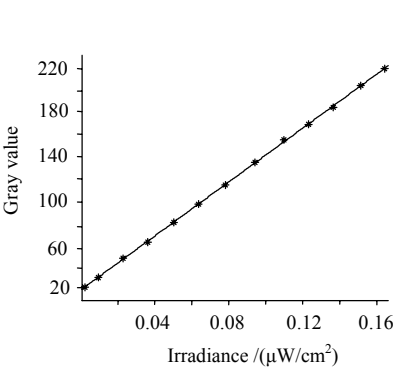


图 3 UV-ICCD 的线性特性

Fig.3 Linear response characteristic of the UV-ICCD detector

表 1 UV-ICCD 线性测量数据

Table 1 Data of measuring for linear response from the UV-ICCD

$E/(\mu\text{W}/\text{cm}^2)$	$A_{\text{ICCD}}$	$\Delta A_{\text{ICCD}}$	$D_{\text{in}}$
1.684 0E-02	22	-0.361 02	0.016
2.340 3E-02	31	-0.306 39	0.010
3.488 4E-02	48	1.045	0.022
4.660 4E-02	62	-0.929 35	0.015
5.920 3E-03	80	-0.101 79	0.002
7.100 8E-02	96	-0.192	0.002
8.350 7E-02	113	-0.228 14	0.003
9.771 4E-02	133	0.407 72	0.012
1.113 2E-01	153	1.862 7	0.000 3
1.230 0E-01	167	-0.057 1	0.006
1.348 0E-01	182	-1.140 5	0.006
1.478 0E-01	201	0.140 5	0.001
1.594 0E-01	216	-0.670 3	0.003

4 不确定度分析

UV-ICCD 线性测量可能的不确定度来源有以下几个方面:

1) 参考探测器的线性度。在实验中参考探测器的非线性带来的误差为 0.13%。

2) 光源的稳定性。氙灯的峰-峰稳定性小于 0.005%/250 nm, 漂移仅为 $\pm 0.5$  hour, 所以由于光源稳定性所带来的测量误差可予忽略。

3) 杂散光影响。对于杂散光, 因为整个测量装置套有屏蔽罩, 杂散光干扰的影响已被抑制到可以忽略的程度。

4) 辐照度的测量误差。接收面处辐照度的测量及处理误差大小约为 1%。

5) UV-ICCD 带来的误差。因所测为面阵 ICCD 的线性, 来自探测器的误差来源主要有像元面阵响应不均匀和噪声的影响, 其不确定度大小为 4% 左右。

6) UV-ICCD 的输出信号误差约 1% 以及对线性测量数据的处理也会产生一定的误差 1%。

综上因素, 线性测量的最大不确定度为

$$\sqrt{0.0013^2 + 0.04^2 + 0.01^2 + 0.01^2 + 0.01^2} \approx 4.36\%$$

由此可知, 比较法进行线性测量是可以保证较高测量精度的。

## 5 结 论

比较测量法是对线性测量的传统平方反比法的改进, 光路中增设了光学衰减器和积分球, 扩大了线性测量的动态范围, 提高了接收面处辐照度的均匀性。参考探测器优异的紫外响应能力、较好的线性度和高信噪比的特点, 保证了 UV-ICCD 线性测量的精度。实验结果表明, 比较法线性测量的不确定度小于 5%, 可用于面阵紫外探测器的线性测量。

### 参考文献:

- [1] Malka Lindner, Shimon Elstein, Pinhas Lindner. Solar Blind and Bispectral Imaging with ICCD, BCCD and EBCCD Cameras [J]. *SPIE*, 1998, **3434**: 22-31.
- [2] 王加朋, 王淑荣, 李福田, 等. 空基紫外成像仪关键器件 ICCD 非均匀性校正技术[J]. *光学 精密工程*, 2007, **15**(9): 1353-1360.  
WANG Jia-peng, WANG Shu-rong, LI Fu-tian, *et al.* Non-uniformity correction of key device ICCD in ultraviolet imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(9): 1353-1360.
- [3] 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 Feng, YU Zhi-jiang, YU Xiao, *et al.* Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 709-713.
- [4] 赵玉环, 闫丰, 隋永新, 等. 紫外序列图像中目标的提取[J]. *光电工程*, 2007, **34**(11): 10-13.  
ZHAO Yu-huan, YAN Feng, SUI Yong-xin, *et al.* Target extraction from the ultraviolet image sequences [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(11): 10-13.
- [5] SWYT D A, LAROCK J G. Inverse-fourth apparatus for photometric calibrations [J]. *Rev. Sci. Instrum*, 1978, **49**(8): 1083-1089.
- [6] 陈家凤, 陈海清, 陈卓. 面阵 CCD 各像元光电变换非线性度探讨[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2002, **30**(10): 99-111.  
CHEN Jia-feng, CHEN Hai-qing, CHEN Zhuo. Discussing on non-linearity of optoelectric conversion in area CCD camera [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech: Nature Science Edition*, 2002, **30**(10): 99-111.
- [7] Ocean Optics, Inc. OOI Spectrometer Linearity Report [R]. 2007.