

日盲紫外像增强型 CCD 疲劳特性测试

孔繁林^{1,2} 周跃¹ 陈雪¹ 隋永新¹ 杨怀江¹ 文刚^{1,2}

(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 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为评估日盲紫外(SBUV)像增强型 CCD(ICCD)响应度随工作时间的变化规律,针对器件的两种典型工作模式设计了 SBUV-ICCD 疲劳特性测试方案,并构建装置对其进行了实验测量。首先结合 SBUV-ICCD 的基本结构和工作原理介绍了器件的两种工作模式;其次,定义了器件疲劳特性,提出了 SBUV-ICCD 疲劳性测试方案;最后,对两只 SBUV-ICCD 进行了疲劳特性测试,并分析了该测试方案的不确定度。实验结果表明:在光电模拟模式和光子计数模式下国内某型号 SBUV-ICCD 的疲劳特性分别为 13% 和 3%,国外某型号 SBUV-ICCD 疲劳特性优于 1%,本测试方案的不确定度为 1%。

关键词 探测器;疲劳特性;日盲紫外像增强型 CCD;光电模拟模式;光子计数模式

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.110401

Measurement of Fatigue Properties of Solar-Blind Ultraviolet Intensified CCD

Kong Fanlin^{1,2} Zhou Yue¹ Chen Xue¹ Sui Yongxin¹ Yang Huaijiang¹ Wen Gang^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To evaluate the evolution of response of solar blind ultraviolet (SBUV) intensified CCD (ICCD) versus working time, a novel fatigue property testing scheme is proposed and actual experiments are carried out for two typical work patterns. At first, two typical working modes for SBUV-ICCD are introduced based on the fundamental construction and principle. Secondly, the device fatigue property is defined and a novel fatigue testing scheme is designed. Finally, fatigue testing for two SBUV-ICCDs is done and their uncertainties are analyzed. The testing results show that the fatigue properties of a homemade SBUV-ICCD in photoelectric simulation mode and photo counting mode are 13% and 3%, respectively, while the corresponding parameters of an abroad SBUV-ICCD are better than 1%, and the scheme's uncertainty is 1%.

Key words detectors; fatigue property; solar-blind ultraviolet intensified CCD; photoelectric simulation model; photon counting model

OCIS codes 040.1520; 040.1880; 040.3780; 040.5160; 040.7190

1 引言

建立在近地大气中“日盲区”及“紫外窗口”基础上的紫外成像探测技术是近年来欧美国家为军事目的发展起来的新型成像探测技术^[1-2]。其中基于日盲紫外(SBUV)波段(200~300 nm)的成像探测技术,具有不受日光干扰、图像清晰、性能稳定、使用方便等优点,在高压电力设备电晕探测、紫外导弹逼近告警、紫外保密通信以及紫外成像辅助导航等领域拥有广阔的应用前景^[3-6]。日盲紫外成像探测的核心技术之一是成像探

收稿日期: 2013-07-18; 收到修改稿日期: 2013-07-20; 网络出版日期: 2013-10-15

基金项目: 国家 863 计划(2012AA03A707)、应用光学国家重点实验室开放基金(Y2Q03FQK01)

作者简介: 孔繁林(1987—),男,硕士研究生,主要从事紫外辐射定标方面的研究。E-mail: kongfanlin2008@126.com

导师简介: 杨怀江(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事高精度光学加工、检测技术、信息融合、紫外探测等方面的研究。E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

测器件的研制。目前,该谱段内已实用化的成像探测器件为日盲紫外像增强型 CCD(SBUV-ICCD)^[7]。欧美发达国家掌握了该器件研制的核心工艺技术,并对我国严格保密;而国内科研院所对该领域的研究工作起步较晚,所研制 SBUV-ICCD 器件的性能距离实际应用需求差距较大,亟需进行关键技术攻关。全面测试器件的性能量化指标有利于准确评价器件性能,对器件制造工艺的改进和性能的提高有指导作用^[8]。

SBUV-ICCD 响应度随时间变化的程度是衡量器件稳定性和探测精度的一个重要指标。当持续长时间工作时,由于受到其内部光电阴极量子效应、导电膜热稳定性等各种因素的影响,响应度会有所下降,进而造成输出信号出现偏差,影响对探测目标辐射特性的准确判断。对于 SBUV-ICCD 性能的研究,国内外相关小组主要集中在光谱响应特性、面响应均匀性、线性、噪声等方面,对 SBUV-ICCD 响应度随时间变化的研究尚未有文献报道。目前,对 SBUV-ICCD 响应度随时间变化的描述,国内外均没有相关的定义和标准。为了便于描述,我们将 SBUV-ICCD 响应度随时间的变化定义为疲劳特性。

本文基于 SBUV-ICCD 的基本结构和工作原理,提出了一套疲劳特性测试方案,根据该方案构建装置对两只 SBUV-ICCD 进行了测试,取得了较高的测试精度,为 SBUV-ICCD 器件性能优化及评估提供参考依据。

2 测试装置及原理

2.1 SBUV-ICCD 结构及工作原理

日盲紫外 ICCD 的典型结构如图 1 所示,主要由入射窗、光电阴极、微通道板(MCP)、荧光屏、耦合光锥、可见光 CCD 六个部分组成。其基本工作原理为:从入射窗入射的光子照射到光电阴极上时,按一定的量子转换效率转化为光电子,在加速电场的作用下光电子进入 MCP 进行倍增,然后聚焦到荧光屏激发出可见光,通过光纤光锥将图像耦合到可见光 CCD 上,最后由电子线路读出,完成从入射光到电子图像的转换。

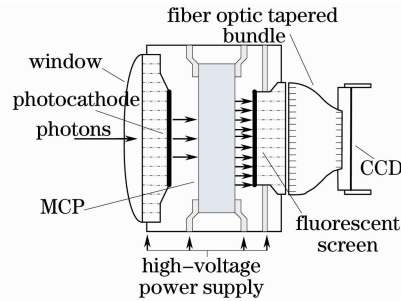


图 1 SBUV-ICCD 结构原理图

Fig. 1 SBUV-ICCD structure diagram

大气对日盲区辐射的吸收和散射作用较为强烈,一般情况下 SBUV-ICCD 接收到的信号极为微弱。目前,常见的 SBUV-ICCD 采用二级 V 型或三级 Z 型级联 MCP 进行电子倍增,其增益可高达 10^6 ,动态范围达 120 dB^[9]。入射到探测器的辐射有两种方式:大量光子叠加到一起形成高功率辐射的模拟入射方式和少量光子形成低功率辐射的离散入射方式。因此,SBUV-ICCD 的工作模式涵盖了光电模拟模式和微弱信号探测的光子计数模式^[10]。

图 2(a)所示为 SBUV-ICCD 在强辐照度条件下工作在光电模拟模式的输出图像,此模式下通常以帧平

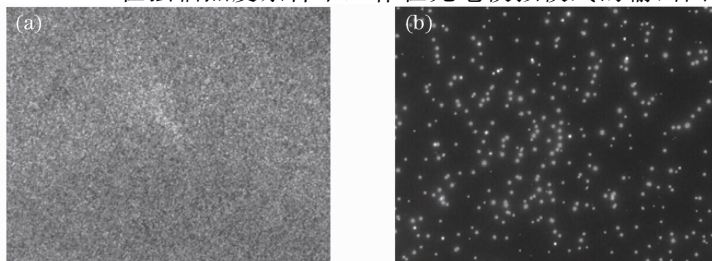


图 2 SBUV-ICCD 输出图像。(a) 光电模拟模式下输出图像;(b) 光子计数模式下输出图像

Fig. 2 Output images of SBUV-ICCD. (a) Photoelectrical simulation mode; (b) photon counting mode

均灰度值来衡量入射 ICCD 光功率的大小;图 2(b)为 SBUV-ICCD 在较弱辐照度条件下工作在光子计数模式的输出图像,此模式下以帧光子计数值来衡量入射 ICCD 光功率的大小。为更准确地评估 SBUV-ICCD 疲劳特性,本文在这两种工作模式下分别进行了测试。

2.2 疲劳特性测试方案

根据本文对 SBUV-ICCD 疲劳特性的定义,可用如下公式对其进行描述:

$$\delta = \frac{R_0 - R_t}{R_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中 R_0 为 SBUV-ICCD 在其持续工作时间段内的初始响应度, R_t 为持续工作到 t 时刻时的响应度。探测器响应度通常可表示为

$$R = \frac{S}{E}, \quad (2)$$

式中 S 为探测器输出信号, E 为探测器所接收到的光辐射。疲劳特性测试过程中采用高稳定性光源,可将 E 视为恒定值,则(1)式可变换为

$$\delta = \frac{S_0 - S_t}{S_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中 S_0 为 SBUV-ICCD 在其持续工作时间段内的初始输出信号, S_t 为持续工作到 t 时刻时的输出信号。因此,只需测量 SBUV-ICCD 随时间变化的输出信号,即可根据(3)式计算得到其疲劳特性。

搭建的疲劳特性测试装置如图 3 所示。SBUV-ICCD 在两种不同工作模式下接收到的光源辐照度差异较大,需采用能够在极大动态范围内保持高稳定性的辐照度光源。本实验采用美国海洋公司生产的氙灯 D2000 作为光源,该光源在 215~400 nm 波段范围内产生强大稳定的输出光谱,其峰-峰不稳定性小于 0.005%(250 nm 处)。为保证 SBUV-ICCD 光敏面上接收到的辐射均匀,在光源之后放置一个积分球,用于匀光。利用平行光轨调节光源与 SBUV-ICCD 光敏面之间的距离,在积分球两端口处加精密光阑实现光源大动态范围的调节。为定量分析光源稳定性及被测 SBUV-ICCD 增益电压稳定性对测量不确定度的影响,在积分球上设置光电二极管监测光源稳定性,并在 ICCD 上外接稳压源监测其增益电压稳定性。为了确保 SBUV-ICCD 工作在日盲紫外谱段,在其前端设置一块日盲紫外滤光片。由氙灯发出的光经过精密光阑和积分球后,再经过日盲紫外滤光片滤波均匀入射到 SBUV-ICCD 光敏面上,并利用 NI 公司生产的型号为 PCI1410 的图像采集卡和 Labview2012 对其输出的视频信号进行实时处理和分析。为了减少杂散光对测试结果的影响,实验全程在暗室内进行,所有实验装置套有屏蔽罩。

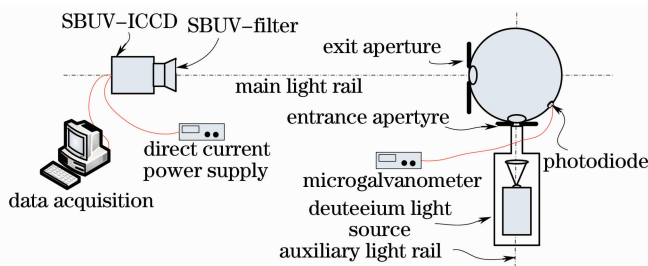


图 3 疲劳特性测试装置
Fig. 3 Fatigue properties testing device

3 测试实验

3.1 光子计数模式下测试

由于随机噪声对 SBUV-ICCD 输出信号的影响,相邻两帧之间的信号值存在较大起伏,采用多帧平均的方法对输出信号进行处理以减小随机噪声的影响。当处于光子计数模式时,需要选择合适的阈值对每帧图像进行二值化处理,之后再行形态学处理,从而计算出每帧图像中的光子数,最后对多帧图像计算结果取平均得到所需的光子计数值。光子计数模式下 SBUV-ICCD 输出图像处理结果比较如图 4 所示,可以看出:通过上述处理,输出图像的对比度更高,更易于精确地统计出光子数。

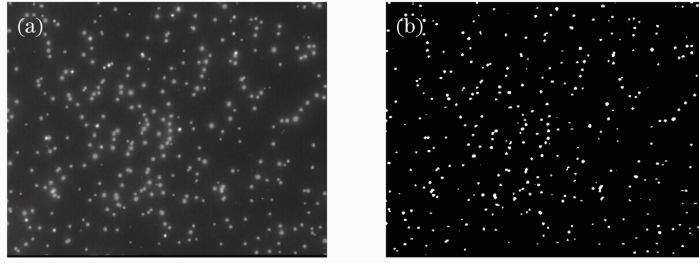


图4 光子计数模式下 SBUV-ICCD 输出图像处理前后对比。(a) 图像处理前;(b) 图像处理后

Fig. 4 Comparison between output images before and after image processing in photon counting mode.

(a) Before processing; (b) after processing

弱辐照度下,ICCD 的工作模式为光子计数模式,对采集到的 ICCD 输出视频信号进行计数处理。数据处理采用多帧图像取平均值的方式,同时减去无光照时 ICCD 的暗计数 n_b 。采集弱光照条件下成像区域的 N 帧图像光子计数值 n_s ,系统净输出光子计数值 n 的计算公式为:

$$n = \frac{\sum n_s}{N} - n_b. \quad (4)$$

在光子计数模式下对国内某型号 SBUV-ICCD(编号为 ICCD-A)和国外某型号 SBUV-ICCD(编号为 ICCD-B)的疲劳特性进行了测试。测试中每 10 s 取其内所有帧有效区域的光子计数值记录一次,共记录 5 h;每隔 1 h 记录增益电压以及光电二极管输出电流的变化情况以分析测量不确定度;测量过程中环境温度保持 $T=23\text{ }^\circ\text{C}$ 。测得的 ICCD 净输出光子计数值与时间的关系曲线如图 5 所示。从图中可以看出:随着测试时间的增加,ICCD-A 的净光子数下降幅度较大,ICCD-B 的净光子数下降较为平缓。测试过程中监测到光源的不稳定度低于 0.1%,增益电压的不稳定度低于 0.2%。由(3)式求得 ICCD 每小时的疲劳特性结果如表 1 所示。可以看出:持续工作 5 h 后,ICCD-A 的疲劳特性为 3%,ICCD-B 的疲劳特性优于 1%。

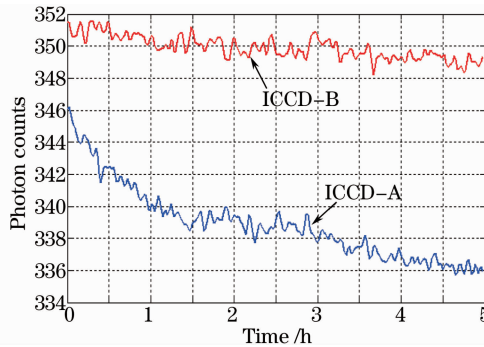


图5 光子计数值随时间变化的关系曲线

Fig. 5 Curves of photon counts changing with time

表1 较弱辐照度条件下疲劳特性测试结果

Table 1 Test result of fatigue properties under weak irradiance

Time /h	1	2	3	4	5
ICCD-A $\delta/\%$	1.8	2.0	2.3	2.8	2.9
ICCD-B $\delta/\%$	0.3	0.4	0.4	0.6	0.6

3.2 光电模拟模式下测试

强辐照度下,SBUV-ICCD 工作在光电模拟模式。对采集到的 ICCD 输出视频信号进行灰度值处理。为减小随机噪声对输出信号的影响,数据处理采用多帧图像取平均值的方式,同时减去无光照时 ICCD 的本底灰度值 G_b 。采集强光照条件下有效成像区域的 N 帧图像灰度值 G_s ,系统净输出灰度值的计算公式如下:

$$G_t = \frac{\sum G_s}{N} - G_b. \quad (5)$$

在光电模拟模式下分别对 ICCD-A、ICCD-B 的疲劳特性进行了测试。测试中 ICCD 输出帧的平均灰度

值约为 150(约为饱和灰度值 255 的 60%),每 10 s 取其内所有帧有效区域的灰度平均值记录一次,共记录 5 h;每隔 1 h 记录增益电压以及光电二极管输出电流的变化情况以分析测量不确定度;测量过程中环境温度保持 $T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测得的 SBUV-ICCD 净输出灰度值与时间的关系曲线如图 6 所示。从图中可以看出:随着测试时间的增加,ICCD-A 的净输出灰度值下降幅度较大,ICCD-B 的净输出灰度值下降较为平缓。由(3)式求得 ICCD 每小时的疲劳特性结果如表 2 所示。可以看出:ICCD-A 连续工作 5 h 的疲劳特性为 13%,且仍有下降趋势,ICCD-B 连续工作 5 h 的疲劳特性为 1%。

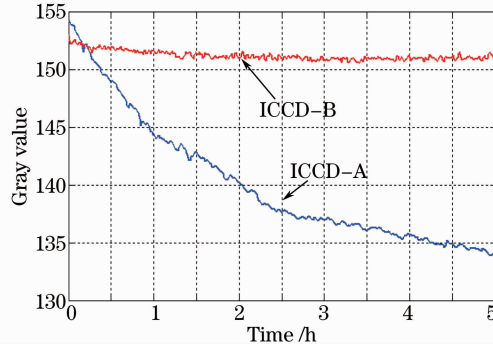


图 6 灰度值随时间变化的关系曲线

Fig. 6 Curves of gray values changing with time

表 2 较强辐照度条件下疲劳特性测试结果

Table 2 Test result of fatigue properties under strong irradiance

Time /h	1	2	3	4	5
ICCD-A δ /%	6.4	9.3	10.9	12.2	13.1
ICCD-B δ /%	0.5	0.9	1.1	1.1	1.1

综合两种工作模式下的测试结果可以看出:在光子计数模式下,ICCD-A 长时间工作的疲劳特性较差,ICCD-B 长时间工作的疲劳特性较好;在光电模拟模式下,两只 ICCD 的疲劳特性均比光子计数模式下的测试结果要差,ICCD-B 的疲劳特性在两种工作模式下的变化幅度相对较小,说明 ICCD-B 的性能更稳定。此外,SBUV-ICCD 属于弱光成像探测器件,一般针对紫外弱目标成像,不会出现长时间强辐照度照射的情况,在较弱的辐照度下的疲劳特性测试结果更具有参考价值。国内研制的 ICCD-A 在较弱辐照度下连续工作 5 h 的疲劳特性不超过 3%,已基本能满足目前国内的需求,但与国外研制的 ICCD-B 相比仍有较大差距。

4 不确定度分析

日盲紫外 ICCD 疲劳特性测试系统的不确定度来源主要有以下几个方面。

- 1) 增益电压的不稳定性:由增益电压引入的不确定度约为 0.3%。
- 2) 光源不稳定性:氙灯在 250 nm 处的峰-峰稳定性小于 0.005%,测试过程中由监视光源稳定性的光电二极管输出微电流的变化值可知,光源引入的不确定为 0.1%。
- 3) SBUV-ICCD 自身的误差:疲劳特性测试的是面阵 ICCD 的响应输出,探测器像元面阵响应的不均匀性和噪声是器件的主要误差来源,这些误差较难评定。从实验角度来看,记录的测量数值是取 10 s 内所有输出值的统计平均值,不确定度为标准差除以平均值^[11]。本实验中两 ICCD 取其最大值均约为 1%。
- 4) 数据采集和处理:数据采集卡的量化误差和计算机处理过程中的舍入误差引入的不确定度约为 0.1%。

综合以上分析可知,本实验中的疲劳特性测试结果的复合不确定度约为 $\sqrt{0.003^2+0.001^2+0.01^2+0.001^2} \approx 1\%$ 。对于 ICCD-B 而言,其疲劳特性在本测量方案的误差范围之内,故本文测定的 ICCD-B 疲劳特性在数值上是不准确的,但其响应度随时间的下降趋势对衡量该器件性能仍有一定的参考价值。

5 结 论

提出了一种 SBUV-ICCD 疲劳特性测试方案,并对 SBUV-ICCD 在两种典型工作模式下的疲劳特性进行了测试。经分析,该疲劳特性测试方案的不确定度约为 1%,能较为准确地测量日盲紫外 ICCD 不同工作模式下的疲劳特性,对于指导器件性能优化及评估具有重要意义。本方案具有一定的局限性,当 SBUV-ICCD 疲劳特性优于 1%时,准确测量其疲劳特性需要建立性能更好的测试方案。

参 考 文 献

- 1 Xue Qiang. Military UV Detection Technology and Application [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010. 4-5.
许 强. 军用紫外探测技术及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010. 4-5.
- 2 Schreiber P, Dang T, Pickenpaugh T, *et al.*. Solar-blind UV region and UV detector development objectives[C]. SPIE, 1999, 3629: 230-248.
- 3 K S Doo, J S Oh, S G Jahng, *et al.*. Simulation of target detection in ultraviolet and infrared bands[J]. Opt Eng, 2001, 40 (11): 2646-2654.
- 4 Wang Zhengfeng, Fu Xiuhua, Zhang Jing, *et al.*. Research of imaging filter in solar blind ultraviolet alarm system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1207002.
王正凤,付秀华,张 静,等. 日盲紫外告警系统中成像滤光片的研制[J]. 中国激光,2011,38(12):1207002.
- 5 Zhao Taifei, Wang Xiaorui, Ke Xizheng. Research on multi-channel access technology in wireless UV scattering communication[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306001.
赵太飞,王小瑞,柯熙政. 无线紫外光散射通信中多信道接入技术研究[J]. 光学学报,2012,32(3):0306001.
- 6 Luo Chang, Li Jiye, Chen Xiaomin. Analysis of channel of wireless ultraviolet communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(4): 040602.
罗 畅,李霁野,陈晓敏. 无线紫外通信信道分析[J]. 激光与光电子学进展,2011,48(4):040602.
- 7 Zhao Yuhuan, Yan Feng, Lou Hongwei, *et al.*. Linearity measurement of ultraviolet ICCD detector[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(8): 88-91.
赵玉环,闫 丰,娄洪伟,等. 紫外 ICCD 的线性测量[J]. 光电工程,2008,35(8):88-91.
- 8 Zhou Yue, Yan Feng, Zhang Mingchao, *et al.*. A solar blind light source with long dynamic range[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(6): 1451-1455.
周 跃,闫 丰,章明朝,等. 超大动态范围日盲紫外辐照度光源[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(6):1451-1455.
- 9 M Lindner, S Elstein, P Lindner. Solar blind and bispectral imaging with ICCD, BCCD and EBCCD cameras[C]. SPIE, 1998, 3434: 22-31.
- 10 P Bergamini, G Bonelli, S D'Angelo, *et al.*. Performance evaluation of a photon-counting intensified CCD[C]. SPIE, 1997, 3114: 250-259.
- 11 Zhang Mingchao, Song Huiying, Zhou Yue, *et al.*. Calibration for SBUV corona detection system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(4): 135-146.
章明朝,宋慧营,周 跃,等. “日盲”紫外电晕探测系统定标[J]. 光电工程,2010,37(4):135-140.