

紫外像增强器的调制传递函数测试系统设计

苏天宁, 刘峰阁, 王 强, 朱荣胜, 杨慧卿, 成 帅, 姬 明

(北方夜视技术股份有限公司, 云南 昆明 650217)

摘要: 紫外像增强器是紫外成像系统的核心器件, 其成像质量决定了对紫外光学信号的探测和成像能力。调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 反映了系统对图像不同频率信息的传递能力, 是像质评定的一种客观指标。本文基于狭缝成像和傅里叶分析的调制传递函数测试原理, 设计了一套紫外像增强器的调制传递函数测试系统。然后对 3 支紫外像增强器进行了调制传递函数测试实验, 得到 3 支紫外像增强器的 MTF 曲线截止频率均在 32~34 lp/mm 之间, 并根据 MTF 曲线对 3 支紫外像增强器成像质量进行对比分析。最后经过重复测试得到几个重要频率点 MTF 测试值的标准差均低于 0.02。

关键词: 紫外像增强器; 调制传递函数; 成像质量; 截止频率; 测试标准差

中图分类号: TN144 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2022)05-0469-06

Design of Modulation Transfer Function Test System for Ultraviolet Image Intensifiers

SU Tianning, LIU Fengge, WANG Qiang, ZHU Rongsheng, YANG Huiqing, CHENG Shuai, JI Ming

(North Night Vision Technology Co.Ltd, Kunming 650217, China)

Abstract: The ultraviolet (UV) image intensifier is the core device of an UV imaging system. Its imaging quality determines its ability to detect and image UV optical signals. The modulation transfer function (MTF) represents the system's ability to transfer information at different frequencies and is an objective indicator of image quality assessment. Based on the MTF test principle of slit imaging and the Fourier analysis method, a set of MTF test systems for UV image intensifiers is established in this study. MTF test experiments were performed on three UV image intensifiers. The MTF curve cutoff frequencies of the three UV image intensifiers were between 32 and 34 lp/mm, and the imaging quality of the three UV image intensifiers was compared based on the MTF curves. Finally, the standard deviations of the MTF values of several important frequency points obtained from repeated tests were lower than 0.02.

Key words: UV image intensifier, modulation transfer function, imaging quality, cut-off frequency, test standard deviation

0 引言

紫外探测和成像技术在电晕检测、紫外制导、紫外告警等领域发挥着重要作用^[1], 其中紫外像增强器由于其具有高增益、低暗计数等优点, 是在紫外微弱信号探测与成像领域应用最广的一种紫外真空器件。紫外像增强器一方面可用于对微弱紫外光学信号的探测, 另一方面也用于与 CCD、CMOS 耦合成紫外成像器件^[2-3], 因此对紫外像增强器的成像质量研究十分有意义。调制传递函数 MTF (modulation transfer

function) 作为一种客观和全面的光学系统成像质量评价标准, 因此可以用调制传递函数来评价紫外像增强器的成像质量。目前国内对于微光像增强器的 MTF 测试系统研究较多, 清华大学朱宏权等人构建了一套基于狭缝法测像增强器 MTF 的装置^[4], 南京理工大学的黄贤斌和倪进园等人构建了一套微光像增强器自动对焦的 MTF 测试系统^[5-6], 北京理工大学陶禹等人研究了高性能近贴式像增强器 MTF 的测试原理和方法^[7], 但对于紫外像增强器的 MTF 测试系统研究鲜有报道。

本文设计了一种紫外像增强器的调制传递函数

收稿日期: 2020-11-12; 修订日期: 2021-02-27.

作者简介: 苏天宁 (1984-), 男, 工程师, 主要研究方向: 非标专用设备设计开发、制造。E-mail: 79564875@qq.com.

通信作者: 刘峰阁 (1985-), 男, 工程师, 主要研究方向: 非标专用设备设计开发、制造。E-mail: 344581813@qq.com.

测试系统,搭建了紫外成像系统,采用极细的狭缝作为成像靶标,利用CMOS采集和传输紫外像增强器荧光屏上的可见光图像,通过软件算法对图像处理运算获得调制传递函数曲线。通过对3支紫外像增强器进行测试得到调制传递函数曲线并计算测试重复性,证明了测试系统的准确性和稳定性,为提升紫外像增强器的成像质量提供了理论依据和实验支撑。

1 MTF 测试原理

光学传递函数为像面和物面图像频谱的比值,调制传递函数就是光学传递函数的幅值部分。根据光学系统的线性不变性,像面图像的一维分布 $I'(x')$ 可以看作是物面上图像的一维分布 $I(x)$ 与线扩散函数 (line spread function) $LSF(x)$ 的卷积^[4-7]:

$$I'(x') = I(x) * LSF(x) \tag{1}$$

将其代入到光学传递函数的公式中化简可得到:

$$OTF(x) = \frac{F(I'(x'))}{F(I(x))} = \frac{F(I(x)) \cdot F(LSF(x))}{F(I(x))} = F(LSF(x)) \tag{2}$$

因此,调制传递函数可以由线扩散函数傅里叶变换后的幅值计算得到。目前通常是利用极细的狭缝进行成像,由图像采集设备如 CCD 和 CMOS 等获得狭缝像的亮度分布即是线扩散函数,再进一步离散傅里

叶变换后进行幅值归一化得到调制传递函数。

根据测试原理得到测试紫外像增强器调制传递函数的流程如图 1 所示,根据此测试流程搭建紫外像增强器的调制传递函数测试系统,主要包括紫外成像系统和图像采集系统。

2 测试系统

基于上述测试原理,我们设计和搭建了一套紫外像增强器的 MTF 测试系统,其结构示意图如图 2 所示。

1) 光源:采用氘灯作为光源,其装配有紫外波段透过率高的优质透紫石英双透镜,光谱范围在 200~400 nm。照度均匀,输出稳定,并且是非相干的。可以通过调节光源输出出口的透镜位置,控制输出光斑的大小从而调节输出紫外光的辐射照度。

2) 毛玻璃和衰减片:采用石英材质的毛玻璃,是为了让紫外光源更加均匀,并在一定程度上减弱光照。紫外衰减片采用的是中性衰减片,起到减弱紫外辐射照度作用,根据实际照度需求采用不同透过率的紫外衰减片组合。

3) 紫外衰减片:由于 254 nm 是我国紫外波段标定的波长,因此采用中心波长为 254 nm,半波带宽为 15 nm 的干涉型紫外滤光片。它的峰值透射率为 23.0%,截止带的透射率为 0.1%。能够得到窄带宽的紫外光。

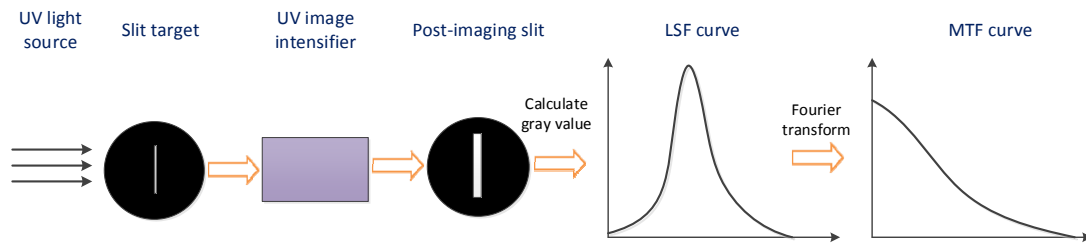


图 1 紫外像增强器的 MTF 测试流程

Fig.1 MTF test process of UV image intensifier

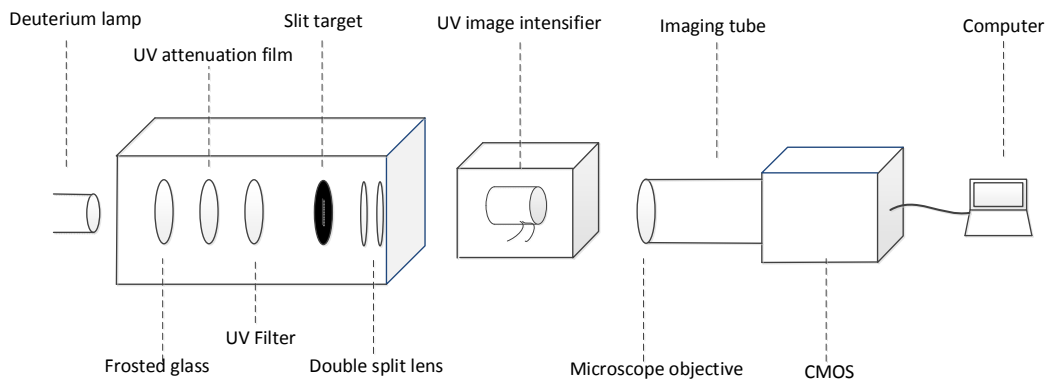


图 2 紫外像增强器的 MTF 测试系统

Fig.2 MTF test system of UV image intensifier

4) 狭缝靶标: 狭缝靶标采用宽度为 10 μm 的狭缝。根据狭缝的 MTF 公式:

$$MTF_{slit} = |\text{sinc}(\pi df)| \quad (3)$$

式中: d 为狭缝宽度; f 为频率。计算得到在 10 lp/mm、20 lp/mm、30 lp/mm 的 MTF 值分别为 0.984、0.936、0.859, 根据 MTF 的级联性狭缝宽度对测试的结果影响较小。

同时根据单缝衍射艾里斑的角度公式:

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{d} \quad (4)$$

式中: λ 为入射光的波长, 目前研究的日盲紫外波段主要为 240~280 nm, d 为狭缝宽度。狭缝越窄, 紫外成像时造成的衍射现象越明显, 会造成成像质量变差, MTF 曲线下降。因此采用的狭缝宽度不能过宽或过窄, 如果狭缝宽度过大, 会放大狭缝自身 MTF 对系统的影响, 如果狭缝宽度过小, 将导致衍射现象发生, 影响测试结果。

5) 双分离透镜: 紫外成像时由于透镜材料的限制, 是无法像可见光成像那样保证成像的保真度, 像差是影响成像质量的主要因素^[8]。目前, 紫外成像多采用反射系统减少像差的影响, 本实验的折射系统中像差影响相对较大。可以采用正负透镜组成双分离透镜结构, 通过正负透镜之间成像减少球差、色差等像差的影响, 保证紫外成像系统的分辨特性。

6) 紫外像增强器: 紫外光通过狭缝靶标照射到光阴极面上发生光电转换, 目前常用的紫外阴极材料

有 CsTe、RbTe 等, 它们的量子效率可达 20%。电子在紫外像增强器内部通过微通道板增强后轰击荧光屏, 转换生成可见光图像。

7) 显微物镜和成像镜筒: 将荧光屏上的可见光图像成像到相机的光敏面上。为了满足采样要求, 成像时采用 10 倍的物镜对狭缝图像进行放大。

8) CMOS: CMOS 作为现在常用的成像器件, 完成接收图像后的采样量化。本实验采用的 CMOS 像元尺寸是 0.011 mm, 数字输出是 8 bit, 并且具有良好的低照度特性。

9) 计算机和软件: 完成图像采集和数据处理, 得到 LSF 曲线和 MTF 曲线。

3 实验结果与分析

实验中采用了国内生产的 3 支编号分别为 512374049、517333211 和 517323220 的日盲紫外像增强器, 如图 3 所示。后续分别用 I、II、III 表示这 3 支像管。

实验过程中先在靶标成像系统中放入石英毛玻璃、透过率 1% 的衰减片、254 nm 的滤光片和狭缝靶标。将 CMOS 接上 5 V 的电压并通过 USB 数据传输线接到计算机, 打开氙灯光源预热。将紫外像增强器接至 3 V 的电源, 并将测试系统做好环境密闭工作。此时用光功率计测得入射紫外光功率约为 2.0×10^{-10} W/cm², 对焦后 3 支像管得到的狭缝图像如图 4 所示。

将 3 支像管的狭缝图像分别进行灰度值计算、降噪处理和曲线平滑后, 得到的 LSF 曲线如图 5 所示。



图3 紫外像增强器 I、II、III

Fig.3 UV image intensifier I、II、III

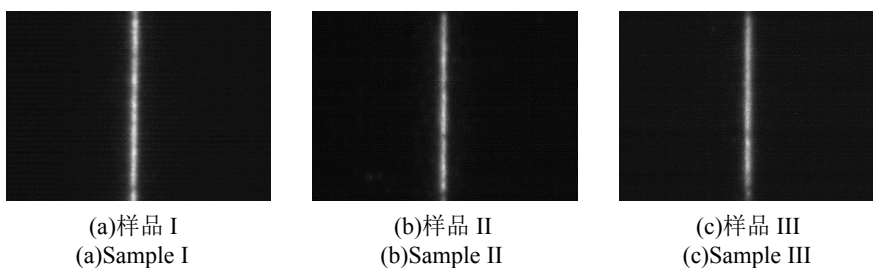


图4 紫外像增强器 I、II、III 得到的狭缝图像

Fig.4 Slit images obtained by UV image intensifier I, II, III

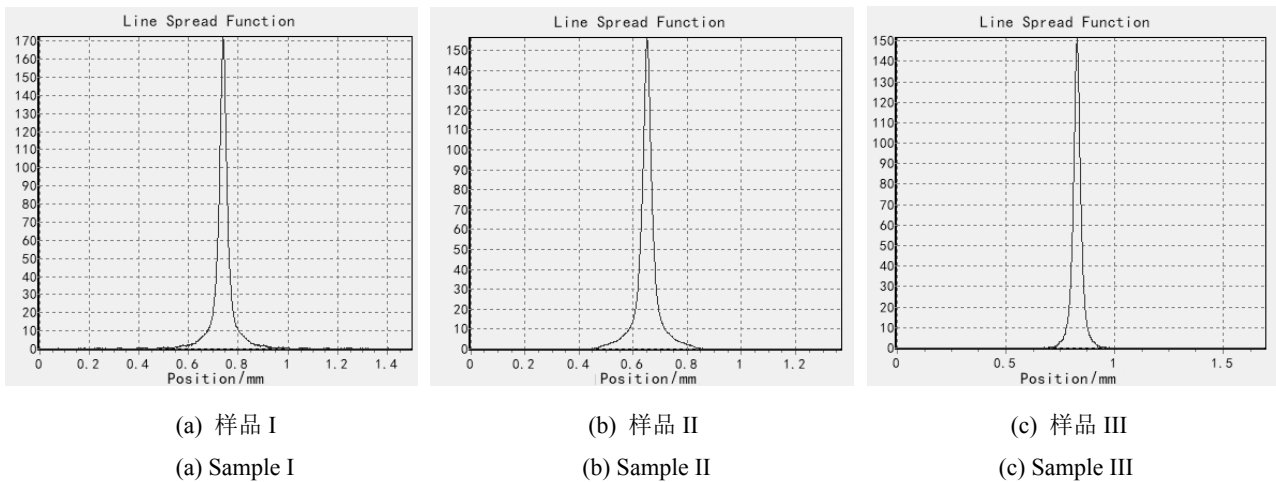


图5 紫外像增强器 I、II、III测试得到的 LSF 曲线

Fig.5 LSF curves obtained by UV image intensifier I, II, III

为了使得到的 MTF 曲线更准确,同时也为了验证测试系统的稳定性,分别对每支像管进行4次测试,得到像管 I、II、III的 MTF 曲线分别如图6、图7、图8所示。

由测试曲线可以得到3支像增强器的 MTF 曲线截止频率,即 MTF 值为 0.03 对应的频率值分别为 32.93 lp/mm、32.10 lp/mm、33.41 lp/mm。极限分辨力反映的是器件对图像细节的分辨能力^[9],这3支像增

强器在西安国防一级计量站通过 USAF1951 靶成像目视探测的方法测试得到的极限分辨率分别为 32 lp/mm、32 lp/mm、34 lp/mm,可以看出截止频率和极限分辨率非常接近,测试结果比较准确。

根据4次测试的曲线计算3支像管在 2.5 lp/mm、7.5 lp/mm、15.0 lp/mm、25.0 lp/mm、30.0 lp/mm 这几个重要频率点 MTF 平均值如表1所示。

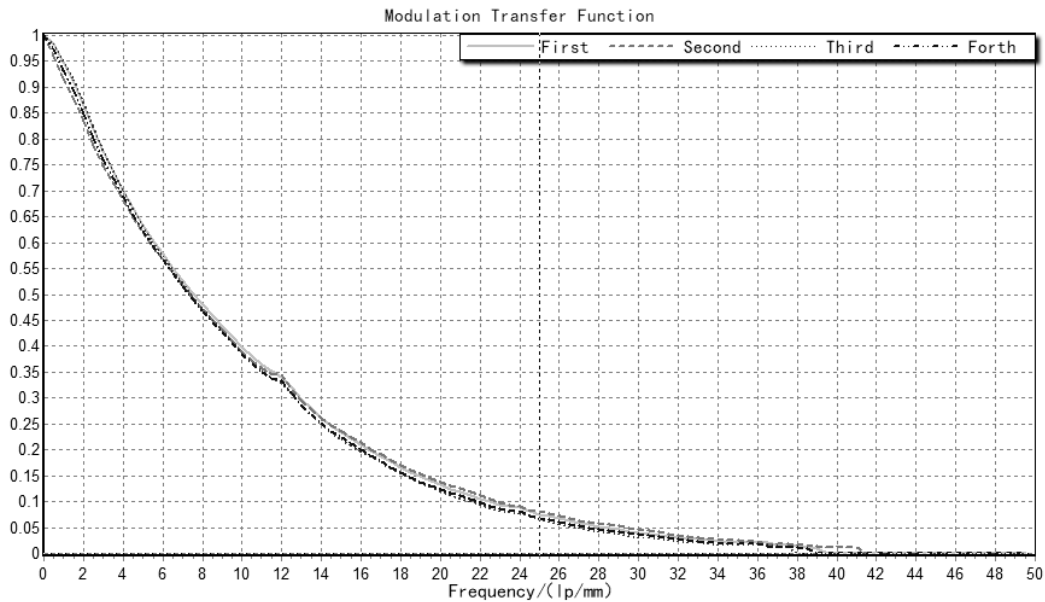


图6 紫外像增强器 I 重复测试得到的4条 MTF 曲线

Fig.6 Four MTF curves obtained by repeated testing of UV image intensifier I

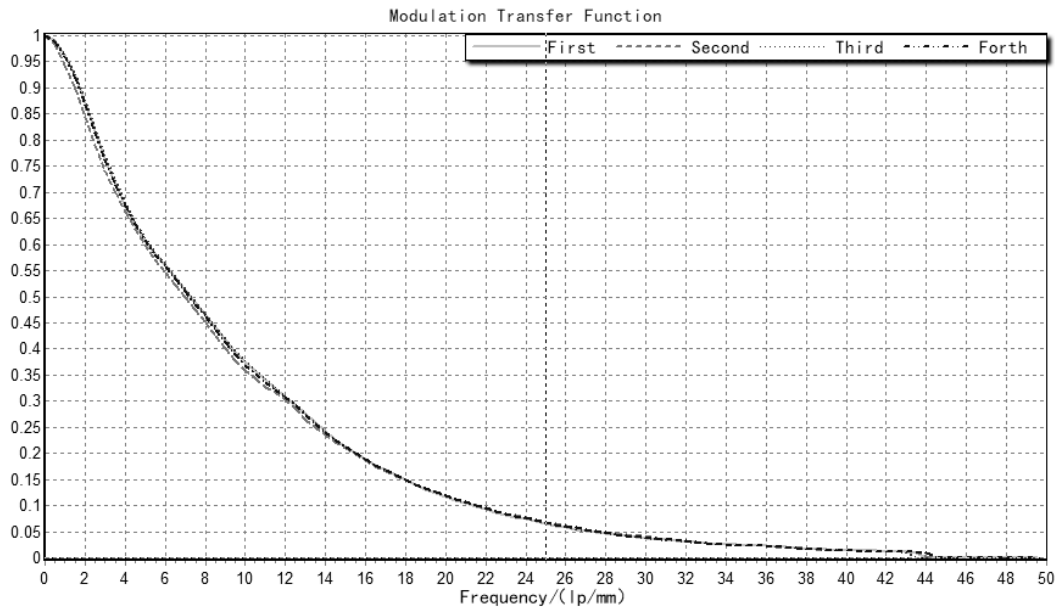


图7 紫外像增强器II重复测试得到的4条MTF曲线

Fig.7 Four MTF curves obtained by repeated testing of UV image intensifier II

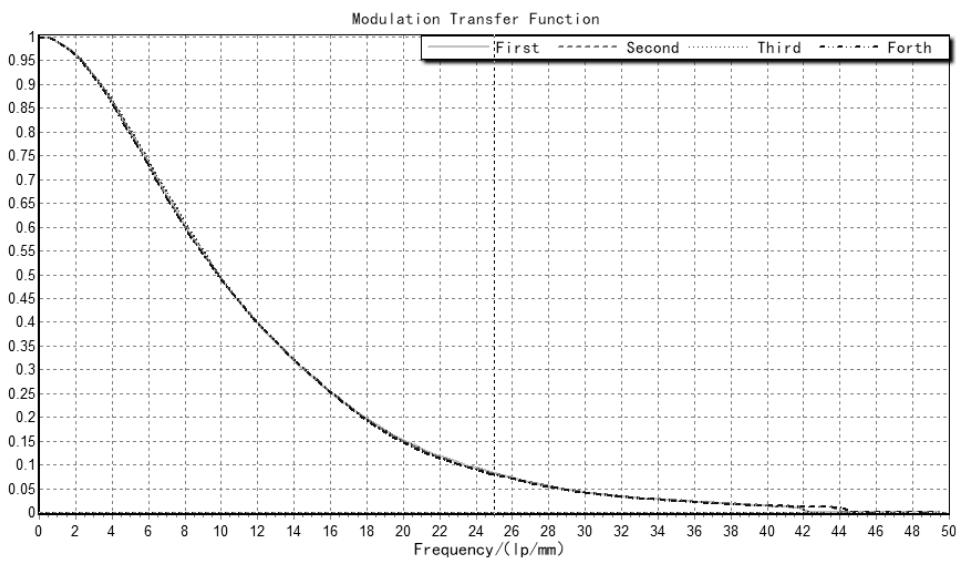


图8 紫外像增强器III重复测试得到的4条MTF曲线

Fig.8 Four MTF curves obtained by repeated testing of UV image intensifier III

表1 重要频率点测试得到的MTF平均值

Table 1 MTF average values at important frequency points

Frequency / (lp/mm)	2.5	7.5	15.0	25.0	30.0
Sample I	0.8133	0.4900	0.2325	0.0753	0.0410
Sample II	0.7983	0.4690	0.2136	0.0727	0.0386
Sample III	0.9443	0.6225	0.2838	0.0793	0.0334

通过对比,可以看出3支像管在高频分段的MTF值比较接近,即对细节的分辨能力基本相同。但是在中低频段,即对图像的轮廓和层次传递上,像管III的

性能要明显优于像管I和像管II,而像管I要略微优于像管II。

测试重复性采用多次测试数据的标准差作为评价标准,如公式(5)所示:

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

式中: n 表示实验次数, x_i 表示第 i 次实验测量值, \bar{x} 表示测量值的平均值。根据上述测试曲线和数据计算得到3支像管在2.5 lp/mm、7.5 lp/mm、15.0 lp/mm、

25.0 lp/mm、30.0 lp/mm 的标准差如表 2 所示。

表 2 重要频率点测试得到的 MTF 标准差

Table 2 MTF standard deviation at important frequency points

Frequency /(lp/mm)	2.5	7.5	15.0	25.0	30.0
Sample I	0.0183	0.0123	0.0097	0.0084	0.0046
Sample II	0.0147	0.0108	0.0090	0.0029	0.0019
Sample III	0.0075	0.0068	0.0054	0.0028	0.0006

由表格数据可以看出, 3 支像管在几个重要频率点的测试标准差均低于 0.02, 大部分数据是低于 0.01 的, 测试系统误差较少, 测试重复性较好。

4 结论

本文针对紫外像增强器的成像质量评价搭建了一套紫外像增强器的调制传递函数测试系统。介绍了测试原理和测试装置, 并在此系统上对 3 支紫外像增强器进行了实验, 得到的 MTF 曲线截止频率与测试得到的极限分辨力十分接近, 并且根据 MTF 曲线分析对比了 3 支像管的成像性能。最后根据重复性测试计算得到 3 支像管在关键频率点的 MTF 测试标准差均低于 0.02, 证明测试系统准确性和稳定性较好。

参考文献:

[1] 王颖, 王璐子, 倪进园, 等. 日盲紫外波段电晕成像特性的仿真研究[J]. 红外技术, 2019, 41(11): 1057-1064.
WANG Hao, WANG Luzi, NI Jinyuan, et al. Research on simulation of corona imaging at solar-blind ultraviolet band[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(11): 1057-1064.

[2] 权利, 王颖, 龙维刚, 等. 紫外图像传感器技术研究进展[J]. 半导体光电, 2013, 34(4): 537-541.
QUAN Li, WANG Ying, LONG Weigang, et al. Advances in UV image sensor technology[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(4): 537-541.

[3] 崔穆涵. 日盲紫外像增强器与 ICCD 的参量测试与辐射标定[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2016.
CUI Muhan. Parametric Test and Radiometric Calibration of the Solar-Blind UV Image Intensifier and Intensified CCD[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2016.

[4] 朱宏权. 微通道板像增强器的调制传递函数的测量与研究[J]. 光子学报, 2007, 36(11): 1983-1986.
ZHU Hongquan. Measurement and research on modulation transfer function of microchannel plate image intensifier [J]. *Journal of Photonics*, 2007, 36(11): 1983-1986.

[5] 黄贤斌. 微光像增强器调制传递函数测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017
HUANG Xianbin. Research on Testing Technology of Modulation Transfer Function of Low Light Level Image Intensifier[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.

[6] 倪进园, 王璐子, 王颖, 等. 微光像增强器的 MTF 测试技术研究[J]. 红外技术, 2019, 41(12): 1161-1166.
NI Jinyuan, WANG Luzi, WANG Hao, et al. Research on measurement technology of the MTF of low-light level image intensifiers[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(12): 1161-1166.

[7] 陶禹, 金伟其, 王瑶, 等. 高性能近贴式像增强器的调制传递函数分析[J]. 光子学报, 2016, 45(6): 168-173.
TAO Yu, JIN Weiqi, WANG Yao, et al. The MTF analysis of high performance proximity image intensifier[J]. *Journal of Photonics*, 2016, 45(6): 168-173.

[8] 何丽鹏, 林峰. 紫外工业检测光学系统设计及公差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 294-298.
HE Lipeng, LIN Feng. Design and tolerance analysis of UV industrial inspection optical system[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 294-298.

[9] 贺英萍, 李敏, 尹雷, 等. 紫外像增强器分辨力和视场质量测试技术研究[J]. 应用光学, 2012, 33(2): 337-341.
HE Yingping, LI Min, YIN Lei, et al. Resolution and FOV quality of UV image intensifier[J]. *Applied Optics*, 2012, 33(2): 337-341.