

引用格式: LI Xiaofeng, LI Jiaojiao, LI Jinsha, et al. Measure and Comparison between the Second-generation and the Third-generation Image Intensifier within the Different Region of Wavelength[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2):0225001
李晓峰,李娇娇,李金沙,等.超二代及三代像增强器不同响应波段的参数测量及比较[J].光子学报,2021,50(2):0225001

超二代及三代像增强器不同响应波段的参数 测量及比较

李晓峰¹,李娇娇¹,李金沙¹,钱要红²,苏天宁¹,王强¹

(1 北方夜视技术股份有限公司,昆明 650217)

(2 北方夜视科技研究院集团有限公司,昆明 650217)

摘 要:对 A 光源分别进行 550 nm、625 nm 以及 675 nm 的短波截止,对比测量了超二代和三代像增强器的光谱响应、阴极灵敏度、增益、分辨力以及信噪比。在 10^{-1} lx 照度条件下,当对 A 光源进行 675 nm 的短波截止之后,三代像增强器的分辨力未出现下降,而超二代像增强器的分辨力却下降到初始值的 94 %;但在 10^{-4} lx 照度条件下,当对 A 光源进行 675 nm 的短波截止之后,三代像增强器的分辨力下降到初始值的 90 %,而超二代像增强器的分辨力下降到初始值的 85 %。但信噪比越高的像增强器,分辨力降低的比例越低。对于超二代和三代像增强器而言,如果在 A 光源条件下的性能参数相同,但在不同的短波截止条件下使用时,其性能并不相同,三代像增强器的性能更好。尽管超二代像增强器在不同短波截止波长条件下性能参数下降的比例较三代像增强器下降的比例高,但差距并不大,因此使用过程中的性能差距也不大。

关键词:像增强器;微通道板;阴极灵敏度;信噪比;分辨力;增益

中图分类号:Q462.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215002.0225001

Measure and Comparison between the Second-generation and the Third-generation Image Intensifier within the Different Region of Wavelength

LI Xiaofeng¹, LI Jiaojiao¹, LI Jinsha¹, QIAN Yaohong², SU Tianning¹, WANG Qiang¹

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

(2 North Night Vision Science & Technology Research Institute Group Co.,Ltd, Kunming 650217, China)

Abstract: The spectral response, cathode sensitivity, gain, resolution and signal-to-noise ratio of the super second-generation and the third-generation image intensifier were measured at the short wave cut-off of 550 nm, 625 nm and 675 nm for A luminant. Under 10^{-1} lx illumination, the resolution of the third-generation image intensifier does not decrease after undertaking 675 nm short wave cut-off for A luminant, while the resolution of super second-generation image intensifier drops to 94% of the initial value; however, under 10^{-4} lx illumination, the resolution of the third-generation image intensifier decreases to 90% of the initial value after undertaking 675 nm short wave cut-off for the A luminant, while that of the super second-generation image intensifier decreases to 85% of the initial value. In addition, the resolution decreases with the decrease of illumination. For the super second-generation and third-generation image

基金项目:国家自然科学基金(No. 11535014)

第一作者:李晓峰(1963—),男,正高级工程师,博士,主要研究方向为微光夜视技术。Email: 984118295@qq.com

收稿日期:2020-08-26;录用日期:2020-10-15

<http://www.photon.ac.cn>

intensifiers, although the parameters are the same under the illumination of A luminant, but when used in different short wave cut-off wavelengths, the performance of the third-generation image intensifier is better. Although the decline proportion of parameters for super second-generation image intensifier is higher than that of third-generation image intensifier under different short wave cut-off wavelengths, the difference is not obvious, so the performance difference during use is not obvious.

Key words: Image intensifier; Microchannel plate; Cathode sensitivity; Signal-to-noise ratio; Resolution; Gain

OCIS Codes: 250.0040; 040.3780; 040.5250; 040.5160; 230.2090

0 引言

人眼由于受到探测阈和光谱响应的限制,在夜间看不到物体。微光像增强器的作用就是使人眼在夜间也能看到物体^[1-2]。微光像增强器利用光电阴极将入射光转换为光电子,再利用微通道板(Microchannel Plate, MCP)^[3]对光电子进行倍增,之后再提高 MCP 输出电子的动能,最后使其轰击荧光屏发光,从而获得亮度适合人眼观察的可见光图像。微光像增强器从结构上讲包括输入窗、光电阴极、MCP、荧光屏、输出窗、管壳以及高压电源等。

目前主流像增强器有两种,一种为超二代像增强器,另一种为三代像增强器。超二代像增强器采用 Na_2KSb 光电阴极^[4-5]以及常规 MCP,而三代像增强器则采用 GaAs 光电阴极^[6]以及带有离子阻挡膜的 MCP(简称带膜 MCP)。尽管超二代及三代像增强器均采用同一套性能参数,但在这些参数中,根据相关测量标准^[7-8],阴极灵敏度(Cathode sensitivity)、增益(Gain)、信噪比(Signal to noise ratio)、分辨力(Resolution)等均是在 A 光源(2 856 K 色温钨丝灯)条件下测量的。因 Na_2KSb 光电阴极与 GaAs 光电阴极的光谱响应波长范围不同,所以利用 A 光源条件下所测得的参数来比较超二代及三代像增强器的性能时,不具备可比性。

要使超二代及三代像增强器的性能参数具有一定的可比性,需要利用在特定应用波长范围内所测得的性能参数。例如,如果像增强器在星光条件下使用,而星光中的长波成分比短波多^[9],因此比较超二代以及三代像增强器的性能时,需要对 A 光源的短波进行截止,即对 550 nm 以下波长进行截止,这样测得的性能参数才具有一定的可比性。另外如果像增强器(如飞行员夜视头盔)在飞机舱内使用,那么夜视头盔物镜的短波截止波长为 625 nm 或 675 nm^[10],因此要比较超二代及三代像增强器的性能时,也需要利用在 625 nm 或 675 nm 短波截止 A 光源条件下所测的参数,所以有必要对在不同短波截止条件对超二代及三代像增强器的性能参数进行测量及比较。

1 测量样品及测量方法

测量样品为一只超二代像增强器和一只三代像增强器。超二代像增强器编号为 036#, 阴极灵敏度为 $963 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 。三代像增强器编号为 303#, 其阴极灵敏度为 $2\,240 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 。两只测量样品的光谱响应曲线见图 1。测量样品的光谱响应时,超二代像增强器的阴极电压为 200 V,而三代像增强器的阴极电压为 400 V。

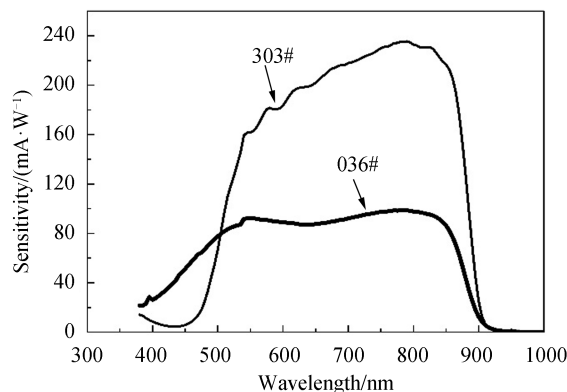


图 1 036#、303#样品阴极光谱响应
Fig. 1 Spectral response of photocathode between sample 036# and 303#

从图1中可以看出,两只像增强器样品的光谱响应曲线差别较大。GaAs 光电阴极较 Na₂KSb 光电阴极具有更高的光谱响应,几乎是 Na₂KSb 光电阴极光谱响应的2倍。另外 GaAs 光电阴极光谱响应的短波截止波长约在 500 nm,而 Na₂KSb 光电阴极的短波截止波长却在约 350 nm,但两种光电阴极的长波截止波长基本相同,均在约 940 nm。

两只样品参数(增益、信噪比及分辨力)的测量采用符合相关标准要求的测量仪器^[7-8]。这些测量仪器的测量原理是,以 A 光源照射像增强器的光电阴极作为激励,通过光电传感器(光电倍增管或 CCD 相机)接收像增强器荧光屏的输出信号,最后得出测量值。在测量仪器的光路中通过调节光阑大小以及中性滤光片的衰减倍数对光源的光通量进行调整,使像增强器光电阴极上获得符合要求的测量照度以及测量面积。测量时,先在 A 光源照明条件下测量样品的初始参数(如增益),然后再在测试仪器的光路中,在测量样品的光电阴极前端插入一片短波截止(如 550 nm)的高通滤光片,其他条件不变,再在该条件下测量样品的参数(如增益),这样就可以测量出像增强器样品在 A 光源照明条件下的初始参数以及在对 A 光源进行短波截止以后的参数。另外为了使两只像增强器的参数更具可比性,测量增益、信噪比及分辨力参数时,通过调节 MCP 的工作电压使两只像增强器的增益统一设定为 15 000 cd·m⁻²·lx⁻¹,即在相同的增益条件下测量其性能参数。

2 测量结果及分析

2.1 阴极灵敏度

两只样品初始阴极灵敏度以及三种短波截止条件下的阴极灵敏度测量结果见表1。表中第一列为样品编号,第二、第三以及第四列分别为 A 光源、550 nm、625 nm 以及 675 nm 短波截止条件下所测得的光电阴极灵敏度以及变化的百分比。

表1 不同波长范围内的阴极灵敏度
Table 1 Sensitivity within the different region of wavelength

Sample	A luminant	≥ 550 nm/		≥ 625 nm/		≥ 675 nm/	
	Sensitivity/ ($\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$)	Sensitivity/ ($\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$)	Percentage/%	Sensitivity/ ($\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$)	Percentage/%	Sensitivity/ ($\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$)	Percentage/%
036#	963	922	96	775	80	691	72
303#	2 240	2 200	98	1 900	85	1 704	76

从表1中可以看出,当利用短波截止高通滤光片对光源进行截止后,不同波长范围内的阴极灵敏度较初始阴极灵敏度均有所下降。但 Na₂KSb 光电阴极与 GaAs 光电阴极相比较,当增加短波截止高通滤光片以后,Na₂KSb 光电阴极(036#样品)灵敏度下降的比例较大,GaAs 光电阴极(303#样品)灵敏度下降的比例较小。例如,在 ≥675 nm 波长范围内,Na₂KSb 阴极灵敏度为初始阴极灵敏度的 72%,但 GaAs 光电阴极的阴极灵敏度却为初始阴极灵敏度的 76%。同时从表1中也可以看出,在增加短波截止高通滤光片以后,尽管 GaAs 光电阴极阴极灵敏度下降的比例较小,但与 Na₂KSb 光电阴极相比较,差别并不很大。原因是 A 光源的光谱辐射主要在长波,短波的辐射较少,见图2。因此尽管 Na₂KSb 光电阴极的短波截止波长在 350 nm,但

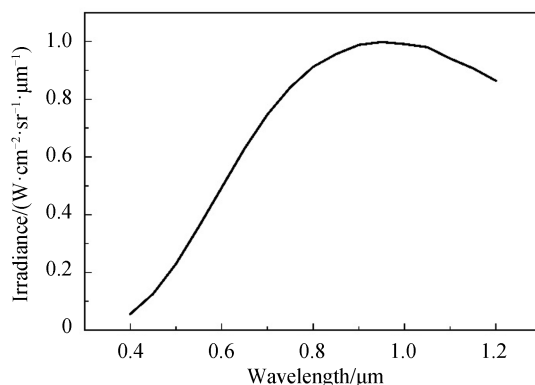


图2 2 856 K 色温钨丝灯的辐射光谱
Fig.2 Spectral radiation of tungsten lamp in the color temperature of 2 856 K

由于光源中短波(350 nm~550 nm)的成分较少,因此Na₂K Sb光电阴极在350 nm~550 nm波长范围内所产生的光电流也就相应的不高,所以当进行550 nm短波的截止后,Na₂K Sb光电阴极灵敏度与GaAs光电阴极相比较,灵敏度下降比例的差距不大。

需要说明的是,光电阴极在像增强器中仅仅是一个部件,其阴极灵敏度仅仅是光电阴极这一部件的性能指标,不是整个器件(像增强器)的性能指标。再有,像增强器光电阴极的阴极灵敏度对像增强器性能的影响主要体现在像增强器的信噪比指标中。所以当比较不同光电阴极像增强器的性能时,不能以光电阴极的阴极灵敏度作为评价指标,而应该以像增强器的信噪比作为评价指标。因为不同像增强器使用不同的MCP,而不同MCP具有不同的信号利用率^[11-12]。因此,如果两种像增强器MCP的信号利用率不一样,那么即使两种像增强器光电阴极的阴极灵敏度相同,信噪比也会不同。如三代像增强器采用带膜MCP,而带膜MCP与常规MCP相比,信号利用率更低。因此对相同阴极灵敏度的超二代像增强器与三代像增强器而言,超二代像增强器具有更高的信噪比。

2.2 增益

两只样品的初始增益以及三种短波截止条件下的增益测量结果及变化百分比见表2。表中第一列为样品编号,第二、第三以及第四列分别为A光源、550 nm、625 nm以及675 nm短波截止条件下所测得的像增强器增益以及变化的百分比。

表2 不同波长范围内的增益
Table 2 Gain within the different region of wavelength

Sample	A luminant/	≥ 550 m/		≥ 625 nm/		≥ 675 nm/	
	Gain/ (cd·m ⁻² ·lx ⁻¹)	Gain/ (cd·m ⁻² ·lx ⁻¹)	Percentage/%	Gain/ (cd·m ⁻² ·lx ⁻¹)	Percentage/%	Gain/ (cd·m ⁻² ·lx ⁻¹)	Percentage/%
036#	15 000	13 500	90	12 150	81	6 220	70
303#	15 000	14 400	96	8 880	87	3 450	76

从表2可以看出,对于增益相同(15 000 cd·m⁻²·lx⁻¹)的两只像增强器,当在550 nm进行短波截止时,三代像增强器的增益与初始增益相比较下降较低。在625 nm或675 nm进行短波截止时,也有同样的结论。这与表1中光谱灵敏度的测量结果相一致。因此对于增益相同的超二代以及三代像增强器,当在星光下,或在飞机舱内使用时,三代像增强器性能较好。但从增益下降的百分比看,超二代像增强器与三代像增强器的差距并不大。例如当进行675 nm短波截止时,三代像增强器的增益下降到初始值的76%,而超二代像增强器却下降到初始值的70%,两者相差6个百分点。

2.3 信噪比

两只像增强器样品的初始信噪比^[13-14]以及三种短波截止条件下的信噪比测量结果及变化百分比见表3,测量时的输入照度为1.08×10⁻⁴ lx。表中第一列为样品编号,第二、第三以及第四列分别为A光源、550 nm、625 nm以及675 nm短波截止条件下所测得的像增强器信噪比及变化百分比。

表3 不同波长范围内信噪比
Table 3 Signal to noise ratio within the different region of wavelength

Sample	A luminant	≥ 550 m/		≥ 625 nm/		≥ 675 nm/	
	SNR	SNR	Percentage/%	SNR	Percentage/%	SNR	Percentage/%
036#	30.4	28.9	95	26.3	87	23.5	77
303#	31.3	31.0	99	26.8	86	25.7	82

从表3可以看出,两只像增强器的信噪比在进行短波截止的条件下,其变化规律与增益的变化规律相似,仍然是三代像增强器信噪比下降的比例较低。

为了在更低照度条件下比较两种像增强器的信噪比,在1.08×10⁻⁵ lx照度条件下分别测量了两只像增强器的信噪比,即在照度降低1个数量级的条件下再重复测量两只像增强器的信噪比,测量结果及变化百分比见表4。表中第一列为样品编号,第二、第三以及第四列分别为A光源、550 nm、625 nm以及675 nm短波截止条件下所测得的像增强器信噪比及变化百分比。

表4 低照度条件下不同波长范围内的信噪比
Table 4 Signal to noise ratio within the different region of wavelength in low illumination

Sample	A luminant	≥ 550 m/		≥ 625 nm/		≥ 675 nm/	
	SNR	SNR	Percentage/%	SNR	Percentage/%	SNR	Percentage/%
036#	10.9	10.2	94	9.1	83	8.4	77
303#	11.2	11.0	98	9.6	86	9.2	82

从表4中可以看出,在 1.08×10^{-5} lx低照度条件下,两只像增强器在不同短波截止条件下,信噪比下降的比例与 1.08×10^{-4} lx高照度条件下的信噪比下降的比例基本相同,仍然是超二代像增强器信噪比下降的比例最高,三代像增强器信噪比下降的比例最低,但两者相比,差距不大。例如表4中,在进行675 nm短波截止后,超二代像增强器的信噪比下降到初始信噪比的77%,而三代像增强器的信噪比却下降到初始信噪比的82%,两者相差5个百分点。

2.4 分辨力

因为像增强器的分辨力与光电阴极上的照度有关,因此需要分别在高照度(10^{-1} lx)和低照度(10^{-4} lx)条件下测量两种像增强器的分辨力^[15-16]。高照度条件下的分辨力测量结果见表5。表中第一列为样品编号,第二、第三以及第四列分别为A光源、550 nm、625 nm以及675 nm短波截止条件下所测得的像增强器分辨力以及下降的百分比。

表5 高照度下不同波长范围内的分辨力
Table5 Resolution within the different region of wavelength in high illumination

Sample	A luminant/	≥ 550 m/		≥ 625 nm/		≥ 675 nm/	
	Resolution/ (lp·mm ⁻¹)	Resolution/ (lp·mm ⁻¹)	Percentage/%	Resolution/ (lp·mm ⁻¹)	Percentage/%	Resolution/ (lp·mm ⁻¹)	Percentage/%
036#	64	64	100	60	94	60	94
303#	54	54	100	54	100	54	100

从表5可以看出,在高照度条件下,三代像增强器的分辨力在加入短波截止滤光片之后,其分辨力均为54 lp·m⁻¹,与初始分辨力相比,未发生变化。但超二代像增强器的分辨力在加入625 nm和675 nm的短波截止滤光片之后,分辨力有所下降,但仅仅下降了6%。这是因为在高照度条件下,信号较强,因此在加入短波截止滤光片之后,信号损失不大,像增强器的信噪比均较高,所以对像增强器的分辨力未造成较大影响。

在测量完两只像增强器在高照度条件下的分辨力之后,再在低照度条件(10^{-4} lx)测量两只像增强器的分辨力,测量结果以及下降百分比见表6。表中第一列为样品编号,第二、第三以及第四列分别为A光源、550 nm、625 nm以及675 nm短波截止条件下所测得的像增强器分辨力以及下降的百分比。

表6 低照度条件下不同波长范围的分辨力
Table 6 Resolution within the different region of wavelength in low illumination

Sample	A luminant/	≥ 550 m/		≥ 625 nm/		≥ 675 nm/	
	Resolution/ (lp·mm ⁻¹)	Resolution/ (lp·mm ⁻¹)	Percentage/ %	Resolution/ (lp·mm ⁻¹)	Percentage/ %	Resolution/ (lp·mm ⁻¹)	Percentage/ %
036#	14.3	14.3	100	13.5	94	12.1	85
303#	20	20	100	20	100	18	90

从表6可以看出,在低照度条件下,两只像增强器的分辨力在加入短波截止滤光片之后,其分辨力均发生了一定程度的下降,分辨力下降的比例仍然是三代像增强器的较低。如在分别加入625 nm和675 nm的短波截止滤光片之后,超二代像增强器的分辨力分别下降到初始分辨力的94%和85%,但三代像增强器的分辨力仅仅在加入675 nm的短波截止滤光片之后分辨力有所下降,下降到初始值的90%,而加入625 nm的短波截止滤光片之后的分辨力未有下降,仍然为20 lp·mm⁻¹。三代像增强器的光谱响应主要在长波,因此加入短波截止滤光片以后,信号损失不大,因此对分辨力的影响也不大。而超二代像增强器的光谱响应更宽,

包含短波,因此在加入短波截止滤光片以后,信号损失更多,所以对像增强器分辨力的影响较大。

将两只样品高照度和低照度条件分辨力进行比较,即将表5和表6进行比较,可以看出在照度降低以后,分辨力随之下降,下降的比例见表7。从分辨力下降的比例看,超二代像增强器分辨力下降的比例最高,三代像增强器分辨力下降的比例最低。对比两只像增强器高照度和低照度条件下信噪比的下降比例,即将表7与表4相比较,可以发现低照度条件下,信噪比越高的,分辨力的下降比例越低。

表7 低照度分辨力下降百分比
Table7 Percentage decrease of resolution in low illumination

Sample	A luminant/%	≥ 550 nm/%	≥ 625 nm/%	≥ 675 nm/%
036#	22	22	23	18
303#	37	37	37	33

3 结论

超二代与三代像增强器的光电阴极不一样,相应的光谱响应不一样,而其性能参数又是在A光源条件下测量的,因此利用这些参数来比较超二代和三代像增强器的综合性能时,不具备可比性。所以目前采用品质因子^[17]来评价像增强器的综合性能的方法也不准确。当要比较超二代与三代像增强器的性能时,需要利用在相同的响应波长范围所测量的参数,而不能利用在A光源条件下所测量的参数。

在550 nm、625 nm以及675 nm短波截止波长条件下,三代像增强器的性能(增益、信噪比和分辨力)与初始性能相比较,下降的比例最低。因此,同样初始性能指标的超二代像增强器和三代像增强器,当其在星光下或在飞机舱内使用时,三代像增强器的性能最好。如果要达到三代像增强器的性能,那么超二代像增强器需要具有比三代像增强器更高的初始性能参数。

参考文献

- [1] LIU Qiankun, LIU Lei, DENG Yubin, et al. Apparent distance theory revision for low-light-level night vision system based on noise factor[J]. Optical and Quantum Electronics, 2017, 49(7): 249-264.
- [2] YAN Baojun, LIU Shulin, HENG Yuekun, et al. Nano-oxide thin films deposited via atomic layer deposition on micro-channel plates[J]. Nanoscale Research Letters, 2015, 10(1): 1-11.
- [3] YJIN Weiqi, ZHANG Qin, WANG Xia, et al. An improved apparent distance model for direct-view low-light-level night vision system[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0411001.
金伟其, 张琴, 王霞, 等. 一种改进的直视型微光夜视系统视距模型[J]. 光子学报, 2020, 49(4): 0411001.
- [4] PRANAV G, LUCA C, IVAN B. Monte Carlo simulations of electron photoemission from cesium antimonide[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(21): 215702.
- [5] DIMITROV D A, BELL G I, SMEDLEY J, et al. Modeling quantum yield, emittance, and surface roughness effects from metallic photocathodes[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(16): 165303.
- [6] SIDDHARTH K, DIMITRE D, WILLIAM S. et al. Monte Carlo charge transport and photoemission from negative electron affinity GaAs photocathodes[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(10): 104904.
- [7] WJ 2091-1992, 微光像增强器试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
WJ 2091-1992, Test Method of Image Intensifier[S]. Beijing: Standards Press of China, 1992.
- [8] GJB 2000A-2020, 像增强器通用规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
GJB 2000A-2020, General Specification of Image Intensifier[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [9] TIAN Jingsheng. New development of low light level imaging sensor technology[J]. Infrared Technology, 2013, 35(9): 527-534.
田金生. 微光像传感器技术的最新进展[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 527-534.
- [10] BAI Xiaofeng, YANG Shuning, HOU Zhipeng. NVIS compatible characteristic of low light level image intensifier assembly [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(S2): 2001-2005.
拜晓峰, 杨书宁, 侯志鹏. 微光像增强器夜视兼容特性分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S2): 2001-2005.
- [11] SINOR T W, ESTERA J P. An analysis of electron scattering in the thin dielectric films used as ion barriers in generation III image tubes[C]. SPIE, 2003, 4796: 23-32.
- [12] ESTERA J P, FORD C E, GIORDANA A, et al. High reliability GaAs image intensifier with unfilmed microchannel plate[C]. SPIE, 1999, 3749: 713-714.
- [13] QIAN Yunsheng, CHANG Benkang, TONG Moying, et al. Frequency spectrum measurement of noise of image

- intensifiers[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 67-70.
- 钱芸生,常本康,童默颖,等.微光像增强器噪声频谱测试技术研究[J].光学学报,2003,23(1):67-70.
- [14] CUI Dongxu, ZHENG Shaocheng, QIU Yafeng, et al. Output signal-to-noise ratio characteristics of Microchannel Plate [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(16): 468-471.
- 崔东旭,郑少成,邱亚峰,等.微通道板的输出信噪比特性研究[J].真空科学与技术学报,2012,32(16):468-471.
- [15] LI Xiaofeng, CHANG Le, ZENG Jinneng, et al. Study on resolution improvement of microchannel plate [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12):1223002.
- 李晓峰,常乐,曾进能,等.微通道板分辨力提高研究[J].光子学报,2019,48(12):1223002.
- [16] LI Xiaofeng, LI Tingtao, ZENG Jinneng, et al. Study on the improvement of input signal utilization of MCP [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(3):0325002.
- 李晓峰,李廷涛,曾进能,等.微通道板输入信号利用率提高研究[J].光子学报,2020,49(3):0325002.
- [17] BOSCH L A. Image intensifier tube performance is what matters[C]. SPIE, 2000, 4128: 65-78.