

引用格式: LI Xiaofeng, DU Mulin, XU Chuanping, et al. Analysis on Factors Affecting the Maximum Gain of Super Second Generation Image Intensifier[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3):0304001

李晓峰, 杜木林, 徐传平, 等. 影响超二代像增强器最高增益的因数分析[J]. 光子学报, 2022, 51(3):0304001

# 影响超二代像增强器最高增益的因数分析

李晓峰, 杜木林, 徐传平, 黄丽书, 陈俊宇, 常乐

(北方夜视技术股份有限公司, 昆明 650214)

**摘 要:**在阴极灵敏度、微通道板固有增益、屏效以及屏压一定的条件下,超二代像增强器的最高亮度增益由微通道板增益所决定。实验中发现微通道板增益存在一个最高值,当微通道板增益超过最高值时,像增强器会产生自激发光。像增强器产生自激发光时,图像的对比度、分辨力消失,图像亮度的增强作用失去意义。因此超二代像增强器的最高亮度增益受自激发光的影响。超二代像增强器产生自激发光的原因是像增强器内部微通道板电子倍增形成了正反馈。微通道板的最高增益与光电阴极灵敏度、荧光屏铝膜的透过率成反比,所以在阴极灵敏度一定的条件下,影响微通道板最高增益的因数是荧光屏铝膜的透过率。在微通道板固有增益一定的条件下,提高微通道板的板压不会影响像增强器的分辨力和等效背景照度,但会降低像增强器的信噪比,因此信噪比又是影响超二代像增强器最高亮度增益的一个因数。要进一步提高超二代像增强器的最高亮度增益,在阴极灵敏度、屏效以及屏压一定的条件下,需要提高微通道板的固有增益,同时减小荧光屏铝膜的透过率。

**关键词:**像增强器;正反馈;微通道板;光电阴极;荧光屏;暗发射

中图分类号:TN223

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225103.0304001

## 0 引言

夜间景物亮度太低,为使人眼在夜间也能看到景物,需要借助一些辅助手段,如对景物进行照明。然而在一些特殊应用场合,如在夜间对野生动物进行观察时,为了不惊扰野生动物;及在夜间对罪犯进行跟踪或取证时,为了不暴露自身目标,均不能对目标进行照明。因此在不能对景物进行照明时,为了在夜间或黑暗中观察景物,必须借助微光夜视仪。微光夜视仪的核心是像增强器<sup>[1-4]</sup>。像增强器通过光电效应原理实现对景物亮度的增强,从而实现人眼在夜间对景物进行观察的目的。随着微光像增强器技术的发展,像增强器的等效背景照度已从过去的 $10^{-7}$  lx数量级降低到了 $10^{-8}$  lx,甚至 $10^{-9}$  lx数量级。等效背景照度的降低,意味着像增强器可以探测到更低的亮度阈值。然而,要探测更低的亮度阈值,像增强器需要具有更高的亮度增益。对于采用超二代像增强器的头盔式夜视仪,如果观察 $10^{-3}$  lx数量级照度的景物,需要 $10^4$  cd·m<sup>-2</sup>·lx<sup>-1</sup>数量级的亮度增益;观察 $10^{-4}$  lx数量级照度的景物,需要 $10^5$  cd·m<sup>-2</sup>·lx<sup>-1</sup>数量级的亮度增益;观察更低照度的景物,则需要更高的像增强器亮度增益。目前超二代像增强器的亮度增益在 $10^4$  cd·m<sup>-2</sup>·lx<sup>-1</sup>数量级,还不能满足对更低照度或更远距离目标的观察要求。但在提高超二代像增强器亮度增益方面,与提高超二代像增强器分辨力<sup>[5-8]</sup>、信噪比<sup>[9-12]</sup>相比较,研究进展相对缓慢,影响了超二代像增强器观察距离的进一步提高。关于如何提高超二代像增强器的亮度增益,一般认为只要提高微通道板(Microchannel Plate, MCP)工作电压(简称板压)即可。提高MCP的板压可以提高MCP的增益,同时也就提高了超二代像增强器的亮度增益。然而提高MCP板压是否存在极限,以及提高MCP的板压对超二代像增强器的其他性能是否会有影响,这方面的研究还未见报道,所以有必要对影响超二代像增强器最高亮度增益的因数进行分析。

基金项目:国家自然科学基金(No. 11535014),微光夜视技术国防科技重点实验室基金(No.J011102)

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:2021-08-04;录用日期:2021-10-28

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

## 1 理论分析

根据像增强器的相关理论<sup>[13-14]</sup>,超二代像增强器的亮度增益与光电阴极灵敏度、微通道板电子增益(简称增益)、荧光屏发光效率(简称屏效)以及荧光屏电压(简称屏压)有关,它们之间遵循

$$G = \frac{S \times G_M \times \eta \times V_a}{M^2} \quad (1)$$

式中, $G$ 为像增强器的亮度增益,单位为 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ ;  $S$ 为阴极灵敏度,单位为 $\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ;  $G_M$ 为微通道板增益;  $\eta$ 为荧光屏的屏效,单位: $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ;  $V_a$ 为荧光屏的屏压,单位: $\text{V}$ ;  $M$ 为像增强器的几何放大率。由于超二代像增强器为双近贴聚焦的结构,因此其几何放大率 $M$ 为1,所以式(1)可以简化为

$$G = S \times G_M \times \eta \times V_a \quad (2)$$

通常情况下,MCP的板压每增加50 V,MCP的增益就可以增加1倍,即MCP增益与其板压之间遵循

$$G_M = G_{M0} \times 2^{\left(\frac{V_M - 750}{50} - 1\right)} \quad (3)$$

式中, $G_M$ 为MCP增益, $G_{M0}$ 为800 V板压时的MCP增益, $V_M$ 为MCP板压。以下将MCP在800 V板压时的增益称为MCP固有增益。将式(3)代入式(2),可得

$$G = S \times \eta \times V_a \times G_{M0} \times 2^{\left(\frac{V_M - 750}{50} - 1\right)} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,影响超二代像增强器亮度增益的因数包括光电阴极的阴极灵敏、屏效、屏压、MCP固有增益以及MCP板压。其中阴极灵敏度、屏效、屏压以及MCP固有增益对像增强器亮度增益的影响是线性的,即其中之一只要提高10%,那么像增强器的亮度增益也会提高10%。而MCP板压对像增强器亮度增益的影响却是指数型的。所以从影响像增强器亮度增益的角度看,在式(4)中所涉及的5个影响因素中,MCP板压对像增强器亮度增益的影响最大。

目前对于采用普通玻璃窗的超二代像增强器,阴极灵敏度在 $800 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1} \sim 1\,100 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 之间,短期内再进一步提高较困难。对于荧光屏而言,屏效(P22型号荧光粉)一般在 $16 \text{lm}\cdot\text{W}^{-1} \sim 20 \text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ 之间。如果要进一步提高荧光屏的屏效,就需要增大荧光粉粒度,而这又会影响到荧光屏的分辨力,所以短期内,荧光屏的屏效只能保持在目前的水平。对屏压而言,因为屏压的进一步提高会带来荧光屏或MCP高压击穿的问题,由此会降低像增强器的制造良品率。所以超二代像增强器的屏压一般只能保持在6 000V的水平上。至于MCP(直径为25 mm,孔径为 $6 \mu\text{m}$ ,节距为 $8 \mu\text{m}$ )的固有增益,一般在100~300之间,短期内进一步提高也比较困难。综上所述,由于阴极灵敏度、屏效、屏压以及MCP的固有增益在短期内可以认为是相对固定的,因此其对像增强器亮度增益的影响也是相对固定的,所以在式(4)中它们可以被认为是常量。也就是说在超二代像增强器的阴极灵敏度、屏效、屏压以及MCP的固有增益一定的条件下,理论上讲,提高MCP的板压是提高超二代像增强器亮度增益的方法之一。

假设像增强器阴极灵敏度为 $900 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ,屏效为 $18 \text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ,MCP固有增益为250。那么根据式(4)可以计算出,MCP的板压只需要达到879 V,像增强器的亮度增益就可以达到 $20\,000 \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ 。同理可以计算出,MCP的板压只需要达1 046 V,像增强器的亮度增益即可达到 $194\,400 \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ ,接近 $2 \times 10^5 \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ 数量级。但以上仅是理论分析,能否无条件地通过提高MCP板压来提高超二代像增强器的增益,另外在提高MCP的板压以后,是否会对超二代像增强器的其他性能参数产生影响,还需要通过实验来验证。

## 2 实验结果及分析

从实验上研究MCP板压对超二代像增强器亮度增益的影响,选取有效阴极直径为18 mm的超二代像增强器进行试验。超二代像增强器采用多碱阴极<sup>[15-18]</sup>,即S25光电阴极。首先对244#样品进行试验,测量其亮度增益随MCP板压变化的关系。244#样品的阴极灵敏度、等效背景照度(Equivalent Background Illumination,EBI)、分辨力(Resolution)、信噪比(Signal to Noise Ratio,SNR)以及屏效的具体参数见表1。

测量仪器采用符合像增强器测试标准的像增强器亮度增益测试仪。包括光源、滤光片盒、暗箱(样品室)和光度计。输入光经过滤光片衰减后投射在像增强器的光电阴极面上,经过像增强器增强,从荧光屏输出。荧光屏的输出光再被光度计接收,从而测量出像增强器荧光屏的亮度。荧光屏的亮度与光电阴极面上

表1 试验样品的性能参数  
Table 1 Parameters of testing samples

Sample	Photocathode	S/( $\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ )	EBI/( $\times 10^{-7}$ lx)	Resolution/(lp·mm <sup>-1</sup> )	SNR	$\eta$ /(lm·W <sup>-1</sup> )
244#	S25	797	1.2	60	24.3	14.2
119#	S25	802	0.3	68	27.5	14.7
176#	S25	507	1.3	64	17.3	14.5
347#	Cs <sub>2</sub> Te			32		14.3

的输入照度之比即为像增强器的亮度增益。测量仪器的光源为2 856 K色温的钨丝灯。滤光片盒中有一组不同透过率的中性密度滤光片,包括从ND0.5、ND1、ND2、ND3的不同透过率的滤光片,另外还包括挡板。滤光片和挡板在滤光片盒中可以移动。当在测量过程中需要对输入光进行衰减时,可以将不同的滤光片或滤光片组合推入光路。同样当在测量过程中需要增加光电阴极面上的输入照度时,可以将不同的滤光片或滤光片组合拉出光路。当在测量过程中不需要输入光照时,可以将挡板推入光路,反之则可以拉出光路。亮度计为美国Pritchard公司生产。测量仪器的结构如图1(a),像增强器测量所用高压电源如图1(b)。高压电源的输出电压通过高压电缆连接到样品的测试夹具上,再通过测试夹具施加在测量样品上。高压电源包括三组电压输出,第一组为阴极电压,第二组为MCP板压,第三组为屏压。MCP的输出端为地,因此屏压为正高压,MCP板压和阴极电压均为负高压。即MCP输入端电位比输出端电位低,而阴极电位又比MCP输入端电位低。

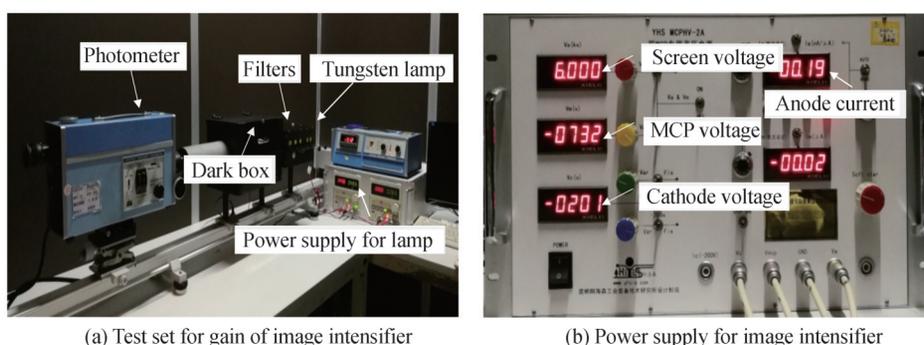


图1 增益测量仪器  
Fig.1 Test set for gain of image intensifier

像增强器的亮度增益测量在暗室中进行。环境温度为常温,相对湿度低于45%。另外测量暗箱中通有干燥氮气,以保证测量过程中不产生高压放电。光电阴极面上的输入照度为 $4.7 \times 10^{-5}$  lx,样品的阴极电压为200 V,屏压为6 000 V。在测量过程中,阴极电压和屏压保持不变,仅变化MCP板压。每变化一次MCP板压,测量一次像增强器的亮度增益。在测量得到样品的亮度增益后,根据式(2)及样品的阴极灵敏度、屏效及屏压计算出该样品的MCP增益。

244#样品MCP增益的计算结果如图2。从图2中曲线244#可以看出,随着MCP板压的增加,样品的MCP增益随之增加,并且符合式(3)的规律。但随着MCP板压的不断增大,当MCP板压增加到1 020 V时,样品的MCP增益变化速率突然增大,见图2中曲线244#上的点A。所以随着MCP板压的不断提高,244#样品MCP增益的变化可分为两个区域,低于点A的区域称为量变区,高于点A的区域称为突变区。在突变区,像增强器图像的对比度、分辨力消失,其他参

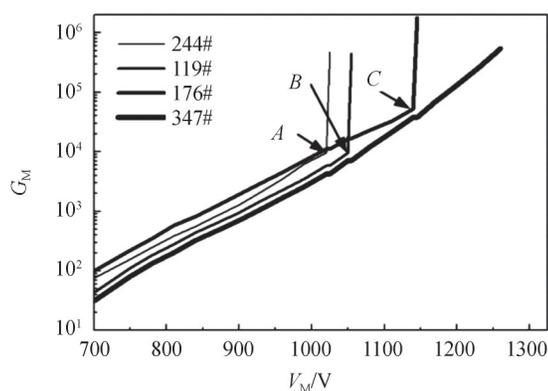


图2 MCP增益随板压V<sub>M</sub>的变化  
Fig. 2 Gain of MCP with the variation of V<sub>M</sub>

数如 EBI、信噪比也不能正常测量。可以认为点 A 所对应的板压即为 MCP 所能施加的最高板压, 对应的 MCP 增益即为 MCP 的最高增益。

为分析 244# 样品 MCP 增益发生突变的原因, 在样品无输入照度条件下, 通过光度计的目镜观察其荧光屏的暗背景, 即在测量光路中推入挡板的条件下对其荧光屏暗背景随 MCP 板压变化情况进行观察。在 244# 样品暗背景的观察过程中, 发现荧光屏上会有一些闪烁点。例如, 在 MCP 板压为 800 V 条件下, 荧光屏图像如图 3(a)。荧光屏上的闪烁点是光电阴极暗发射所造成的。因为暗发射在位置上和时间上是随机的, 因此其在荧光屏上的图像, 即闪烁点在位置上和时间上也是随机的。为了进一步观察暗背景的变化, 在 800 V 板压基础上, 不断增加 MCP 板压。在此过程中, 荧光屏上仍为一些闪烁点, 不同的是这些闪烁点的亮度更亮, 同时数量也更多, 并且板压越高, 闪烁点的亮度越亮, 数量越多。图 3(b) 为 MCP 板压为 950 V 时在荧光屏上所观察到的图像。荧光屏上闪烁点亮度更亮的原因是 MCP 增益的增加, 数量更多的原因是原来被 MCP 输入面电极俘获的暗发射电子也参与倍增。

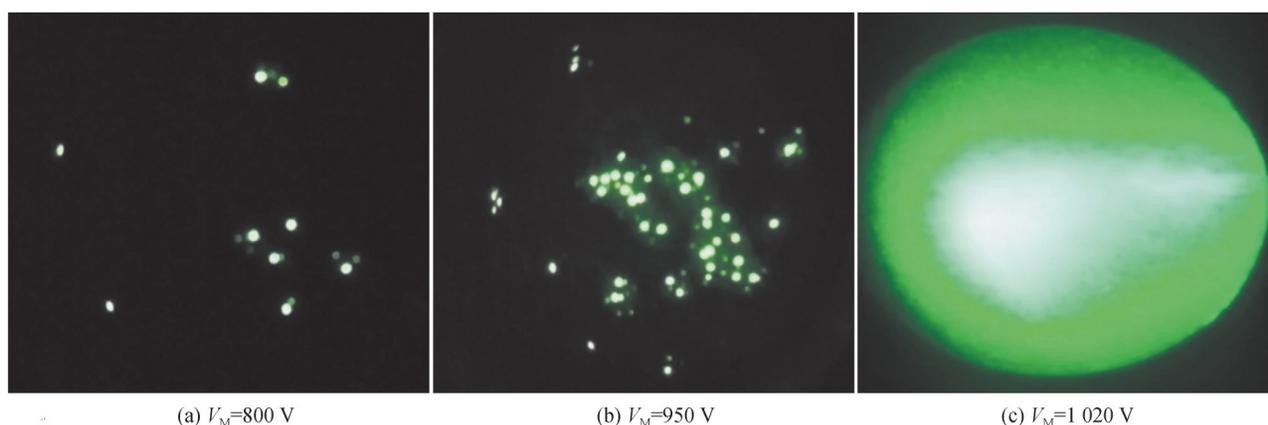
(a)  $V_M=800\text{ V}$ (b)  $V_M=950\text{ V}$ (c)  $V_M=1\ 020\text{ V}$ 

图 3 不同 MCP 板压下的荧光屏图像

Fig.3 The images of phosphor screen on different voltages of MCP

在 950 V 电压的基础上进一步提高 MCP 板压, 荧光屏上的图像仍然由闪烁点组成。当 MCP 的板压提高到 1 020 V 时, 荧光屏的发光状态发生突变, 从只有闪烁点的状态转变为整个荧光屏呈现一个自激发光状态, 并且亮度可达到  $10\text{ cd}\cdot\text{mm}^{-2}$  以上, 如图 3(c)。从理论上讲, 如果像增强器没有输入光, 荧光屏上除光电阴极的暗发射所产生的不连续、随机的闪烁点外, 不应该有连续而稳定的输出光。但实际情况是, 当 MCP 的板压达到一定的数值时, 荧光屏会发生自激发光, 输出连续而稳定的光。由于当 MCP 板压达到最高板压时, 像增强器会产生自激发光, 受这一因数的影响, 像增强器的亮度增益变化速率会随之发生突变, 而根据式 (2), 可得出 MCP 增益变化速率会发生突变的结论。对于 MCP 而言, 实际上其增益变化的速率并未发生突变, 之所以 MCP 的增益变化发生突变, 是根据式 (2) 计算的结果。

图 4 是 244# 样品在无输入照度条件下, 阳极电流  $I_a$  随 MCP 板压的变化曲线。从该曲线可以看出, 随着 MCP 板压的增加, 阳极电流随之增加, 但增加的速率较低。但当 MCP 板压达到 1 020 V 时, 阳极电流突然增大到  $0.5\ \mu\text{A}$ 。因此从阳极电流随 MCP 板压变化的角度也可以看出, 当 MCP 增益或板压达到某一最高值时, 像增强器会产生自激发光。

像增强器发光的原因可以从其倍增机理上来分析。超二代像增强器主要由光电阴极、MCP、荧光屏等组成, 是一种近贴聚焦结构的像增强器, 如图 5。光电阴极发射的光电子经过

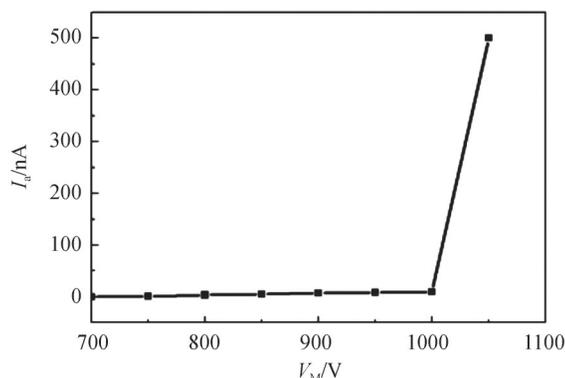


图 4 阳极电流随 MCP 板压的变化

Fig.4 Anode current of screen with the variation of  $V_M$

MCP倍增,从MCP输出端输出,之后在电场作用下加速,获得动能,穿透荧光屏的铝膜并轰击荧光屏发光。荧光屏所发射的光透过输出窗而向外发射。因为荧光屏发光的光通量超过光电阴极输入的光通量,因此像增强器可以实现光的增强作用。

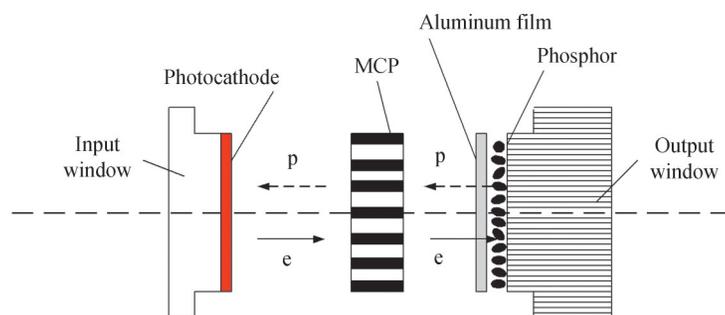


图5 近贴聚焦像增强器示意  
Fig.5 Diagram of proximity-focused image intensifier

像增强器荧光屏由荧光粉层(Phosphor layer)和铝膜(Aluminum film)所组成,如图6。当电子e轰击荧光屏时,电子e首先穿透铝膜,然后再撞击荧光粉颗粒,将电子动能转换为光能。荧光粉颗粒发光时,发光是360°全方位的,即不仅有向输出窗方向的,而且还有向铝膜方向的。由于铝膜的存在,向铝膜方向传输的光线会被铝膜反射,即将向铝膜方向传输的光反射回输出窗方向。为表述方便,将向铝膜方向传输的光称为反向光。尽管荧光屏的铝膜会反射反向光,但荧光屏中的铝膜对反向光的反射率并不是100%,另外铝膜并不是无限厚,因此反向光中仍会有极少一部分反向光p透过铝层,之后再穿透MCP,最终入射在光电阴极上。这些入射在光电阴极上的反向光p会使光电阴极发射光电子e。光电子e经过MCP倍增,会再次激发荧光屏发光,由此完成一个光的循环,如图5。随着光循环的不断进行,当光电阴极的光电流和MCP的增益达到某一值时,像增强器内部将形成正反馈,最终促使荧光屏产生自激发光。这一过程类似电子电路中的正反馈。

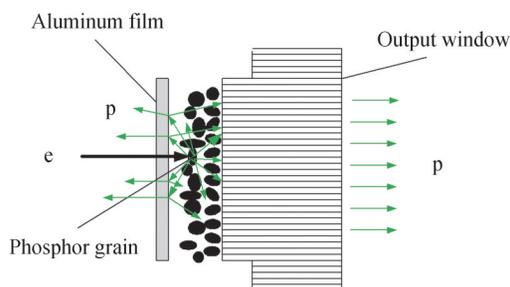


图6 荧光屏结构示意图  
Fig.6 Sketch of phosphor screen in image intensifier

为进一步分析影响MCP最高增益的因数,再另外选择119#和176#超二代像增强器进行试验。119#和176#样品的参数如表1。119#、176#样品与244#样品的制作工艺相同,因此具有可比性。119#和176#样品的试验结果分别如图2中的曲线119#和曲线176#。从图2中可以看出,119#样品的试验结果与244#样品的试验结果相类似,当119#样品的MCP增益达到一定的最高值时,像增强器也发生自激发光,并且MCP最高增益与244#样品的MCP最高增益基本相同,如图2中曲线119#上的点B和曲线244#上的点A,点B和点A的高度基本相同。119#样品的阴极灵敏度为 $802 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ,EBI为 $0.3 \times 10^{-7} \text{ lx}$ 。244#样品的阴极灵敏度为 $797 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ,EBI为 $1.2 \times 10^{-7} \text{ lx}$ 。两个样品相比较,最大区别在于EBI,两者相差1个数量级。由于两个样品发生自激发光的MCP最高增益基本相同,因此可以认为EBI不是影响样品MCP最高增益的主要因数。

将176#样品的试验结果分别与119#和244#样品的相比较,可以看出176#样品MCP的最高增益更高,如图2中曲线176#上的点C,即点C的增益高于点A和点B。176#样品的阴极灵敏度为 $507 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ,244#和

119#样品的阴极灵敏度分别为  $709 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$  和  $802 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 。176#样品的阴极灵敏度最低,而其MCP的最高增益最高,由此可以认为在荧光屏相同的条件下,阴极灵敏度是影响MCP的最高增益的主要因数,同时MCP的最高增益与光电阴极的灵敏度成反比,阴极灵敏度越高,MCP的最高增益越低。

为进一步验证阴极灵敏度与MCP最高增益的相关性,在以上3个超二代像增强器样品试验的基础上,再另外选择347#样品进行试验。347#样品为单MCP的日盲紫外像增强器,采用 $\text{Cs}_2\text{Te}$ 日盲紫外光电阴极<sup>[19-21]</sup>,其阴极灵敏度为  $32 \text{ mA}\cdot\text{W}^{-1}$  (254 nm),其他参数见表1。347#日盲紫外像增强器,除光电阴极外,其结构、MCP、荧光屏等与244#、119#以及176#样品完全相同。347#样品的试验结果如图2中的曲线347#。从图2中的曲线347#可以看出,347#样品在MCP板压为1250 V时,仍未出现自激发光的现象。由此可以判断,347#样品的MCP最高增益远远高于176#、119#和244#样品。需要说明的是,由于目前MCP耐压的限制,在347#样品的试验过程中,MCP的板压仅仅增加到1250 V,未在1250 V的基础上进一步增加,因此未能测量到MCP的最高增益。因为如果再进一步增加MCP板压,那么MCP容易发生击穿。347#样品的荧光屏与176#、119#和244#样品一样,即其荧光粉和铝膜厚度均相同。荧光粉为P22型号的荧光粉,而其发光的光谱峰值波长约在515 nm,如图7,176#、119#和244#样品使用S25多碱阴极,其光谱响应范围在350~960 nm之间。由于S25光电阴极的光谱响应范围与荧光屏的发射光谱范围存在交叠,因此S25光电阴极可以对荧光屏所发射的反向光响应,即光电阴极会因反向光的作用而发射光电子。而347#样品使用 $\text{Cs}_2\text{Te}$ 日盲紫外阴极,其光谱响应范围(石英窗)在180~320 nm之间。尽管两者之间的光谱范围从图7中看不存在重叠,但实际上两者的光谱范围是存在重叠的。因为 $\text{Cs}_2\text{Te}$ 日盲紫外阴极存在带外光谱响应,即在320 nm波长之后,仍然有一定的响应,只不过响应非常低而已。因此其对荧光屏所发射的反向光响应极低,所以对反向光作用而发射光电子的数量极低,即比176#、119#和244#样品光电阴极发射光电子的数量低得多,因此要形成正反馈的MCP最高增益较176#、119#和244#样品都高。347#日盲紫外像增强器的试验结果再次证明,阴极灵敏度越低,发生自激发光的MCP最高增益越高;阴极灵敏度越高,发生自激发光的MCP最高增益越低。目前双MCP的日盲紫外像增强器的MCP增益可达 $10^6$ 以上,这也从另外一方面印证了在荧光屏相同的条件下,光电阴极灵敏度是影响MCP最高增益主要因数的结论。

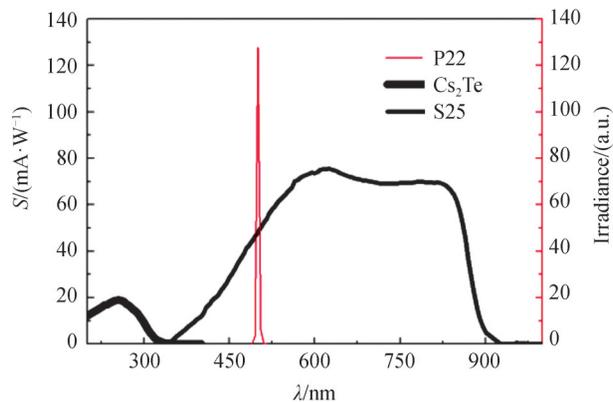


图7 光电阴极光谱响应与荧光屏发射光谱

Fig.7 Spectral response of photocathode and emission spectral of phosphor screen

需要说明的是,在像增强器中,光电阴极灵敏度通常指透射式阴极的灵敏度。所谓透射式阴极是指输入光与发射电子的方向相同。例如在像增强器中,如图4所示,输入光从左向右,而光电子发射方向也是从左向右,与输入光的方向相同。而在上述光电阴极对反向光的响应中,光电阴极的光电发射是一种反射式阴极的光电发射过程。所谓反射式阴极,是指入射光的方向与光电子的发射方向相反。例如在图5中,反向光是从右向左,而光电子的发射方向却是从左向右,与入射光的方向相反。通常情况下,在像增强器中,对于光电阴极而言,透射式的阴极灵敏度越高,其反射式的阴极灵敏度也越高。根据前面的分析,MCP的最高增益与光电阴极的灵敏度成反比,而这里的灵敏度是指透射式光电阴极的灵敏度。但像增强器的自激发射,实质上是与反射式阴极的灵敏度直接相关。因为在像增强器中,反射式的阴极灵敏度与透射式的阴极

灵敏度成正比,因此像增强器的自激发射间接与透射式阴极灵敏度成反比,所以也可以认为MCP的最高增益与光电阴极透射式的灵敏度成反比。

理论上讲,过高的板压会产生一定的场致发射,而这一场致发射对超二代像增强器的自激发光会有一些影响。为了验证MCP场致发射对超二代像增强器自激发光的影响,在像增强器发生自激发光时关闭阴极电压,仅仅保持MCP板压以及屏压,此时自激发光现象消失。在关闭阴极电压时进一步在提高MCP板压(提高200 V),自激发光现象仍未出现,因此可以说明MCP的场致发射不是产生自激发光的主要原因,即MCP的场致发射在产生自激发光的过程中,贡献较小。

MCP的斜切角和离子阻挡膜均会降低MCP对透光率。目前在超二代像增强器中,斜切角过低会影响MCP的固有增益,而过高则会影响MCP的分辨力和均匀性。所以目前对于超二代像增强器所使用的MCP,其斜切角为 $6^\circ$ 。由于超二代像增强器中MCP斜切角固定为 $6^\circ$ ,所以本研究未涉及MCP斜切角对自激发光的影响。理论上讲,增大MCP的斜切角也可以提高MCP的最高增益。离子阻挡膜主要在三代像增强器中使用,超二代像增强器中不使用离子阻挡膜,所以本研究中也未涉及离子阻挡膜对自激发光的影响。然而,对三代像增强器而言,也存在自激发光的现象,这说明尽管离子阻挡膜具有一定的隔光作用,但并不能消除自激发光的现象,只能在某种程度上提高MCP的最高增益。

### 3 讨论

根据以上试验结果和分析可知,MCP的最高增益与光电阴极的灵敏度以及荧光屏铝膜透过率成反比。因此要提高MCP的最高增益,在阴极灵敏度一定的条件下,就需要降低荧光屏铝膜透过率。降低荧光屏铝膜的透过率,可以采用在现有铝膜基础上再镀制一层黑化的铝膜、镍膜或其他的黑色吸光膜的方法。在这方面,已经有一些尝试<sup>[22]</sup>,但实用化技术还须进一步研究。降低荧光屏铝膜的透过率,核心是要阻断来自荧光屏的光。目前的超二代像增强器技术,均是在双近贴聚焦的结构上实现的。所谓双近贴聚焦,是指光电阴极与MCP之间,MCP与荧光屏之间是通过在空间上近贴的方式来实现电子聚焦的,如图5。这种聚焦方式的特点是光电阴极与MCP之间相互面对,因此透过MCP的光不可避免地会直接照射在光电阴极上。对于静电聚焦的像增强器,由于聚焦电极可以隔光,因此透过MCP的光大部分均不能直接照射在光电阴极上,在某种程度上可以提高MCP的最高增益。

静电聚焦的像增强器结构如图8。它与双近贴聚焦结构的区别是在光电阴极与MCP之间存在一个锥电极(Cone)。该锥电极呈漏斗状,在其顶端有一个小孔。锥电极顶端的小孔,对于电子透镜而言,其焦点就在小孔的附近,也相当于一个电子光阑。对于来自荧光屏的反向光而言,该小孔相当于一个光阑,可以阻断大部分来自荧光屏的反向光,从而可以大大提高MCP的最高增益。双近贴聚焦结构像增强器光电阴极采用转移阴极的技术制作,而目前静电聚焦结构像增强器的光电阴极却采用原位的技术制作。随着技术的发展,目前国内生产的 $\Phi 25$  mm有效输入直径、静电聚焦结构、光纤面板输入窗的二代像增强器(型号:XX1470),其阴极灵敏度较过去有了较大提高,阴极灵敏度大于 $500 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 的像增强器的比例达到30%以上,并且性能参数全面合格的像增强器的最高阴极灵敏度达到了 $672 \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ 。如在此基础上,借鉴现有的有关多碱阴极的理论研究成果<sup>[15]</sup>,进一步优化制作工艺,其阴极灵敏度还有进一步提高的可能。只要静电聚焦结构像增强器的阴极灵敏度、分辨力、信噪比等有提升,再加上其更高亮度增益的优点,在某些应用环

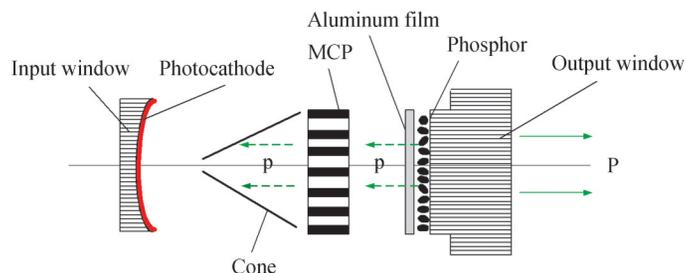


图8 静电聚焦像增强器

Fig.8 Electro-statically focused image intensifier

境中,可以替代超二代像增强器。

另外,在提高MCP最高增益的同时,像增强器的其他参数,如分辨力、EBI以及信噪比仍须满足要求,否则像增强器亮度增益的提高将失去意义。为了从实验上了解MCP板压变化对像增强器其他性能的影响,在不同板压下测量了244#、119#和176#样品的分辨力、EBI以及信噪比。分辨力、EBI以及信噪比的测量采用传统的测量方法<sup>[23-24]</sup>。测量结果表明,在低于MCP最高板压时,随着MCP板压的增加,三支像增强器的分辨力均保持不变,如图9。像增强器的分辨力不随MCP板压的变化而变化,这是因为分辨力主要由像增强器的近贴聚焦距离、MCP的孔径所决定的,而MCP的板压变化并不会改变像增强器的近贴聚焦距离以及MCP孔径,因此像增强器的分辨力不随MCP的板压变化而变化。

像增强器EBI随MCP板压变化的测量结果如图10。理论上讲,一方面,像增强器的EBI主要由光电阴极的暗发射所决定,而MCP的板压不会改变光电阴极的暗发射,因此MCP的板压不会改变像增强器的EBI,所以EBI不会随MCP板压的变化而变化。另一方面,随着MCP板压的增加,暗背景亮度也随之增加,会出现信号感生背景,所以EBI会随着MCP板压的增加而增加。但测试结果表明,在小于MCP最高增益的条件下,EBI并未随MCP板压的增加而有较明显和单调的增加,仅仅是出现了小幅的波动。超二代像增强器的EBI测量长期存在的一个问题是,对同一支像增强器,在相同测试条件下,不同时刻所测量得到的数值会有一些波动。考虑到这一因数,可以认为随着MCP板压的增加,EBI的波动也跟不同时刻测量时出现的波动问题属于同一类。

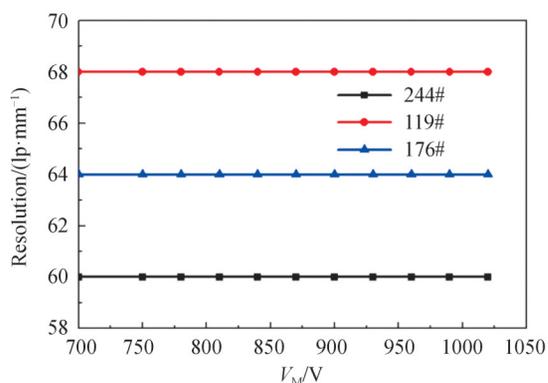


图9 分辨力与MCP板压的关系

Fig.9 Resolution on different operation voltages of MCP

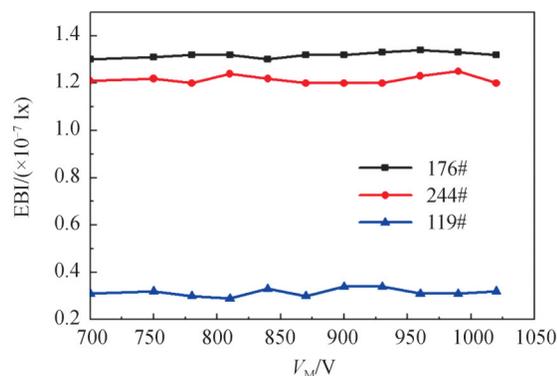


图10 EBI与MCP板压的关系

Fig.10 EBI on different operation voltages of MCP

尽管像增强器的分辨力和EBI不随MCP的板压变化而变化,但信噪比却随着板压的变化而变化,如图11。图11为244#样品信噪比随MCP板压变化的曲线。从图11中可以看出,在MCP板压从700V开始增加时,MCP的增益随板压增加而单调增加,但像增强器的信噪比却并非随板压的增加而单调增加。像增强

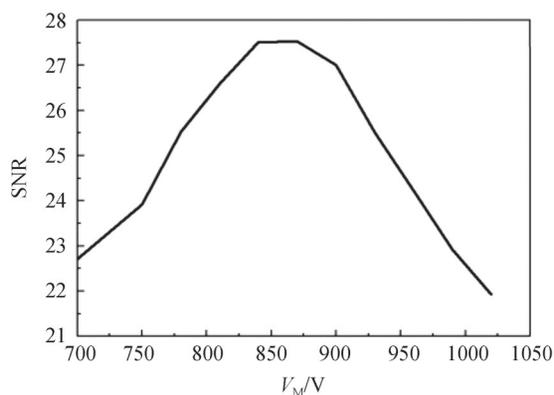


图11 信噪比与MCP板压的关系

Fig.11 SNR on different operation voltages of MCP

器的信噪比起初随MCP板压的增加而增加,并且在860 V达到最高值。但当在像增强器的信噪比达到最高值以后,又随着MCP板压的增加而降低。由此可以看出,当通过提高MCP板压来提高MCP增益,当MCP板压超过最高信噪比电压以后,需要以牺牲信噪比为代价。信噪比降低以后,随着带来的问题是图像的闪烁噪声增大。例如对于静电聚焦的二代像增强器(增益的典型值为 $16\ 000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ ),由于其增益高于近贴聚焦的像增强器(增益的典型值为 $10\ 000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ ),因此其观察距离较近贴聚焦的像增强器更远,但其闪烁噪声更大,对人眼的刺激也更大,更加容易疲劳。正因为受限于提高MCP板压,像增强器信噪比会降低的问题,目前超二代像增强器的亮度增益远远低于其所能达到的最高增益。所以提高像增强器的亮度增益,不能仅仅依靠采取提高MCP板压的办法,而是需要提高MCP的固有增益,即800 V板压下的MCP增益。只有MCP的固有增益提高了,相同MCP增益下的板压才能降低,对像增强器信噪比的影响也才能降低。

随着原子层沉积技术MCP的出现<sup>[25-26]</sup>,MCP的固有增益有了较大的提高,降低了MCP的板压,有望解决提高MCP板压会降低像增强器信噪比的问题。例如对于采用传统烧氢技术MCP超二代像增强器,当平均阴极灵敏度为 $850\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ,平均屏效为 $16\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ,平均亮度增益为 $14\ 000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ 时,其平均信噪比为26.7。但对于采用ALD技术MCP超二代像增强器,当平均阴极灵敏度为 $850\ \mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ,平均屏效为 $16\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ,平均亮度增益为 $14\ 000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ 时,其平均信噪比却为28.3。采用ALD技术的MCP可以获得更高的信噪比,原因是ALD技术的MCP具有更高的增益,因此在相同的 $14\ 000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ 亮度增益条件下,MCP的板压更低,可以获得更高的信噪比。目前ALD技术的MCP的缺点是,尽管可以获得更高的增益,通常情况下,增益可以达2 000以上,较传统烧氢技术MCP的增益高一个数量级,但其增益和板阻的离散性较大,成本较高,因此目前ALD技术的MCP还不具备大批量应用的条件。

## 4 结论

超二代像增强器的阴极灵敏度、MCP固有增益、屏效以及屏压均会影响超二代像增强器的最高亮度增益。在阴极灵敏度、屏效和屏压一定的条件下,提高MCP的增益可以提高超二代像增强器的最高亮度增益。但MCP存在一个的最高增益,超过MCP的最高增益,超二代像增强器的亮度增益的将失去意义。在阴极灵敏度、MCP固有增益、屏效和屏压一定的条件下,影响MCP最高增益的主要原因是荧光屏对反向光的透过率。

通过提高MCP板压来提高超二代像增强器增益的方法对分辨力、EBI均不会产生较大的负面影响,但对信噪比会产生负面的影响。因此如果考虑到超二代像增强器的信噪比,那么超二代像增强器的最高增益需要在信噪比达到要求的条件下考虑,因此信噪比又是在MCP最高增益因数下限制像增强器亮度增益提高的又一个因数。

要降低荧光屏铝膜的透过率,可以采用在现有荧光屏铝膜的表面再制作一层黑化层的方法,如黑铝、黑镍等。但采取这些技术以后,会阻挡来自MCP输出端的一部分输出电子,降低荧光屏的屏效,因此需要分析两者之间的利弊,进行折中。

像增强器技术在光电阴极灵敏度、分辨力以及信噪比方面,潜力不断地被挖掘,但在荧光屏方面,挖掘还不充分,因此有必要进一步对荧光屏的发光材料、制作技术等进行研究。

## 参考文献

- [1] LIU Lu, GUO Ming, AN Yanming, et al. High repeating frequency characteristics of image intensifier in high-speed imaging application[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(11): 1123004.  
刘璐, 郭明, 安严明, 等. 像增强器在高速成像应用中的重复频率特性[J]. 光子学报, 2017, 46(11): 1123004.
- [2] PAN Jingsheng. Image intensifier upgraded performance and evaluation standard[J]. Infrared Technology, 2020, 42(6): 509-518.  
潘京生. 像增强器的迭代性能及其评价标准[J]. 红外技术, 2020, 42(6): 509-518.
- [3] TIAN Jinsheng. New development of low level imaging sensor technology[J]. Infrared Technology, 2013, 35(9): 527-534.  
田金生. 低照度微光传感器的最新进展[J]. Infrared Technology, 2013, 35(9): 527-534.
- [4] GUO Hui, XIANG Shiming, TIAN Minqiang. A review of development of low light level night vision technology[J].

- Infrared Technology, 2013, 35(2): 63-68.  
郭晖, 向世明, 田民强. 微光夜视技术发展动态评述[J]. 红外技术, 2013, 35(2): 63-68.
- [5] QIU Yafeng, YAN Wuling, HUA Sangtun. Resolution research of low-light-level image intensifier based on electronic trajectory tracking[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(12): 1223003.  
邱亚峰, 严武陵, 华桑墩. 基于电子追迹算法的微光像增强器分辨力研究[J]. 光子学报, 2020, 49(12): 1223003.
- [6] 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.
- [7] WU Meijuan, REN Ling, CHANG Benkang, et al. Simulation of image intensifier resolution in Monte Carlo Method [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(9): 798-801.  
武梅娟, 任玲, 常本康, 等. 运用蒙特卡罗方法分析像增强器分辨率[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(9): 798-801.
- [8] TIAN Liping, WEN Wenlong, WANG Xing, et al. Research on the spatial-temporal and gain performances on the small-size streak tube[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(7): 0723002.  
田丽萍, 温文龙, 王兴, 等. 小型条纹管时空分辨及增益特性研究[J]. 光子学报, 2019, 48(7): 0723002.
- [9] 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.
- [10] LI Dan, ZHU Yufeng, ZHAO Huimin, et al. Research on noise factor characteristic of micro-channel plate [J]. Infrared Technology, 2017, 39(11): 1066-1070.  
李丹, 朱宇峰, 赵慧民, 等. MCP噪声因子特性研究[J]. 红外技术, 2017, 39(11): 1066-1070.
- [11] LI Xiaofeng, CHANG Le, LI Jinsha, et al. Study on the relationship between noise factor and working voltage of microchannel plate [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(7): 0725002.  
李晓峰, 常乐, 李金沙, 等. 微通道板噪声因子与工作电压关系研究[J]. 光子学报, 2020, 49(7): 0725002.
- [12] LI Xiaofeng, ZHANG Zhenjun, CONG Xiaoqing, et al. Influence of microchannel plate structure parameters on noise factor [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5): 0225001.  
李晓峰, 张正君, 丛晓庆, 等. 微通道板结构参数对噪声因子的影响研究[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 0225001.
- [13] ZHOU Yisong. Electric vacuum imaging device and its theoretical analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1989.  
周异松. 电真空成像器件及理论分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [14] XIANG Shiming, NI Guoqiang. The principle of photoelectronic imaging device [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.  
向世明, 倪国强. 光电子成像器件原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [15] CHANG Benkang. Multi-alkali photocathode [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2001.  
常本康. 多碱光电阴极 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001.
- [16] KANG Tianyou, REN Ling, ZHANG Kaimin, et al. Electronic structures and optical properties of cubic crystal  $K_2CsSb$ ,  $K_3Sb$  and  $Cs_3Sb$  Cathode Materials [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(3): 0116001.  
康天佑, 任玲, 张锴珉, 等. 立方  $K_2CsSb$ ,  $K_3Sb$  和  $Cs_3Sb$  阴极材料的电子结构和光学性质 [J]. 光子学报, 2020, 49(1): 0116001.
- [17] LI Xiaofeng, FENG Liu, LU Qiang. Photoemission theory of multi alkali cathode [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(10): 1176-1181.  
李晓峰, 冯刘, 陆强. 多碱阴极光电发射理论研究 [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(10): 1176-1181.
- [18] LI Xiaofeng. Photoemission process study of multi-alkali photocathode in the super second generation image intensifier [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(1): 7-12.  
李晓峰. 超二代像增强器多碱阴极光电发射特性研究 [J]. 光子学报, 2013, 42(1): 7-12.
- [19] LI Xiaofeng, CHANG Le, QIU Yongsheng, et al. Measurement of quantum yield and image of microchannel plate in near ultraviolet band [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(3): 0325001.  
李晓峰, 常乐, 邱永生, 等. 微通道板近紫外量子效率测量及成像研究 [J]. 光子学报, 2021, 49(3): 0325001.
- [20] CONTI L, BARNSTEDT J, HANKE L, et al. MCP detector development for UV space missions [J]. Astrophysics and Space Science, 2018, 363(4): 63-71.
- [21] LI Xiaofeng, ZHAO Xuefeng, CHEN Qijun, et al. Study on  $K_2Te(Cs)$  solar blind ultraviolet cathode [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(6): 155-160.  
李晓峰, 赵学峰, 陈其钧, 等.  $K_2Te(Cs)$  日盲紫外光电阴极研究 [J]. 光子学报, 2014, 43(6): 155-160.
- [22] SUN Jian. Study on the characteristics of black aluminium film for TV Tubes [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1986, 20(2): 79-86.  
孙鉴. 彩色显像管黑铝膜特性的研究 [J]. 西安交通大学学报, 1986, 20(2): 79-86.

- [23] QIANG Yunsheng, CHANG Benkang, TONG Moying, et al. Frequency spectrum measurement of noise of image intensifier[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 21(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[J]. 光子学报, 2003, 21(1):67-70.
- [24] LI Xiaofeng, ZHAO Heng, CHANG Le, et al. Comparison of resolution between super Gen. II and Gen. III Image Intensifier[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0904003.  
李晓峰, 常乐, 赵恒, 等. 超二代与三代像增强器低照度分辨力的比较[J]. 光子学报, 2021, 50(9):0904003.
- [25] YAN Baojin, LIU Shulin, HENG Yuekun. Nano-oxide thin films deposited via atomic layer deposition on microchannel [J]. Nanoscale Research Letters, 2015, 10(1): 1-10.
- [26] CONG Xiaoqing, QIU Xiangbiao, SUN Jianning, et al. Properties of microchannel plate emission layer deposited by atomic layer deposition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(9): 0916002.  
丛晓庆, 邱祥彪, 孙建宁, 等. 原子层沉积法制备微通道板发射层的特性[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 0916002.

## Analysis on Factors Affecting the Maximum Gain of Super Second Generation Image Intensifier

LI Xiaofeng, DU Mulin, XU Chuanping, HUANG Lishu, CHEN Junyu, CHANG Le  
(North Night Vision Technology Co., Ltd., Kunming 650214, China)

**Abstract:** The gain of super second generation image intensifier, hereinafter referred to as image intensifier, is determined by photocathode response, gain of microchannel plate, screen efficiency and screen voltage, and is directly proportional to the product between them. The gain of microchannel plate has an exponential relationship with its operation voltage. Generally, when the operation voltage of the microchannel plate is increased by 50 V, the gain of the microchannel plate can be doubled, and the gain of the corresponding image intensifier can also be doubled. Because the photocathode response, screen efficiency and screen voltage are relatively invariant, the gain of image intensifier is mainly determined by the gain of microchannel plate, that is, by the operation voltage of microchannel plate. The higher the operation voltage of the microchannel plate, the higher the gain of the image intensifier. However, when the operation voltage of the microchannel plate is increased, under normal circumstances, only some scintillation points will appear on the fluorescent screen. The higher the voltage is, the brighter the scintillation point is. However, when the operation voltage reaches a certain value, stable output brightness will appear on the fluorescent screen, that is, the image intensifier will produce self-excited luminescence. The so-called self-excited luminescence refers to that the image intensifier can output a certain stable brightness under the condition of no input illumination. When the image intensifier produces self-excited luminescence, the contrast and resolution of the image disappear, and the enhancement of image brightness is meaningless. Therefore, the maximum brightness gain of image intensifier is limited by self-excited luminescence. The reason why the image intensifier produces self-excited luminescence is that the part of luminescence penetrates the aluminum film of the fluorescent screen and microchannel plate, reaches the photocathode, and excites the photocathode to emit photoelectrons. The photoelectron is multiplied by the microchannel plate, and finally the fluorescent screen is excited to emit light, so as to form light feedback. Therefore, light feedback is the direct cause of self-excited luminescence. The main factors affecting the light feedback are the transmittance of the aluminum film of the fluorescent screen and the photocathode response for the luminescence of the fluorescent screen. Light feedback is directly proportional to the photocathode response. The higher the sensitivity of photocathode, the easier it is to produce light feedback. For example, for Na<sub>2</sub>KSb(Cs) photocathode and Cs<sub>2</sub>Te photocathode, since the response of Cs<sub>2</sub>Te photocathode to fluorescent screen luminescence is much lower than that of Na<sub>2</sub>KSb(Cs) photocathode to fluorescent screen luminescence, the image intensifier of Cs<sub>2</sub>Te photocathode is more difficult to produce light feedback than that of Na<sub>2</sub>KSb(Cs) photocathode, so higher gain can be obtained. The light feedback is also directly proportional to the transmittance of the aluminum film of the fluorescent screen. The higher the transmittance of the aluminum film of the fluorescent screen, the easier it is to produce light feedback. Therefore, to suppress the light feedback, it is necessary to reduce the transmittance of the aluminum film of the fluorescent screen. In addition to light feedback, the signal-to-

noise ratio is also the factor limiting the maximum gain of image intensifier. Because when the inherent gain of the microchannel plate is certain, increasing the operation voltage of the microchannel plate can not affect the resolution and equivalent background illumination of the image intensifier, but can reduce the signal-to-noise ratio of the image intensifier, which is the most important performance parameter of the image intensifier. Therefore, in order to further improve the maximum brightness, gain of the image intensifier, under the conditions of certain photocathode response, screen efficiency and screen voltage, it is necessary to further improve the inherent gain of the microchannel plate and reduce the transmittance of the aluminum film of the fluorescent screen.

**Key words:** Image intensifier; Positive feedback; Microchannel Plate; Photocathode; Phosphor screen; Thermal emission

**OCIS Codes:** 040.3780; 230.2090; 060.2350