

〈微光技术〉

微通道板的离子反馈对像增强器性能升级的影响分析及改进途径探究

潘京生^{1,2}, 邵爱飞^{1,2}, 孙建宁^{1,2}, 苏德坦^{1,2}, 陆强^{1,2}

(1. 北方夜视技术股份有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 通过引入像增强器噪声因子的概念, 对几种典型的像增强器的有效量子效率进行了评比, 分析了 MCP 工作状态下由倍增电子引发的离子反馈对像增强器的影响, 说明了无论是砷化镓光阴极像增强器, 还是多碱光阴极像增强器, 要实现面向四代像增强器品质因数的性能升级, 实现低离子反馈低噪声因子 MCP 都具有同等的必要性和重要性。而通过对 MCP 玻璃成份的优化改进, 结合对 MCP 基体玻璃的晶化处理, 达到对 MCP 基体的微结构改性, 抑制产生离子反馈的有害物种在 MCP 通道内壁表面的形成, 是实现低离子反馈 MCP 的有效技术途径。

关键词: 像增强器; 微通道板; 离子反馈; 光阴极灵敏; 信噪比; 分辨力; 噪声因子

中图分类号: TN223

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2015)04-0327-06

Influence Analysis of Ion Feedback of Microchannel Plate on Image Intensifiers Performance Upgrade and Its Improvement Approach Exploration

PAN Jing-sheng^{1,2}, SHAO Ai-fei^{1,2}, SUN Jian-ning^{1,2}, SU De-tan^{1,2}, LU Qiang^{1,2}

(1. North Night Vision Tech. Corp., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract: The effective quantum availability of image intensifier for several typical image intensifier were evaluated by introducing a conception of noise factor of image intensifier, and the effect of ions feedback of MCP on performance of image intensifier is analyzed. Therefore, the realization of low ion feedback and low noise figure MCP for image intensifier performance to be upgraded to the fourth generation image intensifier merit figure is equally necessary and important for both GaAs photocathode image intensifier and multi-alkali photocathode image intensifier. The remodification of MCP substrate microstructure through the reformulation and devitrification treatment, and restricting ion poisoning resource formation within channel inner surface of MCP substrate, is an effective approach for the realization of low ion feedback and low noise figure MCP.

Key words: image intensifier, microchannel plate, ion feedback, signal to noise ratio, resolution, photocathode sensitivity, noise figure

0 引言

微通道板(MCP)使微光像增强的原理从电子加速转为电子倍增,成为第二代像增强器的标志,而在III-V族化合物砷化镓(GaAs)基底上生成 $Al_{1-x}Ga_xAs/GaAs$ 异质结构并表面蒸镀Cs:O激活形成的负电子亲和势(NEA)光阴极,是第三代像增强器的标志^[1]。但像增强器的总体性能是以品质因数而不是以代的概念来

评价^[2]。由于在三代像增强器中MCP输入面上存在的离子阻挡膜的存在,限制了砷化镓光阴极高量子效率优势的发挥,致力于在多碱光阴极上持续发展的超二代像增强器虽然在光阴极效率上与砷化镓光阴极的三代像增强器在光阴极效率上有着实质性的差距,却由于免除了离子阻挡膜的困扰,始终保持着与三代像增强器性能相当齐头并进的发展势头。

无膜MCP曾经一度受美军资助作为三代像增强

收稿日期: 2014-10-11; 修订日期: 2014-11-10.

作者简介: 潘京生(1965-),男,研高工,博士,主要研究方向为基于微通道板的成像探测器的研究。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目,编号: 61275152。

器下一步发展的目标,但由于其在可靠性上存在的不足,薄膜三代像增强器得以在提高信噪比的同时确保可靠性而最后胜出^[3-4],为此美军撤消了“无膜+选通=四代”的划定标准,鉴于铟镓砷焦平面阵列和微光CMOS在微光条件下的应用潜力和非致冷微测辐射计热成像的实用性,而转以资助可见光、近红外、短波红外和长波红外的多光谱图像融合系统的开发^[5-6],但欧洲的Photonis在多碱光阴极像增强器光阴极效率持续提高并进一步拓展近红外光谱响应范围的基础上,推出了其四代概念的Intens像增强器^[7]。

本文通过像增强器的噪声因子对几种典型的像增强器的有效量子效率进行了评比,分析了MCP工作状态下由倍增电子引发的离子反馈对像增强器噪声因子的影响,说明了无论是砷化镓光阴极像增强器,还是多碱光阴极像增强器,要实现面向四代像增强器的性能升级,实现低离子反馈低噪声因子MCP都具有同等的必要性和重要性,而通过对MCP基体玻璃成份的优化改进,结合对MCP基体玻璃的晶化处理,以达到对MCP基体的微结构改性的目的,抑制形成离子反馈的有害物种在MCP通道内壁表面上的形成,是实现低离子反馈MCP的有效技术途径。

1 像增强器的噪声因子和有效量子效率

像增强器的性能决定于其在低照度下的目标探测和识别距离,信噪比(SNR)是描述像增强器在微弱光级别得到的荧光屏图像的噪声质量的最好方式,而在一定的光照级别以上,图像质量不再决定于输入光级别和像增强器的信噪比,而是更多的决定于像增强器的分辨力和调制传递函数(MTF)^[8]。因此像增

强器的性能可由像增强器输出信噪比和极限分辨率的乘积即品质因数来评价。像增强器的输出信噪比首先决定于光阴极的量子效率,与光阴极量子效率的均方根成正比,但最终决定于贡献给荧光屏输出亮度的来自于光阴极的光电子数。由于MCP所存在损失机理和电子倍增统计分布,光阴极输出信噪比或量子效率经过MCP倍增之后受到降低和损失,这个降低和损失的程度可用像增强器的噪声因子来衡量^[9]:

$$N_f = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}} = K \frac{\sqrt{S_k}}{(S/N)_{out}} = \sqrt{\frac{QE_k}{QE_e}} \tag{1}$$

式中:(S/N)_{in}是来自光阴极输出到MCP的信号的信噪比;(S/N)_{out}是像增强器的输出信噪比,虽然荧光屏的转换和传递过程涉及进一步的统计涨落,但这些影响在高增益MCP的像增强器中可以忽略,因此(S/N)_{out}可视为来自光阴极的输出信号经过MCP倍增后输出到荧光屏的信号的信噪比;S_k是光阴极的积分灵敏度。K是与Mil-Spec.测试条件误差的校正系数,如满足Mil-Spec.测试条件,K可视为作为1。QE_k是光阴极的量子效率,QE_e是最终贡献到像增强器荧光屏上的有效量子效率。由此可通过像增强器的噪声因子对像增强器的有效量子效率进行评比。

表1列举了几种典型的像增强器的光阴极灵敏度、信噪比和分辨力参数^[4,7-8,10-12]和按式(1)计算的噪声因子。可以发现,虽然多碱光阴极的光阴极灵敏度远低于砷化镓光阴极,但三代像增强器的有效量子效率与同期技术的超二代像增强器并无实质性的差别,超二代像增强器的信噪比和品质因数并不逊于同期技术的三代像增强器。

表1 几种典型像增强器的光阴极灵敏度、信噪比和分辨力及噪声因子的比较

Table 1 Comparison of photocathode sensitivity, SNR and resolution for several typical image intensifiers

Tube Type and Manufacturer	Sensitivity 2856°K, μA/lm,	Radiant Sensitivity (Min) μA/W				SNR	Resolution lp/mm	Noise Figure
		800 nm	830 nm	850 nm	880 nm			
XD-4 (Photonis)	600~700	50~60	-	40~50	-	20~23	57~64	1.15~1.22
Gen. 3 (Omni IV)	1800	-	190	-	80	21	64	2.02
CNT-4 (NVT)	700~800	65~78	-	50~65	-	22	60~64	1.20~1.28
XR5 (Photonis)	700~800	65~78	-	50~65	-	25~28	64~72	1.01~1.06
Thin film Gen.3 (Exelis)	2000~2200	-	220	-	120	26~28	64	1.7
Unflim Gen.3 (Litton) *	2200	-	200	-	120	33	72	1.4
Intens (Photonis) **	1000	-	-	-	-	30	72	1.05

* Litton 曾经推出的无膜三代像增强器一度被其称为四代,但性能不稳定,且可靠性存在不足,后改称为无膜三代。

**Photonis 最新推出 Intens 像增强器也被其称为四代,Intens 的光谱响应范围拓展到 1000nm,但具体指标不详。

光阴极的积分灵敏度和像增强器的信噪比的测试采用的是 2856 K 钨丝白炽灯, 相同照度下, 这个光源的辐射功率仅在 400 nm~800 nm 范围与星光很相近, 在 800 nm 以上的近红外波段远低于星光的辐射功率, 如图 1 所示。而 GaAs 光阴极的光谱响应分布在近红外波段较多碱光阴极具有优势, 如图 2 所示, 因此在无月星光的 10^{-4} lx 照度下, 即使是具有同样的品质因素, 超二代像增强器的探测能力远不如三代像增强器。

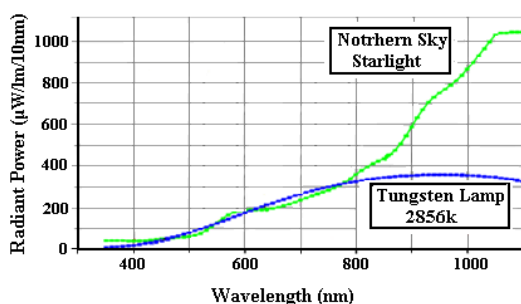


图1 星光和 2856 K 钨丝白炽灯在相同辐照度时的辐射功率的光谱分布

Fig.1 Radiant power at spectral distribution of starlight and tungsten lamp 2856 K with same irradiance

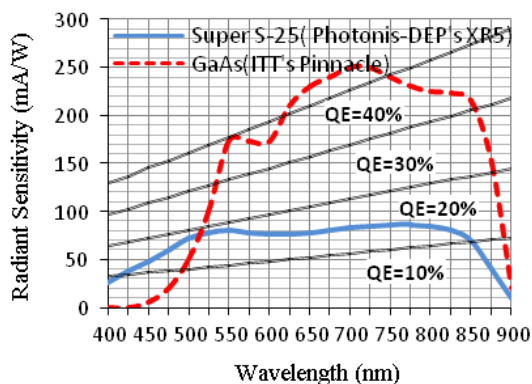


图2 薄膜三代像增强器的 GaAs 光阴极与超二代像增强器 XR5 的 Super S-25 光阴极的光谱响应和辐射灵敏度

Fig.2 Spectral response and radiant sensitivity characteristics of Pinnacle image intensifier GaAs photocathode and XR5 image intensifier Super S-25 photocathode

通过光阴极选通在一定光照度级别以上限定时间平均进入 MCP 的光电子流, 一定程度的限定 MCP 的离子反馈, 为减薄离子阻挡膜膜层厚度甚至去除离子阻挡膜提供了可能。无膜 MCP 和自动选通曾经一度被美军作为三代像增强器下一步发展目标, 但无膜 MCP 三代像增强器性能不稳定, 可靠性存在不足^[4], 通过减薄膜厚以改善离子阻挡膜的电子透射特性, 像增强器的噪声因子得以降低, 同时确保可靠性要求, 薄膜三代像增强器在提高信噪比的同时确保可靠性

而最后胜出^[5]。

Photonis 最新推出的 Intens 像增强器, 光谱响应拓展到 1000 nm, 结合其在已有的低噪声因子高分辨力 MCP 和自动选通技术的持续改进和提高, 不仅彻底扭转了多碱光阴极的响应光谱分布相比于砷化镓光阴极在近红外波段上的劣势, 使多碱光阴极像增强器在 10^{-4} lx 以下照度的无月星光环境下的探测能力得到显著的提升, 同时像增强器的高亮度分辨力达到了 57 lp/mm, 可靠性也得到了进一步的提高^[8]。Intens 像增强器全面达到甚至超越了美军当年对四代像增强器的信噪比和分辨力特特别是高亮度分辨力以及 halo 大小的要求。

北方夜视 (NVT) 在引进 XD-4 像增强器技术的基础上开发的 CNT-4 像增强器, 虽然光阴极灵敏度已经达到了 Photonis 的 XR5 像增强器的技术水平, 但无论是信噪比还是分辨力上都低于 XR5 像增强器, 说明北方夜视的像增强器在噪声因子上仍与 Photonis 的 XR5 像增强器存在一定的差距。

2 MCP 的离子反馈及其对像增强器噪声因子的影响

MCP 工作状态下, 吸附在通道内壁表面, 特别是靠近通道输出端处的, 被称为形成离子反馈的“有害物种”的残余气体分子和表面偏析的碱金属离子及其衍生的复杂成份, 受到电子倍增所形成的密集电子流的撞击, 而在通道壁上迁移、分解、电离并脱附, 并受到电场的作用, 向输入面方向漂移和加速, 形成离子反馈, 具有足够能量的离子在反馈过程中撞击通道壁, 可产生二次电子, 产生“气体”增益。在超二代像增强器中, 那些最终从通道逸出的正离子, 撞出光阴极, 不仅会形成额外的假性增益和噪声信号, 降低像增强器的信噪比, 在极端情形下甚至可影响到像增强器的分辨力。对于三代像增强器更严重的后果是反馈离子从通道逸出后与 NEA 激活层化学结合, 致使光阴极效率的迅速衰竭, 为此三代像增强器在 MCP 输入面上增加一层 Al_2O_3 的离子阻挡膜, 以有效阻止反馈离子从通道逸出, 以确保三代像增强器的可靠性要求。

三代像增强器与超二代像增强器在工作原理和结构上都无实质性的差别, 如图 3 所示, 仅仅是 NEA 的砷化镓光阴极量子效率的提高, 但为保护砷化镓光阴极不受到 MCP 工作状态下由倍增电子引发的离子反馈的伤害, 此而引入的离子阻挡膜, 却降低甚至抵消掉了砷化镓光阴极的高量子效率优势。无膜 MCP 和自动选通曾经一度作为三代像增强器下一步发展

目标,通过光阴极选通在一定光照度级别以上限定时间平均进入 MCP 的光电子流,一定程度的限定 MCP 的离子反馈,为减薄离子阻挡膜厚度提供了可能。无膜 MCP 三代像增强器也已经存在^[4],但性能不稳定,可靠性存在不足,而通过减薄膜厚以改善离子阻挡膜的电子透射特性,像增强器的噪声因子得以降低,同时确保可靠性要求,薄膜三代像增强器在提高信噪比的同时确保可靠性而最后胜出^[5]。

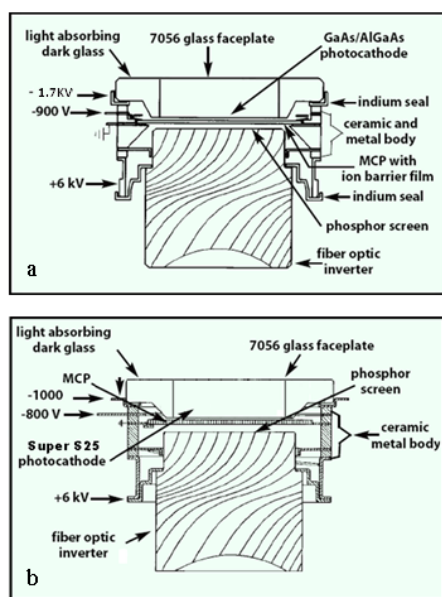


图3 三代像增强器(a)和超二代像增强器(b)结构示意图

Fig.3 Sketch of the structure of Gen.3 image intensifier (a) and Gen.2 plus image intensifier (b)

在超二代像增强器中光阴极与 MCP 间的电压和间距分别是 200 V 和 20~30 μm 左右,撞击在 MCP 通道外端壁面上的光电子,在电场作用返回后,至少有 1/3 以上可再进入相邻通道^[7],在超二代像增强器中 MCP 的探测效率远大于 MCP 的实际开口面积比。但由于离子阻挡膜的存在,三代像增强器的光阴极与 MCP 间的电压和距离分别提高到在 800 V 和 250 μm 左右,以优化电子离子阻挡膜的电子透射特性,如图 2 所示。即使减薄膜厚度后,光阴极电压仍在 650 V。虽然 Al_2O_3 的离子阻挡膜本身亦可构成一个良好的二次电子发射体,但作为一种物质的存在,离子阻挡膜不可避免的对部份来自光阴极的光电子形成散射,而那些由离子阻挡膜散射的和撞击在 MCP 通道壁外端面的光电子,在电场作用下返回后,或因能量损失而被离子阻挡膜捕获,或因反弹距离较远而进入周围较远通道^[13]。在超二代像增强器中光阴极与 MCP 间的电压和间距分别是 200 V 和 20~30 μm 左右,撞击在 MCP 通道外端壁面上的光电子,在电场作用返回后,至少有 1/3 以上可再进入相邻通道^[7],在超二代像增

强器中 MCP 的探测效率远大于 MCP 的实际开口面积比。并且,由于超二代像增强器的光阴极与 MCP 间的电压远低于三代像增强器,超二代像增强器更易于实现高速自动选通。

可见在三代像增强器中,离子阻挡膜的存在给 MCP 的探测效率和分辨力都带来了无法回避的影响。无膜 MCP 和自动选通曾经一度作为三代像增强器下一步发展目标,通过光阴极选通在一定光照度级别以上限定时间平均进入 MCP 的光电子流,一定程度的限定 MCP 的离子反馈,为减薄离子阻挡膜厚度提供了可能。无膜 MCP 三代像增强器也已经存在^[4],但性能不稳定,可靠性存在不足,而通过减薄膜厚以改善离子阻挡膜的电子透射特性,像增强器的噪声因子得以降低,同时确保可靠性要求,薄膜三代像增强器在提高信噪比的同时确保可靠性而最后胜出^[5]。

但并且离子阻挡膜仅仅是能阻止反馈离子从通道的逸出,却无法消除掉那些在通道内形成倍增回路的反馈离子的对像增强器噪声因子的影响。并且, MCP 在工作状态下由倍增电子引发的离子反馈对超二代像增强器的噪声因子也有着同样的影响,对于一个具有离子反馈的在线性工作模式下的 MCP,像增强器的噪声因子可由下式给定^[14]:

$$N_f = \left\{ \left(\frac{1 + I_d/I_s}{Q\theta} \right) \left[\frac{\lambda + 2}{\lambda} + \frac{mr\sigma(\sigma + 2)}{\lambda(1 - mr\sigma)} \right] \right\}^{1/2} \quad (2)$$

式中: I_d 是光阴极暗电流; I_s 是来自光阴极的信号电流; λ 是 MCP 的首次撞击二次发射系数; m 是 MCP 的增益; Q 是光阴极量子效率; θ 是 MCP 接受来自光阴极光电子的开口面积比。 r 是对于每一个到达 MCP 输出端的入射电子在倍增过程中所产生的回到 MCP 输出端的反馈离子的分数,这个反馈离子在反馈回路中产生一个被 MCP 增益 m 再倍增的平均为 σ 的二次电子的泊松分布,即这个 r 分数的离子在反馈回路上产生的增益为 $mr\sigma$ 。

从式(2)可以看出离子反馈导致的噪声因子的增加大大的大于由离子反馈所得到的信号增益的增加所带来的噪声因子的降低,像增强器的噪声因子随着反馈离子的增加而持续恶化。同时还可以看出一个较高值的 Q 、 θ 和 λ 对于降低噪声因子的重要性。

因此,无论是砷化镓光阴极的三代像增强器,还是多碱光阴极的超二代像增强器,要实现面向四代像增强器的性能升级,不仅要致力于光阴极效率的持续提高,以及光谱响应范围进一步向近红外波谱的拓展,同时致力于持续降低 MCP 的离子反馈和噪声因子也具有同等的必要性和重要性。虽然实现无膜 MCP

三代像增强器是可行的,但在多碱光阴极的光谱响应范围得以拓展到 1000 nm 的基础上,超二代像增强器的性能升级似乎更切实可行并易于实现。

3 实现低离子反馈 MCP 的技术途径

通过对 MCP 进行真空烘烤和电子清刷的预处理可有效减除 MCP 通道内的残余气体吸附^[15],而加强电子清刷对减除形成离子反馈的有害物种更有效,但电子清刷实际上是一种工作状态下的时间消耗老化过程,而 MCP 的增益随着电子输出的累积增加而降低。MCP 增益可近似的看作光电子在通道壁首次撞击二次发射及随后的内级联多级倍增的结果,并可以一个增益-电压的转换特性来描述^[16]:

$$G = \delta_1 \delta^{(n-1)} = \delta_1 (V/nV_c)^{k(n-1)} = \gamma \left[nV_{pk} + V/nV_c \right]^k (V/nV_c)^{k(n-1)} \quad (3)$$

式中: δ_1 和 δ 分别是光电子首次撞击和内级联每一级的二次发射产额,这里视每一级内级联倍增有相同的二次发射产额; n 为受通道长径比定性的通道长度和工作电压限定的倍增级数; V_c 是相关于通道壁材料的被称为的首次窜渡电势即单位二次发射比的最小电势; V_{pk} 是光阴极与 MCP 间的电压; γ 是对于 MCP 的有效电子接受区域比; k 为相应于在个工作电势下的通道内壁二次发射函数式 $\delta(V)$ 给定的恒量系数。

从公式(3)可以看出电子清刷导致 MCP 增益降低的一个直接后果就是二次发射函数系数 $\delta(V)$ 的相应变化,特别是 MCP 首次撞击单位二次发射比的最小电势 V_c 的提高。虽然通过提高 MCP 的工作电压 V 可使 MCP 增益得到恢复,从而满足像增强器亮度增益的要求,但不能挽回首次事件二次发射下降带来的 MCP 噪声因子的增大。

有效减少形成离子反馈的有害物种总量在 MCP 通道内壁的存在,才是有效抑制 MCP 工作状态下由倍增电子引发的离子反馈的最根本和最有效的途径。MCP 的电子倍增及由其引发的离子反馈都发生在通道内表面,因此通道的表面成份和表面状态是决定电子发射特性和性的关键。形成离子反馈的有害物种在通道内壁以物理吸附和化学吸附这两种形式存在。基于掺杂碱金属氧化物的铅硅酸盐玻璃的 MCP 基体玻璃结构本身就包含有大量的由网络断裂形成的空隙,玻璃网络断裂程度主要取决于其氧硅比和网络外体离子的种类和含量,在 MCP 的制作过程中芯皮界面网络外体离子的互扩散,以及酸蚀溶液在通道内壁表层一定深度范围内对网络外体离子的浸取所留下的粗糙表面,为气体分子的吸附留下了可观的物理空

间,而化学吸附则与 MCP 玻璃基体的碱度密切相关,玻璃基体中的碱金属离子的表面偏析并与通道内壁表面存在的气体分子或原子结合后所形成的不稳定的复杂成份则是化学吸附的主要来源。

MCP 基体玻璃中的碱金属离子自发的向表面偏析后在通道内壁表面的存在,对 MCP 的二次发射特性有着重要的贡献,但其在通道内壁表面生成的多种复杂衍生成份,在 MCP 工作状态下受倍增电子激励所引发的迁移,分解和脱附,不仅是造成 MCP 增益衰减的直接原因,同时也是形成反馈离子的主要来源。因此, MCP 通道内壁特别是内壁表面结构中的碱金属离子的稳定性,以及在倍增电子撞击下的稳定性,不仅是获得长久持续的增益的关键,也是可 MCP 可耐受电子清刷能力的主要特征。

对 MCP 基体玻璃的诱导析晶,使 MCP 基体由玻璃结构转变为包含纳米晶体和残余玻璃相的类似于玻璃陶瓷的结构,可达到对 MCP 基体的微结构改性的目的^[9,17-19]。玻璃的物化性能与其组成成份更与其网络结构紧密相关,通过 MCP 基体玻璃成份的优化改进,改善 MCP 基体玻璃结构网络的致密程度,并有效减少玻璃的碱度,同时借助于 MCP 制作的热加工过程的自然的热处理温度平台,进一步地结合对 MCP 基体玻璃的晶化处理,可改善 MCP 基体化学稳定性和机械强度,降低碱金属离子和可还原金属离子在 MCP 制作过程在芯皮界面的互扩散和随后形成的通道内壁表面的酸浸取,使 MCP 通道表面结构更为致密,以减少残余气体在 MCP 通道表面的吸附空间,更重要的是,在 MCP 基体中形成的纳米晶可使部份碱离子更为稳定的固化在基体结构中,给 MCP 带来持续稳定的高增益特性,并有效抑制形成离子反馈的有害物种在 MCP 基体玻璃中的形成。

彻底消除掉 MCP 通道壁表面上形成离子反馈的有害物种是不可能的,但通过 MCP 基体玻璃成份的优化改进,结合对 MCP 基体玻璃的晶化处理,达到对 MCP 基体玻璃的微结构改性,可有效的抑制产生离子反馈的有害物种在 MCP 基体玻璃中的形成,并在此基础上改善 MCP 的耐受电子清刷能力,以加强电子清刷强度,最大程度的减少和抑制 MCP 在工作状态下由倍增电子所引发的反馈离子总量,是实现低离子反馈 MCP 的有效技术途径。

4 结论

无论是砷化镓光阴极的三代像增强器,还是多碱光阴极的超二代像增强器,要实现面向四代像增强器的性能升级,不仅要在原有技术基础上致力于光阴极

效率的持续提高,以及光谱响应范围进一步向近红外波谱的拓展,同时致力于持续降低 MCP 的离子反馈和噪声因子也具有同等的必要性和重要性。

通过 MCP 基体玻璃成份的优化改进,结合对 MCP 基体玻璃的晶化处理,以达到对 MCP 基体的微结构改性的目的,有效抑制 MCP 基体中产生离子反馈的有害物种在通道内壁表面上的形成,同时结合电子清除气方法的改进,进一步清除 MCP 通道内形成离子反馈的有害物种总量,以及最大程度的扩大 MCP 的开口面积比,是实现低离子反馈和低噪声因子 MCP 的有效技术途径。

参考文献:

- [1] 周立伟. 微光成像技术的发展与展望[C]//母国光. 现代光学与光子学的进展——庆祝王大珩院士从事科技活动六十五周年专集. 天津: 天津科学技术出版, 2003: 316-339.
- [2] 周立伟. 关于像增强器的品质因数[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 331-337.
- [3] J. P. Estrer, T. Ostromek, A. Bacarella, Advanced Image Intensifier Night Vision System Technologies: Status and Summary 2002[C]//*Proc. of SPIE*, 2003, **4796**: 49-59.
- [4] R. Floryan, N. Devoe, T. Peck. New Image Intensifier Family for Military and Homeland Defense [C]//*Proc. of SPIE*, 2003, **5071**:397-501.
- [5] Curry D C, Harrington L K, Hopper D G. Dichoptic image fusion in human vision system[C]//*SPIE*, 2006, **6224**: 622401.
- [6] 潘京生, 孙建宁, 金戈, 等. 铟镓砷焦平面阵列在微光夜视应用中的潜力和前景[J]. 红外技术, 2014, **36**(6): 425-432.
- [7] Intens™ Image Intensifier[DB/OL]. <http://www.intensnightvision.org/>.
- [8] L. A. Bosch. Image Intensifier Tube Performance is What Matters[C]//*Proc. of SPIE*, 2000, **4128**: 65-78.
- [9] 潘京生, 吕景文, 李燕红, 等. 实现无膜微通道板第三代像增强器的可行性及技术途径探究[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0023005.
- [10] XR5™ Auto-Gated Image Intensifier Technical specifications[EB/OL]. <http://www.photonis.com/en/nightvision/75-xr5.html>.
- [11] XD-4™ Image Intensifier Technical specifications[EB/OL]. <http://www.photonis.com/en/nightvision/74-xd-4.html>.
- [12] Image Intensifier Generation 3 18-mm, MX-10160 [EB/OL]. <http://www.exelisinc.com/solutions/Image-Intensifier-Tubes/Pages/default.aspx>.
- [13] T.W.Sinor, J.P.Estrera. An Analysis of Electron Scattering in Thin Dielectric Films Used as Ion Barriers in Generation III Image Tubes[C]//*Proc. of SPIE*, 2003, **4796**: 23-33.
- [14] R.L.Bell. Noise Figure of MCP Image Intensifier Tube[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1975, **22**(10): 821-829.
- [15] 卜绍芳, 尼启良, 何玲平, 等. 极紫外波段微通道板光子计数探测器[J]. 中国光学, 2012, **5**(3): 302-309
- [16] E. H. Eberhardt. Gain model for microchannel plate[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(9): 1418-1423.
- [17] Pan Jingsheng, Lv Jingwen, S. A. Kesaev, et. al., Innovative Microchannel Plate with Reformulation of Composition and Modification of Microstructure[C]//*Proc. of SPIE*, 2009, **7384**: 738402.
- [18] S.K.Kulov, A.M.Karmokov, O.A.Molokanov, Nanoscale Inhomogeneities on the Micorchannel Plate Lead Silicate Galss Surface[J]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2009, **73**(11):1549-1551.
- [19] PAN Jingsheng, LV Jingwen, ZHANG Zhengjun, et.al. Ion Feedback Suppression for Microchannel Plate Applied to Third Generation Image Intensifiers[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2010, **19**(4): 757-762.