

文章编号: 1002-2082(2007)03-0301-04

一种显著提高三代像增强器信噪比的微通道板

潘京生, 苏德坦, 许志清, 刘术林

(北方夜视技术股份有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 鉴于离子阻挡膜保证了三代像增强器的工作寿命, 但增加了微通道板和三代像增强器的噪声因子, 降低了三代像增强器的信噪比, 削弱了NEA光阴极的优势, 提出一种最新研制的微通道板。它优化了玻璃成份, 提高了玻璃的工作温度, 同时还改善了通道内壁工作面结构, 且开口面积比达到65%~70%。通过三代像增强器制管试验证实, 这种高性能微通道板具有低噪声因子特性, 与标准MCP相比, 可显著提高三代管的信噪比。最后指出通过进一步试验和改进, 实现更高信噪比长寿命无膜三代像增强器的可能性。

关键词: 像增强器; 微通道板; 信噪比; 噪声因子; 高性能微通道板

中图分类号: TN223

文献标志码: A

High signal-to-noise ratio MCP for Gen. III image intensifier

PAN Jing-sheng, SU De-tan, XU Zhi-qing, LIU Shu-lin

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

Abstract: A new technique of MCP fabrication is proposed for overcoming the disadvantages of noise factor increase, signal-to-noise ratio decrease and NEA photocathode superiority reduction caused by the ion barrier film coated on MCP during the operation lifetime of image intensifier. With the technique, the glass composition is optimized, the operation temperature of the synthetic glass is increased, the inwall structure of the channel is improved, and the open aperture ratio reaches 65%~70%. The experiment results show that the high performance MCP can improve the secondary emission performance while the ion feedback noise is reduced. This MCP can offer an even lower noise figure performance in comparison with the standard MCP, and significantly improve the signal-to-noise ratio of Gen. III image intensifiers. Finally, it is pointed out that the further work on the MCP will make high signal-to-noise ratio and long operation life filmless Gen. III image intensifier possible.

Key words: image intensifier; microchannel plate; signal-to-noise ratio; noise figure; high performance MCP

引言

微通道板(MCP)是由数百万个规则排列的细微空心玻璃管即通道阵列熔合而成的玻璃薄片, 通道内壁覆有打拿极倍增层, 每个通道即构成一个独立的连续打拿极倍增单元。当一个具有一定能量的

电子撞击通道输入端内壁产生二次电子, 在工作电压的作用下, 引发“电子雪崩”时, 可在输出端产生几百个输出电子。

MCP的应用使像增强器(简称“管”或“像管”)发展到二代。二代管由多碱光阴极、MCP、荧光屏

收稿日期: 2007-01-17; 修回日期: 2007-02-20

作者简介: 潘京生(1965—), 男, 重庆巫山人, 高级工程师, 主要从事微通道板及熔合纤维光学元件的研制工作。E-mail: jsplan130@sina.com

组成,光阴极将接收的微弱光转换成电子并发射进入真空, MCP 对来自光阴极的电子进行倍增,最后在荧光屏上再现为可见光图像。

三代管的特征是 NEA 光阴极和带离子阻挡膜的 MCP。在镱砷光阴面上沉积 Cs:O 激活形成 NEA 层,其量子效率峰值要高出多碱阴极好几倍。但管内真空残气特别是 MCP 通道内壁残余气体分子离子化后的反馈将会破坏 Cs:O 层的化学完整性,造成光阴极灵敏度迅速衰减。为此,三代管在 MCP 的输入面上覆有一层离子阻挡膜,以提高像管的工作寿命。

超二代管出现在三代管之后,它是通过改进多碱阴极制作方法,使多碱阴极的光阴极灵敏度有大幅度提高。超二代管结构与三代管完全相同,但无需离子阻挡膜。超二代管已成为一种新的欧洲标准的像增强器,其信噪比和调制传递函数(MTF)与三代管水平相当。

信噪比和 MTF 是像增强器的 2 个重要特性,在低照度下像增强器对目标的探测与识别能力正比于其信噪比和 MTF 的乘积。提高光阴极灵敏度,降低 MCP 的噪声因子,可提高像管的信噪比^[1],而降低 MCP 的通道孔径,改进像管的近贴聚焦系统,可改善像管的 MTF。

文中介绍一种新型号的 MCP,与常规标准 MCP 相比,它可显著提高像增强器的信噪比。

1 像增强器的信噪比

信噪比被定义为像管荧光屏输出亮度的平均值与偏离平均值的噪声值的均方根之比。像管的噪声来源为光电转换、电子倍增和再转换为光的过程中的光子和光电子的统计涨落,这些噪声构成的随机函数使输出图像质量恶化。最终表现为:在低光照下,使用者可在像管连续输出图像上观察到很多随机的微小闪光,这种现象有时也被称为“雪花”或“闪烁”^[2]。闪烁机制不同,表现形式也不同。由电子数涨落引起的闪烁小而暗,而由 MCP 通道的残余气体分子离子化后反馈轰击光阴极引起的闪烁大而稀,故离子闪烁对图像的恶化程度最为严重。

在工作状态下,由 MCP 通道内残余气体分子引发的正离子反馈是 MCP 的固有特征。反馈离子碰撞通道壁,产生二次电子并再倍增,形成的“气体”增益产生假性信号噪声,更严重的是离子反馈

到镱砷阴极上时将导致光阴极灵敏度迅速衰减。三代管是在 MCP 输入面上涂敷一层薄的 Al₂O₃ 或 SiO₂ 膜,可以阻止反馈离子轰击光阴极,并改善离子闪烁噪声。

离子阻挡膜对离子和中性气体分子具有最小穿透性,同时对来自光阴极的电子具有最大的穿透性且能量损失最小,但不可避免地来自光阴极的电子造成散射且伴随有能量的损失。

按美军标测评方法,像管输出信噪比可用如下参数和关系式评价:

$$S/N_{\text{OUT}} = k \times \sqrt{\frac{S_K}{N_f}} \quad (1)$$

式中: S/N_{OUT} 为像管的输出信噪比; S_K 为光阴极灵敏度; N_f 为像管的噪声因子; k 为与美军标测试条件相对应的常数。

像管的输出信噪比与其在相应照度下的阴极灵敏度成正比。而噪声因子表征信噪比在像管各组件组成的信噪比传递链中传递时所损失的程度,代表器件对输入信噪比的传递能力。由于离子阻挡膜的存在,三代管增加了系统的信噪比传递损失,降低了 NEA 光阴极的优势。在膜厚约为 8 nm 的情况下,光阴极灵敏度为 1 800 μA/lm 的三代管与光阴极 600 μA/lm 超二代管信噪比相当^[3]。

超二代管 XD4 的光阴极灵敏度为(600~700) μA/lm,信噪比最小值为 21,典型值为 23; XR5 的光阴极灵敏度为(700~800) μA/lm,信噪比最小值为 25,典型值为 28^[4]。而美军 Omni V 的三代管光阴极灵敏度最小值为 1 800 μA/lm,信噪比的最小值为 21,典型值为 23; Omni VI 的 Pinnacle™ 薄膜三代管,光阴极灵敏度为 2 000 μA/lm,信噪比最小值为 25,典型值为 28^[5];无膜三代管的信噪比可达 27 甚至 32 以上^[6]。

2 MCP 的噪声因子

鉴于 MCP 对信号及噪声同时存在放大作用,以及离子阻挡膜的影响, MCP 的噪声因子是三代管信噪比传递损失的一个主要环节。

MCP 噪声因子由如下参数和关系式构成^[7]:

$$N_f = (D_{\text{OAR}})^{-0.5} \times \left\{ \frac{1}{\delta \times [1 + (\alpha^x / M^x)^2]} + 1 + b \right\} \quad (2)$$

式中: D_{OAR} 为 MCP 的探测效率; δ 为二次电子发

射系数; α^x 为首次电子撞击所产生的二次电子标准偏差; M^x 为MCP二次电子平均产额即增益; b 为描述二次电子发射分布状态的一个参数,涉及到离子反馈引发的假性信号增益。

MCP的探测效率由开口面积和首次撞击的二次电子产额决定。MCP的增益决定于首次撞击的二次电子产额、二次电子发射系数、通道长径比和工作电压。而首次撞击的二次电子产额除与二次电子发射系数相关外,更与首次电子能量和入射角度密切相关。

离子阻挡膜的厚度对三代管的工作寿命起着决定性的作用。离子阻挡膜的厚度可由质量厚度 ρZ (ρ 是膜的密度, Z 是物理厚度) 来表述,具体数值决定于膜层的穿透电压和阴极至MCP间的电压。在三极管中,这个电压通常为800 V(超二代管阴极至MCP间的电压为200 V)。在受到电子撞碰时,离子阻挡膜还会产生二次电子,如果膜层足够薄,将有更多的二次电子从背面(非撞击面)发射。因此,MCP接受的首次电子可分为直接穿越膜层的电子(能量较大)、非弹性背散射电子(能量离散分布)以及由背散射产生的二次电子(能量小于50 eV)^[8]。对于能量太大的首次撞击,二次电子将发生在通道壁内较深处,且逸出概率较低。对于能量太低的首次撞击,可能将无法产生二次电子。首次撞击的二次电子产额存在较大偏差。

离子阻挡膜可以有效消除离子闪烁,但仍无法避免那些具有足够能量的正离子撞击通道产生二次电子及其引发的假性信号增益的噪声。加强电子清刷,可以更大程度地清除通道内的残余气体分子,降低MCP假性信号噪声,但过度的电子冲刷将严重降低MCP的二次电子发射系数,增大MCP的噪声因子。

开口面积是决定MCP探测效率的重要参数。在三极管中,由于受离子阻挡膜和阴极至MCP间的电压距离的影响,在撞击非开口区域结构上的电子时,电子反弹后虽然受电场作用返回,但散落距离较远;还有部分能量较弱的电子因无法穿透膜层而损失,增加了MCP的噪声因子,并在一定程度上降低了三极管的MTF,形成晕轮。

带离子阻挡膜的标准三代管MCP的噪声因子通常为2.0,无膜三代管MCP的噪声因子为1.6^[9],而Pinnacle TM薄膜三代管的MCP的噪声

因子为1.7^[6]。MCP的噪声因子与其工作的状态密切相关,通常借助于像管的信噪比对MCP的噪声因子进行对比评估。

3 高性能MCP

北方夜视技术股份有限公司最新开发的一种型号规格为M25/6-1,即板径25 mm、孔径6 μm 的高性能MCP。它是一种玻璃成份优化的MCP,也有人称其为“三代MCP”,但MCP不存在“代”的概念,因此“高性能MCP”应是一个相对准确的称谓。

高性能MCP,优化了玻璃成份,改善了通道内壁成份和结构以及二次电子发射特性,减少了MCP的气体吸附,增加了开口面积。MCP的性能主要体现于增益、噪声和孔径,增益与噪声相关,噪声因子是反映MCP增益噪声特性的最佳参数。

MCP通道内壁的打拿极倍增层呈非均匀分层构造,表层为厚(10~20) nm的SiO₂发射层,二次电子逸出深度约为(3~4) nm。在表层以下(100~200) nm的还原铅粒子集聚着导电层,它为二次电子发射提供补偿电流。在发射层表面偏析的是正电性碱金属单分子层,起到降低表面势垒、提高二次电子发射的作用。以大原子序数的Cs₂O替换小原子序数的碱金属,可改善二次电子发射特性并提高耐电子冲刷能力^[10]。通道内壁纳米级粗糙起伏形貌的凹凸程度在(2~10) nm范围内,它对气体构成强烈的吸附能力,而表面偏析的碱金属离子与H₂O,酸腐蚀液和硅酸盐所形成的化合物极易吸附气体,在电子撞击时极易分解而形成放气和离子反馈^[11]。

MCP六角紧密堆集的通道阵列结构限定了纤维的最大填充系数不超过91%,并且通道壁还存在一厚度。以6 μm 通道孔径MCP为例,其通道壁厚不足2 μm ,为确保经过腐蚀除芯后通道壁的完整性,6 μm 通道孔径MCP的开口面积比通常为60%左右。

高性能MCP采用优化成份设计玻璃配方,调整了碱金属氧化物的引入种类和总量,并增加了碱土金属氧化物的引入种类和总量。这种特殊配方设计的MCP玻璃以Cs₂O作为碱金属氧化物的主要引入物,并限制了引入总量,同时增加了碱土金属氧化物MgO和CaO,特别是BaO的引入总量。这种特殊配方设计的玻璃制造的高性能MCP,可采用

高温氢还原工艺,耐500℃以上的高温烘烤且电性能稳定。玻璃中的Cs₂O可改善MCP的二次电子发射特性,特别是可耐受更大强度的电子清刷。优化的玻璃成份同时还改善了通道内壁工作面结构,使工作面表面更致密平坦,大大减小了气体吸附的物理空间,降低了MCP通道内壁对潮湿气体的吸附能力,而这种更致密的通道工作面使高性能MCP还具有易于快速去除气体的特征^[12]。为了进一步降低噪声因子,高性能MCP还采用了特殊的腐蚀除芯扩孔方法,对通道口进行多层次深扩口处理,形成台阶状的深漏斗通道口,适当扩大了开口面积,并确保了MCP结构的整体性。经过处理,高性能MCP的开口面积比达到了65%~70%。

在高性能MCP与标准MCP的超二代管制管对比试验中,高性能MCP的超二代样管在视场清晰度和离子闪烁噪声方面有着显著的改善。最近,对M25/6-1高性能MCP进行了三代管试验,与标准MCP相比,可显著地提高三代像增强器的信噪比。

4 试验结果及对比分析

对5片M25/6-1高性能MCP进行了三代管制管试验,试验发现高性能MCP显示了极好的耐存贮能力。5片M25/6-1样片经贮存一年后送交用户,用户评价这5片样片表面仍然洁净如初,而标准MCP贮存一段时间后,表面洁净程度有所下降。

在离子阻挡膜的制作过程中,高性能MCP也显示了良好的相容性,5片样品均没有发生破裂。除1片样片在检测时发现有大黑点而没有完成制管,其余均完成并通过了三代管整个制管程序。所有过程及处理方法均与标准MCP完全相同:标准的烘烤温度(340℃),标准的电子清刷剂量(0.4C,即110μAh),标准的离子阻挡膜薄层厚度,完全相同的制管条件,(1700~1800)μA/lm甚至最高可达2000μA/lm的光阴极灵敏度。标准MCP制作的三代管的信噪比通常为21~22,高性能MCP制作的三代管样管的信噪比为25。

试验验证了高性能MCP的低噪因子特性,与标准MCP相比,可显著提高三代管的信噪比。

高性能MCP的低噪声因子特征来自于其优化的玻璃成份及改善后的通道内壁成份和结构,从而减少了通道内壁的气体吸附,改善了二次电子发射特性并降低了离子反馈噪声,同时适当扩大的开口

面积也在一定程度上增加了探测效率。

5 结束语

高性能MCP具有低噪声因子的特征,耐受更高温度的烘烤除气和更大强度的电子冲刷处理等,可显著提高三代像增强器的信噪比。今后将致力于对MCP玻璃成份及制作工艺的优化改进,探究减薄离子阻挡膜膜层厚度进而彻底去除离子阻挡膜,实现长寿命更高性噪比的无膜三代管。

参考文献:

- [1] 周立伟. 微光成像技术的进展与展望[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:天津科学技术出版社, 2003:316-339.
ZHOU Li-wei. Perspectives of developments of low-light-level imaging techniques[C]//MU Guo-guang. Development of modern optics and photonics: The special compile for celebrating academician WANG Da-heng engage technology activity 65 anniversary. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2003: 316-339. (in Chinese)
- [2] 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, 1999.
XIANG Shi-ming, NI Guo-qiang. The principle of photoelectronic imaging devices [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [3] LOKTIONOV V. High technology of night vision system with image intensifiers manufacture [J]. SPIE, 2005, 5834:197-202.
- [4] Delft Electronic Products B V. The Delft Electronic Products Guide to: Image Intensifiers, Digitised Image Intensifiers, Intensified CCD's, Photon Counters [EB/OL] Dwaziewegen, Netherlands. Delft Instruments Company, 2004-09-21/[2004-10-11] <http://www/dep.nl>.
- [5] FLORYAN R, DEVOE N, PECK T. New image intensifier family for military and homeland defense [J]. SPIE, 2003, 5071:397-404.
- [6] ESTRERA J P, OSTROMEK T, BACARELLA A, et al. Advanced image intensifier night vision system technology: status and summary 2002 [J]. SPIE, 2003, 4796:49-60.
- [7] LAPRADE B N, REINHART S T, WHEELER M. A low noise figure microchannel plate optimized for Gen. III image intensification systems [J]. SPIE, 1990, 1243:162-172.