

文章编号: 1002-2082(2007)01-0016-04

一种玻璃成分优化的微通道板

潘京生¹, 苏德坦¹, 刘术林², 邓广绪²

(1. 北方夜视技术股份有限公司南京分公司 南京 211106;

2. 北方夜视技术股份有限公司西安分公司 西安 710100)

摘 要: 降低微通道板(MCP)的离子反馈噪声、提高像增强器的成像质量和工作寿命是 MCP 玻璃成分优化研究的主要目标,指出通过调整碱金属氧化物的引入种类和总量,并采用高温氢还原工艺获得一种玻璃成分得到优化的 MCP,可提高玻璃的转变温度,耐 500 ℃以上的高温烘烤且电性能相对稳定。该方法改善了通道内壁表面结构和 MCP 的耐电子冲刷能力,降低了气体吸附量且易于去除气体。文章最后给出了优化 MCP 玻璃成分所需开展的工作;在玻璃成分优化上增加 SiO₂ 的引入量,调整芯皮玻璃的温度粘度匹配及酸溶速率比,以及开展体导电玻璃 MCP 和硅 MCP 的研究。

关键词: 微通道板;玻璃成分优化;离子反馈;像增强器

中图分类号:TN233

文献标志码:A

Microchannel plate with optimized glass composition

PAN Jing-sheng¹, SU De-tan¹, LIU Shu-lin², DENG Guang-xu²

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

2. Xi'an Branch, North Night Vision Technology Corp. Ltd., Xian 710100, China)

Abstract: Glass composition of microchannel plate (MCP) is optimized to reduce the ion feedback noise of MCP and to improve the image quality and lifetime of image intensifier. The MCPs with optimized glass composition were fabricated by introducing different types and amounts of alkaline-metal oxide as well as adopting high-temperature hydrogen reduction technique. The transfer temperature for the glass is increased; it could be baked at the temperature of over 500 ℃ and remains stable in electrical performance. The result shows that the internal surface structure of the channel is improved, MCP's resistance to electron scrub is enhanced, and the gas absorbing is decreased. At last, the further research is proposed.

Key words: microchannel plate; glass composition optimization; ion feedback; image intensifier

引言

微通道板(microchannel plate, MCP)是由可多达数百万个规则紧密排列的细微空心玻璃管组成的通道式电子倍增器件,是用铅硅酸盐玻璃的表面还原特性和良好的熔合光纤加工制造的。MCP 通道内壁表面呈纳米级的粗糙起伏形貌,凹凸程度

在 2 nm~10 nm 范围,因此对气体构成强烈的吸附能力。表面偏析的正电性碱金属离子不仅可起到降低表面势垒的作用,而且对二次电子的发射有改善和提高作用^[1-2]。另外,碱金属离子与 H₂O, H₂ 和 Si 形成的化合物也易于吸附气体,并且受电子撞击时易分解而形成正离子反馈^[3]。在工作状态

收稿日期:2006-10-18; 修回日期:2006-11-20

基金项目:总装预研项目(40405050101B)

作者简介:潘京生(1965—),男,重庆巫山人,北方夜视技术股份有限公司南京分公司高级工程师,主要从事 MCP 及熔合纤维光学元件的研制工作。E-mail:jspan130@sina.com

下,吸附在通道内壁(接近输出面端口处)的残余气体分子在受到大电流密度的电子流撞击时会电离成正离子,并受到电场的吸引而向输入面方向漂移和加速,形成离子反馈。其中获得足够能量的正离子在撞击通道内壁时还会产生二次电子,形成的假性信号反馈到光阴极时将在光阴极产生电子发射。更严重的是在三极管中,有害气体的离子反馈将造成光阴极灵敏度迅速衰减^[4]。为此,三极管采用一层 SiO₂ 膜或 Al₂O₃ 膜来阻绝 MCP 的离子反馈,以承受 550 ℃ 以上高温真空烘烤除气和更严格的电子清除除气的要求,从而有效保证和提高砷化镓光阴极的工作寿命,并使三极管的离子反馈闪烁噪声达到很小^[5]。

电子清除是清除 MCP 吸附气体的有效手段,但清除过程中大电流密度的电子撞击易造成通道内壁表面偏析的碱金属离子电迁移和电子激励脱附,而内壁表面碱金属离子的减少将造成增益的降低。通过引入大原子序数的碱金属氧化物,改善碱金属离子的耐电子撞击能力,提高 MCP 的工作寿命并改善耐电子冲刷能力^[6]。甚至有人提出利用无碱金属的碱土金属铅硅酸盐玻璃制造 MCP 的想法^[7]。原因是引入 BaO, MgO 和 CaO,可改善 MCP 因电子冲刷造成的增益下降幅度^[8]。

2 优化玻璃成分的光阴极 MCP

最早用于制作 MCP 玻璃的有 CWG8161, Philips3502 和 C78-2,目前这 3 种玻璃仍广泛用于制造 MCP,但不排除做了有限的成分调整。后来出现了 Galileo 的 MCP10 玻璃^[9]和 Litton 的高性能玻璃 NV30P^[10]。MCP10 玻璃以 Cs₂O 和 Rb₂O 作为碱金属氧化物,它使玻璃的软化温度有了相应的提高。由这种玻璃制作的长寿命 MCP 具有持续稳定的增益和长寿命特征^[7]。高性能玻璃 NV30P 同样采用引入 Cs₂O 和 Rb₂O 及进一步减少引入总量方法,并增加了 Bi₂O₃ 尤其是碱土金属氧化物的引入。这不仅使玻璃的软化温度大大提高,而且氢还原工作温度在 500 ℃ 以上。利用这种玻璃制作的 Litton 高性能 MCP 被证明具有通道内壁清洁和易于除气的特点,可显著提高三极管的工作寿命^[11]。

平滑致密洁净的通道内壁表面是降低气体吸附量并易于去除的关键;提高玻璃软化温度是拓展 MCP 耐高温烘烤能力并有效清除吸附气体的重要途径;而引入大原子序数的碱金属氧化物和多种碱土金属氧化物,可改善 MCP 耐受电子清除的能力。

另外,针对热加工过程中芯皮组份相互渗透,皮玻璃表层的网络外体离子(碱金属离子、铅离子和碱土金属离子)迁移造成的一些网络结构的断裂、酸蚀过程中皮玻璃表面网络外体离子的溶出、氢还原过程中玻璃可还原金属离子的还原集聚和蒸发以及碱金属离子向表面偏析,这些均是通道内壁粗糙凹凸形貌形成的根本原因。

优化成分的 P3 玻璃(见表 1 所示)采用以 Cs₂O 为主的碱金属氧化物,通过引入 PbO, Bi₂O₃ 和 Sb₂O₃,增加多种碱土金属氧化物的引入和引入量,提高了玻璃的转变温度。采用高温氢还原工艺, MCP 可耐 500 ℃ 以上的高温烘烤,保持电性能的相对稳定且不发生变形,改善了通道内壁表面结构和 MCP 的耐电子冲刷能力,降低了气体吸附量且易于去除。

表 1 2 种皮玻璃的组分(mol%)及特性参数

Table 1 Composition (mol%) and properties of two tube glasses

Oxide	P1	P3
SiO ₂	73	63
B ₂ O ₃	—	2.5
(Na ₂ O+K ₂ O) or (Rb ₂ O+Cs ₂ O)	10	3
(CaO+MgO+BaO) or BaO	1.5	15.5
PbO+Bi ₂ O ₃ +Sb ₂ O ₃	13	13.4
Al ₂ O ₃	1.5	0.7
P ₂ O ₅	—	0.4
As ₂ O ₃	0.1	0.1
$\alpha_{0\sim 300\text{C}}(10^{-7}/\text{C})$	81	70
T _g (C)	440	560
T _f (C)	490	590
T _{7.6} (C)	649	760

由于碱金属氧化物和可还原金属氧化物相对总体含量较低,玻璃的粘度将大大增加,这给玻璃的熔制成型以及与酸溶芯玻璃的适配带来困难。通过引入 BaO 和 CaO 来降低玻璃的高温粘度,使玻璃更易于熔制,并维持玻璃较高的转变温度和软化温度。此外,通过在皮玻璃中引入适量的 BaO 降低芯皮玻璃在纤维熔合过程中发生的互渗透。

碱土金属离子与碱金属离子虽同样具有较低的表面功函数和较高的二次电子发射系数,但引入较大的碱土金属氧化物会给玻璃的熔制成型及 MCP 制作带来一系列问题。在玻璃中引入适量的 B₂O₃ 可改变玻璃的温度-粘度关系,在铅硅酸盐玻璃中引入相对微量的 P₂O₅,可适当减轻 Pb²⁺ 在酸溶液中的溶出量^[12]。

总之,碱金属氧化物、可还原金属氧化物、碱土金属氧化物和玻璃组成体氧化物的含量配比要做到综合评判和权衡。一方面要考虑功能性的设计,同时还要考虑玻璃的熔制与成型方面的要求。

玻璃中碱金属、铅和碱土金属组分在酸溶液中溶出量的大小依次为 $R^+ > Pb^{2+} > R^{2+}$ 。P3玻璃虽大量增加了碱土金属氧化物的引入量,但在 SiO_2 的引入总量上仍较P1玻璃低。由于碱金属氧化物的引入量的降低,耐酸性和碱性都较P1玻璃均有所加强。P3玻璃软化温度大幅度提高需要相应的高软化温度的酸溶芯玻璃适配。X-7玻璃通过在硼酸盐玻璃中引入多种二价碱土金属氧化物和三价镧系元素氧化物,与P1玻璃采用的芯玻璃X-5相比,软化温度有大幅度提高(见图1所示),但酸溶速率却出现相应程度降低。

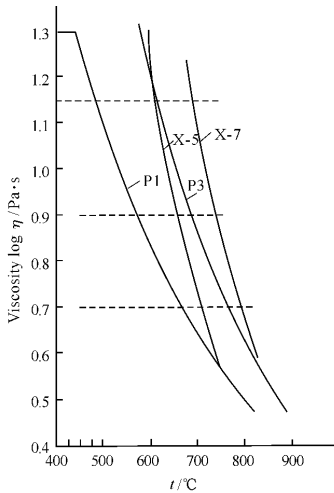


图1 P3/X-7与P1/X-5玻璃的温度-粘度对应关系曲线
Fig. 1 Corresponding relationship curves of viscosity vs temperature for P3/X-7 and P1/X-5 glasses

纤维拉制温度主要取决于芯玻璃粘度,其值大概在 10^6 Pa·s的温度附近,这要求皮玻璃此时的粘度应稍低于芯玻璃,但相差不能太大。熔合温度主要取决于皮玻璃的粘度,在一定的温度压力下,通过皮玻璃的粘滞移动填充纤维空隙,芯玻璃承担骨架作用。熔合温度一般在皮玻璃粘度值 10^8 Pa·s附近,而芯玻璃此时的粘度应高于玻璃的变形点($10^{10.4}$ Pa·s)。从图1可以看出,在熔合温度范围内,P3/X-7玻璃与P1/X-5玻璃相比,前者的芯皮玻璃粘度差明显小于后者,因此P3/X-7的熔合温度范围较窄。

P3/X-7玻璃酸溶速率相差1 000倍,而P1/X-5玻璃酸溶速率相差2 000倍,这是由于X-7的酸溶速率是X-4的1/4,因此需要大大增加酸蚀除芯时间。总体来讲,P3玻璃较P1玻璃的耐酸性有较大增强,可适当采用酸碱交替使用的方法对通道进行深扩孔处理以适当增加开口面积比。

P3玻璃的氢还原温度为 $500\text{ }^\circ\text{C} \sim 540\text{ }^\circ\text{C}$,该值较P1玻璃提高了 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 。小通道孔径MCP在氢还原后易产生翘曲变形,主要原因是通道内壁对环境潮湿气体及水分的强烈吸附所致。氢还原后干燥的通道内壁在遭遇环境中潮湿气体及水分时形成强烈吸收,促成玻璃基体快速膨胀,而实体边对水分及潮湿气体不吸收且不发生膨胀。对于板体强度较弱的小通道孔径厚度减薄的MCP,由此极易引发翘曲变形甚至板体破裂。

由P1玻璃制作的M25/6MCP(板径 $\Phi 25$ mm,有效区直径 $\Phi 18$ mm,通道孔径 $6\text{ }\mu\text{m}$),当其厚度由 $0.30\text{ mm} \sim 0.35\text{ mm}$ 减薄到 0.30 mm 以下时,氢还原后变形几率很高。由P3玻璃制作的M25/6-1高性能MCP(板径 $\Phi 25$ mm,有效区直径 $\Phi 18$ mm,通道孔径 $6\text{ }\mu\text{m}$),厚度为 $0.28\text{ mm} \sim 0.32\text{ mm}$ 时,氢还原后变形几率很小。我们曾对通道孔径为 $5\text{ }\mu\text{m}$,厚度为 0.27 mm 的P3玻璃进行过试验,发现氢还原后变形的概率较低。由此可以看出,P3玻璃构成的MCP,通道内壁表面上有更致密的结构,具有对潮湿气体或水汽的低吸附性特征。

3 试验与分析

3.1 性能测试

对用P3玻璃制造的M25/6-1高性能MCP和P1玻璃制造的M25/6MCP,使用MCP综合性能测试仪进行综合性能测试对比,发现在增益平稳性、均匀性及闪烁方面均有出色表现。但P3玻璃的MCP存在“离子反馈自再生”现象。在 10^{-5} Pa的测试环境下,以较大的电子流输入并将工作电压加大到 $1\text{ }200\text{ V}$,使MCP处于一个相当大的电流输出状态,然后关掉电子流输入,荧光屏的亮度仍将保持相当时间,即此时MCP仍持续不断有电流输出,而P1玻璃MCP则没有这种现象。

离子反馈自再生产生的原因是高工作电压和大电流输入时,MCP吸附近通道输出端的残余气体分子电离脱附产生的离子反馈。反向运动撞击通道内壁产生的二次电子发射再次在通道输出端造成残余气体电离脱附,形成再次的离子反馈。当电

流输入停止时,这种由离子反馈产生的电流输出可以自我维持相当的时间。长寿命MCP在一定条件下也存在有离子反馈自再生,这种现象可用于MCP的电压冲刷除气^[13]。

离子反馈自再生虽不能排除通道内壁吸附的较多残余气体,但可方便地去除掉通道内壁吸附的气体。而增益的平稳性、均匀性、闪烁和变形等方面的明显改善,说明P3玻璃MCP具有快速除气的特征。

3.2 超二代管与三代管制管试验

在真空烘烤电子冲刷处理过程中,与M25/6MCP相比,M25/6-1高性能MCP放气量较大。这个现象再次验证了P3玻璃MCP具有快速除气的特征。

在分辨力和信噪比性能参数上,M25/6-1高性能MCP与M25/6MCP试验样管处于相当水平,P3玻璃的MCP增益较好(见表2所示)。特别在增益均匀性与闪烁方面,P3玻璃的MCP有着显著优异的表现:视场清晰,亮度平稳,闪烁小,视觉舒适度好,眼睛疲劳感降低。而这些表现正是MCP在工作状态下通道内壁清洁度高和离子反馈小的特征,说明P3玻璃的MCP经过烘烤和电子冲刷后,通道内壁残余气体吸附量少,工作状态下的离子反馈减少,因此在像增强器的视场清晰度上有很好的性能表现。

表2 P3玻璃MCP在超二代管制管试验中的主要性能

Table 2 The primary performances of P3 glass MCPs in test of Super Gen. II tube

MCP 编号	电阻/MΩ		电子增益	分辨率 /lp(mm) ⁻¹
	前	后		
2003/06/27	94	108	624	60
2003/08/13	111	123	453	60
2004/06/15	102	126	519	57
2004/06/19	111	135	618	57
2004/06/39	101	139	575	60

注:表中电子增益是指制管工艺中,MCP在380℃真空烘烤12h和33μAh电子冲刷后外加800V时的增益。电阻前、后系MCP在处理前后的电阻。

在三代管试验中,对P3玻璃的MCP进行了耐受500℃以上长时间真空烘烤试验,不发生变形和破裂,烘烤后电阻及增益变化满足正常要求范围。

4 有待进一步研究的工作

玻璃成分优化的MCP在超二代像增强器和三

代像增强器的试验上显出了一定的优势,但在玻璃成分优化上,需通过适当增加网络形成物SiO₂的引入量,进一步提高玻璃结构致密度;此外还适当改善芯皮玻璃的温度-粘度匹配及酸溶速率比,以改善P3玻璃MCP的工艺制造性能。

从美国Litton公司1992年宣布的“使用高性能MCP显著地提高像增强器的工作寿命^[11]”,到2000年该公司实现NV30P玻璃的“长寿命四代像增强器用无膜MCP^[14-15]”看,我们应加强硅MCP和体导电玻璃MCP的研究,这些新材料新技术的MCP也许会给我们带来全新的突破^[16]。

参考文献:

- [1] HILL G E. Secondary electron emission and compositional studies on channel-plate glass surface[J]. Adv Electron Phys, 1976, 40A:153-165.
- [2] ARTAMONOV O M, SATTAROV D K, SMIRNOV O M, et al. Slow-electron spectroscopic study of reduced lead silicate glasses [J]. Fizikai Khimiya Stekla, 1981, 7 (4):470-476.
- [3] KULOV S K, KESAEV S A, BUGULOVA I R, et al. Quality of microchannel plates working surfaces[J]. SPIE, 2005, 5834:203-206.
- [4] 徐江涛. 真空残气对GaAs阴极发射性能的影响[J]. 应用光学 2003, 24(2):13-15.
XU Jiang-tao. Effect of residual gas on emission property of gallium arsenide cathode in vacuum[J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24(2):13-15. (in Chinese)
- [5] 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,1999:272-274.
XIANG Shi-ming, NI Guo-qing. The principle of photoelectronic imaging devices [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 272-274(in Chinese)
- [6] THEN A M, PANTANO C G. Formation and behavior of surface layers on electron glassed [J]. J Non-Crystal Solids, 1990, 120:178-187.
- [7] FINE G J. Alkali-Free multichannel plate and glass: U S, 5034354[P]. 1991-07-23.
- [8] UCHIYAMA, TOSHIYUKI, SUGAWARA, et al. Process of how to fabricate the microchannel plate: U S, 4629486[P]. 1986-11-16.
- [9] THOMAS J L. A glass composition: UK, GB 2120232[P]. 1982-05-17.
- [10] WILLIAM J S, WILLIAMS J A. Glass composition and method for manufacturing a high performance (下转第32页)