

文章编号:1002-2082(2006)06-0552-06

低噪声、高增益微通道板的研制

刘术林¹, 李翔², 邓广绪¹, 潘京生³, 苏德坦³, 严诚¹, 李军国¹

(1. 北方夜视技术股份有限公司 西安分公司, 西安 710100; 2. 信阳职业技术学院 机电化工工程系, 河南 信阳 464000; 3. 北方夜视技术股份有限公司 南京分公司, 南京 210006)

摘要: 降低微通道板噪声和增加其电子增益是改善微光像增强器信噪比、视场清晰度和亮度增益最好的技术途径之一。采用具有高而且稳定的二次电子发射系数的皮料玻璃和与皮料玻璃的热物理性能相匹配且化学腐蚀速率比皮料大4个数量级的芯料玻璃以及与两者在一切工艺过程相匹配的实体边玻璃,通过优化实体边实芯工艺制作出的高性能微通道板,其暗电流密度小于 $5 \times 10^{-13} \text{ A/cm}^2$,固定图案噪声和闪烁噪声明显降低;在真空系统中,经 $40 \mu\text{Ah}$ 电子清刷后,电子增益(800 V)大于500。制管实验表明:这种微通道板达到了预期效果。

关键词: 微通道板;噪声;暗电流密度;电子增益;视场清晰度

中图分类号:TN223

文献标志码:A

Development of low-noise, high-gain microchannel plate

LIU Shu-lin¹, LI Xiang², DENG Guang-xu¹, PAN Jing-sheng³,
SU De-tan³, YAN Cheng¹, LI Jun-guo¹

(1. Xi'an Branch, North Night Vision Technology Co. Ltd(NNVT), Xi'an 710100, China;

2. Xinyang Professional and Vocational College, Xinyang 464000, China;

3. Nanjing Branch, NNVT, Nanjing 210006, China)

Abstract: To reduce the noise and increase the electron gain of microchannel plate (MCP) is one of the best solutions to improve the signal-to-noise ratio, FOV definition and brightness gain for image intensifiers. The high performance MCP was fabricated by adopting the clad glass which has high and stable secondary emission coefficient, the core glass which matches the thermal physical property of the clad glass, but its etch rate is 4 orders greater than that of clad glass, and the border glass which matches the clad glass and core glass in the whole manufacture process. The MCP fabricated with this optimized technique shows better performance, its dark current density is less than $5 \times 10^{-13} \text{ A/cm}^2$, its fixed pattern noise and scintillating noise are significantly reduced. After it is scrubbed by electrons of $40 \mu\text{Ah}$, its electron gain(800 V) is greater than 500 in vacuum system. The experiment results indicate it meets the expectation.

Key words: microchannel plate; noise; dark current density; electron gain; FOV definition

引言

国防科学技术的发展推动着微光夜视器件和技术的发展。微光夜视技术发展的总趋势是向着低

噪声、高增益、宽光谱响应、高分辨率、大动态范围、小型化、固体化的方向前进。而在二代及其以上的微光像增强器中,微通道板起着放大来自光电阴极

收稿日期:2006-03-24; 修回日期:2006-06-21

基金项目:“十五”兵器预研项目(40405050101B)

作者简介:刘术林(1963—),男,河南光山县人,北方夜视技术股份有限公司西安分公司高级工程师,主要从事光电器件及其工艺技术研发工作。E-mail:nj@nvt.com.cn

的二维光电子图像的作用,如图1所示。其电子增益的高低、孔间距的大小、噪声的高低、视场质量的好坏将直接影响着微光像增强器的亮度增益、分辨率、信噪比和视场质量。围绕上述总体技术要求,考虑到制造微通道板的材料和工艺的自身因素,我们研制出的皮料玻璃材料具备较高而且稳定的二次电子发射系数、较低的膨胀系数以及较高的转变点和软化点,其化学腐蚀速率在 10^{-2} mg/cm²h数量级;研制出的芯料玻璃的热物理性能指标与皮料玻璃相匹配,且化学腐蚀速率在几十个mg/cm²h数量级;新设计的实体边玻璃及其工艺不仅全程与制板工艺相匹配,而且在随后的500℃真空烘烤2小时均不变形。由此材料和工艺制造出的微通道板,其暗电流密度小于 5×10^{-13} A/cm²,固定图案噪声(网络、网格或称之为鸡丝)和闪烁噪声明显降低;在真空系统中,经真空烘烤和40 μAh电子清刷后,电子增益(800 V)大于500,经超二代制管工艺处理后,分辨率大于57 lp/mm,具有良好的视场清晰度。

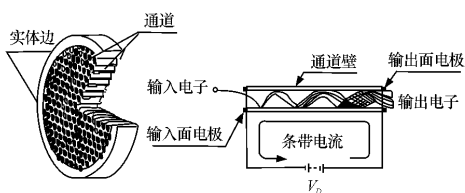


图1 微通道板及其实现电子倍增的原理

Fig. 1 Microchannel plate and its electron multiplier mechanism

1 材料的设计思路和研制途径

我们沿着实体边实芯工艺的技术途径来研制高性能微通道板。由此涉及到的微通道板材料有:形成通道壁及通道之间的皮料玻璃、在制板前期确保通道质量并在随后工艺中腐蚀掉的芯料玻璃及在有效区外的实体边玻璃。为了确保最终研制出的微通道板满足用户要求,设计并制造出好的微通道板材料至关重要。

1.1 皮料玻璃材料的设计、研制途径及拉管工艺

皮料玻璃成分、熔炼工艺以及拉制出玻璃管的尺寸精度及质量将影响微通道板的电子增益、噪声、寿命、耐真空烘烤温度和电子清刷剂量,甚至间接影响微观结构的规整性和视场质量。材料设计还

必须考虑以后批量生产的熔炼、拉管和制板工艺的全过程。因此,皮料玻璃成分的设计必须满足上述各因素的要求。为了提高微通道板的电子增益,设计出的皮料玻璃的二次电子发射系数的峰值应该比较大而且稳定,故皮料玻璃中必须含有碱金属或碱土金属氧化物,而原子半径小的碱金属氧化物,诸如Li₂O, Na₂O和K₂O,在形成玻璃后,其碱金属离子在高温除气处理或长时间电子清刷后容易移动或挥发,从而使得通道壁的二次电子发射系数降低,进而导致微通道板的电子增益下降。我们在皮料玻璃成分设计中,引入了碱金属氧化物Rb₂O, Cs₂O和碱土金属氧化物MgO, CaO和BaO,考虑到最终要在微通道内壁形成半导体层,故在成分设计中适当引入PbO和Bi₂O₃,以保证皮料玻璃在氢还原过程中还原出部分Pb和Bi,确保二次电子的补充。另外,引入SiO₂和Al₂O₃,通过它们及上述各氧化物来调整玻璃的膨胀系数、软化点和转变点以及抗酸、碱的化学腐蚀。为了确保玻璃易于熔炼,在配方设计中还得引入少量的As₂O₃和Sb₂O₃,便于玻璃的澄清。当然,在调整配方过程中,应当充分考虑随后的熔炼、成型和制板工艺处理的可实施性,即考虑玻璃的料性、析晶性能等因素。

为了确保设计的玻璃能够达到最终使用效果,熔炼工艺至关重要。在原材料的引入上,通过控制好碳酸盐和硝酸盐的比例,确保熔炼气氛在弱氧化气氛中,化料温度、澄清温度、搅拌速度和时机等都要仔细设计。考虑到这种玻璃的熔炼温度在1 280℃~1 360℃范围内,PbO的挥发必须先考虑到,特别注意Bi₂O₃的活性,它的微小变化对最终产品的电阻有较大影响。

一种理论认为,高软化点皮料玻璃经高温氢还原处理后,微通道板能够耐高温真空烘烤和大剂量的电子清刷,进而能够有效改善微通道板的寿命,而满足上述各种因素的皮料玻璃,其料性变短,成型相对困难,手工拉管技术难度大,一致性变差。我们通过2种技术途径来解决皮料玻璃管的拉制:其一是将熔炼后的玻璃浇铸成玻璃砣,经退火后,再置于挤压拉管炉内,当温度达到软化点以上某一温度后,通过上挤下拉的工艺,将玻璃砣拉成玻璃管;另一技术途径是直接拉制好的玻璃液浇到拉管炉内,待温度降至软化点以上的某一温度后,通过上挤下拉工艺,直接拉制出玻璃管。

考虑到我们的皮料玻璃所含 PbO 占质量百分比的 20%~30%,用铂金坩埚直接化料风险较大,我们考虑先用粘土坩埚或石英坩埚实施一次化料,能手工拉制出玻璃管更好,拉不出的玻璃渣用铂金坩埚实施二次化料,再通过上述 2 种途径拉制出玻璃管。2 种化料方式和 3 种拉管工艺所拉制的皮料

玻璃管,都能够制作出合格的高性能微通道板。只是二次化料直接浇料拉管的综合效率和一致性较好。表 1 为我们设计定型的 2 种皮料玻璃的一次化料和二次化料后的热物理性能参数。

表 1 中,P03 和 P05 是我们研制的 2 种皮料玻璃,后缀“-1”和“-2”分别为一次化料和二次化料的

表 1 玻璃材料热物理性能测试一览表

Table 1 Measured data for thermophysical performance of glass material

性能 样品	膨胀系数 ($1 \times 10^{-7} / \text{C}$)						转变 点/ $^{\circ}\text{C}$	软化 点/ $^{\circ}\text{C}$
	室温~120	室温~300	100~200	200~300	300~400	400~500		
P03-1	66.8	75.6	78.2	81.7	78.2	79.8	590	640
P03-2	62.8	69.9	73.5	74.0	75.5	75.1	601	655
P05-1	70.0	76.0	78.0	81.0	83.0	83.3	595	630
P05-2	60.1	67.0	68.6	75.1	72.6	71.1	578	638
X-6	63.6	74.3	81.0	83.5	86.0	89.6	652	696
X-7	66.3	76.3	78.0	80.5	83.0	85.7	679	712

测试结果。为了便于比较,我们将芯料玻璃的性能也列入表中。

1.2 芯料玻璃材料的设计、熔炼和成型工艺

在制作微通道板的实体边实芯工艺中,芯料玻璃主要是在拉单、复丝和熔压工艺中起到支撑作用,确保微通道阵列的规整性和各个通道本身的圆度。而在形成通道的过程中,将通道内的芯料腐蚀掉。这就要求芯料玻璃的热物理性能与在化学腐蚀工艺之前的所有工艺相匹配,而化学腐蚀速率要比皮料玻璃至少低 3 个数量级。为此,我们设计的玻璃配方以钽钼硼酸盐玻璃为主,使其转变点接近或高于皮料玻璃的软化点,而在高温区,以其膨胀系数略高于皮料玻璃为出发点。表 1 中的 X-6 和 X-7 为我们设计定型的 2 种芯料玻璃,它们都能很好地与表中任意一种皮料玻璃相匹配。表 2 为所设计的皮、芯料玻璃的化学腐蚀速率,测试的条件是 1 M 的盐酸溶液,温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。这种玻璃熔炼比较困难,熔化温度高,澄清时间长,料性短,在浇铸玻璃棒时,一定要掌握玻璃的粘度和时机。

表 2 玻璃材料的化学腐蚀速率

Table 2 Chemical etch rate of glass material

材料 参数	P03	P05	X-6	X-7
化学腐蚀速率 ($\text{mg}/\text{cm}^2\text{h}$)	0.016	0.030	58.460	36.850

1.3 实体边玻璃材料的设计及相关工艺技术

对于孔径小、厚度薄并使用于近贴聚焦像增强

器之中的高性能微通道板,实体边的作用不仅可以提高微通道板的机械强度,而且便于真空排气和降低放电打火的风险。设计出的实体边玻璃要保证在熔压工艺、光学冷加工、化学腐蚀过程中不炸裂,在氢还原和制管工艺的高温真空烘烤中不变形,其技术难度大。我们采取 2 种工艺技术途径来制作实体边。起初是采用皮料玻璃管套抗腐蚀的芯料棒通过拉单、复丝、排丝等工艺来实施的。我们在本项目的研制早期是按照该设计思想进行的,当时研究了 2 种实体边芯料 R0 和 R1(主要技术指标如表 3 所示),并与皮料管 P03 配套使用。从使用效果来看,P03/R0 所做的实体边在 540 $^{\circ}\text{C}$ 氢还原处理时,就有部分微通道板变形;即便是不变形的,在随后的 500 $^{\circ}\text{C}$ 真空烘烤过程中,绝大部分变形;而由 P03/R1 所做的实体边全部通过高温氢还原处理,但在随后的 500 $^{\circ}\text{C}$ 真空烘烤过程中,还有部分变形。这一思想迫使我们不断提高实体边芯料的软化点来解决之。事实上,在确保上述技术条件的前提下,单方面提高软化点的工艺技术难度极大。我们试图从玻璃材料的应力形成机理出发,寻求不同玻璃在热处理后应力消除的范围和条件,预示采用单一材料作为实体边的可能性存在,从现有牌号玻璃中,按照我们的技术分析思路,遴选几种玻璃(其主要性能如表 4 所示),直接加工成六棱柱,用一次拉丝代替原来的皮套芯二次拉丝工艺来彻底解决因实体边不合适而导致的真空烘烤变形问题。这些单一材料

必须满足我们工艺过程的一切要求,即热物理性能必须全程匹配,化学腐蚀速率越低越好,最终在500℃及其以上真空烘烤过程中不变形。我们的这种方法经查询尚未见到相关报道,业已申请一项发明专利。

表3 实体边的芯料玻璃主要技术指标

Table 3 Technical data of core glass of rim material

样品编号	膨胀系数 ($\times 10^{-7}/\text{C}$) (室温~120℃)	膨胀系数 ($\times 10^{-7}/\text{C}$) (室温~300℃)	转变点 /℃	软化点 /℃	化学腐蚀速率 ($\text{mg}/\text{cm}^2\text{h}$)
R0	70.3	75.7	664	698	0.023
R1	64.5	76.4	682	719	0.013

表4 单一材料的实体边材料主要性能指标

Table 4 Main technical data of rim material consisted of one kind of glass

性能 材料	膨胀系数 (20℃~300℃)	转变点 /℃	软化点 /℃	抗酸碱 腐蚀性	所匹配 的材料	到目前止 实用效果
R8	70.3	596	632	Ⅱ级	P03/X-7	好
R9	63.4	617	632	Ⅲ级	手拉管	一般
R10	68.7	652	687	Ⅱ级	P05/X-5	一般
R11	69.4	606	650	Ⅱ级	全匹配	相当好
R12	70.6	621	663	Ⅱ级	全匹配	好

2 高性能微通道板制作工艺

高性能微通道板实体边实芯工艺具体流程:

皮料玻璃一次化料——二次化料——机械拉管——退火——刻槽——清洗
 芯料玻璃熔炼——制棒——退火——研磨、抛光——刻槽——清洗
 实体边玻璃熔炼——制棒——退火——研磨、抛光——刻槽——清洗
 排复丝棒——拉复丝——选复丝——排板(排屏)——压板——切片——滚圆——倒边——磨、抛——清洗——检验——清洗——腐蚀——清洗——烘干——氢还原——镀电极——检验——测试——包装——与制管工艺兼容性试验。

对于涉及到降低噪声、提高电子增益和分辨率、改善视场清晰度的工艺技术途径,现分别加以讨论。

2.1 进一步降低噪声的工艺技术途径

能够准确而又恰当描述微通道板噪声性能的技术指标的是微通道板的噪声因子,其表达式为

$$NF = (D_{OAR})^{-0.5} \{1/\delta [1 + (\alpha^X/M^X)^2] + 1 + b\} \quad (1)$$

式中: D_{OAR} 为MCP的探测效率; δ 为材料的二次电子发射系数(有人认为是首次碰撞时的二次电子发射系数); α 为增益的标准偏差; M 为增益的平均值; b 是描述增益分布形状的参数,一般认定为0。

可有效地降低MCP噪声因子的工艺技术途径如下:

- 1) 提高MCP输入端的开口面积比 通过减薄皮料管壁和扩口技术,使MCP的开口面积比达到70%左右,此时 D_{OAR} 达90%;
- 2) 提高材料的二次电子发射系数(特别是首次碰撞时的二次电子发射系数),使其达3.5以上;
- 3) 降低MCP增益的标准偏差 主要通过改善材料二次电子发射系数的统计偏差和使通道壁尽可能光滑等相关工艺来实现;
- 4) 缩短输入面电极进入通道内的深度。

2.2 高增益及其稳定技术

1) 设计的工艺技术途径应尽可能确保皮料材料优良性能得以发挥,使得MCP内壁对低能入射的电子具有较高的二次电子发射系数;

2) 各种热处理对玻璃材料的影响,诸如拉单复丝等工艺,尽可能降低皮芯间的扩散;

3) 加强对新材料的化学腐蚀工艺和通道表面结构的研究;

4) 加深对氢还原机理及工艺研究,确保还原层稳定。

2.3 提高分辨率和改善视场清晰度的工艺技术途径

提高分辨率主要是采取缩小通道孔间距,加大输出电极进入通道的深度,当然,二者又以牺牲其他特性为代价,要掌握好平衡点。而改善视场清晰度的工艺技术途径比较复杂,而且涉及到许多工艺过程,在此不作过多讨论。

描述微通道板的技术参数比较多,这些技术参数本身又相互制约,而工艺设计的参数更加复杂,现就实现小孔径、大开口面积比的MCP的工艺设计作简要描述。图2为微通道板在扫描电子显微镜下拍摄的图片,两相邻通道中心之间的距离定义为通道中心距,它将决定微通道板的几何分辨率的极限值,从而影响着像增强器的空间分辨率,而微通

道板的孔径和通道中心距将共同决定微通道板的开口面积比。它们之间存在着如下关系:

$$A=0.907(d/p)^2 \times 100\% \quad (2)$$

式中: A 代表开口面积比; d 和 p 分别代表 MCP 的孔径和通道中心距。为了实现微通道板孔径在 (6±1) μm, 开口面积比在 60%~70% 范围内的技术要求, 首先使皮料玻璃管的内外径之比尽量靠近

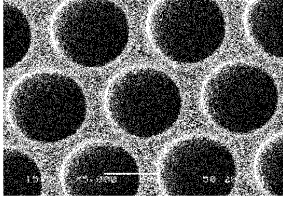


图2 微通道板的显微结构图

Fig.2 Microstructure photograph of microchannel plate

微通道板的孔径和通道中心距之比; 其次, 通过控制单丝直径、复丝(截面为正六边形)对边距和复丝内单丝的根数来最终保证微通道板的孔径和中心距满足技术要求。当然, 微通道板经过熔压、化学腐蚀去芯和氢还原工艺处理后, 两者均存在微小变化, 但这种变化与上述两种情况相比, 可以忽略不计。在工艺实施的过程中, 计算出的皮料玻璃管的尺寸及其范围见表5。对于标准型 Φ25 mm MCP, 为了便于比较, 我们将设计出的4种不同孔径和中心距的MCP单丝直径、复丝对边距、复丝内含单丝数量、有效区和实体边单复丝数量列表描述(见表6)。对于所研制的6 μm MCP, 单丝直径设计为0.45 mm, 每根复丝内含5 419根单丝, 其对边距为0.605 mm, 有效区复丝数为1 051根, 如采用皮套芯的实体边工艺, 整个MCP的单丝总数为12 295 711根, 复丝总数为2 269根。

表5 设计出的皮料玻璃管的尺寸范围

Table 5 Size of cladding glass tubes

内径/mm	29.0	29.5	30.0	30.5	31.0
外径/mm	33.01~35.66	33.58~36.27	34.15~36.89	34.72~37.50	35.29~38.12
壁厚/mm	2.00~3.33	2.04~3.39	2.08~3.45	2.11~3.50	2.15~3.56

表6 标准型 Φ25 mm MCP 单复丝尺寸

Table 6 Dimension and number of single fiber and multifiber of typical Φ25 mm MCP

通道孔径 /μm	通道间距 /μm	单丝直径 /mm	复丝对边距 /mm	复丝内单丝数	有效区复丝数	有效区通道数	实体边复丝数	实体边单丝数
10	12	0.53	0.700	3 169	817	2 589 073	714	2 262 666
8	10	0.45	0.755	5 419	661	3 581 959	858	4 649 502
6	8	0.45	0.605	5 419	1 051	5 695 369	1 218	6 600 342

在实际制作过程中, 我们采用的皮料玻璃管壁厚偏薄, 为了确保中心距和开口面积比, 将孔径设在上限(即6.5~6.9 μm)。

关技术指标列于表7中。

3 研制出的高性能微通道板的主要技术指标

为了便于比较, 我们将研制所达到的典型技术指标和用户所要求的技术指标以及国外同行的相

4 综合制管情况

为了检验新研制的微通道板制管后的综合技术水平, 我们将新研制的5块微通道板拿到北方夜视技术股份有限公司昆明分公司(在其超二代管上做试验), 先后做出5支管子。这些管子中的微通道板在制管前后的主要性能指标如表8所示。

表7 所研制的高性能MCP典型技术参数及与同行的比较

Table 7 Comparison of developed high-performance MCP with those of others

技术参数名称	用户的技术指标	研制所达到的技术指标	同行业典型参数
板外径/mm	24.80±0.04	24.79±0.02	24.80±0.04
有效直径/mm	≥18.8	≥19.0	≥18.8
通道直径/mm	6±1	6.2~7.0	6.2~7.0
孔间距/μm	8±1	7.3~8.5	6.5~8.7
长径比	40:1~60:1	46:1~55:1	48:1~58:1

续表 7

技术参数名称	用户的技术指标	研制所达到的技术指标	同行业典型参数
开口面积比/%	≥60	65.7~69.2	58~70
增益(800 V 时)	≥6 000	≥6 000	≥4 000
清刷后增益	≥500	500~1 000	~300
电阻/MΩ	100~300	100~200	70~300
暗电流密度	≤0.5 PA/cm ²	0.1~0.5 PA/cm ²	≤5×10 ⁻¹²
大面积不均匀性	≤±10%	合格	更好一些
场发射	无(1 000 V)	无(1 200 V)	无(1 200 V)
其他物理疵病	A 级	A 级	A 级
固定图案噪声	低于标准 MCP	优于指标 0~1 级	1~2 级
闪烁噪声	0~1 级	0~1 级	0~1 级
寿命/h	≥6 000	≥8 700	≥8 000
烘烤温度/℃	≥500	≥500	420(P)\480(G)\550(L)

注:烘烤温度一栏中数据后括号中的 P,G,L 分别代表法国的 Photonis 公司、美国的 Galileo 公司和 Litton 公司同类产品所达到的水平。

表 8 综合制管(在超二代管型中)微通道板的主要技术指标

Table 8 MCP main technical data of super Gen II image intensifiers

MCP 编号	材料	电阻/MΩ		电流增益 /800 V	电子 增益	分辨率 (lp/mm)	大面积 均匀性	网络 网格	视场质量 疵病/闪烁
		前	后						
2003-60-27	P05/X-7	94	108	7 640	624	60	1 级	√	合格 无闪烁点
2003-80-13	P03/X-7	111	123	6 300	553	60	0 级	√	合格 无闪烁点
2004-16-15	P03/X-7	102	126	7 240	519	57	1 级	√	合格 无闪烁点
2004-16-19	P03/X-7	111	135	6 583	618	57	1 级	√	合格 无闪烁点
2004-60-39	P03/X-7	101	139	11 200	575	60	0 级	√	合格 无闪烁点

注:这里所讲的电阻的前后,分别指微通道板在制管工艺处理前后的真空环境下的电阻,前者是在 500 V 电压下测得的值,后者为 800 V 时的结果;电子增益是指在超二代制管工艺中,对微通道板实施除气工艺(380℃真空烘烤 12 h,40 μAh 电子清刷)后 800 V 时的增益。

5 结论

为了研制高性能微通道板,我们通过材料、工艺及其结合方面进行了一系列技术攻关,使得新研制的微通道板具备低噪声(表现在暗电流密度小于 5×10^{-12} A/cm²,固定图案噪声和闪烁噪声明显降低)、高增益(380℃真空烘烤 12 小时,40 μAh 电子清刷后,增益大于 500)和其他良好的特性(诸如高分辨率和耐高温真空烘烤),能够满足超二代和三代微光像增强器的技术要求,可广泛应用于高质量微光像增强器和其他探测器之中。

致谢:感谢中国兵器科学研究院光电处对本项目给予的资金支持,感谢北方夜视技术股份有限公司科研开发部、西安分公司、南京分公司、昆明分公司的相关领导和员工分别在项目管理、材料和工艺研发、分析测试和综合制管等方面给予的大力支持,

同时感谢西安应用光学研究所第二研究室的同志们在使用我们的微通道板的过程中反馈的宝贵意见。

参考文献:

- [1] 宁静. 三代微通道板玻璃的初步探讨[C]. 北京:中国硅酸盐学会,1998.180-182.
NING Jing. The principium discussion of the third generation microchannel plate [C]. Beijing: Sinic Silicate Academy,1998.180-182. (in Chinese)
- [2] LAPRADE B N, REINHART S T, WHEELER. A low noise figure microchannel plate optimized for Gen III image intensification systems [J]. SPIE, 1990,1243:162-172.
- [3] FELLER W B, COOK L M, FRASER G W, et al. Low noise microchannel plates [J]. SPIE, 1989, 1072:138-148.
- [4] ZHONG W J S, WILLIAMS J. Etchable core glass compositions and method for manufacturing a high performance microchannel plate: USA, 5108961[P]. 1992-04-28.