

〈微光技术〉

微通道板斜切角对像增强器性能的影响研究

曾进能^{1,2}, 李臻¹, 褚祝军¹, 张简屏¹, 李娇娇¹, 乔芳建¹, 李金沙¹, 赵恒¹,
龚燕妮¹, 李廷涛¹, 许有毅¹, 陈坤杨¹, 陈卫军¹, 王乙瑾¹,
汪云¹, 李耀斌¹, 刘倍宏¹, 王光凡¹, 李晓峰¹

(1. 北方夜视技术股份有限公司, 云南 昆明 650217; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 采用试验对比分析的方法, 从 MCP 斜切角对像增强器的 MCP 噪声因子、分辨力、MCP 增益三方面的影响展开研究。试验结果表明, MCP 斜切角在 5°~12° 范围内时, MCP 噪声因子与 MCP 斜切角呈抛物线关系, 当 MCP 斜切角为 9° 时, MCP 噪声因子最小; 分辨力与斜切角呈负相关关系, 当 MCP 斜切角为 5° 时, 分辨力最大; MCP 增益随斜切角的增加呈抛物线变化, 当 MCP 斜切角为 9° 时, MCP 增益最大。这主要是因为改变 MCP 斜切角后, 光电子进入 MCP 通道前端二次电子发射层的角度深度不同, 激发出的二次电子数及电子在 MCP 输出端形成的散射斑半径存在差异。若要选择最佳 MCP 斜切角, 必须综合考虑不同场景下对像增强器主要性能指标的要求。

关键词: 像增强器; 微通道板; MCP 斜切角; 分辨力; MCP 噪声因子; MCP 增益

中图分类号: O462.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2023)03-0322-06

Effect of Microchannel Plate Tilt Angle on Image Intensifier Performance

ZENG Jinneng^{1,2}, LI Zhen¹, CHU Zhujun¹, ZHANG Jianping¹, LI Jiaojiao¹, QIAO Fangjian¹, LI Jinsha¹, ZHAO Heng¹, GONG Yianni¹, LI Tingtao¹, XU Youyi¹, CHEN Kunyang¹, CHEN Weijun¹,
WANG Yijin¹, WANG Yun¹, LI Yaobin¹, LIU Beihong¹, WANG Guangfan¹, LI Xiaofeng¹

(1. North Night Vision Technology Co. Ltd, Kunming 650217, China;

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

Abstract: The effects of the microchannel plate (MCP) tilt angle on the MCP noise factor, resolution, and gain of an image intensifier was studied through an experimental comparison and analysis. The results showed that the relationship between the MCP noise factor and MCP tilt angle was parabolic when the MCP tilt angle was in the range of 5°~12°. The MCP noise factor was the smallest when the MCP tilt angle was 9°, and the resolution was negatively correlated with the MCP tilt angle. The resolution was the largest when the tilt angle of the MCP was 5°. The MCP gain changed parabolically with an increase in the MCP tilt angle. The MCP gain was the largest when the MCP tilt angle was 9°. Because the direction of the photoelectrons emitted by the photocathode of the image intensifier is certain, changing the MCP tilt angle causes the photoelectrons to enter the front end of the MCP channel at a different angle. This results in different secondary electron emission layer depths, such that the number of secondary electrons and the radius of the scattering spot formed by the electrons at the output end are different. To determine the best MCP tilt angle, the main performance requirements of an image intensifier under various usage scenarios must be comprehensively considered.

Key words: image intensifier, MCP, MCP tilt angle, resolution, MCP noise factor, MCP electronic gain

0 引言

微通道板 (Microchannel Plate, MCP) 是由大量微通道二维排列而成的片状结构, 被用于检测电子、

收稿日期: 2021-10-03; 修訂日期: 2021-11-11。

作者简介: 曾进能 (1988-), 男, 工程师, 主要研究方向: 真空光电器件。E-mail: zengjnnvt@163.com。

通信作者: 李晓峰 (1963-), 男, 正高级工程师, 博士, 主要研究方向: 真空光电器件。E-mail: lxf@nvt.com.cn。

基金项目: 国家自然科学基金 (11535014)。

高能粒子、紫外线、中子、离子、X射线等各种粒子和部分电磁波,广泛应用于微光成像、质谱、电镜等领域^[1]。像增强器^[2]主要由输入窗、光电阴极^[3]、MCP、荧光屏、输出窗、高压电源等组成, MCP 在像增强器中主要起电子倍增作用。当像增强器工作时, MCP 两端被加上电压, 在微通道内部形成电场, 电子轰击微通道内壁产生的二次电子会被电场加速, 再次轰击微通道内壁产生更多的二次电子。这个过程在同一微通道中重复多次, 最终在出口端输出大量的电子^[4-5]。衡量像增强器成像质量的性能参数主要是 MCP 噪声因子、分辨力、MCP 增益等。像增强器的 MCP 噪声因子^[6-7]越小, 信噪比^[8]越高, 信号相对噪声越强, 成像时雪花点的数量越少。像增强器的分辨力^[9-10]主要体现在对目标局部信息的分辨能力上, 在相同条件下, 分辨力越高, 像增强器成像越清晰。MCP 增益^[11-12]为原电子通过 MCP 倍增后产生的电子数量与原电子数量之比, 像增强器中 MCP 在一定工作电压范围内, MCP 增益随工作电压增加呈指数增加。在相同的工作电压下, MCP 增益越高像增强器的亮度增益也会越高, 像增强器的探测能力也会增强。MCP 的性能参数包括结构参数, 如板厚、开口面积比、电极深度等, 以及电参数, 包括面电阻、暗电流、板阻等。目前, 对 MCP 斜切角的研究主要从 MCP 斜切角对电子输运特性的影响方面展开, 如王洪刚等人详细分析了微通道板的斜切角、通道直径和两端电压对电子输运特性产生的影响^[13], 然而对 MCP 斜切角与像增强器性能之间的研究并不系统。探究 MCP 斜切角与 MCP 噪声因子、分辨力和 MCP 增益的关系, 以便在科研和生产中根据实际需求确定 MCP 最佳斜切角, 满足像增强器在不同场景下的性能指标要求。

1 试验原理及方案

MCP 斜切角 θ 是指微通道与 MCP 表面法线之间所成的角度, 如图 1 所示。实际应用中, MCP 斜切角主要影响像增强器的 MCP 噪声因子、分辨力、MCP 增益。斜切角增加了入射电子撞击微通道的次数, 可以激发出更多二次电子^[14], 提高 MCP 增益。由于电子入射角度会影响电子首次碰撞时的二次电子发射系数^[15-17], 结合 MCP 噪声因子的表达式, 可知改变 MCP 斜切角会导致 MCP 噪声因子发生变化。改变 MCP 斜切角会导致 MCP 出射电子弥散斑的半径发生变化, 从而会导致像增强器分辨力发生变化。MCP 输入端通道内壁的二次电子发射系数与入射电子能够进入二次电子发射薄膜的深度和 MCP 斜切角密切相关。以像增强器中光电阴极发射出的光电子为例, 光

电子进入微通道内壁后激发出二次电子, 此时二次电子发出的位置以及该位置的二次电子发射系数都与 MCP 斜切角相关。相同的电场强度下, 如果斜切角增加, 光电子进入通道内壁二次电子发射层的深度也会增加, 原电子射入发射物体内部使其中的电子激发, 跳至较高的能级, 而原电子的能量逐渐损失, 速度逐渐减慢。这种已经激发而尚未从表面逸出的电子, 称为内次级电子, 内次级电子数目与原电子能量损耗率成正比, 但是这些被激发的电子沿初电子所经过路程的分布是不均匀的, 它在单位路程上激发的电子沿原电子被阻滞的程度而快速增加, 一般认为在原电子的形成末端(原电子能量还有 100 eV 左右)被激发的电子数目最多, 此时 MCP 输入端内壁的二次电子发射系数也随之增加。但 MCP 斜切角并非越大越好^[18], 原电子获得的能量相同, MCP 斜切角增加, 原电子穿入通道内壁二次电子发射层的深度也会增加, 并且激发次级电子主要发生在通道内壁的深层, 大部分次级电子到达表面发射层的路程增加, 向表面输运过程中能量的损失增大, 逸出的次级电子数减少, 此时 MCP 输入端通道内壁的二次电子发射系数就会降低。所以找到斜切角 θ 的临界角是提高像增强器性能的重要因素之一。

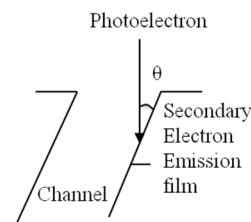


图 1 MCP 斜切角示意图

Fig.1 Schematic diagram of MCP tilt angle

为了找到 MCP 斜切角与 MCP 噪声因子、分辨力、MCP 增益的关系, 从而推导出最优斜切角, 制备了不同斜切角的 MCP, 并装配为像增强器, 在相同条件下开展试验对比分析。将相同屏段的复丝棒切为不同斜切角的 MCP, 包括 5°、7°、9° 和 12°, 板厚为 0.29 mm、外径为 25 mm、孔径为 7 μm、孔心距为 8 μm, 输入端和输出端均制作有镍铬电极层, 输入端电极深度为 0.5d (d 为 MCP 孔径), 输出端电极深度为 2.0d。将 4 组不同斜切角的 MCP 装配为像增强器, 输出窗为相同屏段的光纤面板, 荧光屏均采用 P22 荧光粉, 输入窗为防光晕玻璃, 光电阴极为 S25 光电阴极。

2 MCP 斜切角对像增强器性能的影响

2.1 MCP 噪声因子

像增强器中 MCP 的噪声因子大小, 直接影响到夜

视仪的观察距离、探测距离或者成像效果。降低 MCP 噪声因子的主要途径有两个: 一是增加 MCP 的开口面积比^[19] (Open Area Ratio, OAR), 二是提高 MCP 输入端电子碰撞时的二次电子发射系数。常用的提高 MCP 输入端二次电子发射系数的方法是在输入端导电层表面制作一层输入增强膜^[20], 或根据二次电子发射系数与电子入射角的关系, 找到电子最佳入射角对应的 MCP 斜切角, MCP 噪声因子 N_f 的表达式为^[21]:

$$N_f = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot E \cdot \gamma}{2e \cdot \Delta f \cdot (S/N)^2} \quad (1)$$

式中: R 为信噪比测试时的光斑半径 (0.1 mm); E 为入射光辐照度 (1.08×10^{-4} lx); γ 为光电阴极灵敏度;

表 1 四组像增强器的噪声因子比较

Table 1 Comparison of noise factors of four groups of image intensifiers

MCP tilt angle/°	Sensitivity/(μA/lm)	SNR	Noise factor	Average noise factor
5	894	22.75	1.831	1.833
5	832	21.93	1.834	
7	889	25.59	1.439	1.445
7	884	25.42	1.450	
9	880	25.98	1.382	1.385
9	866	25.71	1.389	
12	888	24.41	1.580	1.571
12	813	23.48	1.563	

由表 1 可知, 随着斜切角增大, 4 组像增强器的 MCP 噪声因子先减小、再增大, 呈抛物线变化。MCP 斜切角为 9° 时噪声因子最低, 均值为 1.385。MCP 斜切角为 5° 时, 噪声因子最高, 均值为 1.833。MCP 斜切角为 12° 的噪声因子出现回升, 均值为 1.571。MCP 斜切角为 9° 时, 比 MCP 斜切角为 5° 时的噪声因子低 24.4%。

MCP 斜切角为 9° 时噪声因子最低, MCP 斜切角为 7° 时噪声因子次之, MCP 斜切角为 5° 时噪声因子欠佳。其主要原因是 MCP 斜切角过大时, 二次电子在通道内飞行轨迹夹角太大, 增益过高造成电子束的内建电场和加速电场抵消, 最终造成增益饱和, 此时噪声因子也会增加, 信噪比会随之降低甚至无信号输出。如果 MCP 斜切角太小, 光电子进入通道内壁的机会也会减小, 导致电子首次碰撞时没有足够的二次电子激发, 同样会导致噪声因子降低。

2.2 分辨力

分辨力指像增强器对目标的探测和识别能力, 是像增强器的重要参数之一。部分学者主要研究微通道板的通道间距、输出电极深度、板厚对分辨力的

e 为电子电量 (1.6×10^{-19} C); Δf (10 Hz) 为信号分析器的带宽; S/N 为信噪比。将各参数代入式(1), 可以简化噪声因子的表达式为:

$$N_f = 1.06 \frac{\gamma}{(S/N)^2} \quad (2)$$

由式(2)可得, MCP 噪声因子主要与像增强器的灵敏度和信噪比有关。灵敏度、信噪比的测试方法和原理为国际统一标准, 可以直接用标准仪器和方法测试出准确值, 将像增强器的灵敏度和信噪比代入式(2)可以计算出 MCP 噪声因子。将 4 组像增强器的亮度增益调制为 $15000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$, 测试 4 组像增强器的噪声因子, 测试结果见表 1。

影响^[22], 也有学者计算了像增强器分辨力的理论极限值, 针对 MCP 斜切角对像增强器分辨力的关系研究甚少, 并缺少数据支撑。采用像增强器分辨力测试系统 (测试原理见图 2), 通过显微镜目视读数的方法, 测试装配不同斜切角 MCP 的像增强器的分辨力。像增强器分辨力测试系统由显微镜、暗箱、成像物镜、准直镜、光源、分辨力靶 (USAF1951)、中性滤光片、积分球等组成。

USAF1951 分辨力靶共有 8 个单元, 每个单元有 6 组, 由等宽黑白相间相互垂直的线条图案组成, 各组线条的宽度由宽逐渐变窄。测试像增强器分辨力时, 将分辨力靶图案投射到像增强器的光电阴极面转化为电信号之后经微通道板倍增, 倍增后的电子激发荧光屏显示出明暗相间的分辨力靶板图像, 通过显微镜读出准确的分辨力值。随着输入信号中两线条图案之间距离的缩短, 荧光屏输出的图像中的两线条之间的距离也在逐渐地靠近, 甚至互相重叠。当互相重叠到一定程度时, 两线条就不能被独立分辨, 这个临界距离称为像增强器的分辨力 (单位: lp/mm)。按照通道板的斜切角将像增强器分为 4 组, 把 4 组像增强器

的亮度增益都调整为 $15000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$, 在相同条件下测试 4 组像增强器的分辨力, 结果见表 2。

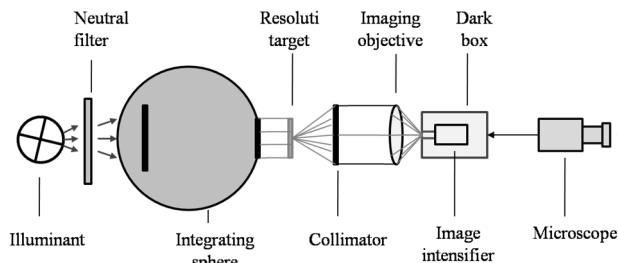


图 2 像增强器分辨力测试系统结构

Fig.2 Diagram of resolution test system for image intensifier

表 2 四组像增强器的分辨力比较

Table 2 Contrast of resolution between four kinds of image intensifiers

MCP tilt angle/°	Resolution/(lp/mm)	Average resolution/(lp/mm)
5	68	
5	64	66
7	64	
7	64	64
9	64	
9	60	62
12	60	
12	60	60

从表 2 可以看出, 随着 MCP 斜切角增加, 像增强器的分辨力逐渐降低。斜切角为 5° 的 MCP 装配为像增强器之后分辨力最高, 平均值为 66 lp/mm。斜切角为 12° 的 MCP 装配为像增强器之后分辨力最低, 平均值为 60 lp/mm。MCP 斜切角由 5° 增加到 12° 时, 像增强器的分辨力降低 9.1%。MCP 斜切角由 5° 增大到 12°, MCP 微通道的输出端与输入端法线之间的偏移距离由 0.025 mm 增加到 0.062 mm, 增大了 142%, 电子在 MCP 输出端形成的散射斑半径也会增大, 所以像增强器分辨力随斜切角增加而降低。由于斜切角导致 MCP 的微通道开口是椭圆形状, 椭圆的长轴和短轴对应不同的分辨力值, 导致像增强器分辨力具有一定的方向性, 对此可以建立相应的 MCP 模型开展深入研究。

2.3 MCP 增益

MCP 增益为每个电子能在 MCP 上倍增的电子数, MCP 增益主要取决于工作电压和 MCP 输入电流密度^[23], 通过增加 MCP 工作电压可以提高电子撞击通道内部的能量, 激发出更多的二次电子, 获得更高的增益。当 MCP 电压增加到一定值时, 通道的输出端会积累大量的电荷, 导致 MCP 增益出现饱和现象。

由于电子的电荷量相同, 故在连续稳定工作状态下 MCP 增益与电流增益相当, 所以可将 MCP 增益定义为输出电子流与输入电子流之比, 式(3)为计算式:

$$G_{\text{MCP}} = I_a / I_c \quad (3)$$

式中: G_{MCP} 为 MCP 的电子流增益; I_a 表示荧光屏电流 (输出电子流); I_c 表示光电阴极的电流 (输入电子流)。MCP 增益测试原理如图 3 所示, 测试过程中, 光电阴极的电压为 -200 V, MCP 电压为 800 V, 阳极电压为 6 kV。

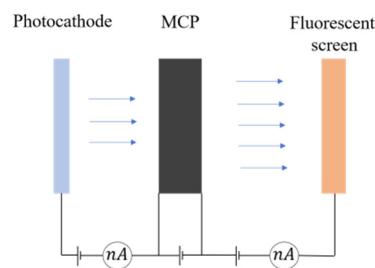


图 3 MCP 电流增益测试原理

Fig.3 Schematic diagram of MCP current gain test

在相同条件下, 按照上述方法对像增强器中 MCP 的输入电流、输出电流进行测试, 按照式(3)计算出 MCP 增益值, 其结果见表 3。

表 3 四组像增强器的 MCP 增益比较

Table 3 MCP gain comparison between four kinds of image intensifiers

MCP tilt angle/°	MCP image	Average MCP image
5	290	284
5	277	
7	325	320
7	315	
9	340	338
9	356	
12	282	268
12	254	

像增强器中, MCP 斜切角为 5°、7°、9°、12° 时, 对应的 MCP 增益平均值分别是 284、320、338 和 268。MCP 斜切角与 MCP 增益的关系为一条开口向下的抛物线。由于 MCP 斜切角过小时, 入射电子激发出的二次电子数过少, MCP 斜切角可以增加入射电子撞击通道内壁的几率, 随着 MCP 斜切角增大, 入射电子穿入二次电子发射层的深度增加, 激发出更多二次电子。当 MCP 斜切角过大时, 大部分二次电子到达表面发射层的路程增加, 二次电子向表面输运过程中能量损失增大, 导致逸出的次级电子数减少, 所以 MCP 增益最高时对应的 MCP 斜切角为 9°。

3 结论

为了研究 MCP 斜切角对像增强器性能的影响, 制备了斜切角不同的 4 组 MCP, 制管后比较了 MCP 斜切角对像增强器的 MCP 噪声因子、分辨力、MCP 增益 3 个指标的影响。结果表明, MCP 斜切角为 9° 时, MCP 噪声因子最低, MCP 增益最大; MCP 斜切角为 5° 时, 像增强器分辨力最高。MCP 斜切角的改变使得像增强器的 MCP 噪声因子、分辨力和 MCP 增益相互牵制, 像增强器在实际应用中需要较低的 MCP 噪声因子、较高的分辨力和较高的 MCP 增益。MCP 斜切角为 7° 时, MCP 噪声因子和 MCP 增益仅次于 9° 斜切角, 分辨力仅次于 5° 斜切角, 所以像增强器用 MCP 的最佳斜切角为 7°。

参考文献:

- [1] 潘金生. 微通道板及其主要性能特征[J]. 应用光学, 2004, 25(5): 25-29.
PAN Jinsheng. Microchannel plates and its main characteristics[J]. *Journal of Applied Optics*, 2004, 25(5): 25-29.
- [2] 向世明, 倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京: 国防出版社, 2006.
XIANG Shiming, NI Guoqiang. *The Principle of Photoelectronic Imaging Devices*[M]. Beijin: National Defense press Industry Press, 2006.
- [3] 常本康. 多碱阴极光学监控原理研究[J]. 真空科学与技术, 1994, 14(1): 41-46.
CHANG Benkang. A study of survey and control principles on optical information of multi-alkali photocathode[J]. *Vacuum Science and Technology*, 1994, 14(1): 41-46.
- [4] 张淑琴. 电子倍增器微通道板(MCP)在微光夜视技术中的应用[J]. 山西电子技术, 2003(4): 28-29, 41.
ZHANG Shuqin. The application of electronic multiplier (MCP) in low light level night vision technique[J]. *Shanxi Electronic Technology*, 2003(4): 28-29, 41.
- [5] Choi Y S, Kim J M. Monte carlo simulations for tilted-channel electronmultipliers[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2000, 47(6): 1293-1296.
- [6] 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[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 143-150.
LI Xiaofeng, ZHANG Zhenjun, CONG Xiaoqing, et al. Influence of microchannel plate structure parameters on noise factor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 143-150.
- [7] 朱宇峰, 石峰. 防离子反馈 MCP 噪声因子测试与分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 499-502.
ZHU Yufeng, SHI Feng. Analysis and test on noise factor of Micro-channel plate with ion barrier film[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 499-502.
- [8] 石峰, 程宏昌, 贺英萍, 等. MCP 输入电子能量与微光像增强器信噪比的关系[J]. 应用光学, 2008(4): 562-564.
SHI Feng, CHENG Hongchang, HE Yingping, et al. Optimization for signal-to-noise ratio of low-light-level image intensifier[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008(4): 562-564.
- [9] 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): 120-126.
LI Xiaofeng, CHANG Le, ZENG Jinneng, et al. Study on Resolution Improvement of Microchannel Plate[J]. *Acta photonica Sinica*, 2019, 48(12): 120-126.
- [10] Chrzanowski K. Review of night vision technology[J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, 21(2): 153-181.
- [11] 谢运涛, 张玉钧, 王玺, 等. 基于微通道板的像增强器增益饱和效应研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 195-200.
XIE Yuntao, ZHANG Yujun, WANG Xi, et al. Research on the gain saturation effect of an image intensifier based on microchannel plate[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 195-200.
- [12] 郝子恒, 李相鑫, 张妮, 等. 微通道板高增益二次电子发射层制备研究[J]. 红外技术, 2018, 40(11): 1077-1080.
HAO Ziheng, LI Xiangxin, ZHANG Ni, et al. Preparation of high gain secondary electron emission layer for micro-channel plate[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(11): 1077-1080.
- [13] 王洪刚, 钱芸生, 王勇, 等. 微通道板电子输运特性的仿真研究[J]. 计算物理, 2013, 30(2): 221-228.
WANG Honggang, QIAN Yunsheng, WANG Yong, et al. Simulation of electronic transport in micro-channel plate[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2013, 30(2): 221-228.
- [14] 杨文晋, 李永东, 刘纯亮. 高入射能量下的金属二次电子发射模型[J]. 物理学报, 2013, 62(8): 516-520.
YANG Wenjin, LI Yongdong, LIU Chunliang. Model of secondary electron emission at high incident electron energy for metal[J]. *Journal of Physics*, 2013, 62(8): 516-520.
- [15] 翁明, 胡天存, 曹猛, 等. 电子入射角度对聚酰亚胺二次电子发射系数的影响[J]. 物理学报, 2015, 64(15): 456-462.
WENG Ming, HU Tiancun, CAO Meng, et al. Effects of electron incident angle on the secondary electron yield for polyimide[J]. *Journal of Physics*, 2015, 64(15): 456-462.
- [16] 谢爱根, 宋标, 赵浩峰. 高能有效真二次电子发射系数与逸出深度和入射角的关系[J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 2008(6): 53-55, 68.
XIE Aigen, SONG Biao, ZHAO Haofeng. The relations among real efficient secondary electron emission coefficient at high energy, the incident angle of primary electron and depth[J]. *Journal of Anhui University: Natural Science Edition*, 2008(6): 53-55, 68.
- [17] 谢爱根, 裴元吉, 王荣, 等. 金属的有效真二次电子发射系数与高能原电子入射角的关系[J]. 高能物理与核物理, 2005(5): 530-532.

- XIE Aigen, PEI Yuanji, WANG Rong, et al. Relation between the incident angle of high energy primary electron of metal and the real efficient emission coefficient of secondary electron[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2005(5): 530-532.
- [18] 李杨威, 任成燕, 孔飞, 等. 绝缘材料二次电子发射系数的测量及其影响因素研究进展[J]. *高压电器*, 2019, 55(5): 1-9.
LI Yangwei, REN Chengyan, KONG Fei, et al. Research progress on the measurement of secondary electron emission yield of insulation materials and influencing factors[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(5): 1-9.
- [19] 傅文红. MCP 扩口工艺的理论、实验与测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
FU Wenhong. The Research of Theory, Experiment and Testing Technology on Enlarging MCP's Port[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2006.
- [20] 曾进能, 李廷涛, 常乐, 等. MCP 输入增强膜对像增强器主要性能的影响研究[J]. *红外技术*, 2020, 42(8): 735-741.
ZENG Jinneng, LI Tingtao, CHANG Le, et al. Study on the effect of MCP input enhancement film on the performance of image intensifier[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(8): 735-741.
- [21] 李晓峰, 李金沙, 常乐, 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): 16-22.
LI Xiaofeng, LI Jinsha, CHANG Le, et al. Study on the relationship between noise factor and working voltage of microchannel plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(7): 16-22.
- [22] 程耀进, 石峰, 郭晖, 等. MCP 参数对微光像增强器分辨率影响研究[J]. *应用光学*, 2010, 31(2): 292-296.
CHENG Yaojin, SHI Feng, GUO Hui, et al. Effect of MCP parameters on resolution of image intensifier[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(2): 292-296.
- [23] 张小东, 欧阳晓平, 何军章, 等. 微通道板的增益研究[J]. *核技术*, 2019, 42(10): 50-54.
ZHANG Xiaodong, OU-YANG Xiao-ping, HE Junzhang, et al. The study on the gain of microchannel plate[J]. *Nuclear Techniques*, 2019, 42(10): 50-54.