

doi: 10.3788/gzxb20124108.0962

电子清刷对微通道板增益及输出信噪比的影响

崔东旭^{1,2}, 郑少成¹, 邱亚峰¹, 钱芸生¹, 常本康¹

(1 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

(2 西安应用光学研究所, 西安 710065)

摘 要:电子清刷是微通道板生产流程中常用的除气方法, 会引起微通道板其他性能参量的变化。为研究电子清刷对微通道板输出信噪比及增益的影响, 根据信噪比及增益的定义讨论了微通道板性能参量的测试方法, 研制了微通道板参量测试系统。应用微通道板参量测试系统对微通道板进行了电子清刷处理, 测试清刷过程中不同阶段微通道板的信噪比及增益变化。实验表明: 微通道板增益随清刷时间增加而降低, 同时增益稳定性提高; 电子清刷过程中微通道板的输出信号及噪音的变化率与微通道板增益的变化率基本相同, 输出信噪比基本不变。增益变化是影响清刷过程中信号及噪音变化的主要因素, 并且电子清刷对微通道板输出信噪比影响较小。

关键词:微通道板; 电子清刷; 输出信噪比; 增益

中图分类号: TN233

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)08-0962-5

0 引言

微通道板(Microchannel Plate, MCP)作为电子倍增器件, 具有体积小、重量轻、使用电压低、电子增益高和自饱和等优异特性, 在微光夜视、光辐射探测、空间探测和高速摄影等诸多领域有广泛应用^[1-7]。电子清刷是 MCP 生产过程中必要的除气方法, 通道内壁的残余气体是降低阴极灵敏度, 影响 MCP 寿命的主要原因^[8-9]。电子清刷同时会对 MCP 的其他特性产生影响, 为研究电子清刷对 MCP 信噪比及增益的影响, 本文设计了具有电子清刷功能的 MCP 噪音测试系统。应用 MCP 噪音测试系统对 MCP 进行了清刷实验, 研究了电子清刷对 MCP 信噪比的影响, 并对实验结果进行了分析讨论。

1 MCP 输出信噪比及增益的概念

MCP 是一块被加工成薄片的具有高二次电子发射系数的空心玻璃纤维二维阵列^[10], 如图 1。MCP 的每一个通道相当于一个具有电子倍增特性的光电倍增管, 当 MCP 工作时在输入和输出端加上高压形成加速电场, 入射电子以一定角度入射到通道内并在加速电场作用下轰击具有电子倍增特性的通道内壁产生二次电子发射^[11], 工作过程如图 2。

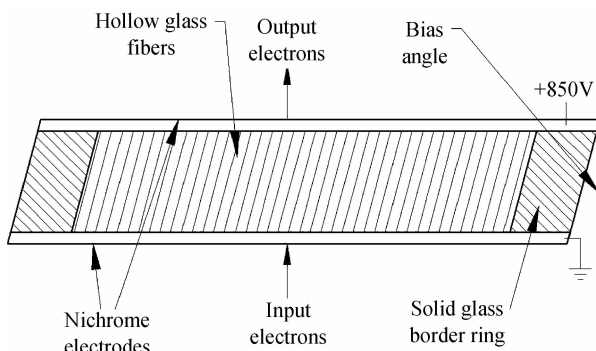


图 1 微通道板的结构及工作原理
Fig. 1 Schematic diagram of MCP

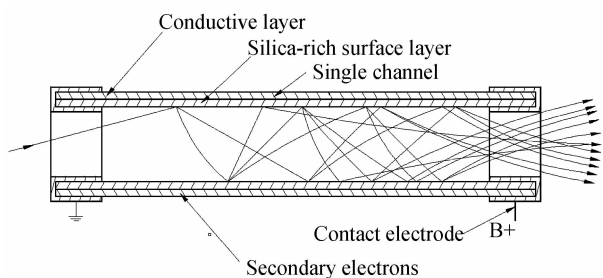


图 2 单个通道的结构和工作原理
Fig. 2 Schematic diagram of single channel

MCP 在电子倍增过程中由于二次发射电子数的涨落以及通道内壁的离子反馈噪音的影响而引入噪音, 噪音使通道板信噪比降低使成像质量变差。信噪比是评价 MCP 性能的重要参量, 其定义如下^[12]

基金项目: 国防重点预研项目(No. 40405030202)资助

第一作者: 崔东旭(1965—), 研究员, 博士研究生, 主要研究方向为微光夜视检测技术。Email: cuidongxu656@sina.com

通讯作者: 常本康(1950—), 教授, 博导, 主要研究方向为光电发射材料和成像器件。Email: bkchang@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2012-03-14; 修回日期: 2012-05-16

$$(S/N)_{out} = \frac{S_E - S_{out_0}}{\sqrt{N_{out}^2 - N_{out_0}^2}} \quad (1)$$

式中, S_{out} 为有电子束入射时的 MCP 平均输出电流值, 单位 nA; N_{out} 为有电子束入射时偏离平均值的均方根噪音值, 单位 nA.

MCP 有电子入射的工作条件包括: 电子枪发射热电子、电子枪相对于 MCP 输入端加 -400 V 电压作为电子束加速电场、MCP 输出端相对 MCP 输入端加 800 V 电压作为 MCP 工作电压、荧光屏相对于 MCP 输入端加 1 000 V 电压收集 MCP 出射电子.

S_{out_0} 为无电子束入射的 MCP 暗背景平均电流值, 单位 nA; N_{out_0} 为无电子束入射时偏离平均值的均方根噪音值, 单位 nA.

MCP 无电子入射的工作条件为: 在有电子入射的工作条件条件下关掉灯丝上的 -400 V 电压. 具体测试原理示意图如图 3.

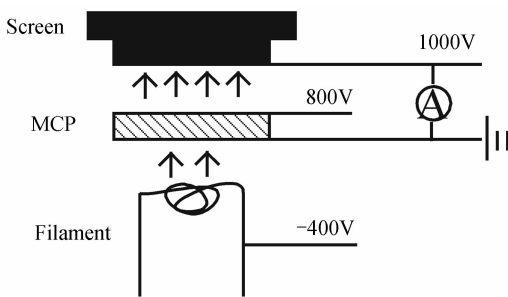


图 3 MCP 输出信号测试示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the MCP output signal test

在有电子入射条件下采集 N 个信号值 S_i ($i = 1, 2, \dots, N$), 运用式(2)和(3)可计算出 S_{out} 、 N_{out}

$$S_{out} = \sum_{i=1}^N S_i / N \quad (2)$$

$$N_{out} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - S_{out})^2 / N} \quad (3)$$

同理在无电子入射条件下采集 N 个信号点 S_{i0} ($i = 1, 2, \dots, N$), 由式(2)、(3)可求出 S_{out_0} 、 N_{out_0} . 得到上述四个参量后由式(1)即可计算出输出信噪比.

MCP 的电子倍增功能用增益来评价, 增益定义为输出电子数与输入电子数的比值. 电子数可以用输入输出信号值表示, 故增益 G 的计算方法为

$$G = (S_{out} - S_{out_0}) / (S_{in} - S_{in_0}) \quad (4)$$

式中 S_{out} 为有电子入射时的输出信号, S_{out_0} 为无电子入射时的输出信号, S_{in} 为有电子入射时的输入信号, S_{in_0} 为无电子入射时的输入信号.

为测试 MCP 增益及输出信噪比等参量及电子清刷对增益及输出信噪比的影响, 设计了 MCP 噪

音测试系统, 同时在设计中使系统具备了电子清刷功能. 应用测试系统对三代未镀膜微通道板进行了电子清刷实验并对实验结果进行分析讨论.

2 MCP 信噪比测试系统

2.1 系统总体结构

MCP 噪音测试系统由 MCP 工作环境提供模块、信号采集处理模块、系统协调控制模块组成. MCP 工作环境提供模块包括: 真空系统、电子枪、电子光学系统、高压电源以及测试夹具组件等, 为 MCP 工作提供真空环境, 工作电压及均匀入射面电子源. 信号采集处理模块包括: 信号放大电路、数据采集系统、数据处理软件, 完成信号调理、采集及处理运算. 系统控制模块包括: I/O 控制、通信适配, 完成系统协调工作的自动控制. 图 4 为系统结构图.

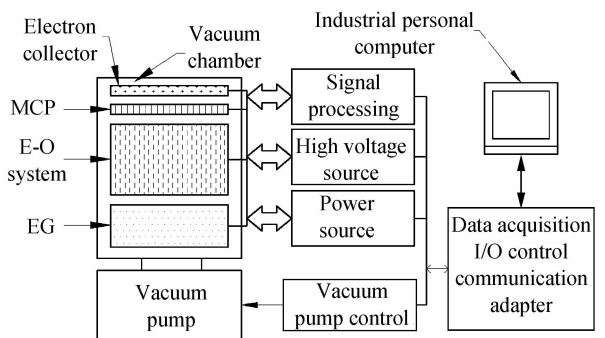


图 4 MCP 噪音分析系统的结构

Fig. 4 Schematic diagram of MCP noise analysis system

其工作流程为: 电子枪、电子光学系统发射均匀面电子流入射到 MCP 输入端, 高压电源为 MCP 工作提供合适的各级电压, 入射电子在 MCP 内倍增后由入射到荧光屏端. 信号采集处理模块对 MCP 输出端的电流信号放大、采集、运算处理计算出 MCP 的输出信噪比.

2.2 真空系统

真空系统结构如图 5, 真空系统为 MCP 正常工作提供真空环境. 系统主要由真空室 (VC)、无油涡轮分子泵 TURBOVAC SL300 (P_1)、分子泵驱动器 TD400 (G_1)、分子泵控制器 TURBO. CONTROL 300 (G_2)、机械干泵 SC150D (P_2)、离子真空规 ITR90、及三个电动阀门 (V_1 、 V_2 、 V_3) 组成. 真空系统的极限真空度为: 5×10^{-7} Pa, 工作真空度为 5×10^{-5} Pa. 测试样品 MCP 通过测试夹具安装在真空室内, MCP 工作需要的各级高压通过接线柱引到真空室外由外部高压电源模块提供, 安装在真空室内的电子枪 (EG) 为 MCP 工作提供入射面电子源.

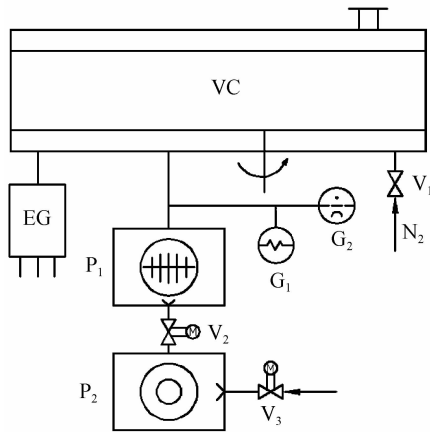


图5 真空系统结构
Fig. 5 Diagram of vacuum chamber

3 电子清刷实验

电子清刷时在灯丝与 MCP 输入端之间加上聚焦筒, 聚焦筒接负高压形成电子聚焦电场, 从灯丝出射的电子在聚焦电场的作用下汇聚成细密电子束入射到 MCP 输入端, 对 MCP 进行大电流清刷.

实验选用的是北方夜视南京分公司生产的用于三代像增强器 $6\ \mu\text{m}$ 孔径 MCP, 并在电子清刷前先对 MCP 进行了高温烘烤处理, 烘烤温度为 300°C , 烘烤时间为 10 h. 电子清刷时灯丝电流为 2 800 mA, 灯丝电压为 $-600\ \text{V}$, 通道板电压为 $850\ \text{V}$, 清刷时通过调节聚焦电场改变电子束密度使通道板的输出信号达到 $5\ \mu\text{A}$. 清刷时间为 30 h, 清刷过程中每 5 h 进行一组测试. 测试的各项原始数据如表 1.

表 1 电子清刷实验原始数据表

Table 1 Test data of the electron rinse at different stages

Time/h	S_{out}	S_{out_0}	N_{out}	N_{out_0}	SNR	Gain
0	2.866	0.004 1	0.096	0.000 3	29.83	1 479.8
5	1.305 7	0.006 8	0.045	0.000 3	28.89	671.6
10	1.158 7	0.006 1	0.040 2	0.000 3	28.67	595.9
15	1.036 9	0.005 7	0.035 8	0.000 3	28.90	534.6
20	0.929 6	0.005 1	0.032 1	0.000 3	28.78	478.0
25	0.877 1	0.006 1	0.030 6	0.000 3	28.42	450.3
30	0.831 7	0.005 9	0.029 2	0.000 4	28.24	427.0

将清刷前的 S_{out} 、 N_{out} 、SNR、增益作为 1, 计算清刷过程中各次测试结果相对于清刷前的变化率得到表 2 各项数据归一化后的结果.

表 2 归一化后各项数据

Table 2 Test data of normalized

Time/h	S_{out}	N_{out}	SNR	Gain
0	1	1	1	1
5	0.455 6	0.468 5	0.968 7	0.453 8
10	0.404 3	0.418 9	0.961 4	0.402 7
15	0.362 7	0.372 8	0.969 1	0.361 3
20	0.324 5	0.334 7	0.965 1	0.323 0
25	0.306	0.319 4	0.953	0.304 3
30	0.290 2	0.304 7	0.946 9	0.288 5

通道板的增益随清刷时间的变化如图 6, 通道板的增益随清刷时间增加而减小, 且在清刷初期下降较快, 下降趋势逐渐趋于平稳. 增益下降是因为电子轰击使有益于 MCP 二次电子产额的材料发生物理化学变化, 从而降低了二次电子产额. 例如 MCP 通道内表面富集大量的 K^+ 、 Na^+ 等碱金属离子, 这些离子对 MCP 的二次电子产额有利, 但是电子轰击会使这些离子迁移离开表面从而降低了二次电子产额. CO 、 CO_2 在有水汽^[13]的条件下极易与 MCP 通道内壁起导电层作用的 Pb 起反应生成 PbCO_3 , PbCO_3 对二次电子发射会造成不稳定, 降低二次电子产额, 并且游离的 Pb 被氧化后 MCP 的导电层就不能有效的给发射层补充电子, 易形成发射层的电荷积累、影响增益^[14]. 随着清刷时间增加增益变得更稳定, 增益的变化更平稳. 微光像增强器在正常使用过程中相当于是在对 MCP 进行小剂量的电子清刷, 如果在制管前就对 MCP 进行电子清刷处理使其增益稳定下来, 会使在制管后像管的性能也更稳定.

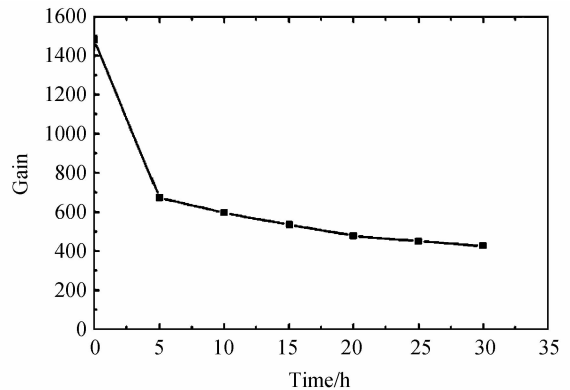


图 6 增益随清刷时间的变化
Fig. 6 Gain changes with electron rinse time

图 7 为 S_{out} 、 N_{out} 、Gain 归一化处理后的随清刷时间的变化率. 可见 S_{out} 、 N_{out} 、Gain 的变化率基本重合, 可以得出结论输出信号和输出噪声的减小主要是由于通道板增益的下降引起的.

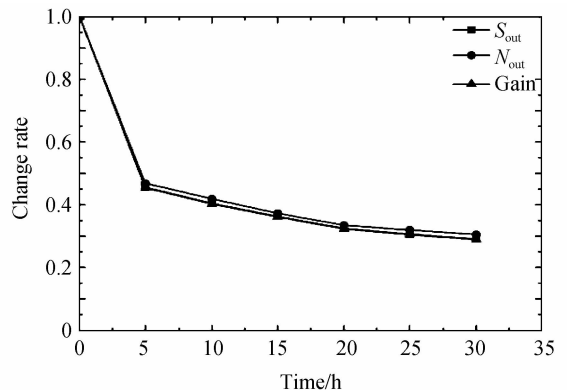


图 7 Gain、 S_{out} 、 N_{out} 随清刷时间的变化率
Fig. 7 Rate change of Gain, S_{out} and N_{out} with electron rinse time

MCP 信噪比随清刷时间的变化率如图 8, 信噪比随清刷时间加长有波动但是波动较小, 基本保持不变。由图 7 可知 S_{out} 、 N_{out} 、Gain 的变化率基本相同, 将其变化率用 K 来表示, 另外, 由测试表 1 可见 S_{out_0} 、 N_{out_0} 的变化很小, 对 SNR 的计算影响不大, 可以认为是常量, 则式(1)可写为

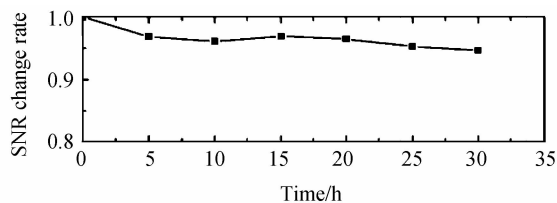


图 8 MCP 输出信噪比随清刷时间的变化率
Fig. 8 Output SNR changes with electron rinse time

$$SNR = \frac{KS_{out} - S_{out_0}}{\sqrt{(KN_{out})^2 - N_{out_0}^2}} \quad (5)$$

即 MCP 在工作条件及输入信号不变的情况下, 其信噪比随清刷时间基本不变, 较小的波动主要是由于增益的变化引起的。

考虑实验装置采用的是灯丝热电子发射作为 MCP 输入信号而实际的像管采用的是光阴极电子发射作为输入信号, 虽然实验中电子清刷除气使 MCP 噪音降低的作用不是很明显, 但是在像管中电子清刷除气却可以有效减少反馈离子对光阴极的破坏和光阴极离子反馈噪音, 所以电子清刷对像管信噪比的影响与对 MCP 信噪比的影响是有区别的。

4 结论

为了研究电子清刷对 MCP 输出信噪比及增益的影响, 设计了具有电子清刷功能的 MCP 参量测试系统, 应用测试系统对用于三代像增强器的 $6 \mu\text{m}$ 孔径 MCP 进行了电子清刷实验。实验表明 MCP 增益随清刷时间增加而降低, 同时增益稳定性提高, 电子清刷过程中 MCP 的输出信号及噪音的变化率与 MCP 增益的变化率基本相同, 输出信噪比基本不变。认为增益变化是影响清刷过程中信号及噪音变化的主要因素, 并且电子清刷对 MCP 输出信噪比影响较小。

参考文献

[1] PAN Jing-sheng, LÜ Jing-wen, LI Yan-hong, *et al.* Exploring the feasibility and approach for unfiltered-microchannel-plate based third generation image intensifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0323005.
潘京生, 吕景文, 李燕红, 等. 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): 0323005.

[2] PAN Jing-sheng, LÜ Jing-wen, ZHENG Zheng-jun, *et al.* Ion feedback suppression for third generation image intensifiers [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2010, **19**(4): 757-762

[3] HU Hui-jun, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* X-ray photon counting detector for x-ray pulsar-based navigation[J].

Acta Physica Sinica, 2012, **61**(1): 019701.

胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 等. 用于脉冲星导航的 X 射线光子计数探测器研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(1): 019701.

[4] ZHANG Xing-hua, ZHAO Bao-sheng, LIU Yong-an, *et al.* Gain characteristic of ultraviolet single photon imaging system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1779-1784.
张兴华, 赵宝升, 刘永安, 等. 紫外单光子成像系统增益特性研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 1779-1784.

[5] LIAO Hua, HU Xin, YANG Qin-lao, *et al.* Soft X-ray streak camera with dynamic range of 2000 and picosecond temporal resolution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2190-2193.
廖华, 胡昕, 杨勤劳, 等. 动态范围 2000 的皮秒时间分辨软 X 射线扫描相机[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 2190-2193.

[6] YANG Wen-zheng, HOU Xun, BAI Yong-lin, *et al.* Uniform design method of the exposure time of X-ray picoseconds framing camera with gated microchannel plate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 339-443.
杨文正, 侯洵, 白永林, 等. 微通道板选通 X 射线皮秒分幅相机曝光时间的均匀设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 339-443.

[7] BAI Xiao-hong, BAI Yong-lin, LIU Bai-yu, *et al.* A kind of 30-40 ps cascade gating x-ray framing camera with chevron MCPs[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1351-1355.
白晓红, 白永林, 刘百玉, 等. 一种双 MCP 选通型 30-40 ps 软 X 射线分幅相机[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1351-1355.

[8] LI Xiao-feng, ZHANG Jing-wen, GAO Hong-kai, *et al.* Ion barrier of MCP in the third generation mage intensifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(12): 1496-1499.
李晓峰, 张景文, 高鸿楷, 等. 三代管 MCP 离子阻挡膜研究[J]. *光子学报*, 2001, **30**(12): 1496-1499.

[9] YAN Jin-liang. Studies of electron transmission film at the input of MCP by AES [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 677-680.
闫金良. 微通道板电子透射膜工艺的 AES 研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 677-680.

[10] YAN Jin-liang. Operating effectiveness of electron transmission film at the input of MCP [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 164-166.
闫金良. 微通道板电子透射膜的工作特性[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2): 164-166.

[11] LIU Yong-an, ZHAO Fei-fei, HU Hui-jun, *et al.* Properties of photon counting imaging detector with Au photocathode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 217-222.
刘永安, 赵菲菲, 胡慧君, 等. 采用金阴极的光子计数成像探测器的性能[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 217-222.

[12] QIAN Yun-sheng, CHANG Ben-kang, ZHAN Qi-hai, *et al.* Development of signal-to-noise ratio tester for LLL image intensifier [J]. *Vacuum Science And Technology*, 2002, **22**(5): 389-391.
钱芸生, 常本康, 詹启海, 等. 微光像增强器信噪比测试技术研究[J]. *真空科学与技术*, 2002, **22**(5): 389-391.

[13] XU Jiang-tao. Mass spectrum analysis of releasing gas composition of II generation MCP [J]. *Journal of Applied Optics*, 2000, **21**(5): 1-4.
徐江涛. 二代微通道板(MCP)放气成份质谱分析[J]. *应用光学*, 2000, **21**(5): 1-4.

[14] XIAO Kun-xiang, ZHOU Ming-gui, TAN Xiao-hua. The influences of electromagnetic field and pressure on hydrogen ionization in penning ion source [J]. *Vacuum Electronics*, 2003, **23**(6): 23-28.
肖坤祥, 周明贵, 谈效华. 潘宁离子源中电磁场和气压对氢气电离的影响[J]. *真空电子技术*, 2003, **23**(6): 23-28.

Effect of Electron Rinse on Output SNR and Electron Gain of the Microchannel Plates

CUI Dong-xu^{1,2}, ZHENG Shao-cheng¹, QIU Ya-feng¹, QIAN Yun-sheng¹, CHANG Ben-kang¹

(1 *Institute of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

(2 *Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China*)

Abstract: The microchannel plate (MCP) is a core device of the image intensifier for the characteristic of the electron gain. The electron rinse is a common way in the flow of the microchannel plate produce but it also changed the other characteristics of the microchannel plate. To study the effect of the electron rinse on the output signal to noise ratio and the electron gain of the microchannel plate, the method of the output signal to noise ratio test and the electron gain test based on their definition are discussed. The microchannel plate parameters test system is designed and the microchannel plate is rinsed by electron in the microchannel plate parameters test system. The output signal to noise ratio and the electron gain of the microchannel plate are tested in the process of the electron rinse at different stages. The causation of the variation of the output signal to noise ratio and the electron gain is analyzed.

Key words: Microchannel plate(MCP); Electron rinse; Output signal noise ratio(SNR); Electron gain