

〈微光技术〉

电子清刷对双 MCP 像增强器闪烁噪声的影响

冯 刘^{1,2}, 刘 晖^{1,2}, 张连东^{1,2}, 高 翔^{1,2}, 苗 壮^{1,2}, 程宏昌^{1,2}, 贺英萍^{1,2}, 史鹏飞^{1,2}

(1.微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2.北方夜视科技集团有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 由于微通道板除气不彻底, 导致双微通道板像增强器在工作时视场上出现闪烁噪声, 因而无法正常工作。为了消除闪烁噪声并使微通道板增益进入一个稳定值区间, 采用不同的电子清刷控制方法, 对两块微通道板进行彻底除气, 结果表明: 增大萃取电荷量的方法在减少闪烁噪声的同时也会降低像增强器的增益, 而增加台外预先电子清刷阶段并且使第二块微通道板的预先萃取电荷量大于第一块微通道板, 可以完全消除闪烁噪声。选择合适的预先萃取电荷量, 可以保证像增强器的增益达到 10^5 以上, 制作出合格的双微通道板像增强器。

关键词: 电子清刷; 双微通道板; 像增强器; 闪烁噪声; 萃取电荷量

中图分类号: TN223 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)05-0295-05

Influence of Electron Scrubbing on Flicker Noise of Double-MCP Image Intensifiers

FENG Liu^{1,2}, LIU Hui^{1,2}, ZHANG Lian-dong^{1,2}, GAO Xiang^{1,2}, MIAO Zhuang^{1,2},
CHENG Hong-chang^{1,2}, HE Ying-ping^{1,2}, SHI Peng-fei^{1,2}

(1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;

2. North Night Vision Science & Technology Group Co., Ltd., Kunming 650223, China)

Abstract: Inadequate degassing generated heavy flicker noise on field of view, which enabled double-MCP image intensifiers not to work normally. In order to eliminate flicker noise and achieve stable MCP gains, different electron scrubbing schemes were used to degas completely two MCPs. The results indicated that if extracted charge amount was increased, flicker noise was degenerated while the gain of image intensifier was decreased, but if combined pre-electron-scrubbing with more pre-extracted charge amount of second MCP than of first MCP, flicker noise was completely eliminated. In result, if appropriate pre-extracted charge amount was chosen, the gain of image intensifier could be more than 10^5 and double-MCP image intensifiers up to standard could be produced.

Key words: electron scrubbing, double-MCP, image intensifier, flicker noise, extracted charge amount

0 引言

微通道板 (Micro Channel Plate, 简称“MCP”) 是一种列阵式微通道电子倍增器, 具有很高的二次电子发射系数。双微通道板像增强器采用两块 MCP 以“V”型级联作为电子倍增器, 具有低噪声、高增益、快响应等特点, 广泛用于军事、天文、生物等弱光探测成像领域^[1-6]。

MCP 的引入会大大提高像增强器的增益 (单 MCP 型增益达到 $10^3\sim10^4$, 而双 MCP 型可达 10^5)

以上), 但也会导致信噪比变差, 暗电流增加^[2,7]。由于制作过程中曾暴露大气, 微通道板外表面和通道内壁会吸附大量的 H_2O 、 N_2 、 H_2 、 CO 、 CO_2 等气体^[8-11], 因此必须通过真空烘烤和电子清刷来实现 MCP 的彻底除气^[12]。

制作的双 MCP 像增强器的视场出现闪烁噪声 (俗称“雪花点”), 必须进行抑制或消除, 否则将严重影响像增强器的正常使用。闪烁噪声是由于 MCP 除气不彻底, 通道内残余气体分子电离后离子轰击光阴极所致。对于闪烁噪声的处理, 孙立群等人提

收稿日期: 2012-09-17; 修订日期: 2013-03-11。

作者简介: 冯刘 (1980-), 男, 重庆人, 硕士, 主要从事三代微光阴极制作与分析工作。E-mail: bit551@163.com。

出通过降低 MCP 工作电压、制冷和屏蔽等方式来降低噪声^[13-14]，这是对像增强器成品的补救措施。利用电子枪或紫外灯对 MCP 进行电子清刷，可较彻底地消除 MCP 通道内残余气体，并使器件度过增益不稳定时期，降低闪烁噪声^[1,14]。本文正是基于此结论提出了通过调整 MCP 的电子清刷工艺来消除闪烁噪声，彻底地除去 MCP 通道内壁的残余气体，并使 MCP 度过增益不稳定期，在像增强器制作阶段就将闪烁噪声产生的源头消除。

1 原理介绍

双 MCP 像增强器采用两块 MCP 以“V”型级联的方式作为电子倍增器，见图 1，结构与常规像增强器类似，本文采用多碱光阴极。

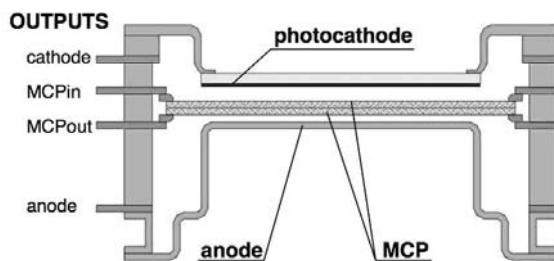


图 1 双 MCP 像增强器结构示意图

Fig.1 Configuration diagram of double-MCP image intensifier

对于两块 MCP 的安装，有研究表明在两块 MCP 间距为 30 μm 时（用 30 μm 厚的 Au 箔相隔），电子通过级联通道的效率最高^[15]，也有报道称采用特殊方法使板间距在 10~35 μm 之间，可以保证器件性能^[16]。本文采用完全紧贴的“V”型级联，并且利用光照法保证 MCP 的对孔准确率。

双 MCP 像增强器的电子清刷原理见图 2，利用电子枪或紫外灯发射电子，电子在电场作用下轰击 MCP 表面，进入通道内的电子产生大量二次电子，不断轰击 MCP 内壁，可以除去表面上或通道内吸附的气体。

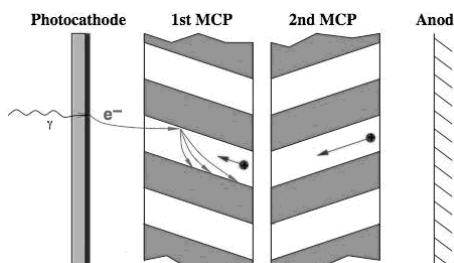


图 2 双微通道板电子清刷的原理图

Fig.2 Electronic scrubbing schematic diagram of double-MCP

在电子清刷的初始阶段，增益会逐渐下降，吸气和放气局部可逆，重新吸气可导致初始增益的部分恢复，见图 3 的第 I 阶段。严格控制萃取电荷量（extracted charge amount，缩写“ECA”），直到 MCP 彻底除气，并且使增益进入一个稳定值区间，得到真实的 MCP 增益，即第 II 阶段，Boutot 称增益约下降到清刷前的 1/3^[8]。电子清刷时除了要尽量使 MCP 彻底除气，还要防止萃取电荷过量而破坏二次电子发射层，导致 MCP 增益持续下降，即第 III 阶段。

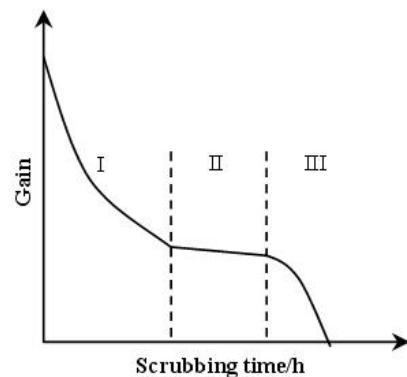


图 3 微通道板电子清刷过程中的增益变化曲线

Fig.3 Curve of MCP gain during electron scrubbing

2 实验

2.1 原因分析

单 MCP 像增强器的电子清刷过程共分为 3 个阶段，见表 1，以荧光屏的阳极电流来进行控制，按照公式(1)，萃取电荷量为 216 mC。双 MCP 像增强器采用两块同规格的 8 μm 板，进行相同的电子清刷处理，视场出现闪烁噪声，见图 4(a)。

$$q = \sum i_x \cdot t_x \cdot 3600 / 1000 \quad (1)$$

式中： q 为萃取电荷量，mC； i 为清刷阶段的阳极电流，μA； t 为该阶段时间，h。

电子清刷时， MCP_{in} 接零电位，通过改变灯丝电流和各极电压来调节阳极电流，经过不同阶段的电子清刷，萃取一定的电荷量，完成 MCP 电子清刷。由于输入电子多，MCP 几乎没有倍增作用，输入输出电流几乎相等。

表 1 列出了单/双 MCP 像增强器在不同清刷阶段中电子枪的灯丝电流和 MCP 输出端电压，可以看出，对于同样的阳极电流，双 MCP 需要更大的灯丝电流，这意味着第一块 MCP 的输入面接收到更多的入射电子，那么它的输出电子肯定多于单 MCP 时的输出电子，理论上进入第二块 MCP 的输

入电子和输出电子也比单 MCP 的输入、输出电子多, 而实际清刷时双 MCP 像增强器的输出电子与单 MCP 相等。分析认为由于双块 MCP 采用完全紧贴的“V”型级联方式, 导致两块 MCP 之间存在对孔率问题, 因而部分微通道的输入电子较少甚至可能没有, 有效工作的电子倍增通道数量减少。当要求双 MCP 像增强器在电子清刷时获得与单 MCP 相同的输出电流时, 需要增加第二块 MCP 的输入电子, 因此电子枪的灯丝电流反而要比单 MCP 的大。以单 MCP 的萃取电荷量为标准, 第一块 MCP 的萃取电荷量已经足够甚至可能过量, 而第二块 MCP 也已经足够, 但是双 MCP 像增强器却有明显的闪烁噪声, 这同样是由于“V”型级联存在对孔率的问题, 虽然第二块 MCP 的萃取电荷量足够, 但是在清刷中有部分通道只有很少电子输入, 导致第二块 MCP 除气不够彻底, 残余气体电离后轰击光阴极产生闪烁噪声。

表 1 电子清刷中的灯丝电流和 MCP_{out} 电压Table 1 Filament current and MCP_{out} voltage during electron scrubbing

| $I_A/\mu A$ | t/h | Single MCP | | Double MCP | |
|-------------|-------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| | | I_C/A | U_{MCPout}/kV | I_C/A | U_{MCPout}/kV |
| 4 | 2 | 3.7 | 0.7 | 4.1 | 1.4 |
| 8 | 4 | 4.1 | 0.8 | 4.4 | 1.6 |
| 10 | 2 | 4.2 | 0.9 | 4.5 | 1.8 |

注: I_A 为阳极电流, t 为阶段时间, I_C 为灯丝电流, MCP_{in} 为接零电位, MCP_{out} 为 MCP 输出电压, 两块 MCP 之间不加电压 (见图 1)。

2.2 实验方案

双 MCP 像增强器利用光照法保证 MCP 的对孔准确率, 在超高真空设备内完成制作工作, 真空度优于 5.0×10^{-7} Pa。MCP 电子清刷采用的电子枪为国产电子枪^[17], 以“V”型钨铼合金丝作为灯丝, 发射电流密度可达 1.2×10^{-5} A/cm², 完全能满足工作要求。

表 2 不同实验方案的萃取电荷量

Table 2 Extracted charge amount in different experiment schemes

| Scheme name | Increasing extracted charge amount in equipment (ECA_{in}) | Adopting pre-electron-scrubbing before entering equipment (pre- ECA_{MCP}) | | |
|-------------|--|--|--|--|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Contents | $ECA_{in} = 360, 540, 720$ and 1080 mC | $Pre-ECA_{MCP1} = 144\text{ mC}$ $Pre-ECA_{MCP2} = 216\text{ mC}$ $ECA_{in} = 216\text{ mC}$ | $Pre-ECA_{MCP1} = 216\text{ mC}$ $Pre-ECA_{MCP2} = 288\text{ mC}$ $ECA_{in} = 216\text{ mC}$ | $Pre-ECA_{MCP1} = 288\text{ mC}$ $Pre-ECA_{MCP2} = 360\text{ mC}$ $ECA_{in} = 216\text{ mC}$ |

注: ECA 为 extracted charge amount 的缩写, 即萃取电荷量。

结合实验要求和近年来的研究成果^[18-20], 将实验方案分两类, 一是增大萃取电荷量, 从之前的 216 mC(与单 MCP 像增强器相同)增加至 360 mC、540 mC、720 mC 和 1080 mC, 共 4 种; 二是增加台外的预先电子清刷阶段, 对两块 MCP 分别进行电子清刷后再装入制作设备, 烘烤后再次进行电子清刷 ($ECA_{in} = 216\text{ mC}$)。根据前面的分析, 双 MCP 像增强器出现闪烁噪声是第二块 MCP 在级联清刷时除气不彻底, 因而预先清刷时第二块 MCP 的萃取电荷量比第一块要大, 见表 2。

3 结果与讨论

图 4 是双 MCP 像增强器的视场图, 图 4(a)是实验改进前所制作的像增强器, 其萃取电荷量为 216 mC, 可以看出存在非常明显的闪烁噪声。图 4(b)是将萃取电荷量增加至 720 mC, 闪烁噪声较小, 但是视场较暗。

表 3 是将萃取电荷量增加至 360~1080 mC 的测试结果, 并通过在相同输入光照下视场的亮度来判断增益大小, 增益大亮度大。

从图 4(a)、(b)和表 3 可以看出, 增大萃取电荷量能够减少闪烁噪声, 但是同时也会降低视场亮度。这一结果说明加大萃取电荷量可以改善第二块 MCP 的除气程度, 但是在增大萃取电荷量的电子清刷过程中, 会对第一块 MCP 的二次电子发射层造成极大损伤, 板增益逐渐从稳定值区间 II 进入不可逆的衰减阶段 III。对第二块 MCP 而言, 有大量倍增电子进入的通道也存在损伤, 使这些通道的增益降至一个不可恢复的阶段。因此, 随着萃取电荷量的增加, 整管增益大幅降低, 视场变暗。

萃取电荷量为 720 mC 时, 测试结果相对较佳, 见图 4(b), 对应单 MCP 像增强器所需的 216 mC 来说, 第二块 MCP 的电荷萃取效果估计不到 30%。显然增大萃取电荷量的方案不适合两块“V”型级联 MCP 的除气, 不但对第一块 MCP 存在损伤, 而且不能对第二块 MCP 进行彻底除气。

表4列出了按照方案2(增加台外预先电子清刷阶段)制作的双MCP像增强器的测试结果(工作条件阴极电压-500V, MCP_{in} 接零电位, MCP_{out} 从单MCP的800V变为1600V, 荧光屏电压5600V), 每种各2只像增强器。

表3 方案1双MCP像增强器的测试结果

Table 3 Measurement results of scheme 1

| Extracted charge amount / mC | | | | | |
|------------------------------|----------|---------|-------|--------|----------|
| | 216 | 360 | 540 | 720 | 1080 |
| Degree of flicker noise | Heaviest | Heavier | Heavy | Slight | Slighter |
| Brightness | | | | | |
| of field of view | Brighter | Bright | Dark | Darker | Darkest |

表4 方案2双MCP像增强器的测试结果

Table 4 Measurement results of scheme 2

| | 1 | 2 | 3 |
|---------------|--|---------------------------|---|
| Flicker noise | Very slight | N/A | N/A |
| Gain | 1#=55665.0 $/(cd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1})$ | 3#=127265.1 2#=61253.4 | 5#=82677.5 4#=119733.7 6#=84926.7 |

图4(c)、(d)、(e)是增加预先电子清刷阶段的3种像增强器的视场图, 图4(c)中有轻微的闪烁噪声, (d)、(e)图中均无闪烁噪声, 但(e)图中视场相对稍暗。比较表4的测试结果, 第一组仍然存在轻微的闪烁噪声, 增益稍低, 说明预先萃取电荷量不够, 微通道板通道内部仍然残余了部分气体, 虽然进行台内二次清刷, 但是由于“V”型级联的对孔率问题, 第二块MCP的清刷并不彻底, 板增益没有进入稳定值区间, 某些微通道内的倍增电子被气体电离产生的离子淹没, 所以像增强器的视场出现非常轻微的闪烁噪声, 并且整管增益也相对要低。第二组、

第三组的预清刷较为彻底, 微通道内无残余气体, 因而没有闪烁噪声, 第二组的增益达到 10^5 以上, 第三组的增益相对低一些。第三组的第一块MCP经过先后两次电子清刷后, 其萃取电荷量过量, 导致板增益降低, 因而整管增益也降低。当MCP经过预先电子清刷阶段后, 板增益处于初始阶段I或稳定阶段II时, 吸气和放气局部可逆, 取出后暴露大气的同时会重新吸气, 导致初始增益的部分恢复, 所以必须保证两块MCP经过两次电子清刷后, 板增益均处于稳定值区间。预清刷后再次装入设备的过程中, MCP表面或通道内会吸附一定量的气体, 但是远远少于未清刷过的MCP, 经过二次清刷后, 可以彻底消除噪声, 并使MCP工作稳定。

4 结论

双MCP像增强器的两块MCP以“V”型级联, 由于存在对孔率, 会导致一定的板增益损失, 我们利用光照法尽量保证MCP的对孔准确率。两块MCP都需要通过高温烘烤和电子清刷进行彻底除气, 才能保证暗电流少, 噪声小。对两块MCP分别进行预先电子清刷, 并加大第二块MCP的预先萃取电荷量, 可以有效地抑制或消除闪烁噪声, 制作的双MCP像增强器视场清晰, 这与Adrian等人的研究成果相似^[18]。

适当控制预先萃取电荷量, 可以保证所制作的双MCP像增强器的整管增益达到 10^5 以上, 比单MCP多碱像增强器高出1~2个数量级。预先进行电子清刷的方法, 适用于采用多块MCP的像增强器、光电倍增管、光子计数器等光电器件。

经过两次电子清刷后, 第一块MCP的萃取电荷量可能偏大, 因此需要进行更深入的研究来优化实验方案, 例如适当降低其预先电子清刷的萃取电荷量或者台内的二次萃取电荷量。

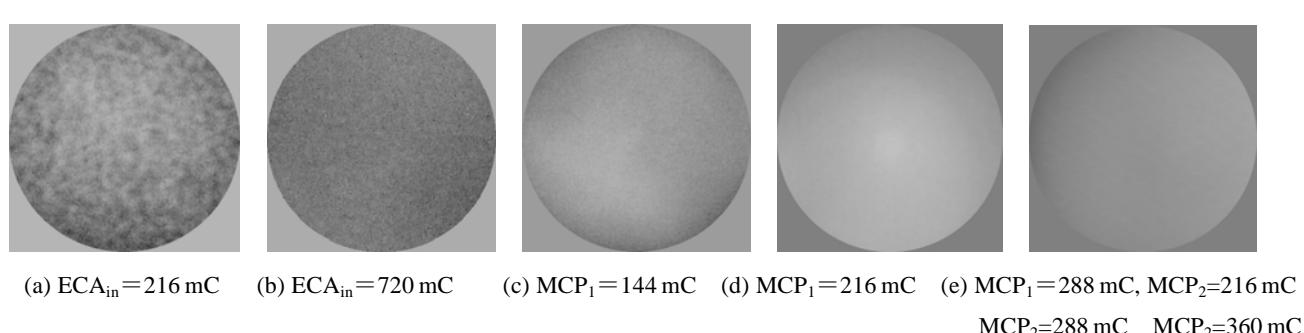


图4 双MCP像增强器的视场

Fig.4 Field of view of double-MCP image intensifiers

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 阎金良. 电子透射膜的生成及其对微通道板性能的影响[J]. 真空科学与技术, 2003, 23(5): 356-358, 368.
- [3] Mario Marckwordt, Geoffrey Gaines, Jerry Edelstein, et al. The EUV detector of the Cosmic Hot Interstellar Plasma Spectrometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5164: 43-53.
- [4] 孙立群, 黄运添, 唐天同, 等. 微光图象光子计数器象管光子增益测试研究[J]. 光子学报, 1997, 26(6): 498-503.
- [5] 张兴华, 赵宝升, 缪震华, 等. 紫外单光子成像系统的研究[J]. 物理学报, 2007, 57(7): 5238-4243.
- [6] 李慧蕊. 真空紫外微通道板光电倍增管的研制[J]. 真空科学与技术, 1999, 19(5): 384-388.
- [7] 戴丽英, 陈举忠. 快速MCP型光电倍增管中暗电流的分析与研究[J]. 真空电子技术, 1999(3): 1-4.
- [8] Boutot J P. Degassing of micro channel plates[J]. *Acta Electronica*, 1971, 14(2): 245-262.
- [9] 刘术林, 彭磊, 许志清, 等. 高性能微通道板除气过程中电阻的变化[J]. 应用光学, 2007, 28(6): 732-736.
- [10] 徐江涛. 二代近贴管微通道板(MCP)电子清刷技术[J]. 应用光学, 2001, 22(4): 23-26.
- [11] 韦亚一, 陶兆民. 微通道板大量放气的原因[J]. 红外技术, 1993, 15(1): 45-47.
- [12] 赵文锦. 微通道板及其真空处理工艺研究[J]. 真空电子技术, 1999, 2(2): 51-54.
- [13] 孙立群, 向世明, 白丽华, 等. 微光图象光子计数器象管等效背景测试研究[J]. 应用光学, 1996, 17(1): 7-11.
- [14] 朱宇峰, 向世明. 噪声对光子计数成像质量的影响[J]. 应用光学, 2008, 29(Sup.): 34-37.
- [15] 白晓红, 白永林, 刘百玉, 等. 一种双MCP选通型30~40ps软X射线分幅相机[J]. 光子学报, 2008, 37(7): 1351-1355.
- [16] 徐江涛. 双微通道板光电倍增管的研究[J]. 真空科学与技术, 2000, 20(5): 358-360.
- [17] 程宏昌, 石峰, 侯志鹏, 等. 微通道板(MCP)电子清刷用电子枪的设计[J]. 应用光学, 2007, 28(5): 582-586.
- [18] Adrian Martin, John Vallerga, Jason McPhate, et al. Further scrubbing and quantum efficiency results of the HST-COS far ultraviolet detector[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4854: 526-531.
- [19] 刘术林, 邓广绪, 严诚, 等. MCP增益与首次碰撞时电子能量关系的试验研究[J]. 红外技术, 2011, 33(6): 354-356.
- [20] 张洋, 黄永刚, 刘辉, 等. 阳极氧化铝微通道板研究的进展[J]. 红外技术, 2012, 34(7): 427-432.

(上接第 273 页)

- [5] 余刚, 王慧, 刘静. ITO 薄膜光电性能红外\可见光谱分析方法[J]. 玻璃, 2007, 3(192): 6-8.
- [6] Wolffer N, Vinouze B, Lever R, et al. 8 multiplied by 8 holographic single mode fiber switch based on electrically addressed nematic liquid crystal deflectors[C]//SPIE Bellingham, 2000, 4089: 311-320.
- [7] 白胜元, 黄昱勇, 顾培夫, 等. 红外高透射率 ITO 薄膜的设计与制备[J]. 光电工程, 2002, 29(1): 26-29.
- [8] 刘德雄, 唐金龙, 温才, 等. ZAO 导电膜的制备与性能分析[J]. 功能材料, 2011, 42(增刊IV): 688-690.
- [9] Kawazoe H, Yasukawa M, Hyodo H, et al. P-type electrical conduction in transparent thin films of CuAlO₂[J]. *Nature*, 1997, 389: 939-942.
- [10] Linda F Johnson, Mark B Moran. Infrared transparent conductive oxides[J]. *Window and dome technologies and materials VII*. 2001, 4375: 289-299.
- [11] Thomas G. Materials science-invisible circuits[J]. *Nature*, 1997, 389: 907-908.
- [12] 申振峰, 冯晓国, 高劲松, 等. 用于红外窗电磁屏蔽的电感性网栅薄膜[J]. 红外技术, 2008, 30(8): 468-471.
- [13] 陈宇. 透红外/可见光学窗的电磁屏蔽技术[J]. 红外技术, 2012, 34(7): 393-397.