

引用格式: LI Xiao-feng, LI Ting-tao, ZENG Jin-neng, *et al.* Study on the Improvement of Input Signal Utilization of MCP [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3):0325002

李晓峰,李廷涛,曾进能,等.微通道板输入信号利用率提高研究[J].光子学报,2020,49(3):0325002

微通道板输入信号利用率提高研究

李晓峰,李廷涛,曾进能,常乐,陈超

(北方夜视技术股份有限公司,昆明 650217)

摘 要:分析了微通道板输入信号损失的原因,提出了在微通道板输入端镀制绝缘层,从而提高微通道板输入信号利用率的方法,并进行了试验.试验结果表明:在微通道板输入端镀制一层 15nm 的绝缘层,可以提高微通道板输入信号的利用率,从而提高微通道板的增益.绝缘层的二次电子发射系数越高,微通道板输入信号的利用率越高,增益提高的比例越大.对 SiO_2 膜层而言,可以提高 12% 左右;对 Al_2O_3 膜层而言,可以提高 35% 左右.在微通道板增益提高的同时,像增强器的分辨力和调制传递函数会降低,并且绝缘层的二次电子发射系数越高,分辨力和调制传递函数降低的比例越大.但微通道板分辨力和调制传递函数降低的比例远低于增益提高的比例.本文提出的提高微通道板输入信号利用率的方法具有一定的实用性,可以推广使用.

关键词:微通道板;像增强器;二次电子发射;分辨力;调制传递函数

中图分类号:O462.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204903.0325002

Study on the Improvement of Input Signal Utilization of MCP

LI Xiao-feng, LI Ting-tao, ZENG Jin-neng, CHANG Le, CHEN Chao

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

Abstract: In this paper, the reason of input signal loss caused by input electrode of Microchannel Plate (MCP) is analyzed, and a method of plating insulation layer on input end of MCP is proposed to increase the utilization of input signal of MCP which is verified by experiment. The experimental results show that a layer of 15 nm thick insulating layer is plated on the input end of the MCP, which can increase the utilization of the input signal of the MCP and the gain of the MCP. The higher the secondary electron emission coefficient of the insulating layer is, the higher the utilization ratio of the input signal of the MCP is, and the larger the ratio of the gain increase is. For SiO_2 films, the gain can be increased by about 12%. For Al_2O_3 films, the gain can be increased by about 35%. At the same time, the resolution and MTF of image intensifier will decrease slightly. Similarly, the higher the secondary electron emission coefficient is, the larger the decrease ratio of resolution and MTF is. However, the decrease ratio of resolution and MTF of MCP is much lower than that of gain increase. The method proposed in this paper to increase the utilization rate of input signal of MCP has certain practicability and can be popularized.

Key words: Microchannel plate; Image intensifier; Secondary electron emission; Resolution; Modulation Transfer Function

OCIS Codes: 250.0040; 040.3780; 040.5250; 040.5160; 230.2090; 060.2350

0 引言

像增强器是一种在微弱光条件下使用的成像器件^[1-3],它采用微通道板(Microchannel Plate, MCP)作为

基金项目:国家自然科学基金(No.11535014)

第一作者:李晓峰(1963-),男,正高级工程师,博士,主要研究方向为微光夜视技术. Email:984118295@qq.com

收稿日期:2019-11-25;录用日期:2019-12-20

<http://www.photon.ac.cn>

电子倍增器^[4-9].在像增强器中,光电阴极产生的光电子向 MCP 输入端运动,经 MCP 倍增后从输出端输出. MCP 输入信号在进入 MCP 通道的过程中会有所损失.原因是 MCP 输入端面上不仅有通道孔,而且还有通道壁,因此并非所有信号均能进入 MCP 通道并从输出端输出.如对 $\Phi 25/6$ 型微通道板,开口比约为 65%.从几何角度考虑,会导致约 35% 的输入信号损失,而这 35% 的信号损失会降低像增强器的增益,从而影响像增强器的探测阈值.因此提高 MCP 的开口比,减小输入信号损失一直是 MCP 最重要的研究方向之一.研究人员曾采取了多种“扩口”技术^[10-13],比如,将 MCP 输入端的通道口制作成为喇叭状,可以将 MCP 的开口比提高到 80% 以上.但由于这些“扩口”技术均未能实现产业化,所以到目前为止,对成像型的 MCP 而言,开口比仍未能超过 70%.因此如何在现有开口比一定的条件下挖掘潜力,进一步提高 MCP 输入信号的利用率是一个值得研究的问题.关于如何解决 MCP 输入信号损失的问题,国内外均有文献提出在 MCP 输入端镀制一层高二次电子发射系数膜层的方法^[14-18],但在这些文献中并没有给出具体的实验结果和结论,也没有分析在 MCP 的输入端镀制一层高二次电子发射系数膜层之后,是否会对 MCP 的其他性能带来影响.本文通过实验验证前人所提出方法的正确性、分析该方法的实际效果以及随之所带来的问题,为该种方法的推广应用提供参考.

1 输入信号利用率提高原理

为保证 MCP 输入输出电极具有良好的导电性和粘附性,电极采用镍铬合金并利用真空蒸发的工艺镀制.因此在 MCP 输入端面上镀制电极时,除通道壁会镀上电极外,通道孔中也会镀上电极,即电极会浸入通道内一定的深度,见图 1.图 1 为 MCP 输入端单根通道子午截面的示意图.从图 1 可直观的看出, MCP 的输入电极实际上由两部分组成,一部分为通道壁电极,另一部分为浸入电极.

在像增强器中,向 MCP 输入端运动的电子束可分为三部分.第一部分为对准 MCP 输入端通道壁的电子束 h_1 ;第二部分为对准 MCP 通道孔的电子束 h_2 ;第三部分为对准 MCP 浸入电极的电子束 h_3 .之所以存在第三部分电子束 h_3 ,是因为 MCP 存在一定的斜切角.当第一部分电子 h_1 和第三部分电子 h_3 与 MCP 输入电极碰撞时,由于其二次电子发射系数较低,因此所产生的二次电子比与 MCP 通道内壁碰撞所产生的二次电子少,相当于造成了信号损失.原理上讲,电子入射到输入电极时,除会产生二次电子外,还会产生背散射电子等,此处为简化问题,仅考虑电极的二次电子发射特性.要提高输入电极的二次电子发射系数,可以在 MCP 输入电极上镀制一层具有高二次电子发射系数的膜层(如氧化物膜层).由于该膜层具有较高的二次电子发射系数,因此提高了 MCP 输入电极的二次电子发射系数,所以产生的二次电子数更多了,这相当于提高了 MCP 输入信号的利用率.例如电子束 h_1 入射在通道壁上,产生的二次电子在电场作用下会返回并进入通道,这样入射在通道壁上的电子束 h_1 与入射在通道内的电子束 h_2 一样,成为了有效信号.不同之处是电子束 h_1 在通道壁上产生二次电子,而电子束 h_2 却在通道内壁上产生二次电子.同样,入射在浸入电极上的电子束 h_3 也成为了有效信号,所以提高了输入信号的利用率,见图 2.

MCP 的增益是其输出电流与输入电流之比.在 MCP 输入端表面蒸镀绝缘层之前,输入信号有一定的损失,因此有效输入信号减小.但当在 MCP 输入端表面蒸镀绝缘层之后,输入信号损失减小,有效输入信号增大,导致输出电流随之增加,在输入电流一定的条件下,相当于提高了 MCP 的增益.

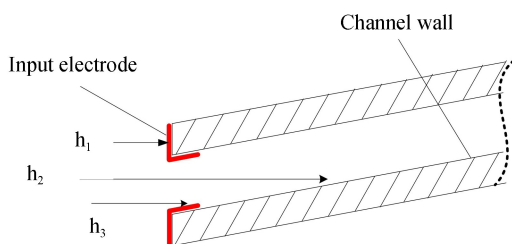


图 1 MCP 输入通道示意图

Fig.1 Diagram of channel of MCP input end

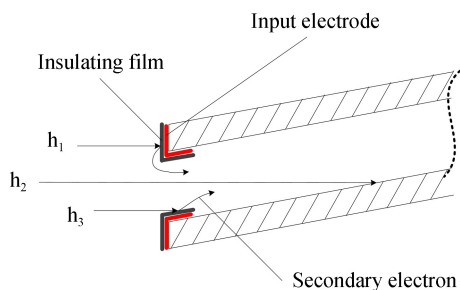


图 2 MCP 输入端镀膜示意图

Fig.2 Diagram of input end of MCP with coated film

2 试验结果及分析

为了验证以上理论分析的正确性,利用试验进行了验证.试验在像增强器上进行,MCP采用 $\Phi 25/6$ 型,孔径为 $6\ \mu\text{m}$,斜切角为 6° ,浸入电极深度为 $3\ \mu\text{m}$;荧光屏采用P22荧光粉(输出窗为光纤倒像器).MCP输入端所镀制的材料为 SiO_2 、 TiO_2 、 Y_2O_3 以及 Al_2O_3 共4种,镀制采用电子束蒸发工艺,所镀膜层厚度为 $15\ \text{nm}$.另外,镀膜时将MCP的输入端遮挡一半,使膜层仅仅镀制在未被遮挡的另一半上,见图3.这样做的好处是,比较MCP镀膜和非镀膜的区别时,可以排除不同MCP性能差异所带来的影响.为叙述方便,将MCP的镀膜区称为A区,未镀膜区称为B区.

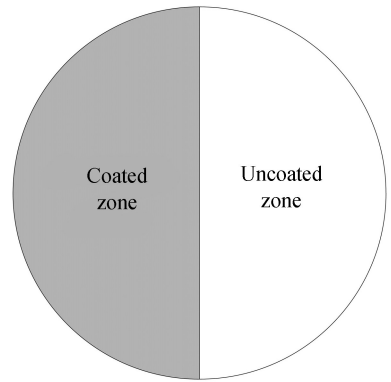


图3 MCP镀膜区和非镀膜区
Fig.3 Coated zone and uncoated zone in MCP input end

像增强器样品制作完成以后,对其进行了测试.测试时,阴极电压为 $200\ \text{V}$,MCP电压为 $800\ \text{V}$,荧光屏电压为 $6\ 000\ \text{V}$,并且对样品的A区和B区分别进行测试.表1为测试结果,其中 S 表示阴极灵敏度, G_A 、 G_B 分别表示像增强器A区和B区的增益, G_{MA} 和 G_{MB} 分别表示MCP的A区增益和B区增益, Δ 表示A区MCP增益较B区MCP增益提高的百分比.需要说明的是表1中的 G_{MA} 和 G_{MB} 是根据阴极灵敏度、荧光屏发光效率以及像增强器增益数据计算得出的.计算时,荧光屏发光效率的数值为 $13\ \text{lm/W}$.

表1 样品镀膜区和非镀膜区增益测量结果
Table 1 Measurement data of MCP gain in different zone

Sample	Film	$S/(\mu\text{A} \cdot \text{lm}^{-1})$	$G_A/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1})$	$G_B/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1})$	G_{MA}	G_{MB}	$\Delta/\%$
7038#	SiO_2	913	11 090	9 901	156	139	12.2
7057#	SiO_2	969	9 460	8 383	125	111	12.6
7023#	TiO_2	868	13 100	11 390	193	168	14.9
7024#	TiO_2	851	10 300	8 803	155	132	17.4
7033#	Y_2O_3	958	13 180	10 715	176	143	23.1
7065#	Y_2O_3	935	12 320	9 856	169	135	25.2
7055#	Al_2O_3	871	10 570	8 068	161	119	35.3
7041#	Al_2O_3	820	13 150	9 392	206	147	40.1

从表1可看出,在MCP的输入端镀制绝缘层以后,4种膜层、8支样品A区的像增强器增益均高于B区.像增强器由光电阴极、MCP和荧光屏三部分组成,其增益与阴极灵敏度、MCP增益以及荧光屏的发光效率成正比.对同一样品,因为光电阴极、MCP以及荧光屏相同,所以像增强器A区和B区增益不同的原因就在于A区的MCP增益高于B区.A区MCP增益高的原因是由于绝缘层阻挡了信号损失,使有效输入信号比B区多,相应的输出电流也多,所以使得A区的MCP增益高于B区.从表1还可以看出,尽管4种材料,8支样品的A区MCP增益较B区均有所提高,但提高的百分比不同.比如,对于 SiO_2 膜层的7038#和7057#样品,增益增加百分比在12%左右,但对于 Al_2O_3 膜层的7055#和7041#样品,增益提高的百分比在35%以上.需要说明的是对同一种材料膜层,不同样品MCP增益提高的比例略有不同,比如对于7038#和7057#样品,所镀膜层均为 SiO_2 ,但7038#样品MCP增益提高的比例为12.2%,而7057#样品MCP增益提高的比例却为12.6%.产生区别的原因是MCP所镀膜层存在一定的离散性.因为在镀膜过程中,在不同位置处的MCP,其被蒸镀膜层的厚度、深度均略有差异,从而造成MCP增益提高的比例存在一定的差异.MCP增益提高百分比不同的原因是膜层材料的二次电子发射系数不同.二次电子发射系数越高,MCP增益提高的百分比越高.4种材料中, Al_2O_3 的二次电子发射系数最高,因此其导致的MCP增益提高百分比最高,而 SiO_2 的二次电子发射系数最低,其导致的MCP增益提高百分比最低.

在MCP的输入端镀制一层绝缘层后,尽管可以提高MCP输入信号的利用率以及MCP增益,从而提高

像增强器的增益,但同时一定程度上影响像增强器的分辨力.表2为以上8支样品的分辨力测试结果.测试时,分别对MCP的A区和B区进行测试.另外为了使比较更具说服力,在测试分辨力时,无论是A区还是B区,均将其增益统一在 $10\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$.即当测试A区分辨力时,通过调节MCP的电压使样品A区的像增强器增益达到 $10\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$,之后再测量样品A区的分辨力;而当测试B区分辨力时,再次调节MCP的工作电压使样品B区的增益达到 $10\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$,然后再测量B区的分辨力.表2中的 V_A 、 V_B 分别表示样品A区、B区对应像增强器 $10\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ 增益时的MCP工作电压, R_A 、 R_B 分别表示样品A区、B区的分辨力.另外表2中数字后的后缀“+”表示“强”,“-”表示“弱”,例如60-lp/mm表示分辨力弱于60 lp/mm,即比60 lp/mm稍差一点,但并未低到下一个档位的57 lp/mm;而60+lp/mm则表示分辨力强于60 lp/mm,即比60 lp/mm稍高一点,但并未高到上一个档位的64 lp/mm.

表2 样品镀膜区和非镀膜区分辨力测量结果

Table 2 Measure data of sample resolution in different zone

Sample	Film	V_A/V	V_B/V	$R_A/(\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1})$	$R_B/(\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1})$
7038 #	SiO ₂	816	820	51	51
7057 #	SiO ₂	823	830	60	60
7023 #	TiO ₂	802	811	64-	64
7024 #	TiO ₂	831	841	60-	60
7033 #	Y ₂ O ₃	839	851	60-	60
7065 #	Y ₂ O ₃	757	769	60	60+
7055 #	Al ₂ O ₃	920	940	60+	64
7041 #	Al ₂ O ₃	846	855	57	60

从表2可以看出,尽管4种材料、8支样品A区的分辨力总体上比B区要低一些,但低的比例不大.例如,7024#样品,B区的分辨力为60 lp/mm,但A区的分辨力却为60 lp/mm,分辨力降低的比例很小.另外从表2还可以看出,MCP镀膜区分辨力的下降比例与膜层二次电子发射系数成正比.如7055#样品和7041#样品,其A区和B区的分辨力相差3 lp/mm,但对于7038#样品和7057#样品,其A区和B区的分辨力相同,所镀膜层对其分辨力的影响非常小.

为进一步研究MCP输入端绝缘层对其调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)的影响,对7041#样品A区、B区的MTF分别进行了测试.测量仪器为德国OEM公司生产的调制传递函数测试仪,型号为MTF-Master IIT,出厂日期为2013年.该测试仪采用傅里叶变换法测量样品的MTF,另外仪器采用CCD接收像管荧光屏上的狭缝图像.测试时,A区和B区的增益均统一在 $10\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$.测量结果见图4.从图4可以看出,A区的MTF小于B区,但区别较小,不明显.

样品A区分辨力以及MTF降低的原因是MCP入射电子束 h_1 产生的二次电子会进入相邻通道,如图5所示.进入相邻通道内的电子会叠加在对准通道孔的入射电子束 h_2 中,使输入信号失真,降低其对比度,所以对A区的分辨力和MTF会有一些影响.然而镀制在MCP输入端通道孔内浸入电极上的绝缘层不仅可以提高输入信号的利用率,而且不会使输入信号失真,所以不会造成分辨力以及MTF的降低.

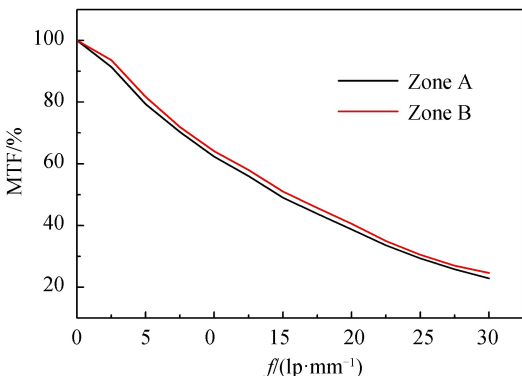


图4 A区和B区的MTF
Fig.4 MTF of zone A and zone B

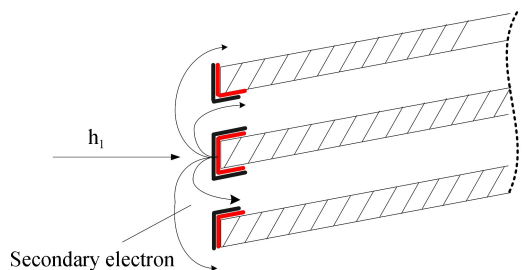


图5 二次电子运动示意图
Fig.5 Diagram of trajectory of secondary electron

3 结 论

像增强器在弱光条件下(10^{-3} lx 照度以下)使用,输入信号较弱.为能发现目标,需要像增强器有尽可能高的增益和更低的探测阈值.在 MCP 输入端镀制一层绝缘层,可以提高 MCP 输入信号的利用率及增益,从而提高像增强器的增益,降低探测阈值.尽管在 MCP 输入端镀制一层绝缘层,会在一定程度上影响像增强器的分辨力以及 MTF,但影响较小.MCP 的增益随其工作电压的增加而增加,然而通过提高 MCP 工作电压来提高 MCP 增益的方法会增加 MCP 的噪声,并且噪声增加速率快于 MCP 增益提高速率,因此会降低 MCP 的输出信噪比.所以在像增强器中,不能仅仅依靠通过提高 MCP 工作电压的方法来提高 MCP 的增益.本文提出的方法是在不增加 MCP 工作电压条件下提高 MCP 增益的,因此不会降低 MCP 的信噪比,所以该方法具有实用性,可以推广使用.

参 考 文 献

- [1] BEAULIEU D R, GORELIKOV D, DE ROUFFIGNAC P, *et al.* Nano-engineered ultra-high-gain microchannel plates [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, **607**(1): 81-84.
- [2] ZHANG Yang, WANG Yun, JIA Jin-sheng, *et al.* Research progres in glass for microchannel plates[J].*Materials Reports*, 2017, **31**(S1): 301-304.
张洋,王云,贾金升,等.微通道板用玻璃材料的研究进展[J].材料导报,2017, **31**(S1):301-304.
- [3] WANG Hong-gang, QIAN Yun-sheng, WANG Yong, *et al.* Simulation of electric transport in micro-channel plate[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2013, **30**(2):221-228.
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.
- [4] TIAN Yang, YANG Yi-gang, PAN Jing-sheng, *et al.* High efficiency event-counting thermal neutron imaging using a Gd-doped micro-channel plate[J]. *Chinese Physics C*, 2014, **38**(8): 59-61.
- [5] CAI Hou-zhi, LIU Jin-yuan, NIU Li-hong, *et al.* Theoretical simulation of electron transit time and gain characteristics in microchannel plate[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(10): 1542-1546.
蔡厚智,刘进元,牛丽红,等.微通道板中电子时间倍增特性的数值模拟[J].强激光与粒子束,2009, **21**(10):1542-1546.
- [6] WU Xing-lin, QIU Ya-feng, QIAN Yun-sheng, *et al.* Relationship between voltage of MCP and signal-to-noise ratio of UV image intensifier[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, **34**(3): 494-497.
吴星琳,邱亚峰,钱芸生,等.紫外像增强器信噪比与 MCP 电压的关系[J].应用光学,2013, **34**(3):494-497.
- [7] PAN Jing-sheng. Microchannel plates and its main characteristics[J]. *Journal of Applied Optics*, 2004, **25**(5): 25-29.
潘京生.微通道板及其主要特征性能[J].应用光学,2004, **25**(5):25-29.
- [8] LI Dan, ZHU Yu-feng, ZHAO Hui-min, *et al.* Research on noise factor characteristic of micro-channel plate[J]. *Infrared Technology*, 2017, **39**(11): 1066-1070.
李丹,朱宇峰,赵慧民,等.MCP 噪声因子特性研究[J].红外技术,2017, **39**(11):1066-1070.
- [9] LIU Shu-lin, DENG Guang-xu, YAN Cheng, *et al.* Experiment research on relation between MCP gain an electron energy while first collision[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(6): 354-356.
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.
- [10] FU Wen-hong. The research of theory, experiment and testing technology on enlarging MCP'S port[D]. Nanjing: Nanjing University of science and Technology, 2006.
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.
- [11] FU Wen-hong, CHANG Ben-kang. Funnel shaped pores of low noise micro-channel plate[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2004(1): 24-26.
傅文红,常本康.低噪声 MCP 的结构研究[J].真空科学与技术学报,2004(1):24-26.
- [12] FU Wen-hong, CHANG Ben-kang. A research into the effect of funnel MCP on the relationship between current gain and noise figure[J]. *Journal of Applied Optics*, 2004, **25**(5): 22-24.
傅文红,常本康.扩口微通道板对电流增益和噪声因子关系的影响[J].应用光学,2004, **25**(5):22-24.
- [13] FU Wen-hong, CHANG Ben-kang, GAO Ping. The research of a funnel shaped micro-channel plate[C].Proceedings of the 5th International Vacuum Electron Sources Conference, 2004.
- [14] AIREYR W, NORTON T J, MORGAN B L. Photon event counting detector development [C]. SPIE, 1990:140-148.
- [15] LIU Shu-lin, ZHANG Ji-sheng. Relationship between noise figure and first collision of secondary electron in Microchannel plate[J]. *Applied Optics*, 1997, **18**(5): 354-356.
刘术林,张继胜.微通道板的噪声因子与首次碰撞时二次电子发射系数的关系[J].应用光学,1997, **18**(5):30-32.
- [16] WIZAJ L. Microchannel plate detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods*,1979, **162**:587-601.
- [17] YANG Yu-zhang, LIU Shu-ling, ZHAO Tian-chi, *et al.* Single electroncounting using a dual MCP assembly[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 2016, A **830**: 438-443.
- [18] YANG Yu-zhang, YAN Bao-jun, LIU Shu-ling, *et al.* MCP performance improvement using alumia thin film[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 2016, A **868**: 48-47.