

引用格式: LI Xiaofeng, ZHANG Zhengjun, CONG Xiaoqing, et al. Influence of Microchannel Plate Structure Parameters on Noise Factor[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4):0404001

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):0404001

微通道板结构参数对噪声因子的影响

李晓峰¹,张正君¹,丛晓庆¹,冯辉¹,钱要红²,李娇娇¹

(1 北方夜视技术股份有限公司,昆明 650217)

(2 北方夜视科技研究院集团有限公司,昆明 650217)

摘要:采用对比测量方法研究了微通道板结构参数,即开口比、板厚、电极深度、离子阻挡膜、输入增强膜对其噪声因子的影响。结果表明,开口比增大,噪声因子减小;板厚增加,噪声因子增加;输入电极深度增加,噪声因子增加;离子阻挡膜会增加噪声因子;输入增强膜会降低噪声因子。其中,离子阻挡膜对噪声因子的影响最大,板厚对噪声因子的影响最小。微通道板的结构参数不仅对噪声因子产生影响,而且对其他参数,如增益、均匀性等性能均会产生影响。要降低微通道板噪声因子,比较可行的方法是将微通道板的开口比提高到 68%,在此基础上,再在微通道板的输入端制作一层高二次电子发射系数的 MgO₂ 输入增强膜,使微通道板的噪声因子接近 1,从而达到理想微通道板的水平。

关键词:像增强器;微通道板;信噪比;噪声因子;二次电子

中图分类号: TN144; TN103

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215004.0404001

Influence of Microchannel Plate Structure Parameters on Noise Factor

LI Xiaofeng¹, ZHANG Zhengjun¹, CONG Xiaoqing¹, FENG Hui¹, QIAN Yaohong², LI Jiaojiao¹

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

(2 North Night Vision Science & Technology Research Institute Group Co., Ltd, Kunming 650217, China)

Abstract: The influences of structure parameters of microchannel plate, such as opening area ratio, thickness, electrode depth, ion barrier film and input enhancement film on noise factor, were studied by comparative measurement method. The results show that the noise factor decreases with the raising of opening area ratio; increases with the raising of thickness; increases with the raising of input electrode depth; increases by ion barrier membrane; decreases by the input enhancement film. The influence of ion barrier film on noise factor is the most, and the influence of thickness on noise factor is the least. The structure parameters of microchannel plate not only affect the noise factor, but also affect other parameters such as gain and uniformity. In order to reduce the noise factor of microchannel plate, the most feasible method is to increase the opening area ratio to 68%, and then make a layer of MgO₂ on the input end of microchannel plate. This will reduce the noise factor of microchannel plate close to 1 behaved in the ideal microchannel plate.

Key words: Image intensifier; Microchannel plate; Signal to noise ratio; Noise factor; Secondary electron

OCIS Codes: 040.3780; 040.5160; 060.3450; 110.2350

0 引言

微通道板(Microchannel Plate, MCP)是一种面阵电子倍增器^[1-2],在各种真空光电器件中有广泛应用。

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:2020-11-12;录用日期:2021-01-08

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

MCP的性能参数包括结构参数及电参数两类。结构参数包括开口比、板厚、电极深度、离子阻挡膜、输入增强膜等。电参数包括增益、板阻、面电阻、噪声因子、暗电流等。在诸多性能参数中,增益是最重要的参数。增益越高,探测阈越低,因此增益越高越好。然而MCP除要求增益尽量高外,还要求噪声因子尽量低。因为如果MCP的噪声因子过高,那么弱信号经MCP放大后,信噪比会降低,而一旦信噪比低于1,那么信号就会被淹没在噪声中。所以MCP不仅要求增益高,而且还要求噪声因子低。提高MCP的二次电子发射系数可以提高MCP的增益。利用原子层沉积技术^[3-4],在MCP通道内壁镀制一层高二次电子发射系数的膜层(如 Al_2O_3),能显著提高MCP的增益,但对噪声因子的改善并不明显。影响MCP噪声因子的因素很多,如在制作工艺方面,腐蚀、烧氢等对MCP的噪声因子有一定的影响^[5-6];又如在MCP的使用方面,MCP的工作电压对噪声因子也有影响^[7]。除此之外,关于MCP结构参数对噪声因子的影响,虽然有一些研究^[8-9],但还不够深入系统。为进一步了解MCP结构参数对噪声因子的影响,有必要对结构参数对噪声因子的影响进行研究。

1 方法及原理

本文研究的MCP为在 $\Phi 18$ mm超二代像增强器中使用的MCP,型号为 $\Phi 25/8$,外径为25 mm,节距为 $8\ \mu\text{m}$ 。为研究MCP结构参数对噪声因子的影响,在 $\Phi 25/8$ 基本型MCP的基础上,分别改变其开口比(Open Area Ratio, OAR)、输入电极深度、板厚、离子阻挡膜等结构参数,制作出一系列用于对比测试的MCP(简称为对比型MCP或对比MCP)。每一种对比MCP与基本型MCP相比,仅仅是某一结构参数发生了变化,而其他参数保持不变。例如对于开口比变化的对比MCP,与基本型MCP相比,仅仅是开口比发生了变化,其他参数如节距、输入电极深度等均保持不变。这样当对比MCP与基本型MCP相比,噪声因子发生变化时,影响因素即可归结为开口比,而与其他因素无关。通过对不同对比MCP与基本型MCP噪声因子的测试与分析,即可得出MCP结构参数对噪声因子影响的结论。

通常MCP的噪声因子可利用MCP测试仪进行测量^[10-11]。目前的MCP测试仪还不具备高温烘烤以及电子清刷除气的功能,而在像增强器中所使用的MCP均需要经过高温烘烤及电子清刷除气。又由于高温烘烤和电子清刷除气均会影响MCP的噪声特性,所以只有对经过高温烘烤及电子清刷除气MCP的测量才有意义,因此MCP噪声因子的测量只能在像增强器中进行。

由于MCP噪声因子的测量需要在像增强器中进行,因此需要将不同结构参数的对比MCP装入超二代像增强器中并制作出测试样管。在像增强器测试样管的制备过程中,无论是基本型MCP还是对比MCP,其处理工艺,如清洗、烘烤以及电子清刷等工艺相同,这样就可以排除MCP处理工艺,特别是清洗、烘烤以及电子清刷对MCP噪声因子的影响。

MCP的噪声因子定义为MCP输入信噪比平方与输出信噪比平方之比。在像增强器中,因MCP的输入信噪比等于光电阴极的输出信噪比,而MCP输出信噪比又近似等于像增强器的输出信噪比,所以MCP的噪声因子又可定义为光电阴极输出信噪比平方与像增强器输出信噪比平方之比,即可由式(1)给出。式中, N_f 为MCP的噪声因子, SNR_c 为光电阴极输出信噪比, SNR_o 为像增强器输出信噪比。

$$N_f = \frac{\text{SNR}_c^2}{\text{SNR}_o^2} \quad (1)$$

一般而言,光电阴极的电子发射是一种随机过程^[12-13],发射噪声为散粒噪声,其输出信噪比 SNR_c 可以由式(2)给出^[14]。

$$\text{SNR}_c = \sqrt{\frac{I_c}{2 \times e \times \Delta f}} \quad (2)$$

式中, I_c 为光电阴极的光电流, e 为电子电量, Δf 为带宽。带宽为所考虑的噪声功率谱频率范围。

将式(2)代入式(1),可得到

$$N_f = \frac{I_c}{2 \times e \times \Delta f \times \text{SNR}_o^2} \quad (3)$$

根据像增强器的信噪比测试标准^[15-16],输入照度为 1.08×10^{-4} lx,光斑直径为0.2 mm,带宽为10 Hz。将

以上输入照度、光斑直径以及带宽的数据代入式(3),即可得到MCP噪声因子的计算公式为

$$N_f = 1.06 \times \frac{S}{\text{SNR}_0^2} \quad (4)$$

式中, S 为光电阴极的白光灵敏度。根据式(4)可知,只要测量出像增强器光电阴极的白光灵敏度及信噪比,即可测量出MCP的噪声因子,而像增强器光电阴极白光灵敏度以及信噪比的测量均为标准方法^[15-16],可以较准确测量。

2 测量结果及分析

2.1 开口比对噪声因子的影响

为研究开口比对噪声因子的影响,对基本型MCP以及对比MCP的噪声因子进行测试。基本型MCP的开口比为64%,对比MCP的开口比为68%。测量时阴极电压为200V,MCP电压为800V。两种MCP噪声因子的测量数据见表1。表1中前三个像增强器所用的MCP为基本型MCP,后三个像增强器所使用的MCP为对比MCP,另外表中的最后一列 $E(N_f)$ 表示噪声因子的平均值。

表1 不同开口比噪声因子测量数据
Table 1 N_f of MCP with different OAR

Sample	OAR/%	$S/(\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1})$	SNR_0	N_f	$E(N_f)$
5056#	64	715	22.26	1.53	
6086#	64	764	22.61	1.58	1.54
5120#	64	752	22.91	1.52	
7055#	68	782	24.07	1.35	
7022#	68	810	24.32	1.37	1.35
7076#	68	774	24.12	1.33	

从表1可以看出,前三个样管基本型MCP的噪声因子分别为1.53,1.58以及1.52,平均值为1.54,而后三个样管对比MCP的噪声因子分别为1.35,1.37以及1.33,平均值为1.35。对比MCP与基本型MCP相比,噪声因子平均降低了12%。MCP的噪声因子与开口比之间满足^[14]

$$N_f = \frac{1}{\beta} \left(1 + \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta - 1} \right) \quad (5)$$

式中, β 为MCP的电子收集率, δ 为MCP的二次电子发射系数。通常情况下MCP的 β 正比于OAR。

开口比从基本型MCP的64%提高到对比MCP的68%,相应的 β 也随之增加,根据式(5),噪声因子应降低6%,但实测却为12%,较理论值高了约一倍。原因是在推导计算式(5)时,MCP的开口比仅作为一个几何参数来考虑。但来自光电阴极的电子,一部分对准MCP的通道孔,而另一部分却对准MCP输入端的通道壁,见图1。

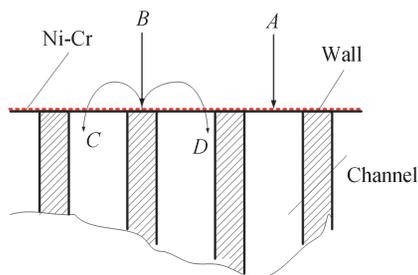


图1 MCP入射电子示意图

Fig.1 Sketch map of input electron on MCP

从几何角度看,只有对准MCP通道孔中的电子A才能进入MCP的通道进行电子倍增,而对准MCP通道壁的电子B却不能进入MCP的通道进行电子倍增,因此MCP的电子收集率等于几何收集率,即等于

OAR,但实际情况却并非如此。对准MCP通道壁的电子 B 与通道壁碰撞之后,部分电子会反弹回来,在电场的作用下,一部分电子 C 仍有可能返回到MCP的通道中。另外当入射电子 B 与通道壁碰撞时,还会产生二次电子,而一部分二次电子 D 在电场作用下仍有可能返回到MCP的通道中。所以MCP开口比对入射电子的实际收集率高于几何收集率,由此出现了MCP开口比变化时,实测变化百分比与理论变化百分比不一致,实测变化百分比高于理论变化百分比的现象。

2.2 输入电极深度对噪声因子的影响

MCP的输入电极包括两部分,一部分为MCP输入端面上覆盖在通道壁上的电极,称为表面电极,另一部分为覆盖在MCP通道孔内壁上的电极,这部分电极称为浸入电极,其深度 H 称为浸入电极深度(简称电极深度),见图2。

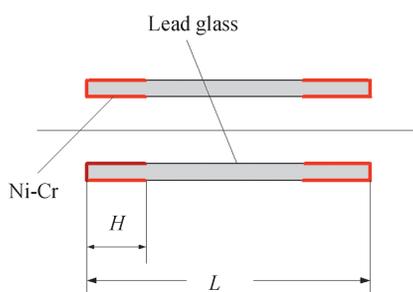


图2 MCP通道示意图

Fig.2 Sketch map of MCP channel

为了研究MCP输入电极深度对噪声因子的影响,测试了对比MCP的噪声因子。测量时阴极电压为200 V,MCP电压为800 V。MCP噪声因子的测量数据见表2,表2中前三个像增强器为表1中的前三个像增强器,而后三个像增强器所使用的MCP为对比MCP。其中基本型MCP的输入电极深度为3 μm ,而对比MCP的输入电极深度为15 μm 。

表2 不同电极深度 N_i 测量数据
Table 2 N_i of MCP with different penetration electrode

Sample	$H/\mu\text{m}$	$S/(\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1})$	SNR_0	N_i	$E(N_i)$
5056#	3	715	22.26	1.53	
6086#	3	764	22.61	1.58	1.54
5120#	3	752	22.91	1.52	
7058#	15	728	20.80	1.78	
7113#	15	750	21.91	1.66	1.74
2206#	15	735	20.86	1.79	

从表2可以看出,后三个样管对比MCP的噪声因子分别为1.78,1.66以及1.79,平均为1.74。输入电极深度从基本型MCP的3 μm 增加到对比MCP的15 μm ,与之对应的噪声因子从1.54增加到1.74,增加了13%。这说明MCP的输入电极深度对其噪声因子有影响,输入电极深度越深,噪声因子越大。输入电极深度影响MCP噪声因子的原因是在MCP通道长度 L 一定的条件下,输入电极的深度 H 越深,铅玻璃占通道总长度的比例越小,如图2所示。由于镍-铬浸入电极的二次电子发射系数低于铅玻璃的二次电子发射系数,因此输入电极的深度 H 越深,通道内壁的平均二次电子发射系数也越低(镍-铬电极与铅玻璃),根据式(5)可知,二次电子发射系数越低,MCP的噪声因子越大,实测结果与理论相符合。

2.3 板厚对噪声因子的影响

为了研究MCP板厚对噪声因子的影响,采用板厚为0.42 mm的对比MCP,而基本型MCP的厚度为0.30 mm。测量时阴极电压为200 V,基本型MCP所施加的工作电压为800 V,而对比MCP所施加的工作电压为1000 V。之所以对比MCP采用1000 V的工作电压,是因为当MCP的厚度从0.3 mm增加到0.42 mm以后,偏离了MCP的最佳长径比,导致增益大幅下降。为了提高MCP的增益,使噪声因子能够测量,需将

MCP的工作电压提高到1 000 V。噪声因子的测量数据见表3、表3中前三个样管所用的MCP为基本型MCP,即表1中的前三个样管,而后三个样管所用的MCP为对比MCP,另外表3中的 L 表示板厚。

表3 不同板厚 N_f 测量数据
Table 3 N_f of MCP with different thickness

Sample	L/mm	$S/(\mu A \cdot lm^{-1})$	SNR_o	N_f	$E(N_f)$
5056#	0.3	715	22.26	1.53	
6086#	0.3	764	22.61	1.58	1.54
5120#	0.3	752	22.91	1.52	
5484#	0.42	759	22.03	1.66	
5482#	0.42	835	23.06	1.67	1.70
5469#	0.42	787	21.61	1.79	

从表3看出,后三个样管中对比MCP的噪声因子分别为1.66,1.67以及1.79,平均值为1.7,较基本型MCP的噪声因子增加了10%,与之相应的MCP的板厚从基本型的0.30 mm增加到对比型的0.42 mm,增加了13%,这说明MCP的板厚对噪声因子有一定的影响。

噪声因子增加有两个原因。一个原因是MCP工作电压的增加。根据相关报道,MCP的噪声因子与MCP的工作电压相关^[7]。电压越高,噪声因子也越高。另外一个原因是MCP的板厚增加以后,电子在通道内部的行程增加了,因此碰撞次数也相应增加了。对于每一次碰撞,所产生的二次电子数并不确定,是一个随机数,因此每一次碰撞均产生一定的噪声,碰撞次数越多,产生的噪声越大。

2.4 离子阻挡膜对噪声因子的影响

对比测试的MCP以基本型MCP为基础,按三代像增强器的使用要求在其输入端制作一层 Al_2O_3 离子阻挡膜层,厚度约为5 nm。所谓离子阻挡膜是指覆盖在MCP输入端表面,包括通道孔和通道壁的一层膜层^[17-18]。其作用是阻挡MCP通道孔中所产生的正离子向光电阴极方向运动,由此损坏光电阴极。测量时阴极电压为400 V。之所以阴极电压采用400 V而不是超二代像增强器所使用的200 V,是因为当MCP的输入端镀制有 Al_2O_3 离子阻挡膜层以后,电子需要足够的能量穿透膜层,因此参照三代像增强器,采用400 V的阴极电压。噪声因子的测量数据见表4,表4中前三个像增强器为表1中的前三个像增强器,后三个像增强器所使用的MCP为带离子阻挡膜的对比MCP,另外表中的“√”表示具有离子阻挡膜,“×”表示无离子阻挡膜。从表4可以看出,对比MCP的噪声因子分别为2.33,2.58以及2.37,平均值为2.43,与基本型MCP的1.54相比,增加了58%。离子阻挡膜的作用是延长光电阴极的寿命,却大大增加了MCP的噪声因子。

表4 离子阻挡膜MCP的 N_f 测量数据
Table 4 N_f of MCP with ion barrier

Sample	Ion barrier	$S/(\mu A \cdot lm^{-1})$	SNR_o	N_f	$E(N_f)$
5056#	√	715	22.26	1.53	
6086#	√	764	22.61	1.58	1.54
5120#	√	752	22.91	1.52	
2047#	×	796	19.40	2.33	
2154#	×	860	18.80	2.58	2.43
2070#	×	763	19.11	2.37	

2.5 输入增强膜对噪声因子的影响

对比测试的MCP采用开口比为68%的对比MCP,并且在其输入端蒸镀了一层输入增强膜^[19]。膜层的材料为 MgO_2 ,厚度为25 nm。输入增强膜不仅镀制在MCP的输入端,而且还深入到通道内一定的深度,并覆盖输入电极,见图3。表5为对比MCP噪声因子的实测数据。表5中的前三个样管为表1中的后三个样管,即MCP开口比为68%的对比MCP;而后三个样管的MCP在开口比为68%的基础上,在输入端镀制有 MgO_2 输入增强膜。另外测量时,阴极电压为200 V,MCP电压为800 V。

从表5可以看出,前三个样管MCP的噪声因子分别为1.35,1.37以及1.33,平均值为1.35。而具有

表5 具有输入增强膜MCP噪声因子的测量数据
Table 5 N_f of MCP with film deposited on the input end

Sample	MgO ₂ film	$S/(\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1})$	SNR ₀	N_f	$E(N_f)$
7055#	×	782	24.07	1.35	
7022#	×	810	24.32	1.37	1.35
7076#	×	774	24.12	1.33	
4078#	✓	668	25.60	1.08	
2276#	✓	754	27.46	1.06	1.06
4170#	✓	788	27.59	1.05	

MgO₂输入增强膜MCP的噪声因子却分别为1.08, 1.06以及1.05, 平均值为1.06, 与未镀制输入增强膜的MCP相比较, 噪声因子降低了21%。在MCP的输入端镀制一层MgO₂输入增强膜后, 噪声因子会降低。原因是在MCP输入端制作一层高二次电子发射系数的MgO₂膜层以后, 由于该膜层既覆盖了MCP输入端通道壁上的镍-铬电极, 同时也覆盖了通道内壁上的浸入电极。而MgO₂的二次电子发射系数较镍-铬电极以及铅玻璃的高, 使得MCP通道内壁的平均二次电子发射系数也随着提高, 因此根据式(5), 噪声因子会降低。另外由于提高了MCP输入端通道壁表面的二次电子发射系数, 相应的增加了进入通道的电子D的数量(见图1), 因此也降低了MCP的噪声因子。

2.6 讨论分析

根据以上各种对比MCP噪声因子的测量结果可知, MCP的开口比、输入电极深度、板厚, 离子阻挡膜以及输入增强膜对噪声因子均有一定的影响。因此要降低MCP的噪声因子, 就是要根据理论预测以及试验数据有针对性的对MCP的结构参数进行改进。

在板厚方面, 减小板厚, 可以降低噪声因子, 但因为MCP的板厚有一个最佳值(最佳长径比), 偏离这一最佳值, 增益会下降, 因此在降低MCP噪声因子方面, 当通过减小板厚来降低MCP的噪声因子时, 应该在增益与噪声因子之间进行取舍。

在MCP输入电极方面, 减小MCP输入电极深度可以降低MCP的噪声因子。但进一步减小输入电极深度会增加制作工艺的难度, 同时还会产生均匀性的问题。也有采用仅仅制作一半MCP输入电极来减小噪声因子的方法^[20], 但该方法也存在均匀性的问题, 因此当通过减小MCP输入电极深度来减小MCP噪声因子时, 也需要在均匀性与噪声因子之间进行取舍。

在离子阻挡膜方面, 离子阻挡膜会增加MCP的噪声因子, 但同时离子阻挡膜又可以提高光电阴极的寿命。所以当需要延长光电阴极寿命时, 需要在MCP输入端增加一层离子阻挡膜, 这时只能以牺牲MCP的噪声特性为代价。

在输入增强膜层方面, 膜层的二次电子发射系数越高, 浸入MCP通道内壁的深度越深, MCP的噪声因子越低。但膜层的二次电子发射系数越高, 所产生的光晕也越大。所以当采用在MCP输入端镀制一层输入增强膜的方法来降低MCP的噪声因子时, 需要在噪声因子与光晕之间进行平衡。但光晕对像增强器在弱光下成像的影响远低于噪声因子的影响, 因此输入增强膜是降低MCP噪声因子的有效途径。

在开口比方面, 提高MCP的开口比可以降低噪声因子。根据本文的试验, 镀制MgO₂输入增强膜的开口比为68%的MCP, 其噪声因子可以减小到1.06, 基本上接近1, 达到理想MCP的水平。因此从可操作性的角度看, 在提高MCP开口比方面, 将MCP的开口比提高到68%即可, 因为更大的开口比意味着更难的技术^[21]以及更高的制作成本。

3 结论

MCP的结构参数, 如开口比、板厚、电极深度、离子阻挡膜厚以及输入增强膜均会影响MCP的噪声因子。开口比越大, 噪声因子越小; 板厚越厚, 噪声因子越大; 输入电极深度越深, 噪声因子越大; 离子阻挡膜会增加噪声因子; 输入增强膜会降低噪声因子。其中离子阻挡膜对噪声因子的影响最大, 板厚对噪声因子的影响最小。

仅从降低 MCP 噪声因子的角度讲,增加 MCP 的开口比、减小 MCP 的板厚、减小 MCP 的输入电极深度均可以降低 MCP 噪声因子,但考虑到 MCP 的其他性能参数以及制作工艺的难度,在降低噪声因子方面,需要进行综合考虑。根据本文的研究,可行的方法是将 MCP 的开口比提高到 68%,在此基础上,再在 MCP 的输入端制作一层高二次电子发射系数的 MgO₂ 输入增强膜,可以降低 MCP 的噪声因子,使 MCP 的噪声因子达到理想 MCP 水平。

参考文献

- [1] ZHOU Qingyong, SHENG Lizhi, WEI Ziqing, et al. Experimental analysis of pulse signal detection capability of the MCP X-ray detector[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(9): 0904002.
周庆勇, 盛立志, 魏子卿, 等. 微通道板 X 射线探测器的脉冲信号探测能力实验分析[J]. 光子学报, 2018, 47(9): 0904002.
- [2] SONG Juan, ZHAO Baosheng, SHENG Lizhi, et al. Research on shared anode used for the large area array MCP detector [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(8): 0823002.
宋娟, 赵宝升, 盛立志, 等. 基于 MCP 大面阵 X 射线探测器共享阳极的研究[J]. 光子学报, 2014, 43(8): 0823002.
- [3] LU Nianhua, YANG Yigang, LIU Jingwen, et al. Neutron detector design based on ALD coated MCP [J]. Physics Procedia, 2012, 26: 110-115.
- [4] YAN Baojun, LIU Shulin, HENG Yuekun, et al. Nano-oxide thin films deposited via atomic layer deposition on microchannel plates[J]. Nanoscale Research Letters, 2015, 10(1): 1-11.
- [5] FENG Liu, LIU Hui, ZHANG Liandong, et al. Influence of electron scrubbing on flicker noise of double-MCP image intensifiers[J]. Infrared Technology, 2013, 35(5): 295-299.
冯刘, 刘晖, 张连东, 等. 电子清刷对双 MCP 像增强器闪烁噪声的影响[J]. 红外技术, 2013, 35(5): 295-299.
- [6] ZHANG Zhengjun, LI Jingwen, NIU Pengjie, et al. Micro-channel plate etching technology in Lye [J]. Infrared Technology, 2020, 42(8): 752-757.
张正君, 李婧雯, 牛鹏杰, 等. 碱腐蚀工艺对微通道板性能的影响研究[J]. 红外技术, 2020, 42(8): 752-757.
- [7] 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): 0725002
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): 0725002
- [8] LI Dan, ZHU Yufeng, ZHAO Huimi, 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 Shulin, DENG Guangxu, 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] CUI Dongxu, ZHENG Shaoheng, QIU Yafeng, et al. Output signal-to-noise ratio characteristics of microchannel plate [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(16): 468-471.
崔东旭, 郑少成, 邱亚峰, 等. 微通道板的输出信噪比特性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(16): 468-471.
- [11] QIAN Yunsheng, CHANG Benkang, TONG Moying, et al. Frequency spectrum measurement of noise of image intensifiers[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 67-70.
钱芸生, 常本康, 童默颖, 等. 微光像增强器噪声频谱测试技术研究[J]. 光学学报, 2003, 23(1): 67-70.
- [12] GUPTA P, CULTRERA L, BAZAROV I. Monte Carlo simulations of electron photoemission from cesium antimonide [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(21): 215702.
- [13] DIMITROV D, BELL G, SMEDLEY J, et al. Modeling quantum yield, emittance, and surface roughness effects from metallic photocathodes[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(16): 165303.
- [14] ZHOU Yisong. Electric vacuum imaging device and its theoretical analysis[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1989.
周异松. 电真空成像器件及理论分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [15] WJ 2091-1992, 微光像增强器试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
WJ 2091-1992, Test method of image intensifier[S]. Beijing: Standards Press of China, 1992.
- [16] GJB 2000A-2020, 像增强器通用规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
GJB 2000A-2020, General specification of image intensifier[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [17] SINOR T W, ESTERA J P. An analysis of electron scattering in the thin dielectric films used as ion barriers in generation III image tubes[C]. SPIE, 2003, 4796: 23-32.
- [18] ESTERA J P, FORD C E, GIORDANA A, et al. High reliability GaAs image intensifier with unfilmed microchannel plate[C]. SPIE, 1999, 3749: 713-714.
- [19] LI Xiaofeng, LI Tingtao, ZENG Jinneng, 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.
- [20] CUI Kaiyuan. A kind of microchannel plate used in photomultiplier: CN, 201410017489.3[P]. 2014-04-30.
崔开源. 一种用于光电倍增管的微通道板: CN, 201410017489.3[P]. 2014-04-30.
- [21] FU Wenhong. The reseach 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.