

引用格式: LI Xiao-feng, LI Jin-sha, 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

微通道板噪声因子与工作电压关系研究

李晓峰, 李金沙, 常乐, 李娇娇, 曾进能, 吴永祥

(北方夜视技术股份有限公司, 昆明 650217)

摘 要:为了解决微通道板噪声因子的测量问题,提出了一种测量像增强器光电阴极灵敏度和信噪比,从而测量出微通道板噪声因子的方法.根据该方法,分别在不同阴极电压、微通道板电压以及阳极电压条件下测量了微通道板的噪声因子.测量结果表明,当阴极电压、微通道板电压以及阳极电压分别变化时,微通道板的噪声因子会随之变化.微通道板电压对噪声因子的影响最大,阳极电压的影响最小.微通道板电压每增加 100 V,噪声因子大约增加 0.11,而阳极电压每增加 100 V,噪声因子大约增加 3.3×10^{-4} .微通道板工作电压提高,意味着电子碰撞能量提高,同时也意味着二次电子发射系数提高,而根据现有微通道板噪声理论,微通道板的噪声因子会减小,但实测结果却相反.造成这一矛盾的原因是在现有微通道板噪声理论中,仅仅考虑了二次电子发射系数、探测率、电子碰撞几率的因数,而未考虑到电子碰撞能量的因数,因此噪声理论需要进行修正.

关键词:像增强器;光电阴极;微通道板;信噪比;噪声因子

中图分类号:O462.2;O462.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204907.0725002

Study on the Relationship between Noise Factor and Working Voltage of Microchannel Plate

LI Xiao-feng, LI Jin-sha, CHANG Le, LI Jiao-jiao, ZENG Jin-neng, WU Yong-xiang
(North Night Vision Technology Co. Ltd, Kunming 650217, China)

Abstract: In order to work out the measuring method of noise factor of microchannel plate, a method to measure the noise factor of microchannel plate by measuring the sensitivity of photocathode and signal to noise ratio of image intensifier is proposed. According to this method, the noise factor of microchannel plate is measured under different cathode voltage, microchannel plate voltage and anode voltage. The results show that the noise factor of microchannel plate change with the change of cathode voltage, microchannel plate voltage and anode voltage. The voltage of microchannel plate has the greatest influence on noise factor and the anode voltage has the least. When the voltage of microchannel plate is increased by 100 V, the noise factor increases by about 0.11. The noise factor increases about 3.3×10^{-4} for every 100 V of anode voltage. The increase of working voltage of microchannel plate means the increase of electron collision energy and the increase of secondary electron emission coefficient. According to the existing noise theory of microchannel plate, the noise factor of microchannel plate will be reduced, but the measured results are increased. The reason for this contradiction is that in the existing noise theory of microchannel plate, only the influence of secondary electron emission coefficient, detection rate and electron collision probability on the noise factor are considered, but the influence of collision electron energy on the noise factor is not considered, so the noise theory needs to be revised.

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

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:2020-03-31;录用日期:2020-05-14

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

0 引言

微通道板(Microchannel Plate, MCP)是一种面阵电子倍增器,在各种电真空器件中有广泛应用^[1-2].通常情况下, MCP工作时需要施加三个电压.第一个电压施加在电子发射源与MCP输入端之间,使电子向MCP的输入端运动.第二个电压施加在MCP输入端和MCP输出端之间,使电子从输入端到输出端运动,同时使电子不断与MCP的通道内壁碰撞,从而进行二次电子倍增.第三个电压施加在MCP输出端与电子收集极之间,使电子向收集极方向运动.为叙述方便,将以上三个电压分别称为阴极电压、MCP电压和阳极电压.增益是MCP最重要的参数之一,它是输出电流(输出电子数)与输入电流(输入电子数)之比.各种使用MCP的器件,其信号放大倍数主要就决定于MCP的增益.MCP的增益越高,器件的放大倍数也越高,所能探测到的信号阈值越低.因此MCP的增益越高越好.然而MCP除增益越高越好外,还要求噪声越低越好.MCP的噪声以噪声因子来描述,定义为MCP输入信噪比平方与输出信噪比平方之比.所谓信噪比是指信号的平均值与噪声的均方根值之比.如果MCP的噪声过大,那么弱信号经MCP放大后,信号的信噪比会降低.而一旦信号的信噪比低于1,那么信号就会被淹没在噪声中而不能识别.所以MCP不仅要增益高,而且要噪声低.要提高MCP的增益,最直接的途径就是提高MCP的二次电子发射系数.因为MCP的二次电子发射系数越高, MCP的增益越高.然而以铅玻璃为材料的MCP,其二次电子发射系数不可能再进一步提高^[3].而在MCP通道内制作一层高二次电子发射系数材料来提高二次电子发射系数的方法还未达到实用化^[4-5],因此不具备应用的条件.所以目前提高MCP二次电子发射系数,仍然采取提高MCP工作电压的方法.但MCP工作电压提高后,尽管MCP的增益可以提高,但同时MCP噪声也会增大,而目前关于电压对MCP噪声因子影响的规律还不清楚.在一些文献中,报道了阴极电压对像增强器信噪比的影响, MCP输入电子能量与像增强器信噪比的关系以及MCP电压对像增强器信噪比的影响等^[6].但这些研究主要针对像增强器的信噪比,而非MCP的噪声因子.因为像增强器的信噪比不仅与MCP有关,还与阴极灵敏度有关,所以研究像增强器的信噪比不能准确反映出MCP的噪声特性.而单独研究MCP的噪声因子又缺乏相应的测试方法和手段,所以对MCP噪声因子研究目前仅仅停留在理论上^[7].针对MCP噪声因子目前无法测量的问题,本文提出了一种测量方法,并测量了不同电压条件下的噪声因子,得出了一些有益的结论,为MCP噪声因子的研究奠定了一定的基础.

1 MCP噪声因子的测量原理

在 $\Phi 18$ mm有效直径的双近贴聚焦像增强器中研究MCP噪声因子与工作电压的关系.该像增强器包括玻璃输入窗、 Na_2KSb 多碱光电阴极、MCP、P22荧光粉镀铝荧光屏、光纤面板输出窗.光电阴极作为MCP的输入电子源,荧光屏作为MCP输出电子的收集极.另外在像增强器中,阴极电压以 V_c 表示, MCP电压以 V_M 表示,阳极电压以 V_a 表示,光电流以 I_c 表示, MCP输出电流以 I_s 表示,如图1.

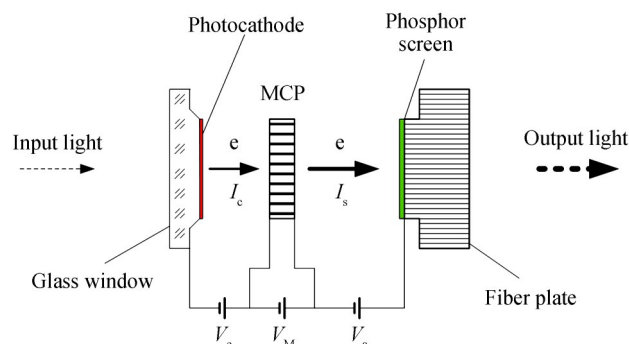


图1 像增强器结构示意图
Fig.1 Diagram of image intensifier

根据MCP噪声因子的定义,MCP噪声因子 N_i 的计算公式为

$$N_i = \frac{(S/N)_i^2}{(S/N)_o^2} \quad (1)$$

式中, S 为信号, N 为噪声, $(S/N)_i$ 为MCP的输入信噪比, $(S/N)_o$ 为MCP的输出信噪比.

一般而言,光电阴极的电子发射是一种随机过程^[8-11],发射噪声为散粒噪声,其输出信噪比 $(S/N)_c$ 为

$$(S/N)_c = \sqrt{\frac{I_c}{2 \cdot e \cdot \Delta f}} \quad (2)$$

式中, I_c 为光电阴极的光电流, e 为电子电量, Δf 为带宽.带宽为噪声功率谱的频率范围.

在像增强器中,光电阴极的输出信号就是MCP的输入信号,因此MCP的输入信噪比 $(S/N)_i$ 就等于光电阴极的输出信噪比 $(S/N)_c$,所以MCP的输入信噪比 $(S/N)_i$ 为

$$(S/N)_i = \sqrt{\frac{I_c}{2 \cdot e \cdot \Delta f}} \quad (3)$$

光电阴极的灵敏度 S 定义为光电流与入射光通量之比,即

$$S = \frac{I_c}{\pi \cdot R^2 \cdot E} \quad (4)$$

式中, R 为入射到光电阴极上的光斑半径, E 为入射光照度, S 为光电阴极灵敏度.

根据式(4)即可求得光电阴极的光电流,即

$$I_c = \pi \cdot R^2 \cdot E \cdot S \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),式(3)再代入式(1)即可以计算出MCP的噪声因子为

$$N_i = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot E \cdot S}{2 \cdot e \cdot \Delta f \cdot (S/N)_o^2} \quad (6)$$

在像增强器中,MCP的输出信号就是荧光屏的输入信号,又因为荧光屏的颗粒噪声远小于MCP的噪声,所以MCP的输出信噪比可以近似认为是荧光屏的输出信噪比^[11],以下简称像增强器信噪比.将式(6)中的MCP输出信噪比 $(S/N)_o$ 以像增强器信噪比 $(S/N)_s$ 替代,则可以得到MCP噪声因子的计算表达式

$$N_i = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot E \cdot S}{2 \cdot e \cdot \Delta f \cdot (S/N)_s^2} \quad (7)$$

根据式(7)可知,要测量MCP噪声因子,先要测量光电阴极灵敏度及信噪比.图2为像增强器阴极灵敏度测量装置的结构原理示意图.测量装置包括钨丝灯、电流表以及测量电源.钨丝灯(色温为2 856 K)所发射的光入射到光电阴极上,入射照度为 E ,光斑半径为 R .测量电源在光电阴极与MCP输入端之间施加200 V的电压.光电流 I_c 通过电流表A测量.测量出 I_c 以后,根据式(4)即可计算出阴极的灵敏度.

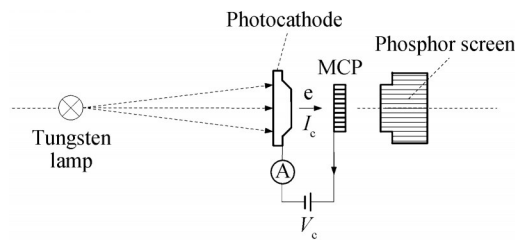


图2 阴极灵敏度测量原理示意图
Fig.2 Diagram of cathode sensitivity test set

像增强器的信噪比定义为

$$(S/N)_s = \frac{D - D_b}{K \sqrt{N^2 - N_b}} \quad (8)$$

式中, D 为像增强器有输入信号时的输出信号平均值; D_b 为像增强器无输入信号时的输出信号平均值; N 为像增强器有输入信号时的噪声均方根值; N_b 为像增强器无输入信号时的噪声均方根值; K 为校正系数.

图3为像增强器信噪比测量装置的结构原理示意图.像增强器信噪比测量是一种国内外统一的测量方

法或标准,属于成熟技术,各个像增强器生产厂家均具备该种测试仪器.测量装置包括光源、积分球、针孔、物镜、光电倍增管及信号分析器等.钨丝灯(色温为 2 856 K)的出射光经过中性滤光片衰减后进入积分球,之后从针孔输出.针孔被物镜投射到像增强器的光电阴极上,经像增强器倍增后从荧光屏输出,再经过物镜成像在光电倍增管上,经过光电倍增管倍增输出电流信号,再经过信号分析器滤波(带宽为 10 Hz)及处理,最后测量出电流的信号平均值和噪声均方根值^[13-14].

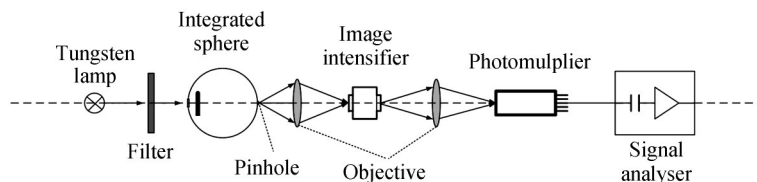


图3 信噪比测量原理示意

Fig.3 Diagram of signal to noise ratio test set

在测得像增强器的阴极灵敏度 S 以及信噪比 $(S/N)_s$ 之后,代入式(7),即可以计算出 MCP 的噪声因子.例如测得某样品的阴极灵敏度为 $702 \mu\text{A}/\text{lm}$,又测得像增强器的信噪比为 25.41,将所测得的灵敏度 S ,信噪比 $(S/N)_s$,以及信噪比测试过程中的各个参数,即针孔半径 $R(0.1 \text{ mm})$,入射光照度 $E(1.08 \times 10^{-4} \text{ lx})$,电子电量 $e(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})$ 以及带宽 $\Delta f(10 \text{ Hz})$ 代入式(7),就可以求得 MCP 的噪声因子 N_i 为 1.15.带宽 Δf 取值 10 Hz 是因为测量像增强器信噪比时,根据测量标准,信号分析器的带宽为 10 Hz,所以光电阴极噪声功率谱的带宽也应与信噪比测量的带宽相同,即为 10 Hz.

2 实验过程

要研究 MCP 噪声因子与阴极电压、MCP 电压以及阳极电压的关系,就需要分别测量不同阴极电压、MCP 电压以及阳极电压的 MCP 噪声因子.而噪声因子的测量,根据式(7),需要先测量像增强器的阴极灵敏度和信噪比.测量样品为 489# 编号的像增强器.该像增强器与普通的像增强器相比,仅仅是阴极近贴聚焦距离从 0.2 mm 增大到 0.3 mm,其他完全相同.近贴聚焦距离增大的原因是使阴极与 MCP 输入端之间能够承受更高的电压.通常,像增强器当阴极电压超过 1 000 V 以后容易放电击穿.增加阴极近贴聚焦距离以后,可施加的阴极电压可以超过 2 000 V,这样使测量的电压范围更宽.另外该样品的 MCP 孔径为 $6 \mu\text{m}$,开口比为 65%,斜切角为 6° ,外径为 $\Phi 25 \text{ mm}$,型号为 $\Phi 25/6$.

实验过程分五步,第一步是测量阴极灵敏度随阴极电压变化的曲线.因为阴极灵敏度只与阴极电压有关,与 MCP 电压以及阳极电压无关,因此测量时,像增强器仅需施加阴极电压.阴极电压 V_c 从 50 V 开始,每增加 50 V 测量一次,一直测量到 3 000 V 为止.第二步是测量像增强器信噪比随阴极电压变化的曲线.测量时,MCP 电压(700 V 或 800 V)以及阳极电压(6 000 V)保持不变,阴极电压 V_c 从 50 V 开始,每增加 50 V 测量一次,一直测量到 3 000 V 为止.第三步是测量像增强器信噪比随 MCP 电压变化的曲线.测量时,阴极电压(200 V)和阳极电压(6 000 V)保持不变,MCP 电压从 700 V 开始,每增加 20 V 测量一次,一直测量到 800 V 为止.第四步是测量像增强器信噪比随阳极电压变化的曲线.测量时阴极电压(200 V)和 MCP 电压(700 V 或 800 V)保持不变,阳极电压从 3 000 V 开始,每增加 500 V 测量一次,一直测量到 6 000 V 为止.阳极电压从 3 000 V 开始是因为荧光屏的起始电压为 2 500 V.第五步是根据以上的测量结果,并根据式(7)分别计算出 MCP 噪声因子随阴极电压、MCP 电压以及阳极电压变化的曲线.

3 实验结果及分析

图 4 为光电阴极灵敏度 S 随阴极电压 V_c 变化的曲线.从图中可以看出,光电阴极的灵敏度随阴极电压的增加而增加,但增加的速率逐步减小.如在 200 V 时,阴极灵敏度为 $702 \mu\text{A}/\text{lm}$;在 1 000 V 时为 $746 \mu\text{A}/\text{lm}$;在 1 800 V 时为 $781 \mu\text{A}/\text{lm}$.同为增加 800 V 电压,1 000 V 时的阴极灵敏度与 200 V 时的阴极灵敏度相比,增加了 6.3%,而 1 800 V 时的灵敏度与 1 000 V 时的灵敏度相比,仅仅增加 4.7%.

图 5 为所测得的 MCP 噪声因子 N_i 随阴极电压 V_c 变化的曲线.图中曲线 $N_i(700 \text{ V})$ 和 $N_i(800 \text{ V})$ 分别表

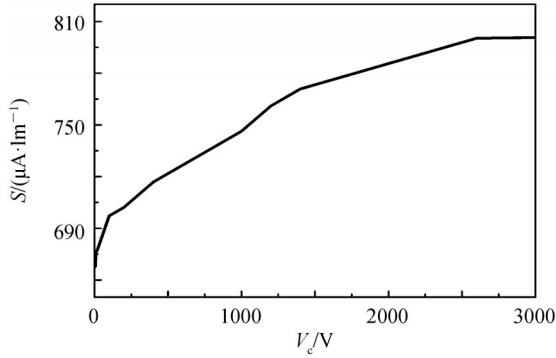


图4 阴极灵敏度随阴极电压变化曲线

Fig.4 Graph of sensitivity against cathode voltage

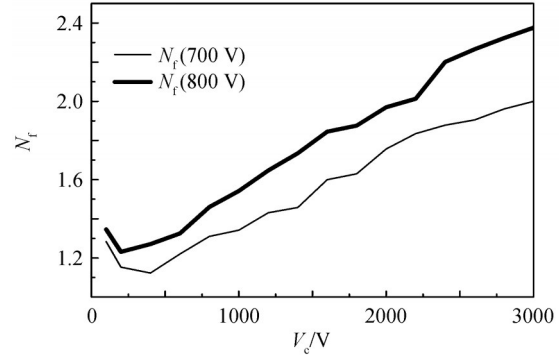


图5 MCP噪声因子随阴极电压变化曲线

Fig.5 Graph of noise factor against cathode voltage

示MCP电压为700 V和800 V时的噪声因子.从图中的两条曲线可以看出,随着阴极电压的增加,噪声因子随之增加.不过在阴极电压变化的低电压阶段(<500 V),两条曲线均存在一个最小值,对曲线 $N_f(700$ V),噪声因子最小值对应的阴极电压约为400 V,而对曲线 $N_f(800$ V),噪声因子最小值对应的阴极电压约为200 V.两条曲线经过最小值之后,随着阴极电压的增加,噪声因子随电压增加而单调增加.如对于曲线 $N_f(700$ V),当阴极电压为800 V时,噪声因子为1.31;当阴极电压为1 400 V时,噪声因子为1.46,1 400 V时的噪声因子与800 V时的噪声因子相比,增加了0.15,相当于电压每增加100 V,噪声因子平均增加 2.5×10^{-2} .阴极电压增加,意味着MCP入射电子能量的增加,因此MCP噪声因子与电子碰撞能量相关.

根据传统理论,MCP的噪声因子与电子的碰撞能量无关.MCP的噪声因子可由式(9)来描述^[12],式中, D 为MCP的探测率, δ 为MCP的二次电子发射系数.

$$N_f = \frac{1}{D} \left(1 + \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta - 1} \right) \quad (9)$$

从式(9)可以看出,MCP的噪声因子与MCP的探测率和二次电子发射系数有关.二次电子发射系数越高,MCP的噪声因子越小.然而,从以上MCP噪声因子随阴极电压变化的测量结果看,实际情况并非如此.当阴极电压增加时,MCP的二次电子发射系数随之增加,但MCP的噪声因子并不是随之减小.

图6为所测得的噪声因子 N_f 随MCP电压 V_M 变化的曲线.从图中可以看出,当MCP电压从低到高时,噪声因子也随之从低到高.例如MCP电压为700 V时,噪声因子为1.15;但MCP电压增加到800 V时,噪声因子增加到1.26,相当于MCP电压每增加100 V电压,噪声因子平均增加0.11.因为MCP电压增加意味着电子碰撞能量的增加,因此噪声因子增加的原因也可以认为是电子碰撞能量的增加.

从MCP噪声因子随其电压变化的测量结果看,与式(9)的理论结果也不相符.因为MCP电压提高,二次电子发射系数也随之提高,根据式(9),噪声因子应该降低,但实测结果却是增加.这再次说明MCP的噪声因子与碰撞电子的能量相关.另外从像增强器的实际观察效果看,当逐渐提高MCP电压时,荧光屏上观察到的闪烁噪声也是逐步增大,与MCP噪声因子增加的测量结果相一致.

图7是MCP噪声因子 N_f 随阳极电压 V_a 变化的曲线,其中曲线 $N_f(700$ V)和 $N_f(800$ V)分别表示MCP电压为700 V和800 V时的噪声因子.从图7可以看出,当阳极电压增加时,MCP的噪声因子也随之增加,但增加的幅度非常小.例如对于曲线 $N_f(700$ V),当阳极电压从3 000 V增加到6 000 V时,MCP的噪声因子从1.23增加到1.24,仅仅增加0.01,相当于阳极电压每增加100 V,噪声因子平均仅仅增加 3.3×10^{-4} .

为了分析MCP噪声因子随阳极电压变化的原因,对MCP增益随阳极电压变化的关系进行了测量.测量结果如图7中的曲线 $G(700$ V)和 $G(800$ V).测量时,阴极电压(200 V),MCP电压(700 V或800 V)保持不变,阳极电压变化.从两条增益曲线可以看出,当阳极电压从200 V开始增加时,MCP的增益会增加.例如对曲线 $G(700$ V),阳极电压为1 000 V时,MCP增益为242;阳极电压为2 000 V时,MCP增益为264;阳极电压为3 000 V时,MCP增益为292.MCP增益增加,意味着MCP输出电子的数量随阳极电压的增加而增加.原因是MCP输出端与荧光屏之间的电场浸入到MCP输出端的通道内,从而改变了通道内靠近输出端的电场,提高了该区域的电子碰撞能量,因此提高了该区域的二次电子发射系数.由此可以认为MCP噪声

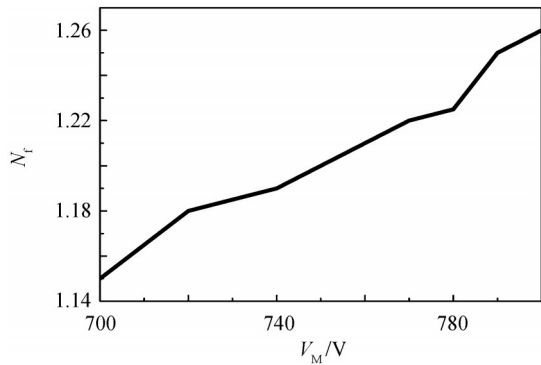


图6 噪声因子随MCP电压的变化曲线
Fig.6 Graph of noise factor against MCP voltage

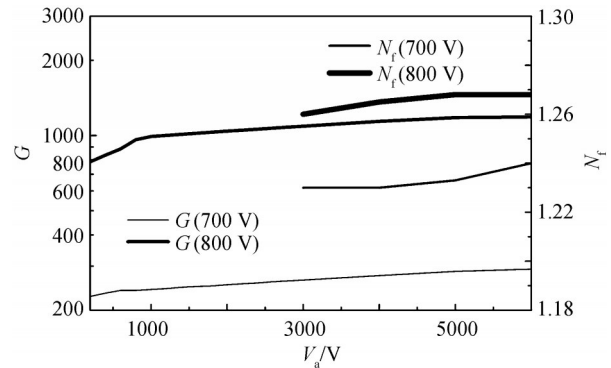


图7 噪声因子及MCP增益随阳极电压变化曲线
Fig.7 Graph of noise factor and gain against anode voltage

因子随阳极增加而增加的原因也是由于电子碰撞能量的增加。

与阴极电压增加、MCP电压增加的情况类似,当阳极电压增加时,MCP的增益也增加,说明MCP的二次电子发射系数增加了.如果根据式(9),MCP的噪声因子也应该增加,但实际测量的结果却相反.这进一步说明MCP的噪声因子与碰撞电子的能量相关。

MCP噪声因子的实测结果与理论计算结果不一致,原因是在推导理论公式(9)时,仅仅考虑了探测率、碰撞电子几率以及二次电子发射系数,而没有考虑电子碰撞能量.从MCP噪声因子的测量结果看,如果不考虑阴极电压在低电压区域($<500\text{ V}$)的变化情况,那么不管是阴极电压、MCP电压还是阳极电压,电压越高,碰撞电子的能量越高,噪声因子也越大。

需要说明的是,在实验过程中,除测量了489#像增强器外,还同时测量了另外的同类型样品,所得到的结果与489#的像增强器的结果类似.另外由于实验是在像增强器中进行,限于像增强器的结构,阴极电压最高为3000 V,阳极电压最高为6000 V。

4 结论

本文提出了通过测量像增强器阴极灵敏度以及信噪比,然后通过理论计算得出MCP噪声因子的测量方法.根据该方法,在不同阴极电压、MCP电压以及阳极电压条件下,测量了MCP的噪声因子.测量结果表明,MCP的阴极电压、MCP电压以及阳极电压对MCP的噪声因子有一定的影响,其中MCP电压的影响最大,阴极电压的影响次之,阳极电压的影响最小.阴极电压、MCP电压以及阳极电压的变化,实质上是电子碰撞能量的变化.电子碰撞能量的变化会影响到MCP的二次电子发射系数,而这种通过提高电子碰撞能量来提高MCP二次电子发射系数的方法尽管可以提高MCP的增益,但同时也会提高MCP的噪声,所以不是一种理想的方法.理想的方法还是要提高MCP固有的二次电子发射系数,这样才能在提高MCP增益的同时不增加MCP的噪声。

MCP的工作电压或电子碰撞能量对MCP的噪声因子有一定的影响.MCP的噪声大小,直接影响到像增强器的观察距离或信号探测阈^[15],所以有必要进一步研究MCP的噪声因子.然而在目前关于MCP噪声因子的理论中,还没有考虑到这一因数,仅仅考虑了MCP的二次电子发射系数、探测率、电子碰撞几率的因数,所以关于MCP噪声因子的理论还需要进一步完善。

参考文献

- [1] LI Xiao-feng, CHANG Le, ZENG Jin-neng, *et al.* Study on resolution improvement of microchannel plate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12):1223002.
李晓峰,常乐,曾进能,等.微通道板分辨率提高研究[J].光子学报,2019, **48**(12):1223002.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] LU Nian-hua, YANG Yi-gang, LV Jing-wen, *et al.* Neutron detector design based on ALD coated MCP[J]. *Physics Procedia*, 2012, **26**: 110-115.
- [5] YAN Bao-jun, LIU Shu-lin, HENG Yue-kun, *et al.* Nano-oxide thin films deposited via atomic layer deposition on microchannel plates[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2015, **10** (1):1-11.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] KARKARE S, DIMITROV D, SCHAFF W, *et al.* Monte Carlo charge transport and photoemission from negative electron affinity GaAs photocathodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**(10): 104904.
- [9] GUPTA P, CULTRERA L, BAZAROV I. Monte Carlo simulations of electron photoemission from cesium antimonide [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **121**(21):215702.
- [10] 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.
- [11] KANG Tian-you, REN Ling, ZHANG Kai-min, *et al.* Electronic structures and optical properties of cubic crystal K_2CsSb , K_3Sb and Cs_3Sb cathode materials[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(1):0116001.
康天佑,任玲,张锴珉,等.立方 K_2CsSb 、 K_3Sb 和 Cs_3Sb 阴极材料的电子结构和光学性质[J].光子学报,2020,**49**(1):0116001.
- [12] 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.
- [13] CUI Dong-xu, ZHENG Shao-cheng, QIU Ya-feng, *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.
- [14] QIAN Yun-sheng, CHANG Ben-kang, TONG Mo-ying, *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.
- [15] JIN Wei-qi, ZHANG Qin, WANG Xia, *et al.* An Improved apparent distance model for direct-view low-light-level night vision system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(4):0411001.
金伟其,张琴,王霞,等.一种改进的直视型微光夜视系统视距模型[J].光子学报,2020,**49**(4):0411001.