

光阴极电压对微光像增强器性能影响研究

周立 曾昊 李新碗

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室)

摘要: 文章基于阴极半导体电子发射理论和微通道板(MCP)电子倍增基本物理过程, 分析阴极背景噪声和信噪比与阴极电压的关系, 分析指出: 像增强器背景噪声会随着阴极电压的增大而增长; 像增强器系统噪声因子随着阴极电压的增大而减小, 并趋于饱和。通过实验证明: 增大阴极电压的幅度, 像增强器背景噪声随之呈指数增长; 输出信噪比随之呈单调增长, 并趋于饱和。由此得出阴极最佳工作电压在-160V左右。

关键词: 像增强器; 阴极电压; 背景噪声; 信噪比

Effect of Photocathode Voltage on the Performance of Image Intensifier

Zhou Li Zeng Hao Li Xinwan

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University)

Abstract: Based on the electro emission theory of cathode semiconductor and the basic physical process of electron multiplication of MCP(micro-channel plate), this paper analyzes the relationship between cathode background noise and SNR and cathode voltage. The analyzed results point out: a. The background noise of a image intensifier will increases with the increase of photocathode voltage; b. The noise factor of an image intensifier will decrease with the increase of photocathode voltage, and tend to saturation. It is proved experimentally that with the increase of the photocathode voltage, the background noise increases in an exponential law; and the SNR increases monotonously and tends to saturation. As a result, the optimal photocathode voltage is about -160V.

Key words: image intensifier; photocathode voltage; background voltage; signal noise ratio;

0 引言

微光像增强器^[1,2]是一种可以将微弱的光图像增强的光电器件。随着微光图像增强技术的发展, 其被广泛应用于天文、航天、生物、医学、卫星监测、高速摄影等各个领域。但是在实际应用过程中, 当外界条件(比如场景的照度、对比度、光谱辐射等)一定时, 成像质量就取决于像增强器自身的特性。背景噪声和信噪比是像增强器的噪声特性两项重要指标^[3]。一方面, 由于像增强器在无光输入时会产生附加背景噪声, 会降低图像照度、对比度等。另一方面, 像增强器在放大输入光信号后, 都会在信号中附加一定的噪声, 从而影响图像的信噪比。因此, 研究像增强器的背景噪声^[4,5]和信噪比^[6]并有效优化像增强器的性能也成为了人们研究的热点。

本文研究光阴极电压对像增强器噪声特性的影响, 首先理论分析阴极电压对像增强器背景噪声和信噪比的影响, 并通过仿真得到阴极电压与噪声关系的趋势, 最后通过两组实验, 与仿真结果拟合, 并论证光阴极电压与像增强器的背景噪声和信噪比的关系。

1 理论分析

1.1 光阴极电压对背景噪声的影响

根据半导体场致发射理论^[7], 当场助电压加载到半导体, 使得势垒的高度降低、宽度变窄, 这样阴极内自由电子通过隧道效应穿透阴极表面势垒而逸出。逃逸电子在匀强电场的作用下到达MCP前板,

又经MCP倍增轰击到荧光屏上转化为光信号。

根据半导体场致发射公式^[8]和Edward H. Eberhardt提出的打拿级模型^[9]可得场致发射电流密度与阴极电压的关系为

$$J_{out} = G_{MCP} J_{in} = A \left(\frac{V_{cathode} * L}{D * \beta} + V_{MCP} \right)^k \cdot \frac{2(2\pi)^{\frac{1}{4}} k_B^{\frac{5}{4}} T^{\frac{5}{4}} e^{\frac{3}{2}} V_{cathode}^{\frac{1}{2}} N_d^{\frac{1}{2}}}{m^{\frac{1}{4}} v_0^{\frac{1}{2}} h^{\frac{3}{2}}} \cdot \exp \left[-\frac{8\pi d \sqrt{2m} E_{\phi}^{3/2}}{3heV_{cathode}} v(y_1) \right] \cdot \exp \left(-\frac{E_c - E_d}{2k_B T} \right) \quad (1)$$

其中 J_{out} 是阳极输出的电流密度, J_{in} 是MCP输入电流密度, G_{MCP} 是MCP的增益, β 是比例常数, V_{MCP} 是MCP电压, D 为微通道直径, L 为微通道长度, k 是MCP特性系数。 T 为光阴极温度, E_{ϕ} 为费米能级, $v(y_1)$ 为Nordheim函数^[8], E_c 为导带底能量, v_0 为电子逃逸阴极的初速度, \mathcal{E} 为光阴极电压, d 为光阴极与MCP前板的距离。

取 $\beta=2.47$, $L/D=40$, $k=0.7$, $E_{\phi}=0.55eV$, $V_{MCP}=800$, $d=2mm$, 由式(1)仿真得场致噪声电流密度与阴极电压的关系, 如图1所示。

图1 光阴极电压与阳极电流密度的关系曲线(参见下页)

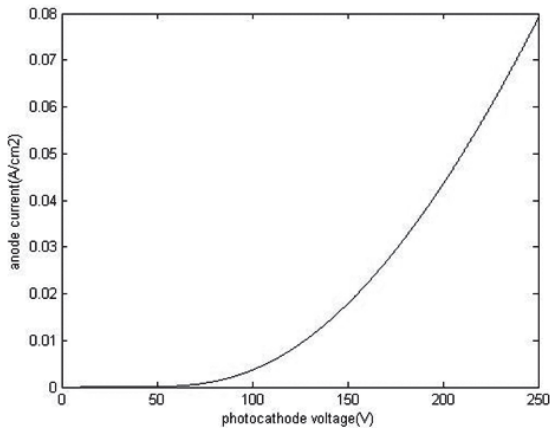


图1 光阴极电压与阳极电流密度的关系曲线

由图1可以看出,当阴极电压比较小的时候,受式(1)的指数部分的影响,电流密度值非常小,所以总电流密度变化得很慢。随着阴极电压的增加,指数部分的贡献开始变大,电流密度的增长也越来越快。

1.2 光阴极电压对系统信噪比的影响

在工程应用上,像增强器的信噪比是通过实测来确定的。而在理论分析中,人们用噪声因子^[10]来评价其信噪比特性。这里被定义为

$$N_F = \frac{(S/N)_i}{(S/N)_o} \quad (2)$$

对于像增强器而言,它的噪声因子可被定义为^[7]:

$$N_F = N_{F1} + \frac{N_{F2}-1}{G_1} + \frac{N_{F3}-1}{G_1 \cdot G_2} + \frac{N_{Fm}-1}{G_1 \cdot G_2 \cdots G_{m-1}} \quad (3)$$

其中:对像增强器而言, N_{F1} 和 G_1 为光阴极的噪声因子和光子增益; N_{F2} 和 G_2 分别是MCP的噪声因子和电子放大倍数; $N_{F3} \cdots N_{Fm}$ 和 $G_3 \cdots G_m$ 为第 m 级的噪声因子和光子通量增益。

在微光条件下,光电阴极输入光子数涨落服从泊松统计分布规律。光阴极噪声因子可表示为^[10]:

$$N_F = \eta^{-1/2} \quad (4)$$

η 为光电阴极的量子效率,它与阴极电场 E 成正比关系^[11]。

根据H.Pollehn^[12]通过对微通道板有效增益分布来计算,其公式为

$$N_F = (1/\gamma) \left(1 + \frac{D_2^2}{K^2} \right) \quad (5)$$

其中 γ 为MCP的开口面积比, D_2 是MCP输出电子数分布的方差, K 为MCP的平均增益,由文献^[13]分析可得,入射电子的能量对MCP的噪声因子成反比例关系。

将式(4)、(5)代入式(3)仿真可得系统的噪声因子与阴极电压的关系,如图2所示。从中可以看出,噪声因子随阴极电压呈现指数规律降低。

图2 光阴极电压与系统噪声因子的关系曲线(参见右栏)

为加工方便,所有的曲线均是规则的圆弧,中间的孔为通光的路径,两边放置散热风扇。

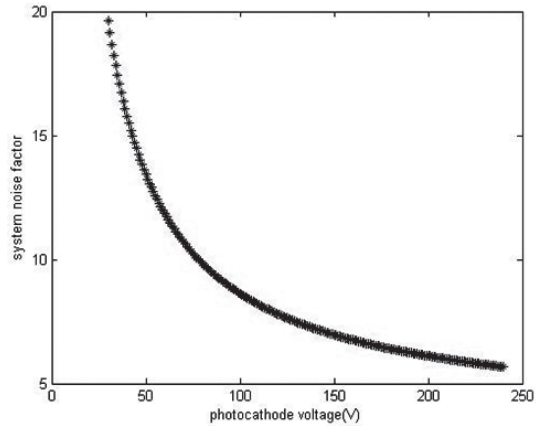


图2 光阴极电压与系统噪声因子的关系曲线

2 像增强器实验测试

2.1 测试系统组成

根据像增强器性能的测试方法^[14],像增强器的测试装置原理图如图3所示。

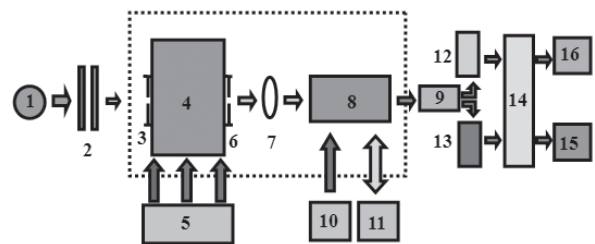


图3 像增强器测试装置原理图

图中的1是标准色温(2856±50)K光源,出射光经过可调光衰减器2均匀地照在被测像增强器4的光阴极上。光阴极受光面积由可调光阑3限定。当像增强器驱动电源5将电压加载到像增强器上时,像管开始正常工作,在其输出屏上产生亮斑,其输出光由低噪声增益的光电倍增管8接收。为了防止杂散光入射到光电倍增管上,采用光阑6和透镜7来限定光束。使得荧光屏输出的光全部进入光电倍增管。由于光电倍增管输出的电流信号在微安量级,而普通的电流表精度不够,所以加一个100kΩ的电阻9将其转换成电压信号,就可以用数字电表或者示波器将电信号监测到。10是恒压源,用来驱动光电倍增管。11是电位调节器,用来控制光电倍增管输出增益的大小。在光电倍增管的输出端接有两个电表,用来分别测定输出电压的直流分量和交流分量。由直流数字电压表12测定输出电压的平均值。另一电表是均方根电压表13,测定输出电压交流量的均方根值。将这两个电压表的测试值输入个人电子计算机14,由打印机15输出测试结果,也同时由X-Y函数记录仪16绘出测试曲线。

2.2 实验结果及分析

2.2.1 测试暗背景噪声

按图3搭建实验平台,关闭光阑3,并且无光源输入。测试像增强器本身的背景噪声,在其他条件保持不变情况下,改变光电阴极电压,测出其光电倍增管输出电压值如表1所示。

表1 输出背景噪声与阴极电压的关系

阴极电压 (V)	暗背景噪声电压 (mV)	归一化噪声电压	归一化噪声 (dB)
-239.9	401.6	1	0
-219.8	339.4	0.84512	-0.73082
-200.4	286.5	0.713396	-1.46669
-179.7	231.7	0.576942	-2.38868
-159	189.2	0.471116	-3.26873
-140.1	156.4	0.389442	-4.09557
-120.8	115.9	0.288596	-5.3971
-99.4	80.6	0.200697	-6.97459
-80.8	58.7	0.146165	-8.35156
-59.7	39.3	0.097859	-10.094
-39.6	24.0	0.059761	-12.2358
-19.9	16.1	0.04009	-13.9697

根据上面的数据可以得到输出背景噪声与输入电压的变化关系曲线，如图4所示。

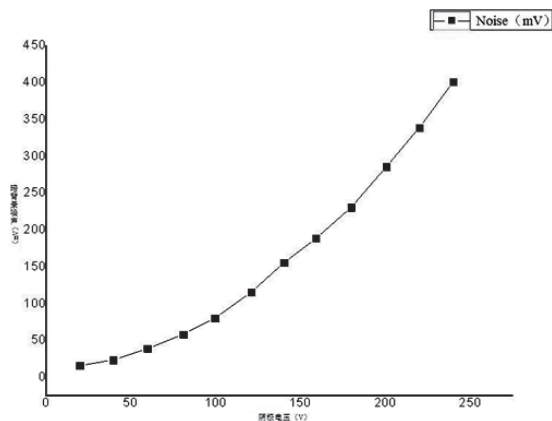


图4 输出背景噪声与光阴极电压幅度的关系曲线

由图4可见，在光阴极没有电压时，输出的噪声基本为零，这是由于半导体内的电子对于无限宽势垒的隧穿概率为零，只有能量高于真空能级的电子可以穿过势垒进入MCP，而那些极少数逸出的电子的能量是由半导体内部热激发出来的，逸出的电子就是无电场的热发射。当光电阴极电压在20~100V阶段时，其输出噪声略微增大，这是由于此时光电阴极势垒的最高点下降，但是势垒的高度还是远大于电子的费米能级，电子穿过势垒的概率很小，因此溢出的电子数量仍然很少。总体变化趋势还是非常缓慢，这与理论仿真曲线图1的趋势基本吻合。当输入电压继续增大时(100~240V)，则噪声输出明显增大。这是由于随着输出电压的增加，势垒高度和宽度都明显减小，因此，电子穿过势垒的概率增加。可以明显观察到，输出的噪声随着输入电压的增加呈指数趋势增长。阴极电压从-20V到-240V，输出背景噪声上升了14dB。与前面仿真结果进行比较，发现两者上升趋势基本相同。

我们将其进行拟合，拟合函数为：

$$y = k_1 \sqrt{x} (1000 + k_2 x)^{0.75} \exp\left(-\frac{k_3}{x}\right)$$

得到的结果如图5所示，曲线拟合度为 $R^2=0.9896$ 。可以看出，实验与理论非常吻合。

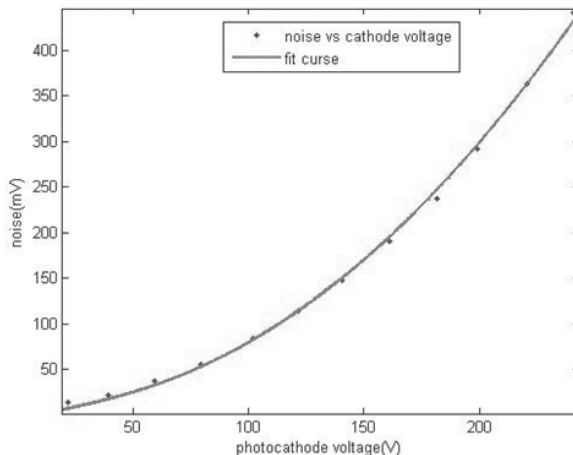


图5 输出背景噪声与光阴极电压幅度的关系拟合曲线

2.2.2 测试背景噪声

根据信噪比测试规范^[15]，测试的信噪比被定义为

$$S/N = K \times \frac{S - S_0}{\sqrt{N^2 - N_0^2}} \quad (6)$$

其中S为有光输入时信号直流电压平均值； S_0 为无光输入时信号直流电压平均值；N为有光输入时噪声交流电压值； N_0 为无光输入时噪声交流电压值。

按图3搭建实验平台，在其他条件保持不变时，改变光电阴极电压，分别用直流电压表和均方根电压表测出S、 S_0 、N、 N_0 ，通过式(6)，可得输出信噪比随阴极电压的变化关系曲线，如图6所示。

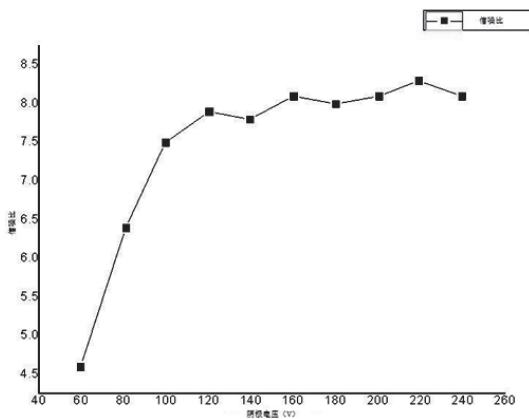


图6 阴极电压与输出信噪比的关系曲线

由图6可见，当阴极电压较低时，输出信噪比较低，这是由于低场助电压不仅抑制了像管的光阴极的量子效率，使得光阴极的噪声因子比较大，同时，从光阴极逃逸的电子在射入MCP时的能量较小，因此也使得MCP的噪声因子比较大，所以整个系统的噪声因子很大，输出信噪比也相应很小；在60~100V之间，我们可以看到，输出信噪比随阴极电压的增加而单调增加，在此阶段中，阴极电压开始增大，这使得光阴极的量子效率提高，并且，射入MCP的电子能量增大，相应的光阴极和MCP的噪声因子开始减小，因此，整个系统的噪声因子呈现下降趋势，输出信噪比开始上升；在120~260V之间，由于光阴极的量子效率和MCP的噪声因子都对阴极

电压具有饱和性, 整个系统的噪声因子开始趋于饱和, 这与理论仿真图2的变化趋势基本相同。因此最终的输出信噪比随着阴极电压的缓慢增加而趋于饱和。

3 总结

光电阴极材料的特性决定着阴极的噪声, 本文首先分析了阴极电压对像增强器背景噪声和信噪比的影响, 然后通过实验测试得: 增大阴极电压的幅度, 像增强器背景噪声随之呈指数增长; 输出信噪比随之呈单调增长, 最后在阴极电压约为-160V时趋于饱和。

在像增强器内部参数确定的情况下, 改变阴极场助电压, 在一定程度上可以提高其工作的性能。综合上述分析, 为了尽量提高系统信噪比, 同时适当地抑制系统暗背景噪声, 阴极电压最佳在-160V左右。

参考文献:

- [1] 艾克聪. 微光夜视技术的进展与展望[J]. 应用光学, 2006, 27(4):303-307.
- [2] Kan Wu, Xinwan Li. Theoretical and experimental analysis of the gating performance of a photocathode-gated image tube using a femtosecond laser[J]. Applied Optics, 2009. 48(18): 3337-3343.
- [3] 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, 2006.
- [4] 邵冲. 微光成像器件制冷结构与噪声性能分析研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [5] 高有堂, 徐源. 像增强器光阴极在热冲击环境下噪声频谱分析[J]. 光学技术, 2010(1):61-65.
- [6] 刘术林, 董煜辉. 微光像增强器信噪比与MCP电压关系[J]. 应用光学, 2009, 30(4):650-653.
- [7] 承欢, 江剑平. 阴极电子学[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1986.
- [8] 叶凡. 几种带宽隙半导体材料的场发射特性研究[D]. 兰州:兰州大学, 2007.
- [9] 方如章, 刘玉凤. 光电器件[M]. 北京:国防工业出版, 1988:151-154.
- [10] 向世明. 微光像增强器信噪比理论极限问题研究[J]. 应用光学, 2008, 29(5):724-727.
- [11] 李晋闽, 郭里辉. 场助InP/InGaAsP半导体光电阴极量子效率的理论计算[J]. 物理学报, 1992, 41(10):1672-1678.
- [12] Pollehn H, et al. Advances in electronics and electronic physics[J], A40,21(1976):21-31
- [13] 刘术林, 董煜辉. MCP输入电子能量与微光像增强器信噪比的关系[J]. 应用光学, 2008, 29(4):562-565.
- [14] 邹异松. 电真空成像器件及理论分析[M]. 北京:国防工业出版社, 1989.
- [15] Dutoit A G. The newest measurement technology

of signal-to-noise ratio in image intensifiers[J]. SP IE, 1986, 691:16-18.

作者简介:

周立, 上海交通大学, 硕士

电话: 021-54748750; 13917642411

电子信箱: kid2009@sjtu.edu.cn

联系地址: 上海市闵行区东川路800号上海交通大学
大学电院裙楼5-200B (200240)

基金项目:

国家自然科学基金项目: 60877012, 61071011, 61107041,

上海市重大基础研究项目(10DJ1400402)。

(上接28页)

作者简介:

曾昊, 上海交通大学, 硕士

电话: 021-54748750; 13661493126

电子信箱: zenghao198646@sjtu.edu.cn

联系地址: 上海市闵行区东川路800号上海交通大学
大学电院裙楼5-200B (200240)

基金项目:

国家自然科学基金项目: 60877012, 61071011, 61107041,

上海市重大基础研究项目(10DJ1400402)。