

紫外单光子成像系统增益特性研究^{*}

张兴华^{1,2)†} 赵宝升¹⁾ 刘永安^{1,2)} 缪震华^{1,2)} 朱香平¹⁾ 赵菲菲^{1,2)}

1) 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2008 年 6 月 17 日收到, 2008 年 8 月 19 日收到修改稿)

介绍了基于微通道板和楔条形阳极的紫外单光子成像系统的组成和工作原理. 利用该系统分别研究了两块和三块微通道板在不同电压下的暗计数特性. 实验和拟合结果表明微通道板的暗计数脉冲幅度呈负指数型分布, 暗计数率随电压升高而增大. 通过测试不同电压下的脉冲幅度分布曲线, 发现微通道板增益在较高电压下更加均匀. 研究了两块微通道板情况下, 微通道板电压和间距对系统分辨率的影响. 结果表明, 系统分辨率随微通道板电压增加而提高; 另外, 适当增加微通道板间距也可以提高系统分辨率.

关键词: 单光子计数成像, 微通道板, 楔条形阳极, 分辨率

PACC: 4280Q, 2940T, 2970J

1. 引 言

随着生物医学、空间探测以及环境辐射检测技术的发展, 对微弱光的检测要求越来越高. 当光微弱到以单个光子发射时, 一般的弱光成像器件已经不能满足要求, 只有利用单光子计数模式, 才能探测到单光子信息. 单光子计数器件一般分为两类: 一类基于光电倍增管 (PMT), 只能探测光子的一维信息, 主要用于单光子计数. 另一类基于微通道板 (MCP), 不仅可以探测一维时间信息, 而且可以探测

光子的位置信息, 从而可以用于单光子计数成像. 因此, MCP 在生物超微弱发光、空间环境探测以及核辐射探测领域得到了广泛应用^[1-3].

在基于 MCP 的单光子计数器件中, MCP 的主要作用是实现电子倍增, 它的增益特性对单光子计数成像系统的分辨率影响很大. 本文介绍了基于 MCP 和楔条形阳极的紫外单光子成像系统的基本组成和工作原理; 在不同电压下, 分别研究了两块和三块 MCP 的暗计数和增益特性; 分析了采用两块 MCP 时, 不同电压和不同间距对系统分辨率的影响. 本文中选用的 MCP 通道直径为 $25 \mu\text{m}$, 长径比为 40:1.

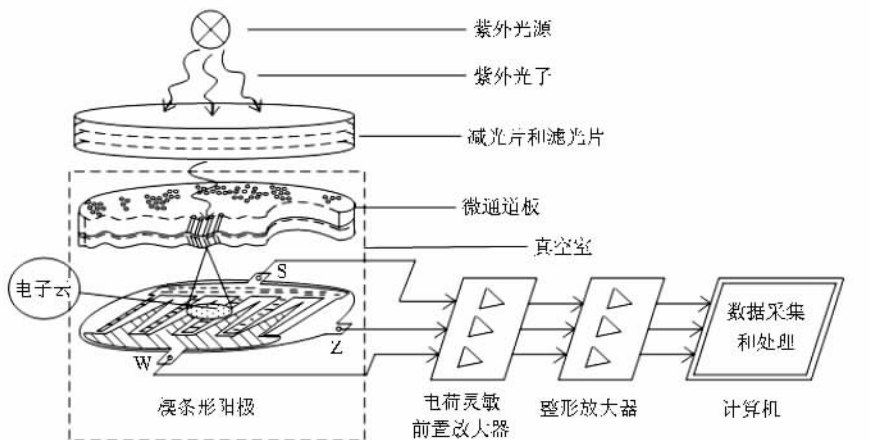


图 1 紫外单光子成像系统结构示意图

^{*} 中国科学院知识创新工程方向性项目资助的课题.

[†] E-mail: xinghua146@yahoo.com.cn

2. 系统组成和工作原理

图 1 是基于 MCP 和楔条形阳极的紫外单光子成像系统结构示意图. 该系统主要由紫外光源、减光片、窄带滤光片、MCP、楔条形阳极 WSA (wedge and strip anode)、电荷灵敏前置放大器、整形放大器、PCI 数据采集卡、计算机以及数据采集和数据处理软件组成. 其中 MCP 和 WSA 处于真空室中. 该系统的工作原理为: 从紫外光源发出的光经过减光片和滤光片后成为光强极微弱的紫外单光子流, 紫外单光子流直接入射在 MCP 上, MCP 产生的二次倍增电子通

过 WSA 进行收集; 电荷灵敏前置放大器将 WSA 收集的电荷信号转换为电压信号; 整形放大器对该电压信号进行滤波和整形; 整形放大器输出的信号由 PCI 数据采集卡采集; 利用数据处理软件对采集的数据进行处理后得到光子入射在 MCP 不同位置的坐标和数目. 通过图像处理技术得到不同位置的光子计数图像. 其具体工作原理可参考文献 [4].

3. 实验结果和讨论

我们分别测量了有光照和无光照时 2 块和 3 块 MCP 的增益分布曲线, 利用指数函数和高斯函数对

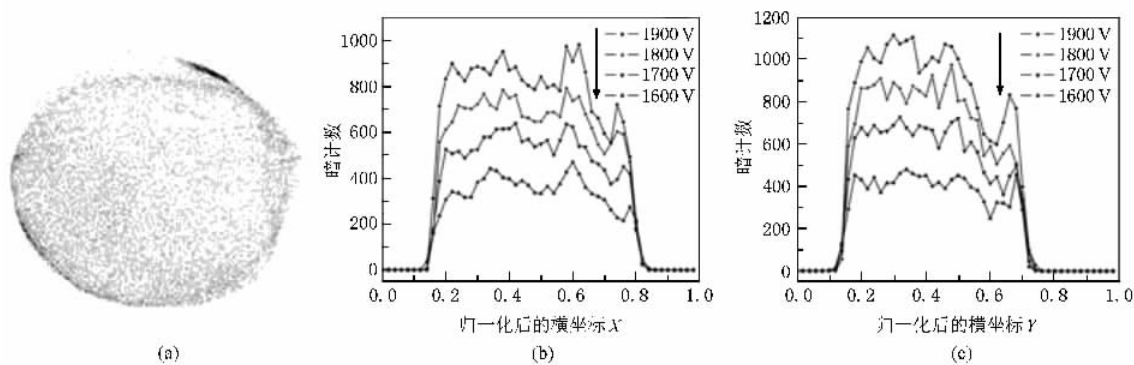


图 2 (a) 2 块 MCP 在 1900 V 时的暗计数图像; (b) 不同电压下 X 方向的暗计数分布曲线; (c) 不同电压下 Y 方向的暗计数分布曲线

分布曲线进行了拟合. 图 2 是 2 块 V 形级联的 MCP 在 1900 V 时的暗计数图像以及在不同电压下 X 方向和 Y 方向的暗计数曲线. 暗计数图像是在真空度为 4×10^{-5} Pa 时, 采样 40 min 得到的. 从图 2(a) 可以看出, MCP 的暗计数图像近似为圆形, 反映了 MCP 的形状, 图像整体亮度比较均匀, 边缘有个别较亮点, 可能是缺陷引起的. 由图 2(b) 和 (c) 可以清楚看到, 不同位置的暗计数并不相同, 但在不同电压下的整体曲线形状相似, 并且随着电压升高, 暗计数逐渐增大.

产生暗计数的原因一般包括玻璃的自然辐射、宇宙射线相互作用、热发射以及由通道壁缺陷导致的场发射, 目前认为暗计数主要是由 MCP 玻璃中 ^{40}K 的 β 衰减和 MCP 通道壁吸附的气体引起的^[5]. 图 3(a) 是 2 块 MCP 不同电压时暗计数的脉冲幅度分布曲线, 图 3(b) 是 1900 V 时的暗计数脉冲幅度分布曲线及其拟合曲线 (虚线). 图 3(c) 是有光照时不同电压下的脉冲幅度分布曲线, 图 3(d) 是不同电压

下的暗计数率曲线和计数率曲线. 从图 3(a) 可以看出不同电压时的脉冲幅度分布曲线形状相似, 随着电压升高, 计数率增大. 据报道^[6], MCP 的暗计数脉冲幅度分布呈负指数型, 我们通过函数 $y = a + b \times e^{-k \times x}$ ($k = 1.76$) 对 1900 V 时的暗计数脉冲幅度分布曲线进行了拟合, 拟合结果表明暗计数脉冲幅度分布确实为负指数型分布 (图 3(b) 中虚线为拟合曲线). 暗计数脉冲幅度分布表明暗计数是沿着微通道的整个长度产生的^[7]. 从图 3(c) 可以看出, 有光照时的脉冲幅度分布曲线与暗计数的脉冲幅度分布曲线不同, 随着电压升高, 脉冲幅度分布曲线逐渐变得平坦, 这是由于 MCP 增益变得均匀引起的. 由图 3(d) 可知, 暗计数率和计数率均随电压升高而增大, 暗计数率比计数率小很多.

图 4 是 3 块 Z 形堆叠的 MCP 在 2650 V 时采样 15 min 的暗计数图像以及在不同电压时 X 方向和 Y 方向的暗计数曲线. 从图 4(a) 可以看出, 除了部分边缘较亮外, 暗计数图像比较均匀. 由图 4(b) 和 (c)

可以看出，横坐标和纵坐标在不同电压下的暗计数曲线趋势相似，当 MCP 电压较低时，各个位置的暗

计数较少，随着电压增大，暗计数也相应增加，当 MCP 电压大于 2500 V 时，暗计数增加较少。

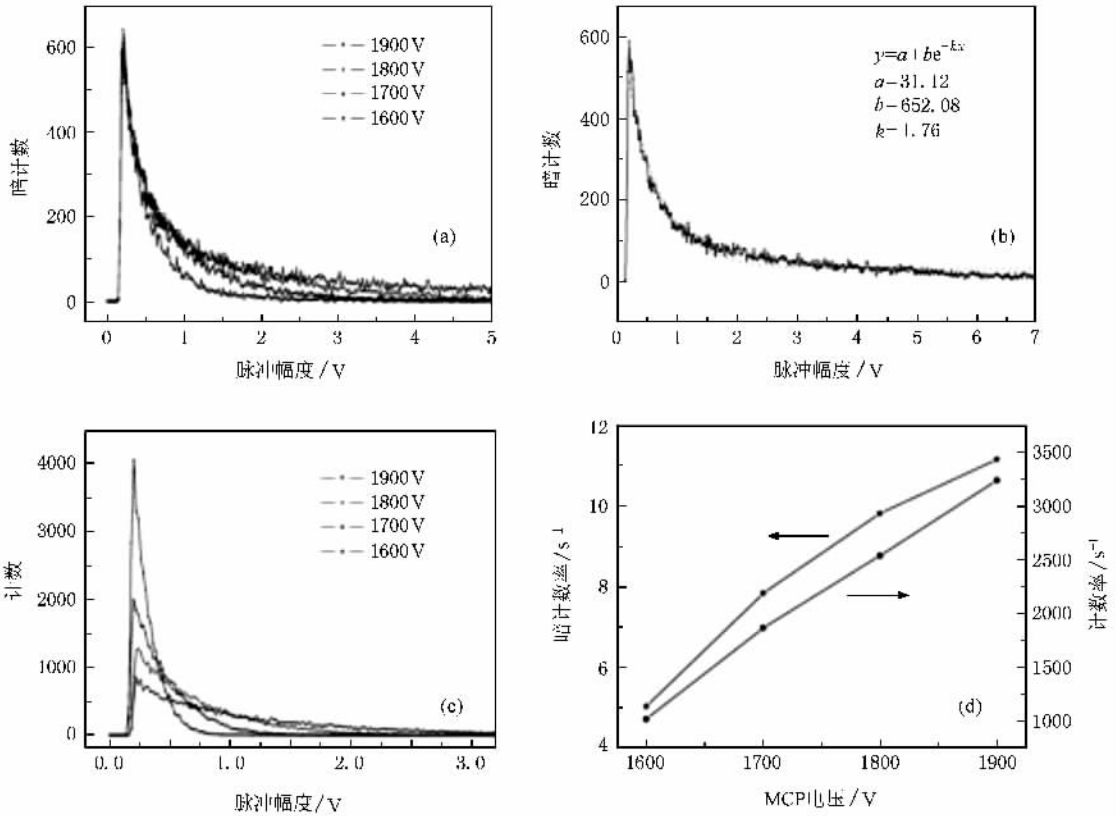


图 3 (a) 2 块 MCP 在不同电压下的暗计数脉冲幅度分布曲线 (b) 1900 V 时的暗计数脉冲幅度分布曲线及其拟合曲线 (虚线) (c) 有光照时不同电压下的脉冲幅度分布曲线 (d) 不同电压下的暗计数率曲线和计数率曲线

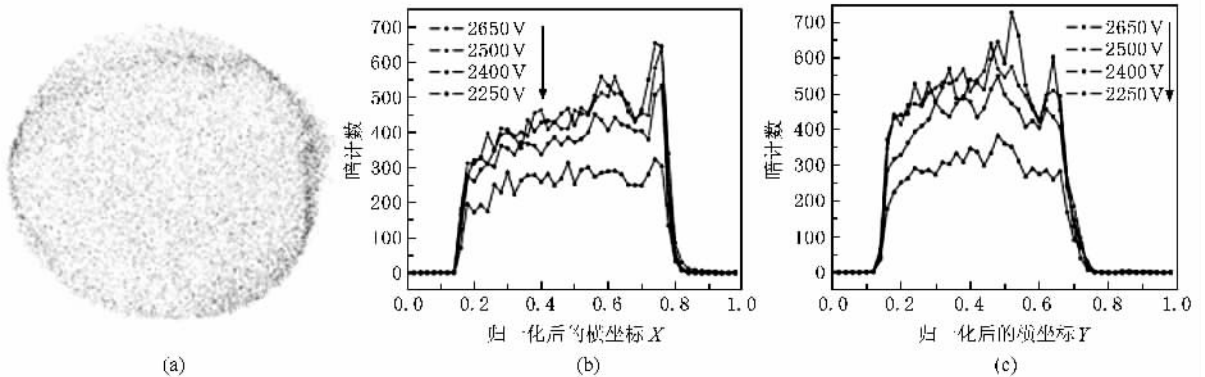


图 4 (a) 3 块 MCP 在 2650 V 时的暗计数图像 (b) 不同电压下 X 方向的暗计数分布曲线 (c) 不同电压下 Y 方向的暗计数分布曲线

图 5 (a) 是 3 块 MCP 在不同电压下的暗计数脉冲幅度分布曲线，图 5 (b) 是 2650 V 时的暗计数脉冲幅度分布曲线及其拟合曲线，图 5 (c) 是有光照时不同电压下的脉冲幅度分布曲线。图 5 (d) 是 MCP 电压

为 2650 V 时有光照情况下的脉冲幅度分布曲线及其拟合曲线。通过图 5 (a) 可以看出，随着 MCP 两端电压增大，最大暗计数和暗计数率都逐渐增大，曲线形状和两块 MCP 的相似。通过 $y = a + b \times e^{-k \times x}$ (k

= 3.03) 函数拟合可以看出, 拟合曲线和实验曲线基本重合(见图 5(b)), 这也再次说明 MCP 暗计数脉冲幅度分布为负指数型分布. 由图 5(c) 可以看出, 有光照时, 随着电压增加, 最大计数减小, 计数率增加. 当 MCP 处于饱和增益时, 脉冲幅度分布为准高

斯分布^[8], 图 5(d) 中的虚线为用高斯函数 $y = y_0 + (A/(w \times \sqrt{\pi/2})) \times e^{-2 \times ((x-x_c)/w)^2}$ 拟合后的曲线, 其中 $y_0 = 111.78$, $x_c = 0.24$, $w = 0.36$, $A = 316.57$. 从拟合结果看, 脉冲幅度分布近似为准高斯分布.

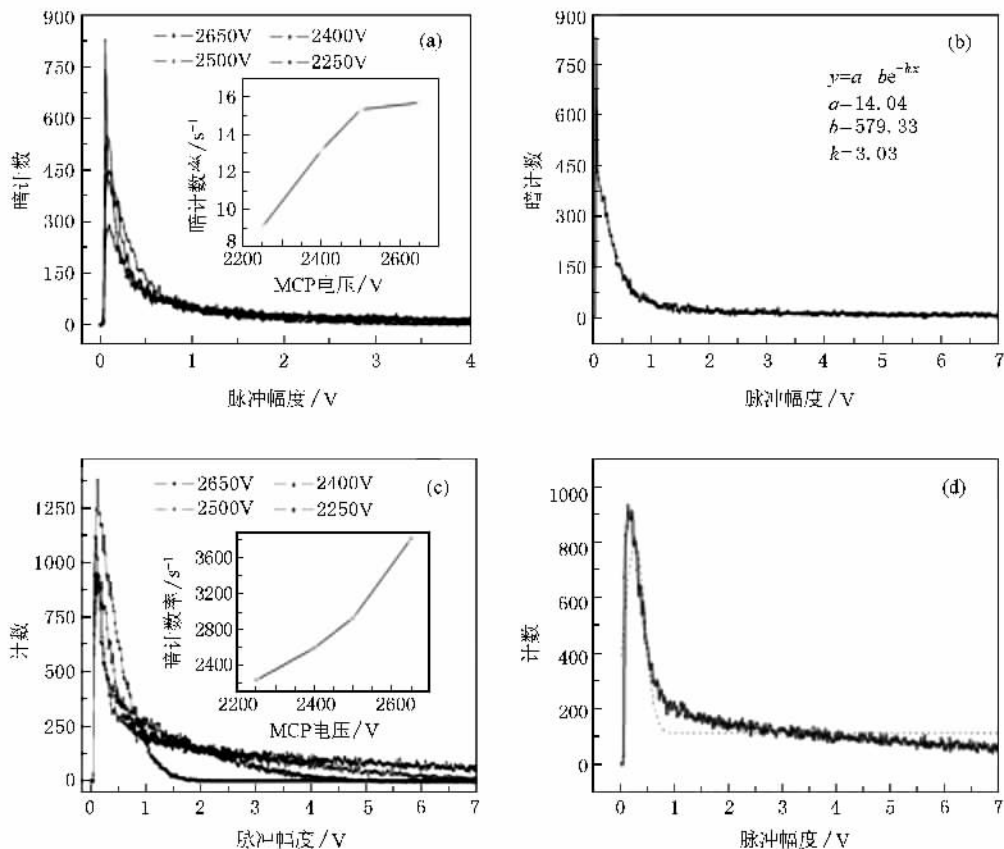


图 5 (a) 3 块 MCP 在不同电压下的暗计数脉冲幅度分布曲线; (b) 2650 V 时的暗计数脉冲幅度分布曲线及其拟合曲线(虚线); (c) 有光照时不同电压下的脉冲幅度分布曲线; (d) 2650 V 时的脉冲幅度分布曲线及其拟合曲线(虚线)

为了研究 MCP 增益对系统分辨率的影响, 我们分别测试了 MCP 在不同电压和不同间距时的分辨率. 由于两块 MCP 比三块 MCP 的暗计数率要小(见图 3(d) 和图 5(a)), 本文选择两块 MCP 来研究 MCP 增益对系统分辨率的影响.

图 6 是分辨率掩模板及其在不同电压下的单光子计数图像. 在图 6(a) 中, 第一象限和第二象限分别是六组条纹, 第三象限和第四象限分别是五组条纹. 该分辨率模板可测得的最小分辨率为 75 μm, 最大分辨率为 550 μm. 从图 6(b) — (d) 可以看出, 随着电压减小, 条纹图像逐渐模糊, 分辨率逐渐下降, 当 MCP 电压为 1700 V 时, 分辨率板所成的像已经变得非常模糊了. 这是由于电压较低时, MCP 增益较小,

从而导致系统分辨率下降^[9].

此外, MCP 间距对系统分辨率也有影响. 图 7 是两块 MCP 所加电压为 1900 V 时, 不同 MCP 间距下分辨率板所成的像. 从图 7 可以看出, 当 MCP 间距为 50 μm 时, 系统分辨率最高为 150 μm(图 7(a)); 当两块 MCP 间距为 80 和 130 μm 时, 系统分辨率优于 100 μm(图 7(b) 和(c)). 因此, 适当增加 MCP 间距可以提高系统分辨率, 这主要是由于间距增加时, 第一块 MCP 出射的电子可以进入第二块 MCP 更多的通道, 提高了 MCP 增益, 从而提高了系统分辨率. 但是随着 MCP 间距的进一步增加, 由于空间电荷效应, 电子云质心偏差也会增加, 从而限制分辨率的进一步提高.

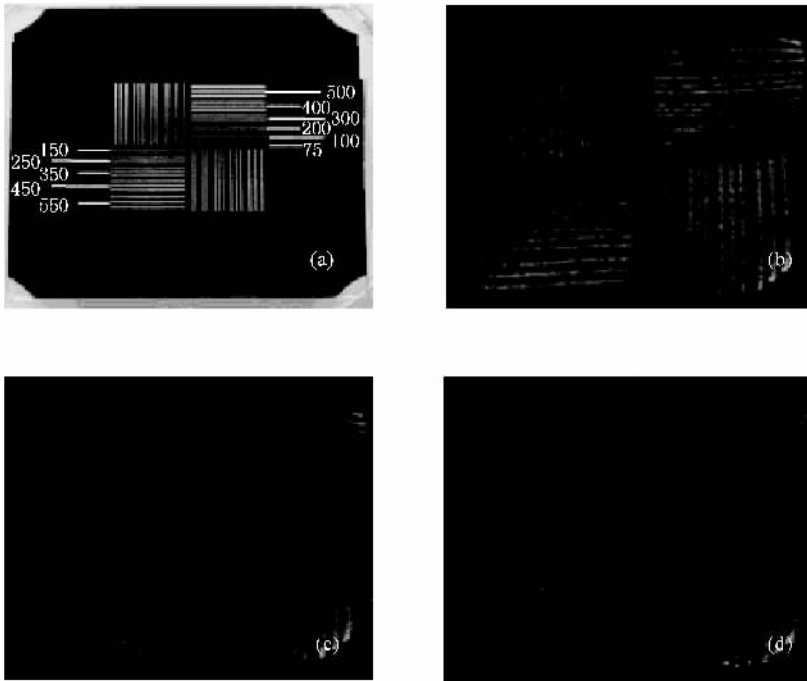


图6 (a)分辨率测试掩模板;(b)MCP电压为1900 V时分辨率板所成的像;(c)MCP电压为1800 V时分辨率板所成的像;(d)MCP电压1700 V时分辨率板所成的像

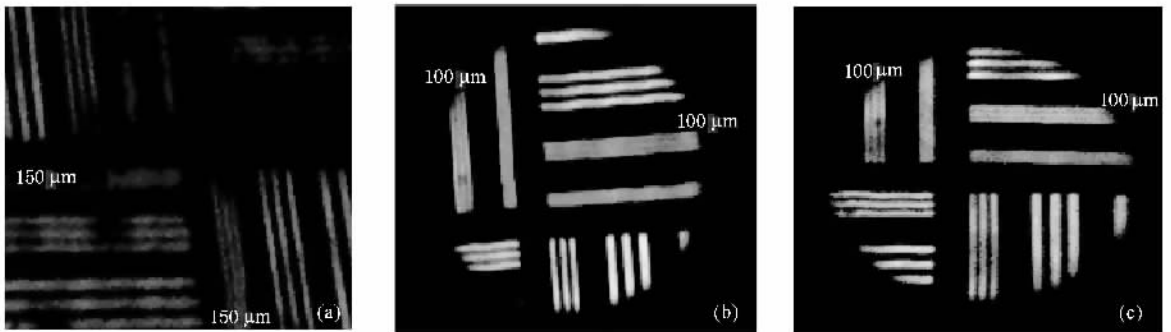


图7 2块MCP所加电压为1900 V时,不同MCP间距下分辨率板所成的像 (a)50 μm ;(b)80 μm ;(c)130 μm

4. 结 论

本文介绍了基于MCP和楔条形阳极的紫外单光子成像系统的组成和工作原理.利用该系统分别研究了两块和三块MCP的暗计数和增益特性,实验和拟合结果表明MCP暗计数脉冲幅度分布为负指数型分布,并且随着电压升高,不同位置的暗计数逐

渐增大,两块MCP比三块MCP的暗计数率小.当三块MCP电压为2650 V时,其在光照下的脉冲幅度分布为准高斯分布.在两块MCP条件下,MCP在1900 V时的系统分辨率明显优于1700 V时的分辨率;在MCP电压为1900 V条件下,两块MCP间距由50 μm 增至80 μm 时,系统分辨率由150 μm 提高至优于100 μm .因此,增加MCP电压和适当增大MCP间距均可以提高系统分辨率.

- [1] Wang X H , Hu X Q , Yu X , Wang S S , Cao G R 1997 *Journal of Beijing Institute of Technology* **17** 503 (in Chinese) [王晓辉、胡新奇、俞 信、王苏生、曹根瑞 1997 北京理工大学学报 **17** 503]
- [2] Zhang J Y , Hao S S 2002 *Radio Communications Technology* **28** 62 (in Chinese) [张建英、郝书顺 2002 无线电通信技术 **28** 62]
- [3] Liu H F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5186 (in Chinese) [刘华锋 2006 物理学报 **55** 5186]
- [4] Zhang X H , Zhao B S , Miao Z H , Zhu X P , Liu Y A , Z W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4238 (in Chinese) [张兴华、赵宝升、缪震华、朱香平、刘永安、邹 玮 2008 物理学报 **57** 4238]
- [5] Sandel B R , Broadfoot A L , Curtis C C , King R A , Stone T C , Hill R H , Chen J , Siegmund O H W , Raffanti R , Allred D D , Turley R S , Gallagher D L 2000 *Space Science Reviews* **91** 197
- [6] Siegmund O H W , Vallerga J V , Wargelin B 1988 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS - **35** 524
- [7] Siegmund O H W , Lampton M , Bixler J , Chakrabarti , Vallerga , J , Bowyer S , Malina R F 1986 *J. Opt. Soc. Am. A* **3** 2139
- [8] Bush B C , Cotton D M , Siegmund O H W , Chakrabarti S , Harris W , Clarke J 1991 *SPIE* **1549** 290
- [9] Siegmund O H W , Clothier S , Thornton J , Lemen J , Harper R , Mason I M , Culhane J L 1983 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS - **30** 503

Gain characteristic of ultraviolet single photon imaging system^{*}

Zhang Xing-Hua^{1)†} Zhao Bao-Sheng¹⁾ Liu Yong-An^{1)‡} Miao Zhen-Hua^{1)‡} Zhu Xiang-Ping¹⁾ Zhao Fei-Fei^{1)‡}

^{1)‡} State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics , Xi 'an Institute of Optics and Precision Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Xi 'an 710119 , China)

^{2)‡} Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)

(Received 17 June 2008 ; revised manuscript received 19 August 2008)

Abstract

Single-photon-counting imaging technology has been widely used in ultraweak bioluminescence , space environment detection and nuclear radiation detection. The structure and working principle of an ultraviolet single photon imaging system based on the microchannel plates and the wedge and strip anode are introduced. The gain characteristic of dark count of two and three microchannel plates is investigated under different voltages respectively. The experimental and fitted results show that the dark count pulse height distribution of microchannel plate has exponential distribution , and the dark count rate rises as the voltage increases . It is shown that the gain becomes more homogeneous as the voltage increases by measuring the pulse height distribution under different voltages. Then the effects of microchannel plate voltage and distance on system resolution with two microchannel plates are tested. It is revealed that the system resolution rises as the voltage of microchannel plate increases , and can be improved also by increasing the distance of microchannel plate properly.

Keywords : single-photon-counting imaging , microchannel plate , wedge and strip anode , resolution

PACC : 4280Q , 2940T , 2970J

^{*} Project supported by the Knowledge Innovation Engineering of Chinese Academy of Sciences.

[†] E-mail : xinghua146@yahoo.com.cn