

# 采用金阴极的光子计数成像探测器的性能

刘永安<sup>1</sup> 赵菲菲<sup>1,2</sup> 胡慧君<sup>1,2</sup> 盛立志<sup>1</sup> 鄢秋荣<sup>1</sup> 赵宝升<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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, 陕西 西安 710119)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 采用 Au 作为感应读出式光子计数成像探测器的光阴极, 在分辨率测试板上蒸镀了薄膜厚度为 15 nm 的 Au 作为透射式阴极。实验测试了加 Au 阴极后微通道板(MCP)的增益性能, 探测器的分辨率和计数率等成像性能, 与未加 Au 阴极时相应的系统性能做了对比。结果表明, 加 Au 阴极后 MCP 的脉冲高度分布呈准高斯型, 随着 MCP 工作电压的提高, 脉冲高度分布曲线的峰值向高增益方向移动, 曲线的半峰全宽(FWHM)逐渐变宽; Au 阴极有效提高了光子计数成像探测器的探测效率和信噪比; 分辨率测试结果表明加 Au 阴极后探测器的空间分辨率优于 75  $\mu\text{m}$ , 随着计数率的提高分辨率将会下降, 在保证系统分辨率优于 150  $\mu\text{m}$  时计数率可达到 13.5 kHz。

**关键词** 光学器件; 探测器; 光子计数成像; 微通道板; Au 阴极; 电荷感应

**中图分类号** TN23; O434.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0123002

## Properties of Photon Counting Imaging Detector with Au Photocathode

Liu Yongan<sup>1</sup> Zhao Feifei<sup>1,2</sup> Hu Huijun<sup>1,2</sup> Sheng Lizhi<sup>1</sup> Yan Qiurong<sup>1</sup> Zhao Baosheng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Au photocathode is used in photon counting imaging system with induction readout. A 15 nm gold film is deposited on the resolution test board and it is used for transmission photocathode. The gain performance of micro-channel plates (MCP), resolution and counting rate of the detector with Au photocathode are tested. The results show that the system with Au cathode has a quasi-Gaussian pulse height distribution (PHD) curves. The peak of the PHD curves moved to the high-gain zone and the full width at half maximum (FWHM) gradually widened as the voltage increased. After the adoption of Au cathode, the detection efficiency and the signal-to-noise ratio of photon counting imaging detector effectively improved. The resolution test results show that the spatial resolution of the detector is better than 75  $\mu\text{m}$ , and the counting rate can reach 13.5 kHz when the system's resolution is better than 150  $\mu\text{m}$ .

**Key words** optical devices; detectors; photon counting imaging; micro-channel plate (MCP); Au cathode; charge induction

**OCIS codes** 230.0040; 040.0040; 110.0110

## 1 引 言

基于微通道板(MCP)和阳极读出的光子计数成像探测器<sup>[1~4]</sup>已被广泛应用于深空探测、生物微弱发光和环境辐射检测等领域<sup>[5~8]</sup>, 该类探测器主要由光阴极、MCP 和位敏阳极构成。位敏阳极又包括电阻阳极、楔条形阳极(WSA)、游标阳极、交叉条

纹阳极和延迟线等<sup>[9,10]</sup>。探测器中光阴极的作用是将入射光子转换为电子, 在 100~300 nm 的紫外波段, 一般采用的光电阴极为碱金属卤化物或碲化物光阴极, 如 Cs<sub>2</sub>Te, Rb<sub>2</sub>Te 等。在模拟实验中<sup>[3]</sup>, 采用汞灯发出的 253.7 nm 的光作为紫外光源, 并采用裸 MCP 直接进行光电转换和电子倍增。由于

收稿日期: 2010-03-31; 收到修改稿日期: 2010-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(10878005)资助课题。

作者简介: 刘永安(1982—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事光电成像器件方面的研究。E-mail: liuan86@126.com

MCP 对 253.7 nm 处的紫外光量子效率极低,为了提高系统的探测效率和性能,需要采用量子效率较高的光电阴极。为研究光阴极对系统性能的影响,此次实验采用透射式 Au 阴极。这是因为 Au 的功函数为 4.2 eV 左右,同实验中所用中心波长 253.7 nm 的紫外光源(对应光子能量为 4.9 eV)非常匹配;另外,Au 阴极的制作和实验操作也均比较简单。

实验中采用厚度为 15 nm 的透射式 Au 阴极,研究表明 15 nm 厚的 Au 薄膜在 257 nm 处的量子效率约为 0.01%<sup>[11]</sup>,该波长与实验采用的 253.7 nm 紫外光源较接近,所以对 Au 阴极在 253.7 nm 处的量子效率不再做过多的研究,这里主要研究 Au 阴极对光子计数成像系统性能的影响。这些将有助于进一步优化探测器的结构和提高探测器的性能,为下一步制作量子效率更高的阴极奠定一定的实验基础,同时也将其他基于 MCP 的探测器提供理论和实践上的参考。

## 2 实验方法

### 2.1 Au 阴极的制作

实验中将 Au 阴极制作在分辨率测试板上。首先在石英基底上蒸镀一层 300nm 厚的金属薄膜并

光刻出分辨率测试图形,然后在该分辨率板上再蒸镀一层厚度为 15 nm 的 Au 薄膜。图 1 所示为未蒸镀 Au 阴极和蒸镀 Au 阴极的分辨测试板实物图。

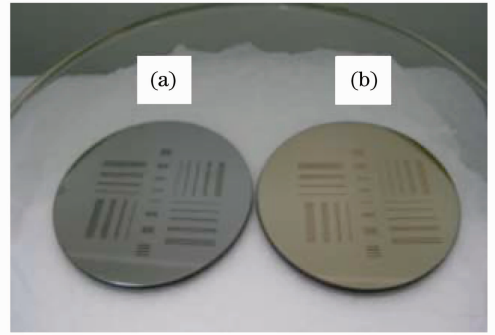


图 1 分辨率测试板实物图。(a)未蒸镀 Au 阴极, (b)蒸镀有 Au 阴极

Fig.1 Resolution test board. (a) without Au cathode, (b) with Au cathode

### 2.2 实验装置

感应读出式紫外光子计数成像探测器的结构如图 2 所示,该系统主要由紫外光源、减光片和滤光片、MCP、Ge 薄膜<sup>[12,13]</sup>及其衬底、WSA 阳极、放大电路和数据采集处理系统构成,其中 MCP、Ge 薄膜及其衬底和 WSA 阳极位于真空室内。未蒸镀 Au 阴极时[图 2(a)],分辨率测试板近贴于 MCP 的输

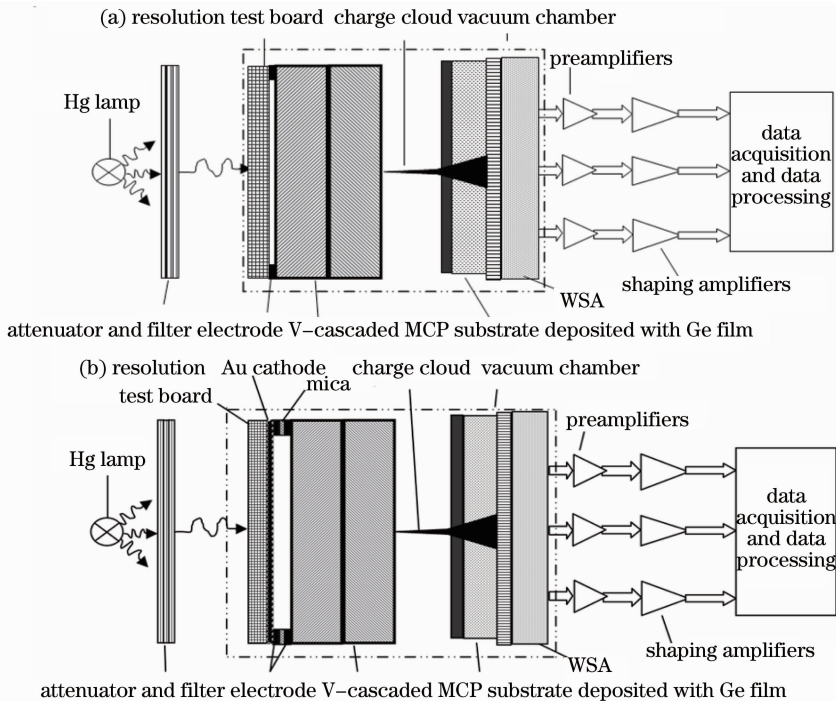


图 2 感应读出方式光子计数成像系统结构示意图。(a) 未加 Au 阴极, (b) 加 Au 阴极

Fig.2 Sketch of experimental photon counting imaging system with induction readout. (a) Cathode without Au, (b) cathode with Au

入面且和 MCP 输入面间距为  $80\ \mu\text{m}$ 。蒸镀 Au 阴极后[图 2(b)], Au 阴极和 MCP 输入面间距为  $0.2\ \text{mm}$  并加一阴极电压。两者工作过程的主要区别是在光电转换部分:未加光阴极时,经过减光和滤光后的紫外光通过分辨率测试板入射到 MCP,光子在 MCP 输入面产生外光电效应并发射光电子;蒸镀 Au 阴极后,紫外光由蒸镀在分辨率测试板上的 Au 阴极进行光电转换并发射光电子,然后光电子经电场加速入射到 MCP。进入 MCP 后的光电子在 MCP 内产生二次电子倍增,MCP 倍增后输出的电荷轰击呈高阻特性的半导体 Ge 薄膜,通过电荷感应由 Ge 膜衬底背面的 WSA 位敏阳极收集;位敏阳极接收的电荷信号经过电荷灵敏前置放大器、整形放大器后由计算机进行数据采集和处理,最后得到不同位置的光子计数图像。

### 3 实验结果和分析

#### 3.1 MCP 的增益性能

MCP 的作用是实现电子倍增,它的增益特性对光子计数成像系统的性能影响较大,曾对未加阴极时 MCP 的增益特性进行了研究<sup>[14]</sup>,这里主要研究 Au 阴极对 MCP 增益性能的影响。

##### 3.1.1 相同阴极电压不同 MCP 工作电压时 MCP 的增益性能

图 3(a)为实验测试得到的无 Au 阴极时 MCP 在不同工作电压时的脉冲高度分布曲线 (PHD),图 3(b)为加 Au 阴极后 MCP 的 PHD 曲线。实验采用的 MCP 孔径为  $25\ \mu\text{m}$ ,长径比为  $40:1$ ,两 MCP 间距为  $80\ \mu\text{m}$ 。测试条件为 MCP 和 Ge 层间加速电压为  $300\ \text{V}$ ,Au 阴极和 MCP 输入面间距为

$0.2\ \text{mm}$ ,阴极电压为  $200\ \text{V}$ 。由图 3(a)可见,未加 Au 阴极时 MCP 的 PHD 曲线分布形状基本不变,随着工作电压的增加曲线峰值逐渐下降并向高增益方向偏移。PHD 曲线的半峰全宽 (FWHM) 逐渐加宽,但始终低增益幅度部分的计数个数占多数,峰值向高增益方向偏移不明显。加 Au 阴极后,如图 3(b),由于增益饱和效应 MCP 的 PHD 曲线呈准高斯型分布。随 MCP 工作电压的增加,PHD 曲线的峰值变低并向高增益方向偏移,曲线的 FWHM 逐渐加宽。这样便于选择一个适当的阈值电压以减小低幅值噪声脉冲的影响,也即提高了探测器的信噪比。相关研究表明<sup>[15]</sup>,随着 MCP 增益的提高,PHD 曲线的 FWHM (%) 逐渐减小。对于光子计数成像系统,需要 MCP 的 PHD 曲线分布峰值处增益较高且 FWHM (%) 较小,这样不仅有利于区分低幅值噪声和有效的光子事件,还可以适当减小对位置解码电路的动态范围要求。

##### 3.1.2 相同 MCP 工作电压时不同阴极电压的 MCP 增益性能

图 4 为 MCP 工作电压不变,不同阴极电压时测试得到的 MCP 的 PHD 曲线分布。实验测试条件:MCP 工作电压为  $1700\ \text{V}$ ,MCP 和 Ge 层间加速电压为  $300\ \text{V}$ 。由图 4 可见,当 Au 阴极电压相对于 MCP 输入面电压为  $0$  时,由于没有加速电场,经 Au 阴极光电转换后发射的光电子不能完全到达 MCP 输入面并倍增,此时的 PHD 曲线呈负指数型。加上阴极电压后,光电转换发出的光电子能够顺利到达 MCP,PHD 曲线呈高斯型分布,随阴极电压的不断提高,PHD 曲线峰值向高增益方向移动,FWHM 逐渐加宽。这主要是由于阴极电压的增加提高了

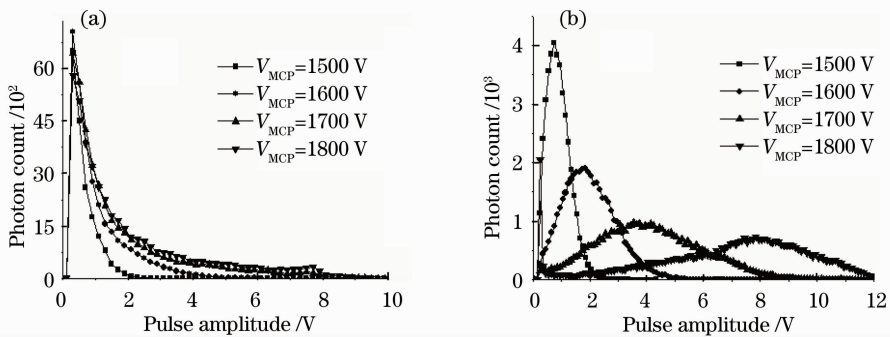


图 3 施加不同电压时的 MCP 脉冲高度分布曲线。(a)未加 Au 阴极,(b)加 Au 阴极

Fig. 3 The pulse height distribution curves of MCP under different applied voltages. (a) without Au cathode, (b) with Au cathode

光电子进入 MCP 通道时的能量,从而在 MCP 增益不变的情况下曲线峰值向高增益方向偏移。另外,在成像性能测试中发现:随着阴极电压从 0 增加到 100 V,系统的分辨率逐渐提高,这可能是由于轰击 MCP 的电子能量提高以及聚焦效果逐渐增强造成的。继续增加阴极电压,当阴极电压从 200 V 增加到 400 V 时,系统的分辨率逐渐下降。这可能是由于随着轰击 MCP 的电子能量提高,产生的二次电子被分辨率板排斥回 MCP 通道,所以降低了分辨率性能。实验发现,阴极与 MCP 输入面电压为 200 V 左右(也即 1 V/ $\mu\text{m}$ )时系统成像性能较好。

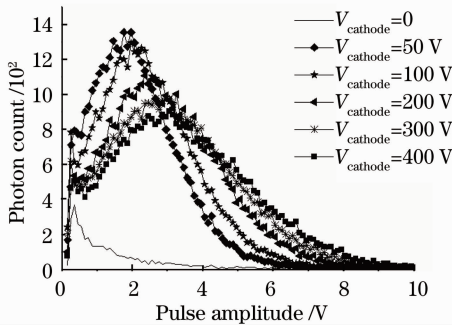


图 4 施加不同阴极电压时 MCP 的脉冲高度分布曲线  
Fig. 4 The pulse height distribution curves of MCP under different cathode voltages

### 3.1.3 暗计数的 PHD 曲线及其与光子计数 PHD 曲线的对比

MCP 产生暗计数的可能因素主要有制作 MCP 的玻璃中<sup>40</sup>K 的  $\beta$  衰减,离子衰减,通道壁吸附气体和场发射等因素<sup>[16]</sup>,还可能是 MCP 污染或损坏造成的热点发射。图 5 为加 Au 阴极前后不同 MCP 电压时暗计数的 PHD 曲线以及暗计数和光子计数的 PHD 曲线对比。其中图 5(c)和(d)的实验测试条件为两块 MCP 工作电压为 1700 V,加速电压为 300 V,加 Au 阴极后阴极电压为 200 V。由图 5(a)和(b)可见,暗计数的 PHD 曲线均呈负指数分布。实验测试得到未加 Au 阴极时的暗计数率为 0.3 / ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ),加 Au 阴极后的暗计数率为 0.26 / ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )。可见,系统的暗计数并没因阴极的热噪声而增加,这样也表明由 15 nm 的 Au 阴极产生的热噪声对系统的影响可以忽略。暗计数几乎不变的另一可能原因是由于探测器放置于密闭的真空室中,关闭光源后基本无其他外界辐射,采集到的主要还是 MCP 本身的暗计数。

对于光子计数和暗计数的比较,由图 5(c)可见,未加 Au 阴极时,光子计数在低增益部分较多,不易区分有效的光子计数和暗计数。加 Au 阴极后,光子计数的 PHD 曲线呈准高斯型,由图 3(b)和图 5(d)可见,随着增益的提高,光子计数的 PHD 曲

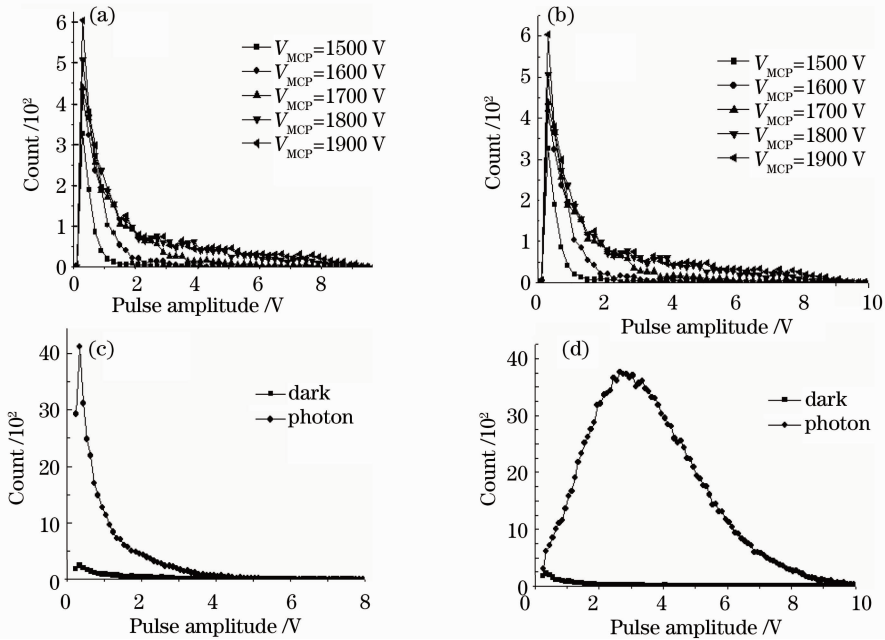


图 5 加 Au 阴极前(a)、后(b)MCP 暗计数的脉冲高度分布曲线;加 Au 阴极前(c)、后(d)MCP 的暗计数和光子计数的脉冲高度分布曲线对比

Fig. 5 The pulse height distribution curves of dark counting of MCP without (a) and with (b) Au cathode; the contrast of pulse height distribution of photon counting and dark counting of MCP without (c) and with Au cathode (d)

线峰值向高增益方向移动,暗计数对光子计数的成像性能影响越来越小。所以,应尽量提高 MCP 的增益,使光子计数的 PHD 曲线峰值向高增益方向偏移,这样便可尽量减小暗计数对探测器成像性能的影响,提高系统的整体性能。

### 3.2 探测器的成像性能

#### 3.2.1 探测器的空间分辨率

以往的实验测试中曾将分辨率板紧贴 MCP 的输入面,以这种方式测得的分辨率可以达到  $100\ \mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>。这里主要测试 Au 阴极对系统性能的影响已无法将分辨率板与 MCP 输入面紧贴,无 Au 阴极时分辨率板与 MCP 输入面间有一距离为  $80\ \mu\text{m}$ 。图 6(a)为未加 Au 阴极时分辨率板的光子计数成像结果,图 6(b)和(c)为加 Au 阴极后实验系统的分辨率板光子计数成像结果。测试条件为 MCP 工作电压为  $1750\ \text{V}$ ,两 MCP 间距为  $80\ \mu\text{m}$ ,加速电压为  $300\ \text{V}$ ,加 Au 阴极时阴极电压为  $200\ \text{V}$ 。可见,未加 Au 阴极时,系统的分辨率优于  $150\ \mu\text{m}$ ,加 Au 阴极后分辨率优于  $75\ \mu\text{m}$ ,加 Au 阴极后系统的分辨率明显提高。这与 MCP 的增益性能有关,由图 3 中 MCP 的 PHD 曲线分布可见,未加 Au 阴极时,大部分有效的光子计数和暗计数及噪声信号叠加在一起,不利于有效光子信号的提取。加 Au 阴极后,有效光子计数向高增益方向偏移,可以通过设置阈值电压将低增益部分暗计数及噪声和有效光子计数区分开。另外,未加 Au 阴极时紫外光子透过分辨率测试板到达 MCP 的输入面,由于分辨率测试板和 MCP 输入面间距离  $80\ \mu\text{m}$ ,在这过程中光子会出现散射,而阴极电场是无法对光子进行聚焦的。加 Au 阴极后,光电转换后出射的电子虽然距 MCP 输入面有  $200\ \mu\text{m}$  的距离,但产生的光

电子是在阴极电场的聚焦作用下进入 MCP 通道进行倍增的。这也在一定程度上影响了实验系统在两种情况下的分辨率性能差异。

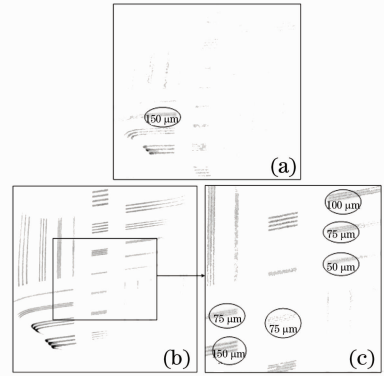


图 6 分辨率测试板的光子计数成像结果。

(a)未加 Au 阴极, (b)加 Au 阴极,

(c)图 (b)的中间部分图像

Fig. 6 Photon counting images of resolution test board.

(a) without Au cathode, (b) with Au cathode,

(c) the central part of figure (b)

#### 3.2.2 不同光强条件下探测器的成像性能

高计数率时光子计数成像系统的分辨率会下降,这主要是由于 MCP 的增益下降和光子计数的脉冲堆积造成的<sup>[17]</sup>。加 Au 阴极后,不同光强条件下系统的光子计数成像结果如图 7 所示。实验测试条件为 MCP 工作电压为  $1800\ \text{V}$ ,阴极电压为  $200\ \text{V}$ ,采集阈值为  $1.5\sim 7.5\ \text{V}$ ,采集时间为  $5\ \text{min}$ 。由图中可以看到,随着计数率的增加,图像的分辨率性能逐渐变差。当计数率提高到  $13.5\ \text{kHz}$  时,系统的分辨率下降为  $150\ \mu\text{m}$ ,此时和未加 Au 阴极时的最好分辨率相当。而未加 Au 阴极时,当计数率最高达到  $3.9\ \text{kHz}$  时,分辨率即下降为  $250\ \mu\text{m}$ 。由此可见,加 Au 阴极后系统的最高计数率得到了有效提高。

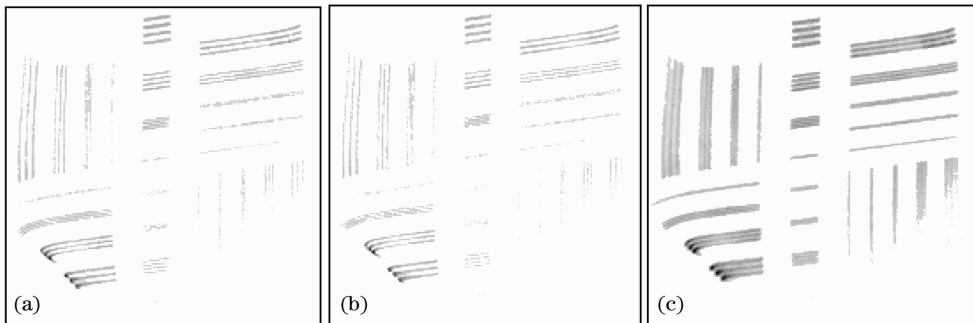


图 7 不同计数率时的光子计数成像结果。(a)  $1.5\ \text{kHz}$ , (b)  $3.6\ \text{kHz}$ , (c)  $13.5\ \text{kHz}$

Fig. 7 Photon counting images of resolution test board with different count rate. (a)  $1.5\ \text{kHz}$ ,

(b)  $3.6\ \text{kHz}$ , (c)  $13.5\ \text{kHz}$

## 4 结 论

在分辨率测试板上蒸镀了厚度为 15 nm 的 Au 薄膜作为光子计数成像探测器的光阴极,实验测试了 MCP 的增益性能以及探测器的分辨中和计数中等性能,同未加 Au 阴极时相应的系统性能进行了实验测试对比。结果表明,采用性能稳定且与实验中所用光源(经滤光后中心波长为 253.7 nm)相匹配的透射式金阴极较大地提高了感应式光子计数成像系统的性能,系统分辨率达到 75  $\mu\text{m}$ 。所以,对于紫外光子计数成像探测器,采用量子效率较高的光阴极会提高系统的整体性能。

## 参 考 文 献

- Zhang Xinghua, Zhao Baosheng, Miao Zhenhua *et al.*. Study on ultraviolet single photon imaging system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(7): 4238~4242  
张兴华, 赵宝升, 缪震华等. 紫外单光子成像系统的研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(7): 4238~4242
- Liu Yongan, Zhao Baosheng, Zhu Xiangping *et al.*. Analysis and testing of wedge-and-strip anode detector characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 750~755  
刘永安, 赵宝升, 朱香平等. 楔条形阳极探测器的性能测试与分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 750~755
- Zhu Xiangping, Zhao Baosheng, Liu Yong'an *et al.*. Experimental study on 30.4 nm extreme ultraviolet imaging detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1925~1929  
朱香平, 赵宝升, 刘永安等. 30.4 nm 极紫外成像探测器的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1925~1929
- Zhang X. H. Zhao B. S. Zhao F. F. *et al.*. An ultraviolet photon counting imaging detector system based on Ge induction readout mode [J]. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2009, **610**(9): 724~727
- Lapington J. S., Chakrabarti S., Cook T. *et al.*. A position sensitive detector for SPIDR—a mission to map the cosmic web [J]. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2003, **513**(1-2): 159~162
- Barnstedt J., Grewing M.. Development and characterization of a visible light photon counting imaging detector system [J]. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2002, **477**(1-3): 268~272
- Ren X. G., Ning C. G., Deng J. K. *et al.*. (e, 2e) electron momentum spectrometer with high sensitivity and high resolution [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2005, **76**(6): 063103-1~063103-8
- Cao Genrui, Yu Xin, Hu Xinqi. Photon counting image acquisition technique and its applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(2): 167~172  
曹根瑞, 俞信, 胡新奇. 光子计数成像技术及其应用[J]. *光学学报*, 1996, **16**(2): 167~172
- Jagutzki O. Barnstedt J. Spillmann U. *et al.*. Fast position and time sensitive read-out of image intensifiers for single photon detection[C]. *SPIE*, 1999, **3764**: 61~69
- Lapington J. S. Sanderson B. Microchannel plate limited resolution with the Vernier anode [C]. *SPIE*, 2000, **4139**: 242~249
- Jiang X. R. Berglund C. N. B. Bell A. E. Photoemission from gold thin films for application in multiphotocathode arrays for electron beam lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1998, **16**(6): 3374~3379
- Zhao Feifei, Zhao Baosheng, Zhang Xinghua *et al.*. Properties of germanium thin film and its application in photon counting imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3236~3240  
赵菲菲, 赵宝升, 张兴华等. Ge 薄膜特性及其在光子计数成像系统中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3236~3240
- Zhao Feifei, Zhao Baosheng, Sai Xiaofeng *et al.*. Influence of annealing on performances of Ge film and photon counting image system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(4): 361~364
- Zhang Xinghua, Zhao Baosheng, Liu Yong'an, *et al.*. Gain characteristic of ultraviolet single photon imaging system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1779~1784  
张兴华, 赵宝升, 刘永安等. 紫外单光子成像系统增益特性研究 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 1779~1784
- Fraser G. W. Pearson J. F. Smith G. C. *et al.*. The gain characteristics of microchannel plates for X-ray photon counting [J]. *IEEE T. Nucl. Sci.*, 1983, **30**(1): 455~460
- Siegmund O. H. W. Vallerger J. Wargelin B. Background events in microchannel plates[J]. *IEEE T. Nucl. Sci.*, 1988, **35**(1): 524~528
- Jagutzki O. Lapington J. S. Worth L. B. C. *et al.*. Position sensitive anodes for MCP read-out using induced charge measurement[J]. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2002, **477**(1-3): 256~261