

引用格式: LI Xiao-feng, CHANG Le, QIU Yong-sheng, *et al.* Measurement of Quantum Yield and Image of Microchannel Plate in Near Ultraviolet Band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3):0325001

李晓峰,常乐,邱永生,等. 微通道板近紫外量子效率测量及成像研究[J].光子学报,2020,49(3):0325001

微通道板近紫外量子效率测量及成像研究

李晓峰,常乐,邱永生,吴永祥,李永春

(北方夜视技术股份有限公司,昆明 650217)

摘 要:提出了一种通过测量微通道板输出电流及增益来计算光电流,从而测量出微通道板量子效率的方法,并用该方法测量了微通道板在近紫外(200~380 nm)的量子效率.测量结果表明,微通道板的量子效率很低,并且随波长增加而快速下降,200 nm 波长处的量子效率为 10^{-4} 数量级,320 nm 波长处的量子效率为 10^{-8} 数量级,大于 340 nm 波长处的量子效率极低且趋近于零.微通道板及荧光屏组成的成像器件可以对酒精灯火焰成像,但图像较稀疏,而传统 Cs₂Te 光电阴极紫外成像器件的图像却较密实,这与微通道板量子效率低,Cs₂Te 光电阴极量子效率高情形一致.在该成像器件的前端放置一片 350 nm 波长的高通滤光片后,所成的酒精灯火焰图像消失.对被照射目标成像时,如果照射光源为 254 nm 的汞灯,则可以成像;但如果照射光源为 365 nm 汞灯,则不能成像,说明微通道板的光谱响应主要在 350 nm 波长以下,与其量子效率的测量结果一致.最后测量得到该成像器件的分辨力为 32 lp/mm,与传统 Cs₂Te 光电阴极紫外成像器件的分辨力相同.微通道板及荧光屏组成的成像器件由于不使用光电阴极,具有价格低、寿命长且可靠性高的优点,因此可在紫外信号较强或成像距离较短的条件下使用.

关键词:微通道板;量子效率;分辨力;紫外线;光电阴极

中图分类号:O434.2;TN23

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204903.0325001

Measurement of Quantum Yield and Image of Microchannel Plate in Near Ultraviolet Band

LI Xiao-feng, CHANG Le, QIU Yong-sheng, WU Yong-xiang, LI Yong-chun

(North night vision technology Co.,Ltd, Kunming 650217, China)

Abstract: A method is proposed to calculate the photocurrent by measuring the output current and gain of microchannel plate, so as to measure the quantum yield. The quantum yield is measured in the near ultraviolet (200~380 nm) by the proposed method. The measurement results show that the quantum yield of microchannel plate is very low, and decreases rapidly with the increase of wavelength. The quantum yield of 200 nm wavelength is 10^{-4} order of magnitude; the quantum yield of 320 nm wavelength is 10^{-8} order of magnitude, and the quantum yield after 340 nm wavelength is very low and almost zero. The imaging device composed of microchannel plate and fluorescent screen can image the flame of alcohol lighter, but the image is sparse, while the image of traditional Cs₂Te photocathode ultraviolet imaging device is dense, which is consistent with the situation of low quantum yield of microchannel plate and high quantum yield of Cs₂Te photocathode. When a 350 nm high pass filter is placed at the front of the imaging device, the detected flame image of the alcohol lighter disappears. When imaging the illuminated target, it can be imaged if the light source is a 254 nm mercury lamp; but it cannot be imaged, if the light source is a 365 nm mercury lamp. The results show that the spectral

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:2019-11-08;录用日期:2019-11-28

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

response of microchannel plate is mainly below 350 nm wavelength, which is consistent with the measurement results of quantum yield. Finally, the resolution of the imaging device is measured as 32 lp/mm, which is the same as that of the traditional Cs_2Te photocathode ultraviolet imaging device. Because the imaging device composed of microchannel plate and fluorescent screen does not use photocathode, it has the advantages of low price, long life and high reliability, so it can be used under the condition of strong ultraviolet signal or short imaging distance.

Key words: Microchannel plate; Quantum yield; Resolution; Ultraviolet rays; Photocathode

OCIS Codes: 250.0040; 040.7190; 260.7210; 040.5250; 230.2090; 110.4190

0 引言

微通道板(Microchannel Plate, MCP)由无数根空芯微通道所组成,其中每一根通道相当于一个像素.因为进入 MCP 通道的电子在通道内会得到二次电子倍增(可达上千甚至上万倍),所以 MCP 是一种大面阵的电子倍增成像器件^[1-4].MCP 不仅具有电子倍增的特性,还具有光电转换的特性(光电转换特性利用量子效率来描述),因此仅仅利用 MCP 和荧光屏就可以组成紫外成像器件.在该器件中, MCP 既作为光电转换器,又作为电子倍增器.为明确起见,将 MCP 和荧光屏组成的紫外成像器件称为 MCP 紫外成像器件,以区别由光阴极、MCP 和荧光屏组成的紫外成像器件.目前对 MCP 紫外量子效率及成像特性的研究主要集中在远紫外波段(10~200 nm).这些研究包括了对远紫外波长的标定^[5]、辐射通量的测量以及在太空中的应用^[6-8].有关 MCP 紫外成像器件在太空应用中的研究可以追溯到 1968 年.之后在 1980 年,伯克利实验室为了研制远紫外 MCP 卫星探测器,对 MCP 在远紫外的量子效率、增益、寿命、噪声等方面进行了详细的研究.2010 年国内嫦娥探月二期工程中也采用了远紫外的 MCP 探测器.因此在远紫外波段,对 MCP 量子效率的研究,特别是在太空应用方面的研究较充分^[9-14].然而对 MCP 在近紫外(200~380 nm)的研究还未见相关报道.究其原因是在近紫外,存在一些量子效率较高的光阴极,如 Cs_2Te 光阴极、AlGaIn 光阴极等.利用这些光阴极,再结合 MCP 和荧光屏,可以组成紫外成像器件^[15-17],从而实现对近紫外信号的探测与成像,因此 MCP 在近紫外的光电转换特性就不再受到关注.然而从科学研究的角度讲,对 MCP 光电转换特性的研究不应该仅仅局限于远紫外,还应该包含近紫外,这样对 MCP 紫外光电转换特性的研究才算完整,毕竟在地表上,主要的应用还是在近紫外^[18-20].另外使用光阴极的紫外成像器件价格高、寿命短且可靠性低.而且光阴极本身存在一定的暗发射(热发射),会降低成像的对比度.MCP 紫外成像器件不使用光阴极,价格低、寿命长且可靠性高.再加上 MCP 的暗发射较低,成像对比度高,因此具有潜在的应用价值,所以有必要开展 MCP 近紫外量子效率测量及成像特性的研究.

1 MCP 量子效率测量

1.1 测量原理及方法

对光阴极而言,量子效率是指光阴极每接收一个光子所产生的光电子数;对 MCP 而言,量子效率是指 MCP 每接收一个光子所产生的光电子数.要测量量子效率,必须先测量出光电流.理论上讲,当紫外线照射 MCP 时,凡是能够被照射到的位置,均有可能产生光电子.图 1 为 MCP 单根通道光电子产生以及倍增的原理示意图.图中的光子 A 入射到微通道板的通道内,在通道内壁上产生光电子 A;而光子 B 入射到微通道板输入端,在通道壁上产生光电子 B.光电子 A 和光电子 B 均在通道内进行二次电子倍增,最终从 MCP 的输出端输出.

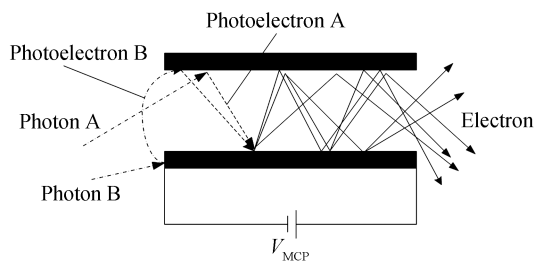


图 1 MCP 光电子产生示意图

Fig.1 Photoelectron generated in the channel of MCP

由于 MCP 产生的光电流被限制在通道内运动, 因此无法测量. 然而该光电流经过 MCP 倍增后的输出电流却是可以测量的. 如果能测量出 MCP 的增益, 那么输出电流除以 MCP 的增益即为所需测量的光电流, 所以 MCP 所产生的光电流可以采用间接的方法来测量. 通过这一方法测量 MCP 的光电流, 需要一支特别的测试样品, 该测试样品是一支只有一半光电阴极的双 MCP 成像器件, 其结构如图 2 所示, 包括输入窗、MCP (两片 V 型堆叠)、镀铝荧光屏以及光纤面板 (Fiber Optical Plate, FOP) 输出窗. 为了便于区分, 把阴极窗上有光电阴极的区域称为 A 区, 没有光电阴极的区域称为 B 区. 当一束紫外线入射到阴极窗的 A 区时, 紫外线穿过阴极窗后激发光电阴极发射光电流, 光电流经 MCP 倍增, 从 MCP 输出端输出. 测量出光电流以及 MCP 的输出电流, 就可测量出 MCP 的增益. 当一束紫外线入射到阴极窗的 B 区时, 紫外线穿过阴极窗后激发 MCP 发射光电流, 光电流经 MCP 倍增, 从 MCP 输出端输出. 测量出该电流并除以 MCP 的增益, 就可以计算出 MCP 的光电流, 也就可以测量出 MCP 光谱灵敏度, 再通过换算可以得到量子效率.

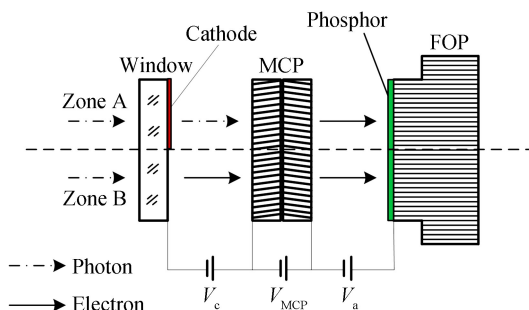


图 2 测试样品结构示意图

Fig.2 Diagram of structure of testing sample

具体测量方法为: 在测试样品的阴极与 MCP 输入端之间施加一定的阴极电压 V_c , 并以波长为 λ_0 的一束光照射测试样品阴极窗的 A 区, 测量出光电阴极的光电流 $I_{c1}(\lambda_0)$. 在光路中加入滤光片, 保持测试样品阴极电压 V_c 不变, 在 MCP 的输入端与输出端之间施加一定的 MCP 电压 V_{MCP} , 在 MCP 输出端与阳极 (荧光屏) 之间施加一定的阳极电压 V_a , 然后测量 MCP 的输出电流 $I_{a1}(\lambda_0)$, 之后计算出 MCP 的增益 G_{MCP} , 即

$$G_{MCP} = \frac{I_{a1}(\lambda_0)}{I_{c1}(\lambda_0) \cdot \tau(\lambda_0)} \quad (1)$$

式中, $\tau(\lambda_0)$ 表示透过率. 需要说明的是, 在测量 MCP 输入电流时, 光路中未加入滤光片, 而在测量 MCP 输出电流时, 光路中加入了滤光片. 加入滤光片的目的是对 MCP 的输入电流进行衰减, 防止 MCP 的输出电流出现饱和并使 MCP 工作在线性区^[21], 否则将会导致所测得的 MCP 增益值偏低. 然而加入滤光片以后, 在计算 MCP 增益时, 需要将输入电流折算到采用滤光片后的数值, 所以在计算 MCP 增益时, MCP 输入电流需要乘以滤光片的透过率, 因此式(1)的分母中出现了透过率 $\tau(\lambda_0)$.

得到 MCP 的增益 G_{MCP} 以后, 去除中性滤光片以及测试样品阴极窗 A 区的光照, 保持测试样品的阴极电压 V_c 、MCP 电压 V_{MCP} 以及阳极电压 V_a 电压不变. 再以一束波长为 λ (待测量量子效率的波长)、辐射通量为 $E(\lambda)$ 的紫外光照射测试样品阴极窗的 B 区, 测量出 MCP 的输出电流 $I_{a2}(\lambda)$, MCP 的光电流 $I_{c2}(\lambda)$ 的计算公式为

$$I_{c2}(\lambda) = \frac{I_{a2}(\lambda)}{G_{MCP}} \quad (2)$$

得到 MCP 的光电流以后, 根据光谱灵敏度的定义, 计算 MCP 的光谱灵敏度 $S(\lambda)$, 即

$$S(\lambda) = \frac{I_{c2}(\lambda)}{E(\lambda)} \quad (3)$$

式中, 光谱灵敏度 $S(\lambda)$ 的单位为安培每瓦 (A/W). 测得 MCP 的光谱灵敏度以后, 计算出 MCP 的量子效率 $Y(\lambda)$ 为

$$Y(\lambda) = 1.24 \cdot \frac{S(\lambda)}{\lambda} \times 10^{-12} \quad (4)$$

式中, 波长 λ 的单位为米 (m). 为计算方便, 将式(1)代入式(2), 式(2)代入式(3), 式(3)再代入式(4), 即可得

到 MCP 的量子效率计算公式,即

$$Y(\lambda) = 1.24 \cdot \frac{I_{a2}(\lambda)}{E(\lambda)} \cdot \frac{I_{c1}(\lambda_0)}{I_{a1}(\lambda_0)} \cdot \frac{\tau(\lambda_0)}{\lambda} \times 10^{-12} \quad (5)$$

1.2 测量过程及结果分析

MCP 量子效率测量装置结构原理见图 3,包括激光泵浦气体放电灯光源、中性滤光片、光栅单色仪、石英光纤束、阴极电流表 Mc(微安表)、阳极电流表 Ma(皮安表)以及测试电源.测试样品(编号:3242#)输入窗材料为氟化镁,MCP(两片 V 型堆叠)型号为 $\Phi 25/6$.该样品的光阴极(S20)采用转移阴极技术制作.制作过程中,将阴极玻璃窗遮挡一半,使光阴极只能制作在其未受到遮挡的部分.测试电源包括 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 共 4 路输出(电位可调),分别连接测试样品的阴极、MCP 输入、MCP 输出以及阳极.

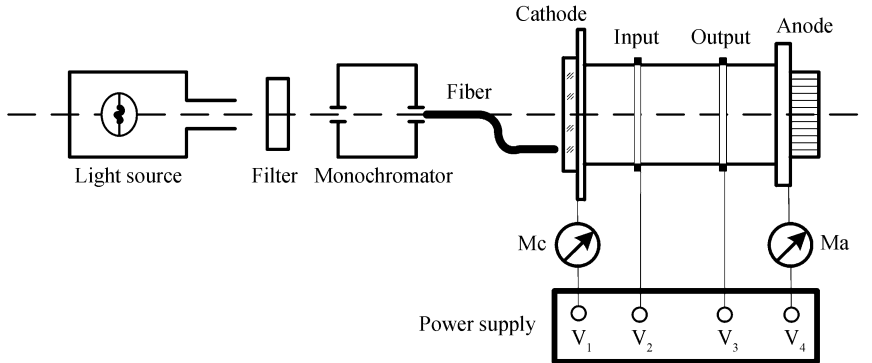


图 3 测量装置结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of testing device

具体测量过程为:打开光源、单色仪以及测试电源,调节 V_1 电位为 0 V, V_2 电位为 200 V,关闭 V_3 及 V_4 电位输出(不使用).设置单色仪的出射波长 λ_0 为 500 nm.在测试光路中移除滤光片,利用光纤将出射光传输到测试样品阴极窗的 A 区位置上,利用阴极电流表 Mc 测得阴极电流 $I_{c1}(\lambda_0)$ 为 $0.382 \mu\text{A}$.在测试光路中加入滤光片,调节测试电源 V_1 电位为 -1800 V , V_2 电位为 -1600 V , V_3 电位为 0 V, V_4 电位为 50 V.利用阳极电流表 Ma 测得阳极电流 $I_{a1}(\lambda_0)$ 为 $0.089 \mu\text{A}$.关闭 V_1 输出(不使用),保持 V_2 、 V_3 以及 V_4 的电位不变.将滤光片移除测试光路,设置单色仪的出射波长 λ 为 200 nm,利用光纤将出射光传输到测试样品阴极窗的 B 区位置上,利用阳极电流表 Ma 测得阳极电流 $I_{a2}(\lambda)$ 为 $0.287 \mu\text{A}$.将以上测量数据代入式(5),即可计算出 MCP 对于 200 nm 波长的量子效率 $Y(\lambda)$ 为 1.1×10^{-4} ,其中 500 nm 波长的中性滤光片透过率 $\tau(\lambda_0)$ 为 1×10^{-5} ,200 nm 波长的 $E(\lambda)$ 为 $0.71 \times 10^{-6} \text{ W}$.根据以上测量方法,设置单色仪不同的输出波长,就可以测量出 MCP 在近紫外波段内的量子效率.另外通过改变 MCP 电压,即可测量出 MCP 在不同电压(增益)条件下的量子效率.MCP 在不同波长和不同电压条件下量子效率 Y 的测量结果见表 1,其中波长的范围为 200~380 nm,MCP 的电压分别为 1500 V、1600 V 以及 1700 V.表 1 中的 $Y_{1500\text{V}}$ 、 $Y_{1600\text{V}}$ 以及 $Y_{1700\text{V}}$ 分别表示 MCP 在 1500 V、1600 V 以及 1700 V 电压条件下的量子效率.另外 MCP 在以上三种电压下的增益分别为 10800、23000 以及 39000.

表 1 不同 MCP 电压下的量子效率

Table 1 Quantum yield of MCP in different operating voltages

λ/nm	200	220	240	260	280	300	320	340
$Y_{1500\text{V}}$	1.1×10^{-4}	4.6×10^{-5}	2.0×10^{-5}	8.1×10^{-5}	1.9×10^{-6}	3.4×10^{-7}	2.4×10^{-8}	1.0×10^{-8}
$Y_{1600\text{V}}$	1.1×10^{-4}	4.2×10^{-5}	1.9×10^{-5}	8.1×10^{-5}	2.3×10^{-6}	5.2×10^{-7}	4.0×10^{-8}	1.9×10^{-8}
$Y_{1700\text{V}}$	1.1×10^{-4}	4.3×10^{-5}	1.9×10^{-5}	8.4×10^{-5}	2.5×10^{-6}	6.5×10^{-7}	5.7×10^{-8}	2.7×10^{-8}

从表 1 中可以看出,MCP 的量子效率很低,200 nm 波长的量子效率仅为 10^{-4} 数量级,与传统的 Cs_2Te 光阴极(量子效率约为 0.2)相比,相差 3 个数量级.另外波长越长,量子效率越低,并且量子效率随波长增加快速下降.如 200 nm 波长的量子效率为 10^{-4} 数量级,但 320 nm 波长的量子效率却低至 10^{-8} 数量级,下降了 4 个数量级,这与传统的光阴极相比较,差别也较大.对于传统的光阴极,在响应波段范围内,量子效

率的差距仅仅在 2 个数量级内.另外从表 1 还可以看出, MCP 的量子效率与 MCP 的电压有关, 波长越长, 量子效率的差别越大, 特别是在 260 nm 波长以上. 如在 280 nm 波长, 当 MCP 的电压从 1 500 V 增加到 1 700 V 时, 量子效率从 1.9×10^{-6} 增加到 2.5×10^{-6} , 增加了 31%. 但在 340 nm 波长, 当 MCP 的电压从 1 500 V 增加到 1 700 V 时, 量子效率却从 1.0×10^{-8} 增加到 2.7×10^{-8} , 增加了 145%. 另外 MCP 的量子效率在 340 nm 波长以上极低, 不能准确测量, 因此表 1 中不再列出 340 nm 以上波长的量子效率测量结果. 图 4 为 MCP 量子效率随波长变化的曲线, 可以看出, 当 MCP 电压增加时, 波长越长, 量子效率的差别越大.

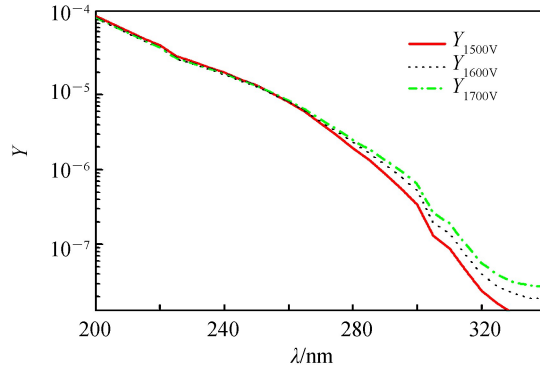


图 4 不同 MCP 电压的量子效率曲线
Fig.4 Quantum yield in different voltage of MCP

2 MCP 近紫外成像研究

2.1 成像特性

为研究 MCP 紫外成像器件在近紫外的成像特性, 利用其对酒精灯火焰进行了成像. MCP 紫外成像器件 (编号: 3554 #) 的有效阴极直径为 18 mm, 输入窗厚度为 3 mm, 材料为氟化镁. MCP (两片 V 型堆叠) 型号为 $\Phi 25/6$, 电压为 1 600 V. 微通道板与荧光屏之间的距离为 0.6 mm, 电压为 6 000 V. 输出窗为光纤面板 (丝径为 $5 \mu\text{m}$). 荧光屏上的图像通过光锥和 CCD 相机再次成像. CCD 芯片为 1/2 英寸行间传输 CCD, 像数尺寸为 $8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$. 成像物镜焦距为 135 mm, F 数为 3.2, 成像距离为 2 m. MCP 紫外成像器件对酒精灯火焰的成像结果见图 5(a). 作为比较, 同时采用一支有效阴极直径为 18 mm 的 Cs_2Te 光电阴极紫外成像器件 (编号: 3537 #) 进行对比. 该成像器件的阴极量子效率为 0.18 (200 nm), 所采用的 MCP、荧光屏以及光纤面板输出窗与上述 MCP 紫外成像器件相同. Cs_2Te 光电阴极紫外成像器件对酒精灯火焰的成像结果见图 5(b). 比较两种器件的酒精灯火焰图像, 可以看出 MCP 紫外成像器件酒精灯火焰图像较稀疏, 而 Cs_2Te 光电阴极紫外成像器件酒精灯火焰图像较密实, 与 MCP 量子效率低、 Cs_2Te 光电阴极量子效率高的情况一致.

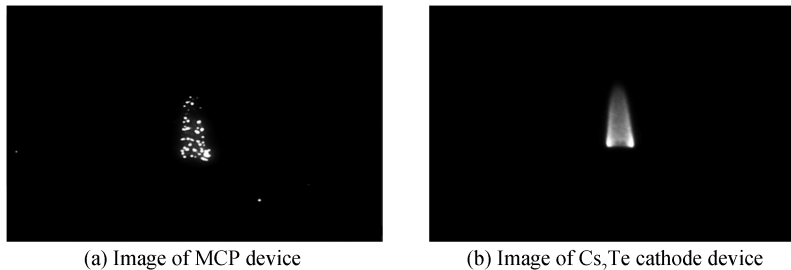


图 5 酒精灯火焰图像
Fig.5 Image flame of alcohol lighter

在物镜前端放置一片 350 nm 的高通滤光片以后, 酒精灯火焰图像消失. 这说明 MCP 的光谱响应范围主要在 350 nm 以下, 350 nm 波长以上的量子效率极低, 与 MCP 的量子效率的测量结果一致.

为进一步研究 MCP 紫外成像器件在近紫外的成像特性, 分别利用 254 nm 和 365 nm 的汞灯对玻璃上的字符进行照射, 同时用 MCP 紫外成像器件 (编号: 3554 #) 对字符进行成像, 成像距离为 2 m. 当用 254 nm 汞灯照射字符时, 玻璃上的字符 UV 可以清晰成像, 如图 6(a). 但当采用为 365 nm 汞灯照射字符时, 玻璃上

的字符 UV 却不能成像,如图 6(b).说明 MCP 对 365 nm 的波长不响应,与 MCP 量子效率在 340 nm 以后极低的测量结果相吻合.

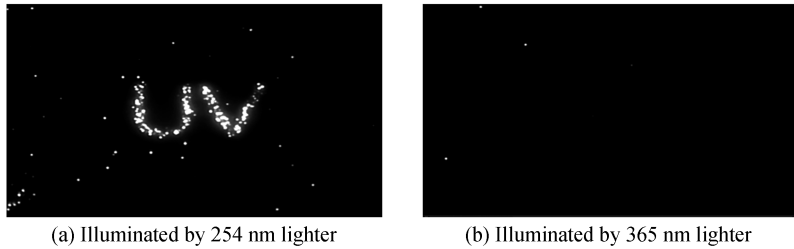


图 6 汞灯照射下字符的图像
Fig.6 Image of character illuminated by the mercury lamp

2.2 成像分辨力研究

为研究 MCP 紫外成像器件(编号:3554#)分辨细节的能力,对其分辨力进行了测试.仪器采用的分辨力靶板标准为 USF1951,对比度为 100%.测量仪器光源为氙灯,同时采用 254 nm 的单色滤光片进行滤光.在分辨力测试过程中,阴极照度通过中性滤光片进行调整,使荧光屏上获得最佳的亮度.采用 10 倍目镜对分辨力靶的图像进行观察.经过测量,MCP 紫外成像器件的分辨力为 32 lp/mm.同样,作为对比,在同样条件下测量了 Cs_2Te 光电阴极紫外成像器件(编号:3537#)的分辨力.测量结果与 MCP 紫外成像器件相同,分辨力也为 32 lp/mm.两支器件分辨力相同的原因是其均采用双 MCP,所以尽管 Cs_2Te 光电阴极紫外成像器件具有光电阴极,同时又存在一定的阴极近贴聚焦距离,但由于它们的分辨力均在 100 lp/mm 以上,远高于双 MCP 的分辨力,因此器件的分辨力主要由 MCP 决定,造成了两支紫外成像器件的分辨力相同.图 7(a)和 (b)分别为 MCP 紫外成像器件和 Cs_2Te 光电阴极紫外成像器件的分辨力靶板图像经过 CCD 相机转换后的图像,对比两张图像可以看出,第二组分辨力靶板中的六块条纹的清晰度基本相同,但第三组靶板中的六块条纹的清晰度就有一定的区别, Cs_2Te 光电阴极紫外成像器件靶板条纹的清晰度更高,这与 Cs_2Te 光电阴极具有更高量子效率的特点相吻合.

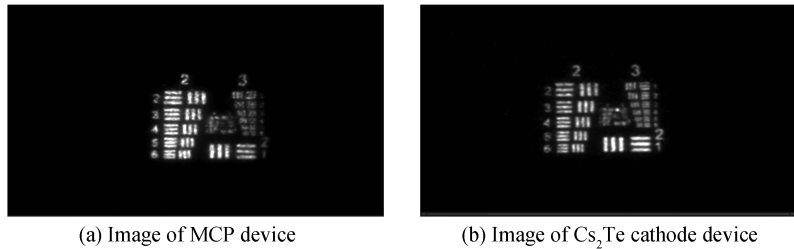


图 7 分辨力靶板图像
Fig.7 The image of resolution target

3 结论

MCP 在近紫外的量子效率很低,200 nm 波长的量子效率仅为 10^{-4} 数量级,与传统 Cs_2Te 光电阴极相比,相差 3 个数量级.当波长从 200 nm 增加到 340 nm 时,量子效率从 10^{-4} 数量级快速下降到 10^{-8} 数量级,量子效率在 340 nm 波长以后极低并且逐步趋于 0.

利用 MCP 和荧光屏组成的成像器件可以对近紫外成像,并且具有较高的分辨力.所以尽管 MCP 在近紫外的量子效率很低,但因该种器件不使用光电阴极,价格低、寿命长且可靠性高,因此适用于对较强近紫外图像成像,或对近距离的微弱近紫外成像.

参考文献

- [1] SHYMANSKA A. Numerical analysis of electron optical system with microchannel plate[J]. *Journal of Computational Electronics*, 2011, **10**(3): 57-60.
- [2] GAO Xiu-min, CAI Chun-ping. Second electron emission coefficients of micro-channel plate glass[J]. *Journal of Applied Optics*, 1998, **19**(4): 9-18.
- [3] PAN Jing-sheng, SHAO Ai-fei, SUN Jian-ning, *et al.* Analysis of the effect of ion feedback of MCP on performance

- upgrade of image intensifier and exploration of improvement ways[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(4): 327-332.
- 潘京生,邵爱飞,孙建宁,等.微通道板的离子反馈对像增强器性能升级的影响分析及改进途径探究[J]. *红外技术*, 2015, **37**(4): 327-332.
- [4] BAI Xiao-feng, YIN Lei, CHENG Hong-chang, *et al.* Research on dynamic range testing for image intensifier with microchannel plate[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, **10**(5): 21-23.
- 拜晓峰,尹雷,程宏昌,等.微通道板像增强器动态范围测试技术研究[J]. *光学与光电技术*, 2012, **10**(5): 21-23.
- [5] DONG Ning-ning, LI Min, LIU Zhen, *et al.* Wavelength calibration of extrem ultraviolet monochromator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1660-1665.
- 董宁宁,李敏,刘震,等.极紫外单色仪波长标定[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1660-1665.
- [6] DIEBOLD S, BARNSTEDT J, ELSENER H R, *et al.* MCP detector development for WSO-UV[C]. *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray*, International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [7] CONTI L, BARNSTEDT J, HANKE L, *et al.* MCP detector development for UV space missions[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2018, **363**(4): 63-71.
- [8] BU Shao-fang, NI Qi-liang, HE Ling-ping, *et al.* Microchannel plate photon counting detector in UV range[J]. *Chinese Optics*, 2012, **5**(3): 302-309.
- 卜绍芳,尼启良,何玲平,等.极紫外波段微通道板光子计数探测器[J]. *中国光学*, 2012, **5**(3): 302-309.
- [9] NI Qi-liang, BU Shao-fang, LIU Shi-jie, *et al.* Preconditioning experiment research of microchannel plate photon counting imaging detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6): 658-663.
- 尼启良,卜绍芳,刘世界,等.微通道板光子计数成像探测器预处理实验研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(6): 658-663.
- [10] ZHANG Hong-ji, HE Ling-ping, WANG Hai-feng, *et al.* Testing method and analysis of far ultraviolet photon counting imaging detector[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, **55**(6): 49-55.
- 张宏吉,何玲平,王海峰,等.远紫外光子计数成像探测器检测方法与分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, **55**(6): 49-55.
- [11] WEI Yong-lin, ZHAO Bao-sheng, SAI Xiao-feng, *et al.* Develop of cesium telluride UV cathode with high quantum efficiency and solar-blind characteristics[J]. *Chinese Journal of Vacuum and Technology*, 2012, **32**(7): 555-558.
- 韦永林,赵宝升,赛小锋,等.高量子效率碲化铯紫外日盲阴极研制[J]. *真空科学与技术学报*, 2012, **32**(7): 555-558.
- [12] LIU Yong-an, ZHAO Fei-fei, HU Hui-jun, *et al.* Properties of photon counting imaging detector with Au photocathode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **31**(1): 225-230.
- 刘永安,赵菲菲,胡慧君,等.采用金阴极的光子计数成像探测器的性能[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 225-230.
- [13] ZHANG Xuan-ni, ZHAO Bao-sheng, ZHU Xiang-ping, *et al.* The research of photocathode CsI on MCP substrate[J]. *Journal of Xianyang Normal University*, 2007(6): 22-25.
- 张宣妮,赵宝升,朱香平,等.以MCP为基底的CsI光电阴极的研究[J]. *咸阳师范学院学报*, 2007(6): 22-25.
- [14] CAO Xi-bin, ZHAO Bao-sheng, SAI Xiao-feng, *et al.* Ultraviolet image intensifier with response at 120 nm~200 nm [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008(5): 731-734.
- 曹希斌,赵宝升,赛小锋,等.一种响应波长在120 nm~200 nm的紫外像增强器[J]. *应用光学*, 2008(5): 731-734.
- [15] WANG Sheng-hui, FENG Hong-en, LV Fang-cheng. Distance correction of corona discharge photon count in ultraviolet imaging detection[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, **41**(1): 194-201.
- 王胜辉,冯宏恩,律方成.电晕放电紫外成像检测光子数的距离修正[J]. *高电压技术*, 2015, **41**(1): 194-201.
- [16] TANG Guang-hua, DAI Li-ying, ZHONG Wei-jun, *et al.* Development of ultraviolet photocathodes research [J]. *Vacuum Electronics*, 2011(6): 5-11.
- 唐光华,戴丽英,钟伟俊,等.紫外光电阴极研究进展[J]. *真空电子技术*, 2011(6): 5-11.
- [17] KUANG Lei, GU Yan. Research on the application of UV image intensifier in security detection of power equipment[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(11): 986-990.
- 匡蕾,顾燕.紫外像增强器用于电力安全检测的研究[J]. *红外技术*, 2015, **37**(11): 986-990.
- [18] LI Xiao-feng, JIANG Yun-long, LI Jing-wen, *et al.* Study on spectral response beyond cut off of Cs₂Te ultraviolet photocathode[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(12): 1068-1073.
- 李晓峰,姜云龙,等.Cs₂Te紫外光电阴极带外光谱响应研究[J]. *红外技术*, 2015, **37**(12): 1068-1073.
- [19] LI Xiao-feng, ZHAO Xue-feng, ZHANG Kun-lin, *et al.* Study on Rb₂Te(Cs) solar blind ultraviolet cathode [J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(9): 581-586.
- 李晓峰,赵学峰,张昆林,等.Rb₂Te(Cs)日盲紫外光电阴极研究[J]. *红外技术*, 2013, **35**(9): 581-586.
- [20] LI Xiao-feng, ZHAO Xue-feng, CHEN Qi-jun, *et al.* Study on K₂Te(Cs) solar blind ultraviolet cathode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 155-160.
- 李晓峰,赵学峰,陈其钧,等.K₂Te(Cs)日盲紫外光电阴极研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(6): 155-160.
- [21] ANTAMANOVA E V, BEARDEN I G, GARCIA-SOLIS E J, *et al.* Anode current saturation of ALD-coated Planacon MCP-PMTs[J]. *Journal of Instrumentation*, 2018, **13**(9): T09001.