

文章编号 1004-924X(2008)01-0001-05

# 微通道板在 12~40 nm 波段的量子效率测量

李 敏<sup>1,2</sup>, 范鲜红<sup>1,2</sup>, 尼启良<sup>1</sup>, 陈 波<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**提出了一种测量微通道板(MCP)量子效率的方法。该方法选用激光等离子体光源作为极紫外辐射源,使用传递标准探测器—硅光电二极管标定光源强度,用标定后的光照射待测 MCP,采用直接测量电压来间接测量探测器输出电流,再计算出 MCP 量子效率。实验结果表明,在 12~40 nm, MCP 量子效率为 2%~12.3%,量子效率随波长的增大呈下降趋势。测量与误差分析表明,导致 MCP 量子效率测量结果变化的主要因素是光源稳定性和机械转动精度。通过与计数方式测量结果比较,进一步验证了本测量方法的正确性。

**关键词:**极紫外;微通道板;量子效率

**中图分类号:**TN144 **文献标识码:**A

## Quantum efficiency of microchannel plate in 12~40 nm

LI Min<sup>1,2</sup>, FAN Xian-hong<sup>1,2</sup>, NI Qi-liang<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>

- (1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** A technique to measure the Quantum Efficiency (QE) of a Microchannel Plate (MCP) was proposed. A laser plasma source was chosen as a Extreme Ultraviolet (EUV) radiant source and was calibrated by a transferring standard detector—silicon photodiode. Then, the MCP detector was irradiated, and the current transmitted from the detector was indirectly measured by measuring the voltage. Finally, the QE of the MCP was computed by a simple formula. The results indicate that the QE is from 2% to 12.3% in 12~40 nm and drops with increasing wavelength. The major factors affecting on the QE fluctuation in the measurement process are the stability of the light source and the rotation accuracy of the mechanism. Comparing with the result obtained by counting technique, the measuring technique is further proved to be correct and efficiency.

**Key words:** Extreme Ultraviolet(EUV); Microchannel Plate(MCP); Quantum Efficiency(QE)

收稿日期:2007-03-29;修订日期:2007-07-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60677043)

## 1 引言

微通道板(Microchannel Plate, MCP)具有分辨率好、增益高、噪声低等优点,是像增强器和位敏探测器的主要器件,在探测电子、离子、X 射线以及真空紫外辐射等方面发挥着重要作用,所涉及领域非常广泛,比如核物理、原子分子物理、电子能谱学、天文学、质子能谱学、空间科学等。在短波范围内对 MCP-X 射线探测器的研究可以追溯到 1968 年。20 世纪 80 年代,伯克利实验室对 MCP 的性能—量子效率、增益、寿命、噪声等进行了研究,目的是为 EUVE 卫星研制 MCP 探测器。现在, MCP 探测器已在 EUVE<sup>[1]</sup>、ALEXIS<sup>[2]</sup> 卫星上应用,但是国内对 MCP 在短波范围内性能的研究比较少。目前,长春理工大学<sup>[3-4]</sup> 仅研究了镀膜 MCP 的响应与 X 射线能量的关系,国内几乎没有 MCP 在 12~40 nm 波段的量子效率实验研究的报道。根据国家未来空间发展的需要,本实验室开展了月基极紫外成像仪及相应探测器—MCP 探测器的研究,因此对 MCP 在极紫外波段量子效率的研究也迫在眉睫,但是至今对 MCP 量子效率的研究大多建立在计数方式<sup>[5-9]</sup> 测量基础上,而且标准探测器和 MCP 探测器的输出信号分别经过不同的电路处理并记录,因此存在电路不同带来的测量误差。为此,基于激光等离子体光源,本文提出一种测量 MCP 量子效率的方法。该方法通过直接测量电压来间接测量探测器输出电流,采用相同的电路对标准探测器和 MCP 探测器的输出信号处理记录,同时对 MCP 在 12~40 nm 波段的量子效率进行了研究,分析了导致量子效率波动的因素。

## 2 基本原理

### 2.1 实验装置

光源的选择:同步辐射源是理想的极紫外光源,但是它不但结构庞大,而且目前国内只有北京和合肥两地建立了此光源,使用上受到很大的限制,因此,本课题组选用了本实验室建立的性能较稳定的激光等离子体辐射源。实验装置如图 1 所示。激光等离子体光源由 Nd:YAG 激光器激发金属靶产生,用 XCT 的 1.0 m 真空扫描单色仪(由美国 McPherson 公司生产,光栅为 600 p/l,

工作波长为 5~62 nm,前后狭缝为 0.1 mm×4 mm时,分辨率为 0.2 nm)选取单色光。美国 NIST 标定过的传递标准探测器 AXUV—100 硅光电二极管(下面简称光电二极管)作为标准探测器,将 MCP 探测器和光电二极管探测器分别固定在真空室的圆盘上,通过圆盘的转动将两个探测器转到光路中。信号处理电路如图 2, MCP 探测器和光电二极管探测器输出电流信号并联到电荷灵敏前置放大器并转化为电压信号,再用双线性放大器将电压信号进一步放大<sup>[10]</sup>,最后用美国 NI 公司的 NI—DAQ6023E 型数据采集卡进行数据采集并用 VI 程序记录保存<sup>[11]</sup>。

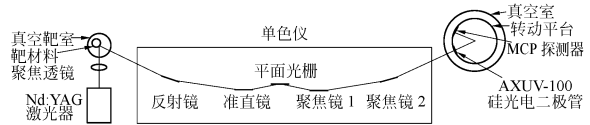


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental equipment

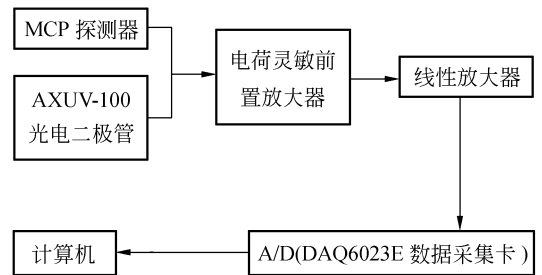


图 2 信号处理电路示意图

Fig. 2 Sketch of signal processing circuit

### 2.2 MCP 探测器结构

MCP 探测器的基本结构如图 3 所示,用两个

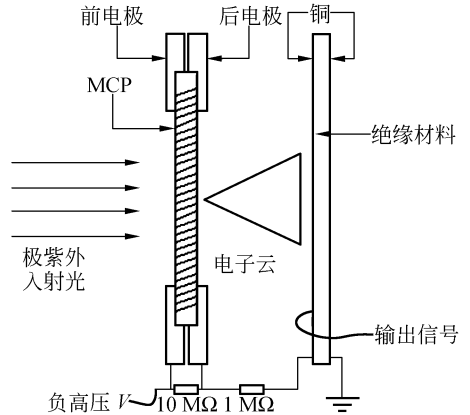


图 3 MCP 探测器的结构图

Fig. 3 Structure of the MCP detector

相同金属环作为前后电极夹住 MCP,通过电极给 MCP 加高压,铜阳极收集从 MCP 出射的电子产生电流信号,通过导线将信号导入处理电路中。MCP 和铜阳极之间的距离约为 5 mm。MCP 的基本参数:偏置角为  $12.50^\circ$ ,有效直径  $\Phi = 26$  mm,通道直径  $D = 12.5 \mu\text{m}$ ,长径比为 40 : 1,当两端电压为 800 V 时,电流增益为 8 880。

### 2.3 测量方法

由于激光等离子体光源是脉冲式软 Y 射线光源,它产生的是持续几个纳秒的光脉冲,对纳秒量级的脉冲信号进行光子计数显然是困难的,即不可能使用光子计数的方法来测量一个光脉冲内含有多少个光子<sup>[12]</sup>。本文采用间接测量电流的方式,并且将标准探测器和 MCP 探测器输出的信号并联由相同的电路处理来减少电路不同带来的测量误差。基本原理如下:设单位时间内入射到探测器接受面上的光子数为  $I_d$ ,标准探测器的量子效率为  $P_{se}$ ,标准探测器输出的电流  $i_d$ <sup>[13]</sup>为:

$$i_d = I_d \times P_{se} \times e, \quad (1)$$

式中,  $e$  是电量。由于 MCP 的工作原理是将入射光先转变为光电子,将其倍增后输出,如设 MCP 的增益为  $G_{mcp}$ ,MCP 的量子效率为  $P_{mcp}$ ,MCP 探测器输出的电流  $i_{mcp}$  为:

$$i_{mcp} = I_{mcp} \times P_{mcp} \times G_{mcp} \times e, \quad (2)$$

式中,  $I_{mcp}$  是单位时间内入射到 MCP 的光子数。假设到达两个探测器的光子数是相同的,即  $I_d = I_{mcp}$ ,实际测得的电压信号与探测器输出的电流成正比,故有:

$$\frac{V_{mcp}}{V_d} = \frac{P_{mcp} \times G_{mcp}}{P_{se}}, \quad (3)$$

式中,  $V_d$  和  $V_{mcp}$  分别是测得的标准探测器和 MCP 输出的电压信号。MCP 的量子效率  $P_{mcp}$  为:

$$P_{mcp} = \frac{V_{mcp}}{V_d} \times \frac{P_{se}}{G_{mcp}}, \quad (4)$$

由于标准探测器的量子效率  $P_{se}$  和 MCP 的增益  $G_{mcp}$  已知,实验只需测得  $V_{mcp}$  和  $V_d$ ,由式(4)直接得到 MCP 的量子效率。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 实验结果

传递标准探测器光电二极管的量子效率  $P_{se}$

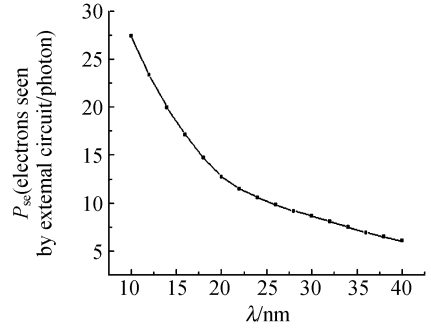
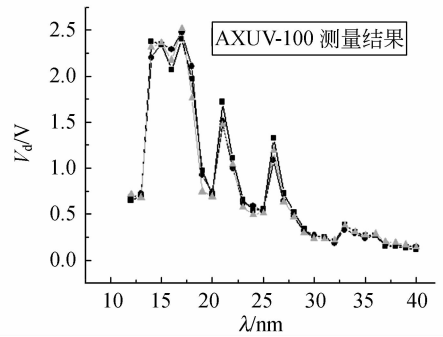


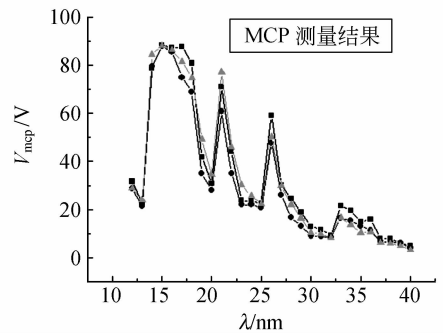
图 4 AXUV-100 硅光电二极管的量子效率曲线

Fig. 4 QE of AXUV-100 Si photodiode



(a) AXUV-100 硅光电二极管输出的电压信号随波长的变化

(a) Voltage from AXUV-100 Si photodiode vs wavelength



(b) MCP 探测器输出的电压信号随波长的变化

(b) Voltage from MCP vs wavelength

图 5 AXUV-100 硅光电二极管和 MCP 探测器输出的电压信号

Fig. 5 Voltages from AXUV-100 Si photodiode and MCP

曲线如图 4 所示。为了获得稳定性和重复性较好的极紫外辐射,减少光源不稳定性对测量结果的影响,可采用多次测量平均统计方式获取一个数据点,并在测量中不时地转动靶改变打靶位置。以步长 1 nm 对波长扫描,图 5(a)是光电二极管测得铜靶的光谱分布(记录的是  $V_d$ ),光谱稳定性为  $\pm 5.5\%$ ;图 5(b)是 MCP 两端的电压为 800 V,光正入射(即入射光和 MCP 的法线方向夹角是  $0^\circ$ )时测得相同范围内铜靶光谱(记录的是  $V_{mcp}$ ),光谱稳定性为  $\pm 10.5\%$ 。将相关数据带入式(4)得到 MCP 的量子效率如图 6,从图 6 可见 MCP 的量子效率在  $2\% \sim 12.3\%$  之间,量子效率重复性为  $\pm 6.3\%$ 。

### 3.2 实验结果分析

从图 5 实验数据计算出,标准探测器光电二极管测得的光谱稳定性为  $\pm 5.5\%$ ,而 MCP 探测器测得的光谱稳定性为  $\pm 10.5\%$ ,两者有很大差别,由此可见光源不稳定给 MCP 探测器所测信号带来较大的误差。另一个导致 MCP 探测器探测信号不稳的主要因素是机械转动误差,因为 MCP 量子效率随入射角有很大的变化<sup>[5]</sup>,三次测量曲线并不是在完全相同入射角下获得的,入射角的变化是由两个探测器位置交替时机械转动误差引起的。因此,利用式(4)计算出 MCP 的量子效率将存在一定波动。除此之外,式(4)并没有考虑单色仪高次谐波的影响,这也给量子效率带来一定的误差。

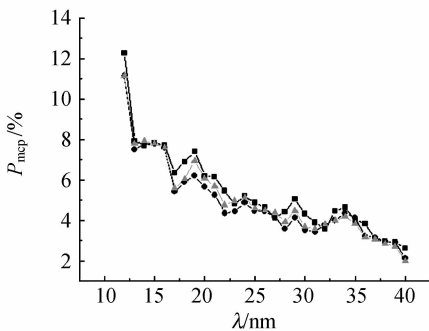


图 6 裸露 MCP 的量子效率

Fig. 6 QE of bare MCP

图 6 显示 MCP 的量子效率随波长的增大而减小,这是由于 MCP 的量子效率是由 MCP 输入面材料本身的性质和入射光的能量决定的。当材料确定后,入射光能量越大,波长越小,产生光电

子的几率越大,故 MCP 的量子效率是随波长的增大而减小的。

为了进一步验证本文测量方案的正确性和实验结果的可靠性,将实验结果同计数方式测量结果进行了对比。图 7 是计数方式测量结果<sup>[5]</sup>,其中“Bare”代表裸露 MCP 的量子效率。图 6 和 7 显示两者在  $20 \sim 40$  nm 之间的变化趋势是一致的,但是图 6 实验结果比较低。这是由于文献<sup>[5]</sup>是在探测器入射面前放置加电压的金属网,防止了电子反馈,提高了 MCP 的量子效率。由于 MCP 的量子效率随入射角发生很大的变化,图 7 是在最佳入射角下测量的。而图 6 实验结果是没有选择最佳入射角和电子反馈处理的条件下测量的,故结果比较低。但是,两者变化趋势的一致性,进一步说明了本文提出的测量方案的正确性。

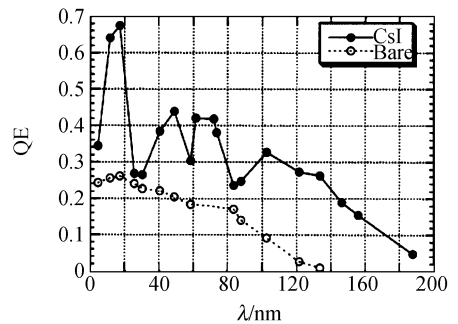


图 7 计数方式测量的 CsIMCP 和裸露 MCP 的量子效率

Fig. 7 QEs of CsI-coated MCP & bare MCP

## 4 结论

以激光等离子体辐射源作为光源,提出了一种测量 MCP 量子效率的方法,即通过直接测量电压来间接测量探测器输出电流,从而实现对 MCP 量子效率的测量。

实验结果表明,在  $12 \sim 40$  nm 波段,MCP 量子效率在  $2\% \sim 12.3\%$  之间,重复性为  $\pm 6.3\%$ ,量子效率的波动主要来源于光源不稳定和机械转动误差。通过与计数方式测量结果对比,进一步验证了本文提出的测量方法的正确性。

为了更加准确地测量 MCP 量子效率,下一步的工作将是提高光源稳定性和机械转动精度,具体分析高次谐波、光源稳定性等因素对测量结果的影响,改进测量装置,提高测量精度。

目前对 MCP 在极紫外波段量子效率的研究还是初步阶段,但是提出的测量方法和研究方法的可行性为进一步测量和研究 MCP 探测器在极紫外光谱区的性能奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] VALLERGA J V,ROBERTS B,DUPUIS J, *et al.*. Six years in orbit: the MCP detectors aboard the extreme ultraviolet explorer satellite[J]. *SPIE*,1998, 3356:1001-1010.
- [2] PRIEDHORSKY W C,BLOCH J J,SMITH B W, *et al.*. ALEXIS: An ultrasoft x-ray monitor experiment using miniature satellite technology[J]. *SPIE*, 1988,982: 188-207.
- [3] 田景全,姜德龙,孙秀平,等.新型变密度卤化物/MCP 反射式 X 射线敏感薄膜的研究[J]. *发光学报*,2002, 23(5): 513-517.  
TIAN J Q, JIANG D L, SUN X P, *et al.*. Study on new MCP reflection X-ray sensitive film of variable density halide[J]. *Chinese journal of luminescence*, 2002, 23(5):513-517. (in Chinese)
- [4] TANG R D, JING Q T, XIU P S, *et al.*. Study on new MCP reflection X-ray sensitive film of variable density halide[J]. *SPIE*, 2002, 4919: 401-404.
- [5] JELINSKY S R,SIEGMUND O H W,MIR J A. Progress in soft X-ray and UV photocathodes[J]. *SPIE*, 1996, 2808: 617-625.
- [6] KOWALSKI M P,FRITZ G G,CRDDACE R G, *et al.*. Quantum efficiency of cesium iodide photo-cathodes at soft X-ray and extreme ultraviolet wavelengths[J]. *Appl. Opt.*, 1986,25(14) : 2440-2446.
- [7] SIEGMUND O H W,EVERMAN E,VALLERGA J V, *et al.*. Ultraviolet quantum detection efficiency of potassium bromide as an opaque photocathode applied to microchannel plates[J]. *Appl. Opt.*, 1987,26(17) : 3607-3614.
- [8] CARRUTHERS G R. Quantum efficiencies of imaging detectors with alkali halide photocathodes. 1: microchannel plates with separate and integral CsI photocathodes[J]. *Appl. Opt.*, 1987, 26(14): 2925-2930.
- [9] SIEGMUND O H W,EVERMAN E,VALLERGA J V,*et al.*. Extreme ultraviolet quantum efficiency of opaque alkali halide photocathodes on microchannel plates[J]. *SPIE*, 1987,868:18-24.
- [10] 尼启良,齐立红,陈波.使用气体靶激光等离子体光源的软 X 射线反射率计[J]. *光学精密工程*,2004,12(6): 576-580.  
NI Q L, QI L H, CHEN B. Soft X-ray reflectometer based on laser-produced plasma source with a gas-jet target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(6): 576-580. (in Chinese)
- [11] 曹继红.一种软 X 射线/极紫外波段标定方法研究[D].中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2003.  
CAO J H. *Study of Calibrating Method in Soft X-ray/EUV*[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [12] 尼启良,巩岩,陈波,等.激光等离子体软 X 射线光源光谱强度测量方法[J]. *光谱学与光谱分析*,2004,24(1):1-3.  
NI Q L,GONG Y,CHEN B, *et al.*. Method to measure spectrum intensity from laser plasma soft X-ray source [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004,24(1):1-3. (in Chinese)
- [13] 曹继红,尼启良,陈波.用 Si 光电二极管标定软 X 射线探测器[J]. *光学精密工程*,2004,12(1): 118-121.  
CAO J H, NI Q L, CHEN B. Calibration of soft X-ray detector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12 (1):118-121. (in Chinese)

作者简介:李 敏(1981—),女,山东博兴人,博士研究生,主要研究方向为短波光学。E-mail:liminciomp@sohu.com

通讯作者:陈 波(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事软 X 射线-极紫外波段光学的研究。E-mail:chenb@ciomp.ac.cn