

文章编号 1004-924X(2011)11-2596-07

## 球面微通道板在极紫外波段的量子探测效率

尼启良<sup>1\*</sup>, 韩素立<sup>2</sup>, 陈斌<sup>1</sup>, 王海峰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 由于球面微通道板(MCP)的量子探测效率与极紫外(EUV)相机的灵敏度有关, 本文研究了球面 MCP 量子探测效率的特点和测量方法。根据微通道板在 EUV 波段光电子产额的理论模型, 计算了球面 MCP 在该波段下随不同入射角变化的电子产额。使用激光等离子体光源测量球面 MCP 在 EUV 波段的量子探测效率, 搭建了球面 MCP 在该波段的量子探测效率的测量装置, 测量了球面 MCP 在不同位置的量子探测效率随波长和入射角的变化曲线。实验结果表明, 入射角为 15° 时的量子探测效率约为入射角为 0° 时的 5 倍。

**关键词:** 极紫外(EUV)相机; 球面微通道板; 次级电子产额; 量子探测效率

**中图分类号:** TN144 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111911.2596

## Quantum detection efficiency of spherical microchannel plate in extreme ultraviolet

NI Qi-liang<sup>1\*</sup>, HAN Su-li<sup>2</sup>, CHEN Bin<sup>1</sup>, WANG Hai-feng<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

\* Corresponding author, E-mail: niqiliang@yahoo.com

**Abstract:** As the Quantum Detection Efficiency (QDE) of a spherical micro-channel plate in a photo-counting imaging detector is relative to the sensitivity of an Extreme Ultraviolet (EUV) camera, this paper researches its characteristics and measurement. The secondary electron yield of the spherical MCP in EUV region is calculated based on the theoretical model describing secondary electron yield of the MCP. Then the QDE of the spherical MCP is measured by using a laser-produced plasma source, and an instrument for measuring the QDE of spherical MCP is built. The QDE of spherical MCP for different positions on a MCP surface is measured at different incident angles and wavelengths. The experimental results show that the QDE at an incident angle of 15° is five times of that at incident angle of 0°.

**Key words:** Extreme Ultraviolet (EUV) camera; spherical micro-channel plate; secondary electron yield; Quantum Detection Efficiency (QDE)

收稿日期: 2011-06-07; 修订日期: 2011-08-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61077016)

## 1 引言

微通道板(Micro-channel Plate, MCP)作为二维图形电子倍增极被广泛应用于微光探测领域中。由于极紫外波段光学信号是极微弱信号,因此研制的极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)相机采用MCP作为倍增器件。该相机具有 $15^\circ$ 的视场和 $0.08^\circ$ 的角分辨率,采用基于球面MCP的二维光子计数成像探测器加EUV多层膜反射镜的结构来探测极微弱信号。相机利用EUV多层膜反射镜曲率半径和球面MCP曲率半径相匹配来消除球差对成像质量的影响。制备了曲率半径为150 mm、长径比为80:1无环形边缘的球面MCP。球面MCP的量子探测效率与EUV相机的灵敏度有关,需要对其量子探测效率进行测量。球面MCP已成功应用到IMAGE<sup>[1-3]</sup>卫星的有效载荷EUV相机上,中科院西安光机所利用高温成型方法制备了具有环形边缘的球面MCP<sup>[4]</sup>,但没有对其性能研究进行报道。目前国内对量子探测效率的研究仅限于平面MCP<sup>[5]</sup>。本文利用次级电子产额理论分析并给出了球面MCP在10~40 nm波段的次级电子产额,使用激光等离子体光源测量球面MCP在EUV波段的量子探测效率,搭建了球面MCP在该波段的量子探测效率的测量装置,得到了10~40 nm波段球面MCP量子探测效率随入射角和波长的变化曲线。

## 2 次级电子产额理论分析

球面MCP量子探测效率是指光照射到探测器表面实现光电转化后进入通道内的电子数。本文在理论上分析并模拟验证了EUV波段光束以不同入射角入射到未镀光阴极的球面MCP表面产生的电子数(次级电子产额)。球面MCP是由高铅玻璃制成的,在微通道板的前后表面镀有电极(镍铬电极,密度 $\rho=8.4\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,Ni和Cr的质量百分比分别为80%和20%,厚度为 $\mu\text{m}$ 量级),用于提供良好的端面接触以便施加电压。对未镀光阴极的球面MCP而言,电极可以看作光阴极材料<sup>[6]</sup>,入射的光子与其相互作用产生初级电子,初级电子能量贡献给次级电子能量并逸出<sup>[7]</sup>。以光子吸收、电子输运和电子逸出3个过

程建立次级电子产额的理论模型,推导出的计算公式为:

$$I_e = \frac{[1-R(\alpha)](1-f)P_s(0)E_x}{\epsilon} \times \left\{ \frac{\sin(\alpha')}{\sin(\alpha') + \mu L_s} \right\} \times \left\{ 1 - \exp\left[-T\left(\frac{\mu}{\sin(\alpha')} + \frac{1}{L_s}\right)\right] \right\}. \quad (1)$$

式中 $R(\alpha)$ 是入射角为 $\alpha$ 时的反射系数, $f$ 是激发初级电子损失的能量, $P_s(0)$ 是次级电子逸出到表面的平均能力, $E_x$ 是入射光子能量, $\epsilon$ 是产生单个次级电子需要的能量, $\alpha$ 是入射光的折射角, $\mu$ 是光的线性吸收系数, $L_s$ 是次级电子的逸出深度, $T$ 是材料厚度,参数 $P_s(0)$ , $L_s$ , $\epsilon$ 取值见表1<sup>[8]</sup>。

表 1 次级电子模型参数

Tab. 1 Secondary electron parameters for model

	$P_s(0)$	$L/\text{nm}$	$\epsilon/\text{eV}$
MCP glass	0.15	3.3	10
Ni-Cr	0.024	2.0	6.65

由表1和公式(1)计算得到次级电子产额随入射角和波长的变化曲线如图1和图2所示。

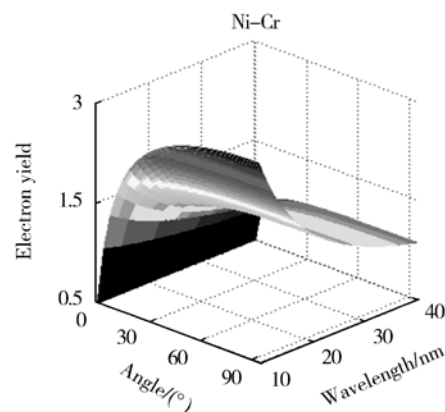


图 1 NiCr 电极次级电子产额随光束入射角和波长的变化曲线

Fig. 1 Secondary electron yield of Ni-Cr electrode vs. incident angle and wavelength

由图1和图2可见,当光束入射角小于临界角时(约 $15^\circ$ ),Ni-Cr电极和铅玻璃的次级电子产额随入射角迅速增大;当光束入射角大于临界角时,次级电子产额变化缓慢并逐渐趋于常数。球面MCP在 $15^\circ$ 入射角的电子产额约为 $0^\circ$ 入射角的5倍。次级电子产额随波长的增加而下降,由

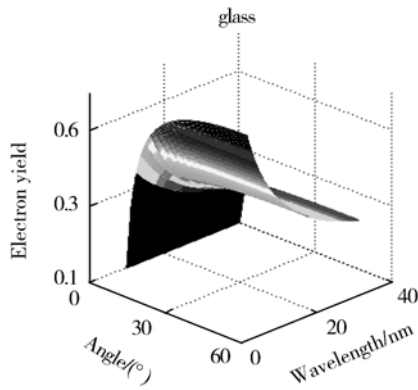


图 2 铅玻璃次级电子产额随光束入射角和波长的变化曲线

Fig. 2 Secondary electron yield of MCP glass vs. incident angle and wavelength

于波长增加,光子能量降低,单个光子产生的次级电子数减少。Ni-Cr 电极的次级电子产额约为铅玻璃的 4 倍,这说明它在光电转换过程中起主要作用。

### 3 实验基本原理

#### 3.1 实验装置

实验装置如图 3 所示。Nd : YAG 激光器产生的波长为 1 064 nm 的脉冲激光束与真空靶室内的铜靶相互作用产生能够辐射 EUV 连续光谱的激光等离子体,EUV 辐射经过美国 McPherson 公司的 XCT 型掠入射真空扫描单色仪分光后入射到待测的球面 MCP 探测器和标定的光电二极管上,光斑的大小为 0.1 mm×2 mm。单色仪的工作波长为 5~62 nm,出入射狭缝宽度为 0.1 mm 时,光谱分辨率为 0.2 nm。由于 EUV 相机的工作波长为 30.4 nm,带宽为 5 nm,因此选取 10~40 nm 波段进行测量。以 NIST 标定过的传递标准 AXUV-100 硅光电二极管作为标准探测器,AXUV-100 和球面 MCP 探测器固定在五维样品台上,通过样品台的转动分别将两个探测器转入光路中。MCP 探测器和 AXUV-100 输出的脉冲信号经电荷灵敏前置放大器放大后送到线性脉冲放大器进一步放大,然后再送到采用保持电路<sup>[9]</sup>,最后用 NI 公司的 DAQ603 数据采集卡进行数据采集并保存到计算机中<sup>[10]</sup>。由于所有材料对 EUV 波段都有很强的吸收,所以整个测量

过程需在真空度大于  $1 \times 10^{-4}$  Pa 的真空环境中进行。

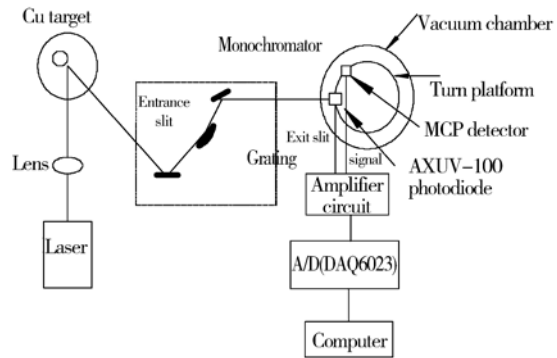


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Sketch of experimental equipment

球面 MCP 探测器的结构如图 4 所示,它包括一个球面 MCP 和金属阳极,通过分压电阻给球面 MCP 和阳极提供高压。球面 MCP 的孔偏角为  $0^\circ$ ,长径比为 80 : 1,电阻  $R=100 \text{ M}\Omega$ ,曲率半径为 150 mm。

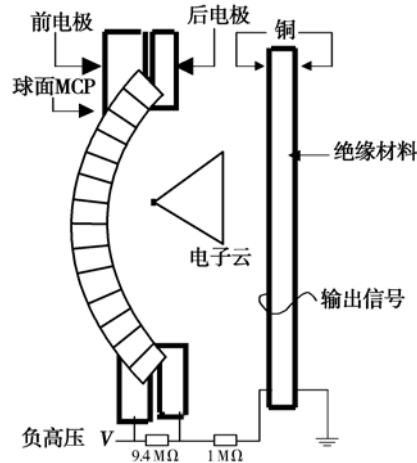


图 4 球面 MCP 探测器结构图

Fig. 4 Structure of spherical MCP detector

#### 3.2 球面 MCP 量子探测效率测量方法

激光等离子体光源是脉冲式 EUV 光源,它产生脉冲宽度为几个纳秒的光脉冲,假设每个脉冲在  $\lambda$  波长产生的能量为  $E(\lambda)$ ,对应每个脉冲的光子数为  $E(\lambda)/hr$ 。对于球面 MCP 探测器,一个入射的光子产生的光电子数为  $L(\lambda)$ ,即 MCP 的量子探测效率。在 MCP 模拟工作模式下,一个光电子经 MCP 倍增可以产生的电子数为  $G_{mcp}$ ,即为 MCP 的增益,因此,一个光子经球面 MCP

产生的电子数为  $L(\lambda)G_{mcp}$ , 对应的电量为  $L(\lambda)G_{mcp}e$  ( $e$  为一个电子的电量), 所以一个光脉冲经球面 MCP 的倍增后产生的电量为:

$$L(\lambda) \cdot G_{mcp} \cdot e \cdot \frac{E(\lambda)}{h\gamma} = \frac{V_{mcp} \cdot C_f}{A_{mcp}}, \quad (2)$$

其中  $A_{mcp}$  是测量电路的放大倍数,  $V_{mcp}$  是采用保持电路的输出电压,  $C_f$  是所用电荷前置放大器的反馈电容。

对于 AXUV-100 硅光电二极管: 在  $\lambda$  波长, 每个能量为  $E(\lambda)$  的光脉冲入射到二极管产生的电量可表示为<sup>[11]</sup>:

$$E(\lambda) = \frac{V_{axuv} \cdot C'_f}{A_{axuv} \cdot R_e(\lambda)}, \quad (3)$$

其中  $R_e(\lambda)$  为 AXUV-100 的响应度, 即在波长  $\lambda$  处一个焦耳的入射能量使 AXUV-100 产生的电量。  $A_{axuv}$  是测量电路的放大倍数,  $V_{axuv}$  是采用保持电路的输出电压,  $C'_f$  是所用电荷前置放大器的反馈电容。将(3)式代入(2)式得:

$$L(\lambda) \cdot G_{mcp} \cdot e \cdot \frac{V_{axuv} \cdot C'_f}{A_{axuv} \cdot R_e(\lambda) \cdot h\gamma} = \frac{V_{mcp} \cdot C_f}{A_{mcp}}. \quad (4)$$

由于 AXUV-100 和球面 MCP 探测器使用相同的前置放大器进行测量,  $C'_f = C_f$ , 由式(4)可以得到球面 MCP 量子探测效率的表达式为:

$$L(\lambda) = \frac{V_{mcp} \cdot A_{axuv} \cdot R_e(\lambda) \cdot h\gamma}{V_{axuv} \cdot A_{mcp} \cdot G_{mcp} \cdot e}, \quad (5)$$

式中  $\gamma = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.0 \times 10^8}{\lambda}$  m/s,  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C,  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J · s

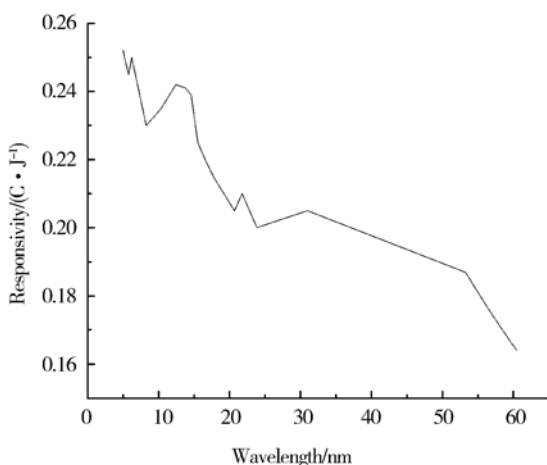


图 5 AXUV-100 硅光电二极管响应度曲线  
Fig. 5 Responsivity of AXUV-100 Si photodiode

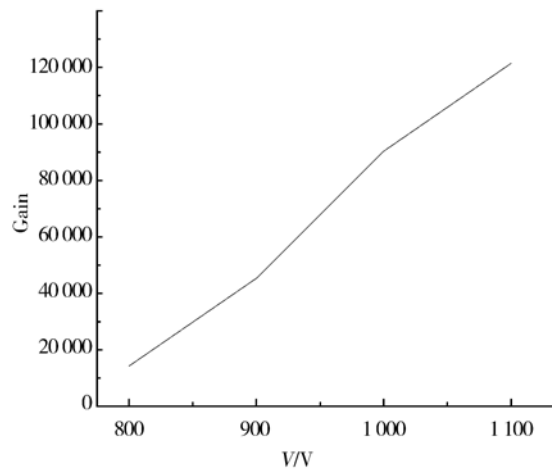


图 6 球面 MCP 增益随电压的变化曲线  
Fig. 6 Gain of spherical MCP vs. bias voltage

传递标准探测器 AXUV-100 的响应度曲线由 NIST 标定如图 5 所示。实验获得球面 MCP 增益如图 6 所示。如果实验测得  $V_{mcp}$ ,  $V_{axuv}$ , 根据公式(5)就可以直接算出 MCP 的量子探测效率。球面 MCP 在测量之前进行了清洗, 烘烤除气, 电子清刷等预处理步骤, 获得了稳定的增益并延长了 MCP 的寿命。

#### 4 实验结果及误差分析

为了减少光源不稳定对测量结果的影响, 本文采用多次测量取平均值的方法, 测量时波长扫描间隔为 1 nm。图 7 是光电二极管 2 次测量获

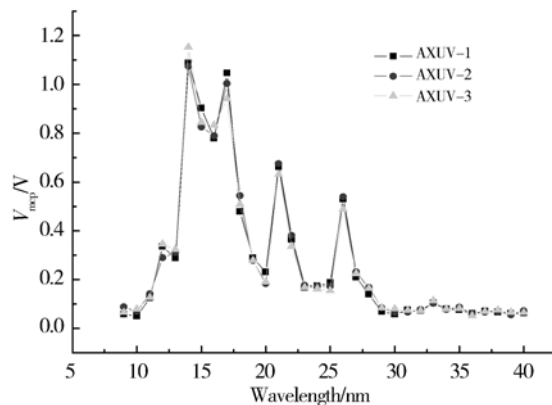


图 7 AXUV-100 硅光电二极管输出电压信号随波长变化曲线  
Fig. 7 Output signals from AXUV-100 photodiode vs. wavelength

得的光源光谱曲线。图 8 是球面 MCP 随不同入射角变化时的光源光谱曲线。图 9 是从球面 MCP 中心处开始测量,依次向其边缘移动 4 mm 时测得的光源光谱曲线。将上述测得的数据带入公式就(5)即得到球面 MCP 量子探测效率变化曲线。

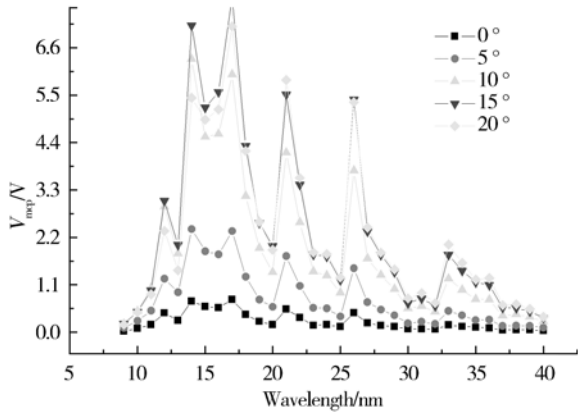


图 8 不同入射角时球面 MCP 探测器输出电压信号随波长变化曲线

Fig. 8 Output signals of spherical MCP detector vs. wavelength with different incidence angles

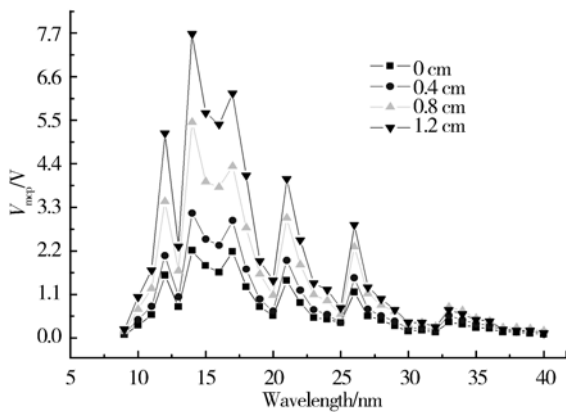


图 9 球面 MCP 探测器不同位置输出电压信号随波长的变化曲线

Fig. 9 Output signals of spherical MCP detector vs. wavelength with different locations on MCP surface

图 10 是球面 MCP 在不同位置其量子探测效率随波长变化曲线,可以看出球面 MCP 边缘比中心位置的量子效率高,这是因为光照射球面 MCP 不同位置时,入射角的不同导致次级电子产额不同。图 11 是测量数据经拟合后不同入射角

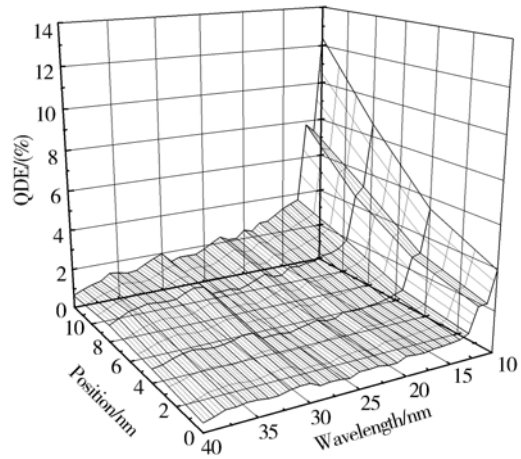


图 10 不同位置球面 MCP 量子探测效率随波长变化曲线

Fig. 10 QDE of spherical MCP vs. wavelength with different locations on MCP surface

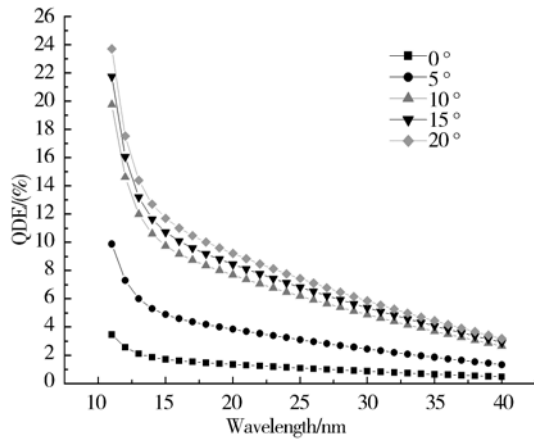


图 11 不同入射角下球面 MCP 量子探测效率随波长的变化曲线

Fig. 11 QDE of spherical MCP vs. wavelength with different incidence angles

下球面 MCP 量子探测效率随波长的变化曲线,当入射角达到临界角后(约为 15°)变化变缓,并逐渐趋于常数。同时由图 10 和图 11 可以看出:波长越短量子效率越高,这是由于波长越大,入射光能量越小,产生光电子的几率越小。上述测量结果和前面的关于次级电子产额的理论分析变化趋势一致。量子探测效率  $L(\lambda)$  的测量误差主要由  $R_e(\lambda)$  的标定误差(5%)、 $V_{mcp}$ 、 $V_{axuv}$  的测量误差(2.5%)及球面 MCP 的增益测量误差(10%)组成,经计算  $L(\lambda)$  的测量误差不超过 22.7%。

## 5 结 论

极紫外(EUV)相机具有大视场和高角分辨率,它的二维位置灵敏阳极光子计数成像探测器采用了球面 MCP。由于 MCP 的量子探测效率是重要的参数,因此需要完成对它的测量。本文根据微通道板在 EUV 的光电子产额理论模型,计算了微通道板在该波段的次级电子产额。使用激光等离子体光源测量球面 MCP 的

量子探测效率,并搭建了球面 MCP 量子探测效率的测量装置,得到了球面 MCP 不同位置的量子探测效率随波长和入射角变化的曲线。实验结果表明:当入射角为  $15^\circ$  时,量子探测效率约为入射角为  $0^\circ$  时的 5 倍,分析了量子探测效率的测量误差,测量结果与理论分析基本吻合。为了更加准确地测量球面 MCP 的量子探测效率,今后将在提高光源稳定性和 MCP 增益的测量精度等方面入手,提高球面 MCP 量子探测效率的测量精度。

### 参考文献:

- [1] STOCK J M, SIEGMUND O H W, HULL J S, *et al.*. Cross delay line microchannel plate detectors for the spectrographic imager on the IMAGE satellite[J]. *SPIE*, 1998, 3445: 407-414.
- [2] MENDE S B, HEETDERKS H, FREY H U. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 1. system design[J]. *Space Science Reviews*, 2000, 91: 243-270.
- [3] MENDE S B, HEETDERKS H, FREY H U. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 2. wideband FUV imaging [J]. *Space Sci. Rev.*, 2000, 91: 271-285.
- [4] 赵宝升,王俊峰,邹玮. 球面微通道板及其制备方法: 中国, ZL 200410073378.0[P]. 2005.  
ZHAO B SH, WANG J F, ZOU W. *The preparation of the spherically curve microchannel plate: China*, No. ZL 200410073378.0[P]. 2005. (in Chinese)
- [5] 尼启良,李敏,饭鲜红,等. 微通道板在 12~40 nm 波段的量子效率测量[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1):1-5.  
NI Q L, LI M, FAN X H, *et al.*. Quantum efficiency of microchannel plate in 12-40 nm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):1-5. (in Chinese)
- [6] 李敏,尼启良,董宁宁. 极紫外波段微通道板光电子产出理论分析与实验测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(8):2030-2034.  
LI M, NI Q L, DONG N N. Theoretical analysis and experimental measurement for secondary electron yield of microchannel plate in extreme ultraviolet region[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(8):2030-2034. (in Chinese)
- [7] HENKE B L, KNAUER J P, PREMARATNE K. The characterization of X-ray photocathodes in the 0.1-10-keV photon energy region[J]. *Appl. Phys.*, 1981, 52(3):1509-1530.
- [8] FRASER G W. The electron detection efficiency of microchannel plates[J]. *Nucl. Instrum. Methodes Phys. Res.*, 1983, 206(3):445-449.
- [9] 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)
- [10] 曹继红. 一种软 X 射线/极紫外波段标定方法研究 [D]. 长春: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: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [11] 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:



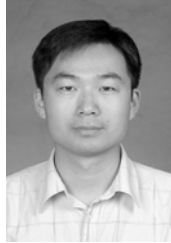
尼启良(1966—),男,辽宁辽阳人,博士,研究员,博士研究生导师,主要从事软 X 射线-紫外波段空间应用光子计数成像探测器的研究。E-mail: niqiliang@yahoo.com



陈斌(1958—),男,辽宁沈阳人,高级工程师,吉林工业大学继续教育学院机械制造工艺与设备专业本科毕业。主要从事超精密加工工艺的研究。E-mail: chenbin5812@yahoo.com



韩素立(1986—),女,河北邢台人,博士研究生,2009 年于吉林师范大学获学士学位,主要从事空间应用光学方面的研究。E-mail: best\_hsl@163.com



王海峰(1980—),男,河南平顶山人,博士,助理研究员,2007 年、2010 年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光与物质相互作用及光在微纳结构内的传输特性等方面的研究。E-mail: cloon@163.com

## ● 下期预告

## 漫反射板法定标成像光谱仪精度分析

张春雷<sup>1,2</sup>, 向阳<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)

使用漫反射板法对成像光谱仪进行定标除需考虑定标仪器设备的精度外还需要对定标角度、距离等几何参数和成像光谱仪仪器参数的影响进行分析。本文根据漫反射板法定标成像光谱仪原理,推导了以定标角度、距离等几何参数和成像光谱仪仪器参数为自变量的探测器沿景物像元方向采集到的信号电子数变化表达式,据此对几何参数和仪器参数的影响进行了分析。结果表明, $F/\#$ 分别为 3 和 4,入瞳口径在 0.1~0.2 m 范围内,辐照度标准灯照射距离取 0.5~2 m 之间,满足 1 mm 的测量精度,只要照射角小于  $12^\circ$ ,满足  $0.5^\circ$  的测量精度,都可以使探测器采集到的信号电子数相对变化小于 1%,可以发挥标准探测器高精度的优势,使利用漫反射板的定标方法达到较高的精度。