

文章编号: 0253-2239(2008)10-1925-05

## 30.4 nm 极紫外成像探测器的实验研究

朱香平<sup>1</sup> 赵宝升<sup>1</sup> 刘永安<sup>1,2</sup> 缪震华<sup>1,2</sup> 张兴华<sup>1,2</sup> 邹玮<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 100039)

**摘要** 报导了最新研制的 30.4 nm 极紫外成像探测器的实验研究结果。该探测器采用了楔条形阳极(WSA)、高增益 V 型级联微通道板组件、低噪声电子读出系统等先进技术,利用单光子计数成像技术在实验室成功获得了模拟图像。搭建了相应的实验系统,对探测器成像的线性度、空间分辨率、暗计数等性能进行了实验研究。结果表明,该探测器具有  $\phi 45$  nm 的有效面积,空间分辨率优于 100  $\mu\text{m}$ ,暗计数率低[0.4 count/( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )],成像线性度好、结构简单等优点。

**关键词** 探测器; 紫外探测; 30.4 nm 极紫外; 单光子计数成像; 微通道板; 楔条形阳极探测器

**中图分类号** TN23; O434.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082810.1925

## Experimental Study on 30.4 nm Extreme Ultraviolet Imaging Detector

Zhu Xiangping<sup>1</sup> Zhao Baosheng<sup>1</sup> Liu Yongan<sup>1,2</sup> Miao Zhenhua<sup>1,2</sup>

Zhang Xinghua<sup>1,2</sup> Zou Wei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xian, Shaanxi 710119, China)  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** The experimental result of the newly developed 30.4 nm extreme ultraviolet imaging detector was reported in detail, which adopted wedge strip and zigzag anode (WSA), V-stack high-gain microchannel plate (MCP) components, low-noise electronic readout system, and other advanced techniques. Simulated images were obtained successfully by using the single-photon counting imaging technique in the laboratory. The experimental setup system was established and the detector imaging linearity, resolution, the dark count rates etc are studied. The research shows that the detector has an effective area of 45 mm in diameter, spatial resolution better than 100  $\mu\text{m}$ , and low dark count rates about 0.4 count/( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ), with good image linearity and simple structure.

**Key words** detectors; ultraviolet detection; 30.4 nm extreme ultraviolet; single-photon counting imaging; microchannel plate (MCP); wedge strip and zigzag anode (WSA) detector

## 1 引 言

利用 30.4 nm 极紫外成像探测技术对地球等离子层  $\text{He}^+$  谐振散射辐射出的 30.4 nm 进行全球成像探测<sup>[1~6]</sup>,可以得到来自于电离层的离子在整个磁层的分布,用于揭示磁层强能粒子分布、等离子体片和伴随的加速过程的结构和动力学过程。2000 年美国宇航局利用椭圆轨道成像卫星上的极

紫外成像仪,第一次获得了地球等离子体层在赤道面上的全球分布及其在太阳扰动期间的变化<sup>[7]</sup>。2007 年日本“月亮女神”搭载的上大气层与等离子体成像仪中在的极紫外望远镜(UPI-TEX)也是用来对  $\text{He}^+$  谐振散射辐射出的 30.4 nm 极紫外辐射进行成像探测<sup>[5]</sup>。国内提出在“嫦娥探月计划”的二期和三期工程中开展月基地球等离子体层中  $\text{He}^+$

收稿日期: 2008-01-07; 收到修改稿日期: 2008-04-28

基金项目: 中国科学院知识创新方向性项目(061Z291213)资助课题。

作者简介: 朱香平(1974—),男,硕士,助理研究员,主要从事紫外光电探测器件及光电成像系统等方面的研究。

E-mail: xpzhu@opt.ac.cn

粒子的谐振散射所形成的 30.4 nm 的辐射进行成像探测<sup>[4]</sup>。

30.4 nm 极紫外成像探测中最为关键的是探测器的研制。本课题组对 30.4 nm 极紫外成像探测器的研制进行了技术攻关<sup>[8,9]</sup>,并于 2007 年 8 月成功研制出了一台基于微通道板(MCP)的楔条形阳极(WSA)探测器样机。本文搭建了一套实验系统,对探测器的暗计数、线性度、分辨率等进行了实验研究。

## 2 探测器组成及工作原理

基于 MCP 的 WSA 多阳极极紫外成像探测技术是利用单光子计数技术<sup>[10,11]</sup>,通过探测从 MCP 发射出的电子云在阳极上的位置实现光子事件位置解码。电子云在阳极上的不同位置决定了不同的光子计数,若光子计数较大,则该位置光越强,经过一段时间累积,形成强度对比,反演成灰度图像,从而达到单光子计数成像探测的目的。实验使用的 WSA 探测器组成如图 1 所示。CsI 紫外光电阴极蒸镀在 MCP 表面,当极微弱紫外光照射到光电阴极时,入射光子以一定的概率(即量子效率)使光电阴极发射一个电子,经 V 型级联 MCP 倍增后,在 MCP 出射面形成电子云,电子云在加速场作用下,到达 WSA 阳极,从而在阳极回路中形成一个电流脉冲,通过负载电阻形成一个电压脉冲,这个脉冲称为单光电子脉冲。

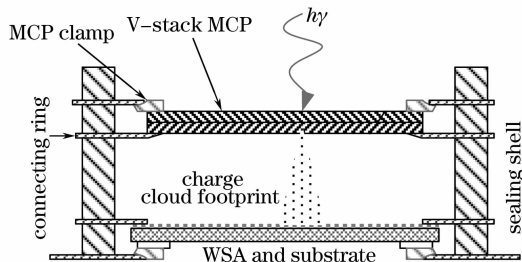


图 1 WSA 探测器组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of WSA detector

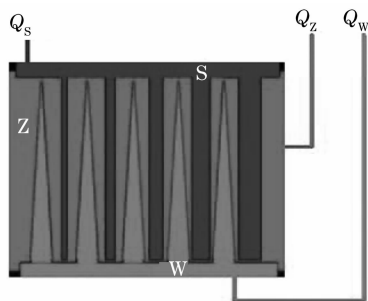


图 2 三个电极的 WSA 阳极示意图

Fig. 2 Schematic of a three-electrode WSA

经 MCP 倍增后的电子云被 WSA 阳极收集,阳极面板共有三个收集电子区(W 区、S 区、Z 区),如图 2 所示。通过三个电极上收集到的电荷量实现光子事件位置解码,假定这三个电极收集到的电荷量分别为  $Q_w$ 、 $Q_s$ 、 $Q_z$ ,则光子事件位置解码算法为<sup>[11]</sup>

$$X = \frac{2Q_s}{Q_s + Q_w + Q_z}, \quad (1)$$

$$Y = \frac{2Q_w}{Q_s + Q_w + Q_z}. \quad (2)$$

## 3 试验装置

实验中由于没有合适的 30.4 nm 光源,采用低压汞灯代替,峰值波长为 253.7 nm,通过采用多个紫外减光片和窄带滤光片组合获得单光子光源。单光子光源光路如图 3 所示。

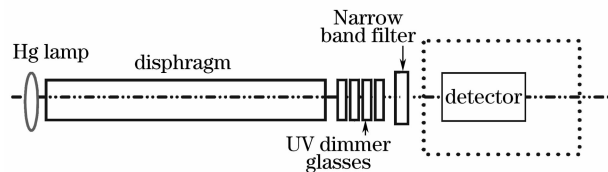


图 3 单光子光源组成示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single-photon source

低压汞灯发出的光,先通过一定长度的光阑筒,光阑筒后面再放置减光片,具体放置几块减光片要根据具体实验情况而定,减光片越多,到达探测器的光越微弱,光子计数率越低。

整个实验装置系统如图 4 所示。探测器放在真空系统内, MCP 采用 V 型级联,外径 50 mm,厚度 1 mm,通道孔径 25  $\mu\text{m}$ ,长径比  $L/D=40$ 。MCP 与阳极之间距离 15 mm, V 型级联 MCP 之间电压 1850 V,阳极与 MCP 之间加速电压 300 V。

单光子光源通过真空室的紫外窗口到达探测器输入面,作用于 MCP 上的光电阴极产生电子,通过 MCP 倍增产生电子云,在加速场作用下达到 WSA 阳极,形成电子脉冲。通过信号电极将三路信号引出,引出的三路信号通过电荷灵敏前置放大电路将电荷信号转换为电压信号、再通过放大整形电路将信号做进一步放大整形;然后通过凌华 PCI9812 数据采集卡(DAQ)采集,得到三路数字化的信号,再通过计算机图像处理软件进行实时处理。最后由光子事件位置解码算法计算出电子云在 WSA 阳极上的质心位置,经过一定时间积分,形成灰度图像。

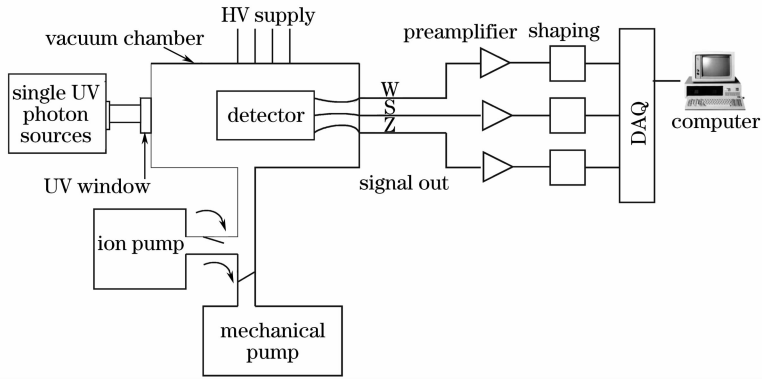


图 4 探测器成像实验装置示意图

Fig. 4 Experimental setup for the WSA detector imaging system

### 4 试验结果与分析

用 TekDPO4104 示波器测量探测器各处引出的信号,结果如图 5 所示,曲线 A 为阳极输出的脉冲信号,电子云到达阳极是一个很快的充电过程然后缓慢放电,所以该信号是一个电子脉冲信号,脉冲下降沿为几个纳秒;曲线 B 为电荷灵敏放大电路输出的脉冲信号,相对于阳极输出信号,实现了反相放大;曲线 C 为整形后的脉冲信号,半峰全宽约  $5 \mu\text{s}$  的准高斯脉冲,脉冲幅度反映脉冲信号电荷量的大小,与 MCP 上所加高压、电子云落在阳极上的位置以及电路放大倍数有关。

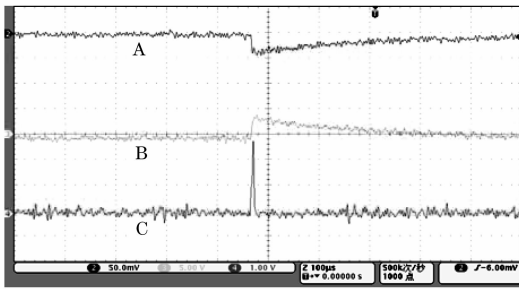


图 5 WSA 探测器各处引出的信号

Fig. 5 Output signals of WSA detector

WSA 探测器是一种基于电荷分割技术的光子计数型位置灵敏探测器,其性能主要由探测器的暗计数、成像线性度和空间分辨率等决定。通常,微通道板暗计数率在  $1 \text{ count}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  量级,图 6 为 20 min 暗计数成像的实验结果,暗计数率为  $0.4 \text{ count}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

为了测试成像线性度,用聚四氟乙烯制作一块  $9 \times 9$  阵列小孔掩模板,开孔孔径为 2 mm,孔间距为 4 mm,掩模板与探测器 MCP 表面近贴。图 7 为 81 孔掩模板成像结果图,大小为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ ,可见,有些边缘小孔成像模糊,主要是实验中光不均匀,有些位置光太微弱导致。

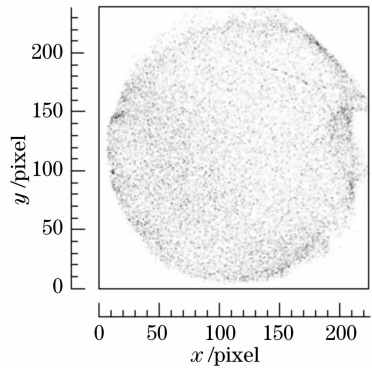


图 6 暗计数成像结果

Fig. 6 MCP dark count imaging result

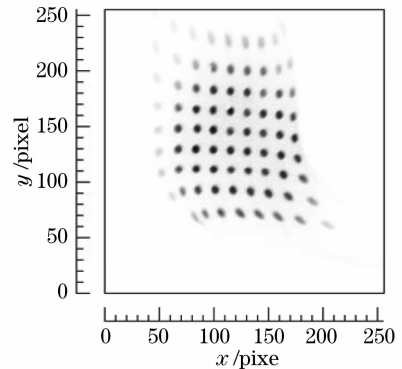


图 7 81 孔掩模板成像效果图

Fig. 7 Imaging of 81 pinholes mask

从图 7 中可见,小孔位置图像在边缘出现明显的“枕形”畸变,并且畸变程度由中心到边缘逐渐增加。畸变产生的因素主要与探测器设计、电子读出系统以及 WSA 阳极探测器固有特性有关。图像畸变很难避免,但可通过优化探测器结构设计减少畸变。另外电子云到达阳极时,部分电子到达阳极边缘的导电电极上面也会引起边缘畸变,所以一般选择畸变较小的中心区域作为探测器的有效探测区域。

因此在探测器研制中,一般使阳极尺寸大于 MCP 尺寸,那样边缘畸变可降低。此外还可通过实验标定,用软件处理方法对畸变进行校正。

图 8 给出了实验获得的 49 小孔阵列成像二维灰度图,是通过改善探测器外形尺寸及装配后的实验结果,可见畸变明显减小。实验时,将一块带有 49 个小孔的点阵掩模板(7×7,孔间距 4 mm,孔径 1 mm)与探测器 MCP 输入面近贴。

图 9(a)、图 9(b)分别是图 8 的  $x$ 、 $y$  方向的光子计数密度分布柱状图,可见,WSA 位置灵敏探测器在  $y$  方向比  $x$  方向具有更好的线性度。从图 8 提取  $x$  方向第 69 个像素的计数数据,拟合结果如图 9(c)所示,可见,单行象素上 7 个小孔区分度情况良好,不同小孔的计数区别很大,出现这种情况的主要原因是光源不均匀以及针孔掩模板在实验过程

中对准情况不是很好。另外,WSA 探测器是基于电荷分割电子读出技术,探测器成像线性度与阳极在  $x$  方向和  $y$  方向面积线性度有关,可以通过阳极设计优化,提高探测器成像线性度。

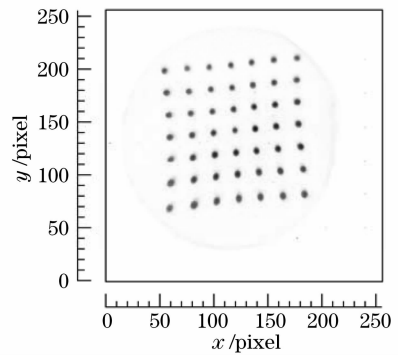


图 8 49 孔掩模板成像效果图  
Fig. 8 Imaging of 49 pinholes mask

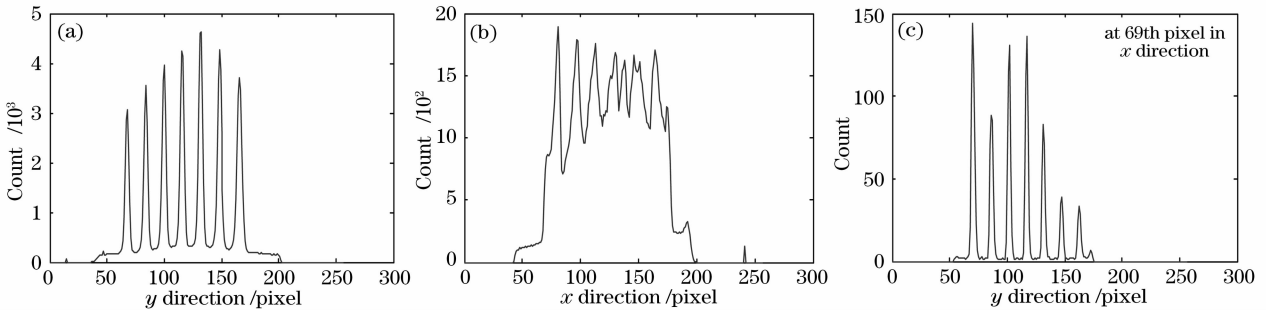


图 9 图 8 中  $y$  方向(a),  $x$  方向(b)和  $x$  方向第 69 像素上的  $y$  方向(c)的计数密度柱状分布图  
Fig. 9 Count histograms of Fig. 8  $y$  (a),  $x$  (b) and  $y$  direction at the 69th pixel in direction  $x$  (c)

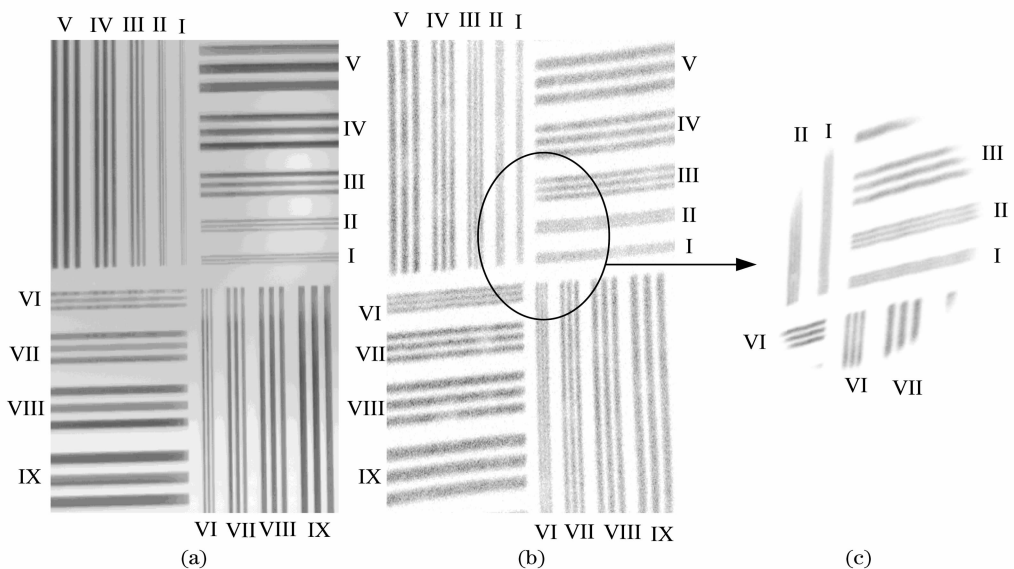


图 10 分辨率掩模板成像。(a) CCD 成像, (b) 试验系统探测器成像, (c) 图(b)中间部分区域成像结果

Fig. 10 Image of the resolution mask. Imaged by CCD (a), the detector (b), (c) imaging of the central part of the mask

为了测试探测器的空间分辨率,制作了相应的紫外分辨率测试掩模板,通过光刻工艺刻蚀出一系

列条纹组,条纹宽度及对应分辨率组合如表 1 所示。图 10(a)是用 CCD 相机拍摄到的分辨率板图,图 10(b)

是探测器对分辨率板成像结果图,结果显示实验中探测器分辨率优于  $100\ \mu\text{m}$ [图 10(c)条纹 II]。另外在不同方向,分辨率有所差别。从测试结果可见,y

表 1 分辨率掩模板条纹与空间分辨率对应表

Table 1 Correspondence of strip and spatial resolution of the resolution mask

Strip label	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Spatial resolution / $\mu\text{m}$	75	100	200	300	400	150	250	350	450

WSA 探测器是通过探测三路电极输出电荷量的比例确定电子云的质心位置,因此如何得到准确的三路信号的电荷量是实验中最为关键的技术。由于探测器阳极输出的原始信号幅度较小(几十毫伏),需要对信号进行放大,然后再进行处理测量。从 MCP 出射的电子云大小、形状以及探测器与放大电路连接传输线、探测器的电磁屏蔽、电路接地等问题都会影响探测器的成像性能。例如,传输线越长,分布电容就越大,信噪比越小,为了减少探测器输出端到电荷灵敏前置放大电路输入端之间分布电容的影响以及信号在这段路程传输过程中受到外界的干扰,提高信噪比,通常把信号放大部分分为电荷灵敏前置放大部分和主放大整形两部分,其中电荷灵敏前置放大部分尽量靠近阳极输出端。此外,为了减少电源噪声影响,使用了蓄电池给高压电源及电路供电;为降低放大电路噪声影响,需要使用低噪声电荷灵敏前置放大器,实验中使用的电荷灵敏前置放大器等效输入噪声不大于  $2.2\ \text{keV}$ 。实验中利用数据采集卡将信号采集,在软件处理信号过程中将三路采集到的数字化信号相加,与事先设置的阈值进行比较,当信号高于该阈值时作为有用信号进行处理,否则作为无效事件。这种措施也可有效降低噪声对探测器成像质量的影响。但是阈值如果设置过高,一些有效事件也当作无效事件,导致有效计数较少,从而影响探测器探测量子效率。因此阈值的选择也是一个关键,需要根据实验参数进行调整,以达到最佳效果。

## 5 结 论

对  $30.4\ \text{nm}$  极紫外成像探测器进行了实验研究,得到了阵列小孔掩模板图像,并对暗计数、分辨率、线性度等进行了实验研究。研究表明,紫外成像探测器具有空间分辨率优于  $100\ \mu\text{m}$ ,暗计数率低 [ $0.4\ \text{count}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ]、成像线性度好、结构简单等优点。为进一步提高探测器空间分辨率和线性度,可通过以下措施:1)增大 WSA 阳极相对 MCP 的有

方向空间分辨率优与  $x$  方向,这与该阳极探测器的电荷分割特性与阳极设计中各区域面积线性有关。

效面积,可有效减少图像的边缘畸变;2)优化探测器的结构设计,较少外界电磁干扰;3)提高低噪声电荷灵敏前置放大电路性能指标,有利于提高探测器时间和空间分辨率。

致谢 感谢空间科学与应用研究中心的徐荣栏研究员、李磊副研究员、王劲东博士提供的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Stuart Bowyer, Jeremy J. Drake, Stéphane Vennes. Extreme ultraviolet astronomy [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2000, **38**: 231~288
- 2 J. L. Burch, S. B. Mende, D. G. Mitchell *et al.*. Views of the Earth's magnetosphere with the IMAGE satellite [J]. *Science*, 2001, **291**(5504): 619~624
- 3 B. R. Sandel, J. Goldstein, D. L. Gallagher *et al.*. Extreme ultraviolet imager observations of the structure and dynamics of the plasmasphere [J]. *Space Science Reviews*, 2003, **109**: 25~46
- 4 <http://sprg.ssl.berkeley.edu/seminar-archive/020706.html>
- 5 Zhang Huiting. Payload of Japanese 'SELENE' [J]. *Space International*, 2007, (5): 21~25
- 6 张会庭. 日本“月女神”探测器的有效载荷(下) [J]. *国际太空*, 2007, (5): 21~25
- 7 Zhu Jingtao, Zhang Shumin, Wang Pei *et al.*. SiC/Mg multilayer film reflective mirror at  $30.4\ \text{nm}$  [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 735~738
- 8 朱京涛,张淑敏,王 蓓等.  $30.4\ \text{nm}$  波长 SiC/Mg 多层膜反射镜 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 735~738
- 9 B. R. Sandel, A. L. Broadfoot, C. C. Curtis *et al.*. The extreme ultraviolet imager investigation for the IMAGE mission [J]. *Space Science Reviews*, 2000, **91**: 197~242
- 10 Zhu Xiangping, Wang Guangming, Zhao Baoshen. Several extreme ultraviolet detector of multianode for space [C]. *Proceedings of the 2nd Academic Annual Meeting of Deep Space Exploration Subcommittee under Chinese Society of Astronautics*, 2005. 120~123
- 11 朱香平,王光明,赵宝升. 几种深空极紫外多阳极探测器 [C]. *中国宇航学会深空探测技术专业委员会第二届学术会议论文集*, 2005. 120~123
- 12 Wang Guangming, Zhao Baosheng, Wei Peiyong *et al.*. The research of WSZ extreme ultraviolet detector and the data acquisition circuits [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1823~1826
- 13 王光明,赵宝升,魏培永等. WSZ 极紫外探测器及其信号采集电路的研究 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1823~1826
- 14 O. H. W. Siegmund, S. Clothier, J. Thornton *et al.*. Application of the wedge and strip anode to position sensing with microchannel plates and proportional counters [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1983, **NS-30**(1): 503~506
- 15 H. E. Schwarz, J. S. Lapington. Optimization of wedge and strip anode [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1985, **NS-32**(1): 433~437