

极紫外微通道板光子计数成像探测器性能研究

尼启良

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 基于 CE-3 极紫外(EUV)相机最高工作温度为 70 °C 的要求,对 EUV 相机的微通道板(MCP)位置灵敏阳极光子计数成像探测器实验件在 70 °C 时的性能进行了研究,该探测器主要由工作在脉冲计数模式下的 MCP 堆、楔条形感应电荷阳极及相关的模拟和数据处理电路组成。为了获得稳定的 MCP 堆电子增益及较小的暗计数率,对 MCP 堆进行了预处理,包括 380 °C 条件下真空高温烘烤 18 h,以及电子清刷 100 $\mu\text{A}\cdot\text{h}$,并测量了预处理前后暗计数率;测量了探测器工作在室温和 70 °C 时的暗计数率、空间分辨率、增益,测量结果表明探测器的空间分辨率为 5.66 lp/mm,与室温下空间分辨率相同,暗计数率虽然小于 1 counts/(s·cm²),但 70 °C 暗计数率是室温的 2~5 倍;对探测器的使用寿命进行了初步分析。实验结果和分析表明探测器在空间分辨率、暗计数率、使用寿命等方面均满足 EUV 相机的要求。

关键词 探测器;光学器件;光子计数成像探测器;极紫外;微通道板;感应电荷楔条形阳极

中图分类号 O433.1; TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1104001

Study on Characteristic Performance of a MCP-Based Photon-Counting Imaging Detector

Ni Qiliang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract A two-dimensional photon-counting imaging detector with induced charge wedge-strip anode in extreme ultraviolet (EUV) region is developed based on the maximal operating temperature of 70 °C for CE-3 EUV camera, which will be applied to the characteristic performance test at 70 °C. The detector is mainly composed of microchannel plate (MCP) stacks operating in pulse-counting mode, wedge-strip position-sensitive anode and correlative analog and data processing circuit. A three-electrode wedge-strip induced-charge position-sensitive anode with 1.5-mm period and 47-mm diameter active area is designed and fabricated, and front-end analog and data circuit with the maximum rate of 200 kHz is also developed. In order to obtain MCP stack's steady gain and less background noise, the preconditioning of MCP stack including 380 °C bake-out for 18 h and 100 $\mu\text{A}\cdot\text{h}$ bake-in is done, background rate is measured before and after preconditioning, and the curve of MCP stack's gain versus high voltage applied to MCP stack is obtained. Operating characteristics of the MCP detector including background rate, spatial resolution are also measured. The life-span of the detector is analyzed. The measured results show that the spatial resolution can reach 5.66 lp/mm, and background noise is less than 1 counts/(s·cm²), they can completely satisfy the requirement of moon-based EUV camera on the spatial resolution, background noise and life-span.

Key words detectors; optical devices; photon-counting imaging detector; extreme ultraviolet; microchannel plate; induced charge wedge-strip anode

OCIS codes 040.7480; 040.3780; 030.5260

1 引言

地球磁层作为保护地球免受太阳活动影响的一

道天然屏障,它的分布变化直接影响到人类大多数的航天活动以及无线电通讯等。CE-3 有效载荷极

收稿日期: 2013-04-09; 收到修改稿日期: 2013-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61077016,61275152)、吉林省科技发展重大项目(20116013)

作者简介: 尼启良(1966—),男,博士,研究员,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方面的研究。

E-mail: niqiliang@hotmail.com

紫外(EUV)相机将在月球环绕地球的运动过程中,从侧面以不同的角度对地球等离子体层的 30.4 nm 辐射进行成像探测,研究目前未知的地球等离子体层的三维结构;在较长的时间内从整体上连续监测地球等离子体层密度和结构的变化,观测结果具有重要的科学意义和应用价值。由于地球等离子体层的 30.4 nm 辐射来自于极微弱的 He^+ 共振散射辐射,辐射强度在 $0.1 \sim 10 \text{ R}$ [$1 \text{ R} = 1/(4\pi) \times 10^{10} \text{ counts}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr})$] 之间,而微通道板(MCP)在该波段具有较高的量子效率,因此选择使用 MCP 的光子计数成像探测器作为成像器件。

目前 MCP 光子计数成像探测器已经被广泛地应用于从近紫外到 X 射线的空间探测^[1-5],分别于 1992 年和 2000 年由美国宇航局发射的极远紫外探索卫星(EUVE)和 IMAGE 卫星均搭载了基于楔条形阳极的 MCP 成像探测仪^[6-7]。与国外使用的延迟线阳极、楔条形阳极(WSA)、Vernier 阳极等多种位敏阳极相比,国内的 MCP 光子计数成像探测器所使用的阳极主要为楔条形阳极。由于 EUV 相机仅使用了一块工作波长为 30.4 nm 的多层膜反射镜作为光学系统,探测器处于中心位置,因此是一个中心遮拦系统,三个电极的 WSA 阳极更适合制作成圆形,遮挡面积最小。此外,该阳极与其他位敏阳极相比^[7]具有制作简单、位置读出电路较易设计等优点。

根据国家军用标准微通道板规范 GJB-1596-93, MCP 的工作温度范围是 $-43 \text{ }^\circ\text{C} \sim +55 \text{ }^\circ\text{C}$, 而 EUV 相机工作时间处于月昼,其所用光子计数成像

探测器区域的工作温度范围为 $-15 \text{ }^\circ\text{C} \sim +70 \text{ }^\circ\text{C}$, 低温区在 MCP 正常工作范围内,但高温区超过 MCP 最高工作温度 15° ,探测器在高温区的性能如空间分辨率、暗计数率等可能不满足 EUV 相机探测器设计指标[空间分辨率大于等于 2.5 lp/mm 、暗计数率小于等于 $1 \text{ counts}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$],因此,本文用两片排列成 V 形的国产平面 MCP 及 WSA 阳极建立一套 EUV 波段光子计数成像探测器实验样机,对其在 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的性能进行了实验验证。根据 CE-3 建造规范,实验温度应为 $70 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,本文实验探测器温度设置为 $72.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2 探测器的结构原理及其主要组成

图 1 为 MCP 成像探测系统的结构简图, MCP、WSA 以及三个分压电阻均被安装在具有加热装置的真空室内。加热装置的控温范围从室温到 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 。为了更精确地测量探测器的温度,一个铂电阻被贴到探测器壁上,从真空室外用万用表电阻档测量铂电阻随温度的变化。探测器使用两片直径均为 46 mm 的平面 MCP,长径比为 80:1,倾斜角为 0° 和 13° ,两片 MCP 之间插入一外径 46 mm、内径 43 mm、厚度 0.1 mm 的环形康铜垫片;实验光源采用发射 253.7 nm 紫外光的低压汞灯;阳极为石英基底表面镀锗的感应电荷 WSA 阳极。从图中可以看出紫外光经过 MCP 实现光电倍增,从 MCP 输出的电子云再被感应电荷 WSA 阳极收集,经过电子读出系统后再通过数据采集卡和相应的数据处理和成像软件输出脉冲高度分布曲线和图像信息等。

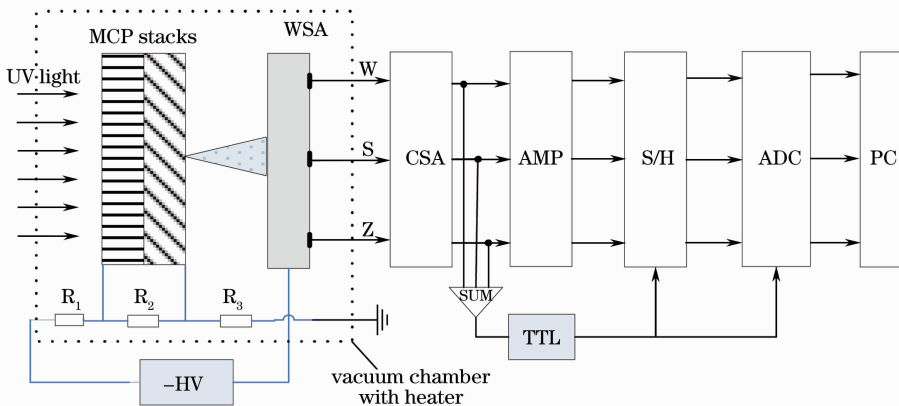


图 1 MCP 成像探测系统结构简图

Fig. 1 Framework plot of MCP imaging detector

其中,位置读出电路包括电荷灵敏前置放大器(CSA),整形放大器(AMP),采样保持电路(S/H),模数转换器(ADC)和用于阻止脉冲堆积的 TTL 电

路。从阳极出来的电荷脉冲信号被 CSA 放大为一个负指数的电压信号,在高计数率情况下由于 CSA 的输出信号尾部衰减时间较长而出现脉冲叠加现

象,需要使用 AMP 将叠加在一起的脉冲信号分开并进一步放大,S/H 将 AMP 输出的具有高斯波形信号的峰值保持一段时间便于 ADC 采集。最终该脉冲信号经过 ADC 和数据采集卡被采集到计算机上。计算机的图像处理软件再对其进行处理,得出需要的图像信息,研制的位置读出电路的最高计数率为 200 kHz。

探测器的(X,Y)坐标即电荷云的质心位置由下式确定:

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

式中 Q_w 、 Q_s 和 Q_z 分别是 W、S 和 Z 电极收集到三个电脉冲的电量,图 2 给出了三个电极的 WSA 阳极的几何简图,S、W 和 Z 是由绝缘线条分割开的金属电极,S 电极是条形,其宽度沿 X 方向按整数倍增加,W 是楔形,其宽度沿 Y 方向增加,Z 是介于 W 和 S 之间的电极。WSA 阳极具有周期性,在每个周期内 S 的宽度增加 1 倍,而 W 的宽度不变。利用传统的光刻技术制备出圆形的 WSA,所用的基片为 2 mm 厚的石英,阳极的材料为铝,周期为 1.5 mm,共计 31 个周期,绝缘间隙 30 μm ,阳极的有效直径为 47 mm,W、S 和 Z 之间的电容分别为 60、110、110 pF,Z 电极的电阻为 100 Ω 。

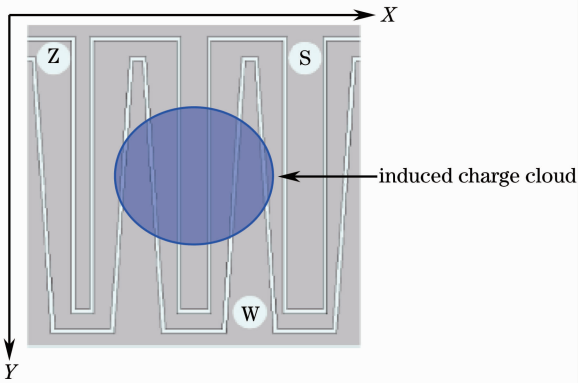


图 2 三电极的 WSA 阳极几何简图

Fig. 2 Schematic diagram of three-electrode geometry of the WSA

3 探测器性能测量

3.1 MCP 堆的预处理

预处理的目的是彻底去除 MCP 堆通道内的气体,降低暗噪声并获得稳定的增益。预处理的手段包括高温真空烘烤及电子清刷,需要考虑烘烤温度、清刷剂量对增益的影响,测量预处理前后 MCP 堆增益在不同高压下的曲线。根据 MCP 规范 GJB-

1596-93,首先将 MCP 堆在 380 $^{\circ}\text{C}$ 条件下真空烘烤 18 h,烘烤过程中,发现随温度升高,真空室内真空度变坏,随着烘烤的进行,真空度又会慢慢恢复并保持不变,由此可知烘烤使 MCP 得以有效地除气。然后利用紫外辐射照射探测器对 MCP 堆进行电子清刷,可以进一步清除 MCP 通道内吸附的气体,清刷过程中从 MCP 堆的出射电流保持在大约 1 μA ,直到完成 100 $\mu\text{A}\cdot\text{h}$ 的清刷为止。图 3 给出了预处理前后探测器在室温下暗计数率随电压的变化,预处理后暗计数率下降到 10 counts/s 以内。图 4 是预处理后在室温和 72.5 $^{\circ}\text{C}$ 时测量的 MCP 堆的电子增益随电压的变化,两者增益相近。

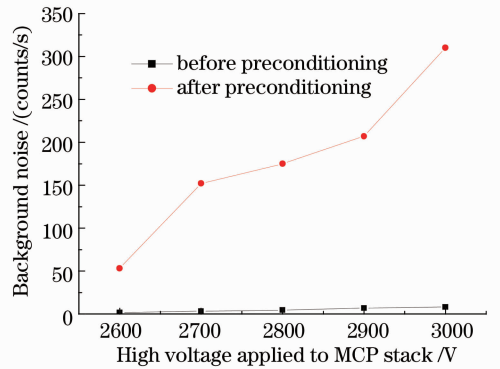


图 3 预处理前后探测器暗计数率

Fig. 3 Background noise before and after preconditioning

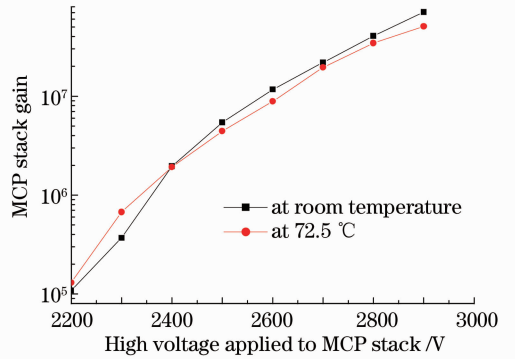


图 4 预处理后在室温和 72.5 $^{\circ}\text{C}$ 时 MCP 堆增益随电压的变化

Fig. 4 MCP stack gain versus high voltage applied to MCP at room temperature and 72.5 $^{\circ}\text{C}$ after preconditioning

3.2 暗噪声

暗噪声(又称暗计数)是无任何光照条件下探测器正常工作时产生的计数率。MCP 堆的暗噪声主要来源于场发射、宇宙射线产生的暗计数及 MCP 中含有的⁴⁰K 放射性衰变产生的暗计数^[4]。因 β 射线引起的暗计数是 MCP 暗噪声的主要来源,因此,减少暗噪声的最有效方法是使用不含有⁴⁰K 的 MCP。

图 5和图 6 分别是在室温和 72.5 °C 时采集的暗噪声图像,图 7 为 500 min 内暗噪声随时间的变化。通过设定采集的光子数,并测量图像的采集时间,获得的暗计数率均小于 1 counts/(s·cm²),但 72.5 °C 时暗计数率是室温下的 2~5 倍。

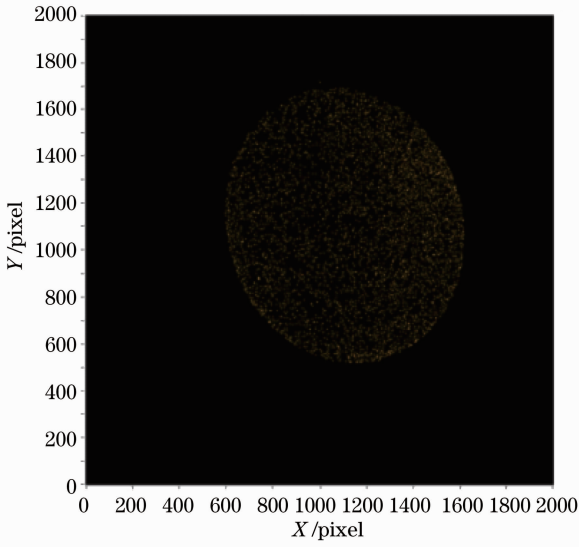


图 5 室温下暗噪声图像

Fig. 5 Background noise image at room temperature

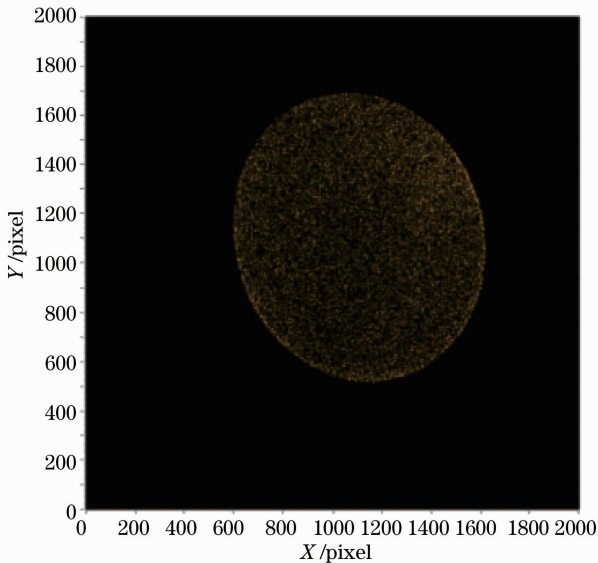


图 6 72.5 °C 时暗噪声图像

Fig. 6 Background noise image at 72.5 °C

3.3 空间分辨率

在探测器前面约 3 mm 距离处放置 Edmundoptics 公司的美国空军(USAF)透射式空间分辨率板,该分辨率板包括 0 组、1 组、2 组及 3 组图案,分辨率板上的每一组线宽对应不同的线对,探测器所能分辨的最窄线对就是它的空间分辨率。图 8 是室温下 USAF 空间分辨率板图像,图 9 是 72.5 °C 时

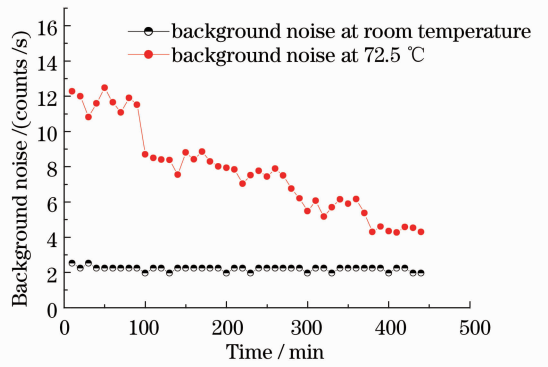


图 7 暗噪声随时间变化

Fig. 7 Background noise versus time

USAF 空间分辨率板图像。从图像可知该探测器能分辨 5.66 lp/mm(能分辨出分辨率板上第 2 组第 4 个单元),两幅图像对应的分辨率均为 88.4 μm,加在 MCP 堆两端的电压为 -2700 V, MCP 出射面与 WSA 阳极之间的电压为 -200 V,对应 MCP 增益约为 2×10^7 。由于 WSA 阳极探测器的空间分辨率主要由 MCP 堆的增益及其位置读出电路的信噪比决定,由图 4 可知在室温和 72.5 °C 时 MCP 堆增益基本一致,因此,在使用同一位置读出电路的情况下获得的图像空间分辨率也相同。

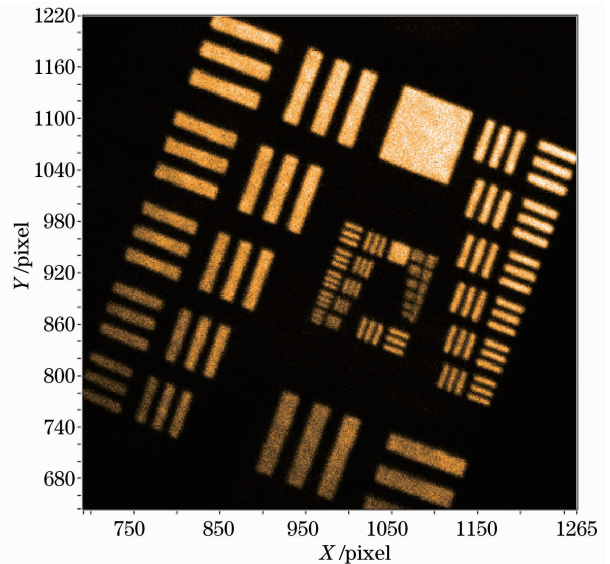


图 8 室温下 USAF 空间分辨率板图像

Fig. 8 UV image of USAF resolution panel at room temperature

3.4 探测器使用寿命分析

国外相关材料表明^[8-10]:MCP 的寿命被定义为从其通道壁抽取的单位电量在 0.1~1 C·cm⁻² 之间。本文实验所用的探测器进行了约 100 μA·h 的电子清刷,即电子清刷后从其通道壁抽取的电量为

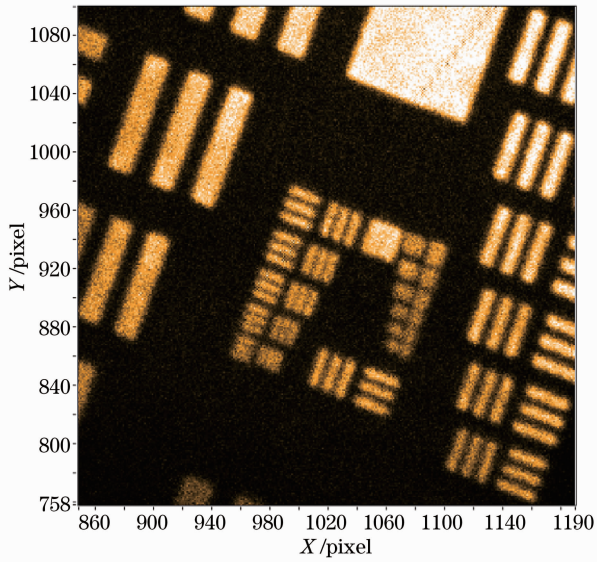


图9 72.5 °C时 USAF 空间分辨率板图像

Fig.9 UV image of USAF resolution panel at 72.5 °C

$100 \times 10^{-6} \times 3600 \text{ A}\cdot\text{s} = 0.36 \text{ C}$, 而 MCP 的有效面积为 $(2 \text{ cm})^2 \cdot \pi = 12.57 \text{ cm}^2$, 则单位面积抽取的电量为 $0.36 \text{ C} / 12.57 \text{ cm}^2 = 0.029 \text{ C}/\text{cm}^2$ 。探测器的设计工作寿命为 2278 h, 最高计数率为 50 kcounts/s, 如果探测器的整体计数率按 50 kcounts/s、电子增益按 2×10^7 计算, 则工作 2278 h 后从 MCP 堆抽取的电量为: $50 \times 10^3 \times 2 \times 10^7 \times 2278 \times 3600 \text{ e} = 0.82 \times 10^{19} \text{ e} = 1.312 \text{ C}$, 即 $1.312 \text{ C} / 12.57 \text{ cm}^2 = 0.104 \text{ C}/\text{cm}^2$ 。加上电子清刷所抽取的电量为 $0.029 \text{ C}/\text{cm}^2 + 0.104 \text{ C}/\text{cm}^2 = 0.133 \text{ C}/\text{cm}^2$ 。同理, 如果探测器的整体计数率按 10 kcounts/s、增益按 2×10^7 计算, 则其工作 2278 h 后被抽取的电量为: $10 \times 10^3 \times 2 \times 10^7 \times 2278 \times 3600 \text{ e} = 0.164 \times 10^{19} \text{ e} = 0.262 \text{ C}$, 即 $0.262 \text{ C} / 12.57 \text{ cm}^2 = 0.021 \text{ C}/\text{cm}^2$, 加上电子清刷抽取的电量为 $0.043 \text{ C}/\text{cm}^2 + 0.021 \text{ C}/\text{cm}^2 = 0.064 \text{ C}/\text{cm}^2$ 。经计算 EUV 相机在月昼工作时到达探测器的 30.4 nm 平均辐射强度小于 10 kcounts/s, 因此, 探测器能够满足工作 2278 h 的要求。

4 结 论

为了研究 CE-3EUV 相机探测器在 70 °C 时的

工作性能, 研制了二维 MCP 楔条形阳极光子计数成像探测器, 该探测器包括两片排列成 V 形的国产平面 MCP 堆、最高计数率为 200 kcounts/s 的模拟和数字前端电路, 对其在 72.5 °C 时的 MCP 堆增益、空间分辨率、暗计数率及工作寿命进行了测量与分析, 实验结果表明上述性能完全能满足 EUV 相机的要求。

参 考 文 献

- O H W Siegmund, M Lampton, S Chakrabarti, *et al.*. Application of wedge and stripe image readout systems to detectors for astronomy [C]. SPIE, 1986, 627: 660-665.
- Yu Lei, Qu Yi, Lin Guanyu, *et al.*. Design and study of an optical system for a far ultraviolet imaging spectrograph in 120~180 nm carried by satellite [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112011.
于 磊, 曲 艺, 林冠宇, 等. 120~180 nm 星载远紫外电离层成像光谱仪光学系统设计与研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112011.
- Yu Lei, Wang Shurong, Qu Yi, *et al.*. Single-grating optical system of imaging spectrometer with high resolution for ionosphere detection [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0712005.
于 磊, 王淑荣, 曲 艺, 等. 用于电离层探测的单光栅高分辨率成像光谱仪光学系统研究[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0712005.
- S Diebold, J Barnstedt, H-R Elsener, *et al.*. MCP detector development for WSO-UV [C]. SPIE, 2012, 8443: 84432X.
- Yu Lei, Lin Guanyu, Yu Xiangyang. Optical system of far ultraviolet spectrometer for space-based upper atmosphere remote sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0122001.
于 磊, 林冠宇, 于向阳. 空间高层大气遥感远紫外成像光谱仪的光学系统[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122001.
- B R Sandel, A L Broadfoot, C C Cris, *et al.*. The extreme ultraviolet imager investigation for the image mission [J]. Space Sci Rev, 2000, 91(1-2): 197-242.
- M Pfeifer, J Barnstedt, C Bauer, *et al.*. Low-power readout electronics for microchannel plate detectors with cross strip anodes [C]. SPIE, 2012, 8443: 84432O.
- G W Fraser, J F Pearson, J E Lees. Dark noise in microchannel plate X-ray detectors [J]. Nucl Instrum Meth A, 1987, 254(2): 447-462.
- David J Sahnou. Long term gain variation in the FUSE detectors [C]. SPIE, 2004, 5488: 731-737.
- O H W Siegmund. Preconditioning of microchannel plate stacks [C]. SPIE, 1989, 1072: 111-118.

栏目编辑: 何卓铭