

doi: 10.3788/gzxb20124106.0658

微通道板光子计数成像探测器预处理实验研究

尼启良¹, 卜绍芳^{1,2}, 刘世界¹, 何玲平¹, 张宏吉¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 空间一部, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:微通道板光子计数成像探测器是嫦娥三号极紫外相机的关键成像器件, 嫦娥三号极紫外相机被用于探测地球等离子层中极微弱的 He^+ 共振散射辐射, 为了消除微通道板内部吸附的残余气体产生的离子反馈等背景噪音对探测器微弱信号成像性能的影响, 需要对微通道板进行预处理. 预处理包括高温真空烘烤和紫外光电子清刷. 根据预处理的实验要求, 设计了一套微通道板预处理装置, 为微通道板预处理实验提供高真空环境和高温加热及保温功能. 本文详细介绍了微通道板预处理实验的实现过程, 对三片 Z 型级联的微通道板进行预处理实验后, 背景噪音由 $27.09 \text{ counts/s} \cdot \text{cm}^2$ 降低为 $0.53 \text{ counts/s} \cdot \text{cm}^2$, 空间分辨率达到 $125 \mu\text{m}$, 上述实验结果表明 MCP 在预处理之后其表面、亚表面和体内吸附的杂质气体得以有效去除, 获得了稳定的增益, 成像性能也得以改善.

关键词:微通道板; 预处理; 脉冲高度分布; 极紫外

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)06-0658-6

0 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, 目前主要通过监控等离子体层的结构及分布变化从而推导出地球磁层的变化情况. 嫦娥三号极紫外相机将用于在月球上拍摄地球等离子体层的图像, 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, 而微通道板 (Microchannel Plate, MCP) 在该波段具有较高的量子效率, 因此选择使用微通道板光子计数成像探测器来实现微弱光的探测. 再利用等离子体沿着线方向的叠加密度与散射光的强度成正比这一特性即可反推出等离子体的密度分布.

空间的极紫外辐射强度通常很弱, 甚至呈现单光子状态, 当在对极紫外成像探测时, 如果使用传统的 CCD 来成像, 信号可能会淹没在 CCD 本身的暗电流噪音中, 而微通道板光子计数成像探测器则可以通过位敏阳极和电子读出电路, 利用位敏探测和单光子计数技术来实现极微弱光辐射的成像探测.

目前微通道板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], 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

形阳极的微通道板成像探测器^[2]. 和国外相比, 国内的微通道板光子计数成像探测器所使用的阳极主要为楔条形阳极, 国外则使用了延迟线阳极、楔条形阳极、交叉条纹阳极和游标阳极等多种位敏阳极. 楔条形阳极相比于其他位敏阳极^[3]具有制作简单、空间分辨率高、相应的位置读出电路较易设计等优点.

微通道板、位敏阳极和位置读出电路都在一定程度上制约了微通道板光子计数成像探测器的成像分辨率特性, 但当探测器这些主要组成部分在制作完成之后, 微通道板的残余气体噪音就成为了探测器的主要噪音来源之一. 本文将主要研究用微通道板预处理法去除残余气体, 并通过对比预处理前后微通道光子计数成像探测器的分辨率、暗噪音等特性, 来证明预处理后探测器将获得稳定的增益, 并具有更高的分辨率和极低的噪音, 从而实现微通道板光子计数成像探测器对极微弱光的精确探测.

1 探测器的结构原理及影响像质的主要因素

1.1 探测器的结构原理及其主要组成部分

MCP 光子计数成像探测器的结构原理如图 1, 主要由微通道板堆 (MCP stack)、楔条形位置灵敏阳极 (Wedge and Strip Anodes, WSA) 和位置读出电路三部分组成.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61077016) 资助

第一作者: 尼启良 (1966-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为软 X 射线和紫外波段空间应用二维光子计数成像探测器. Email: niqiliang@yahoo.com

收稿日期: 2011-11-22; **修回日期:** 2012-02-03

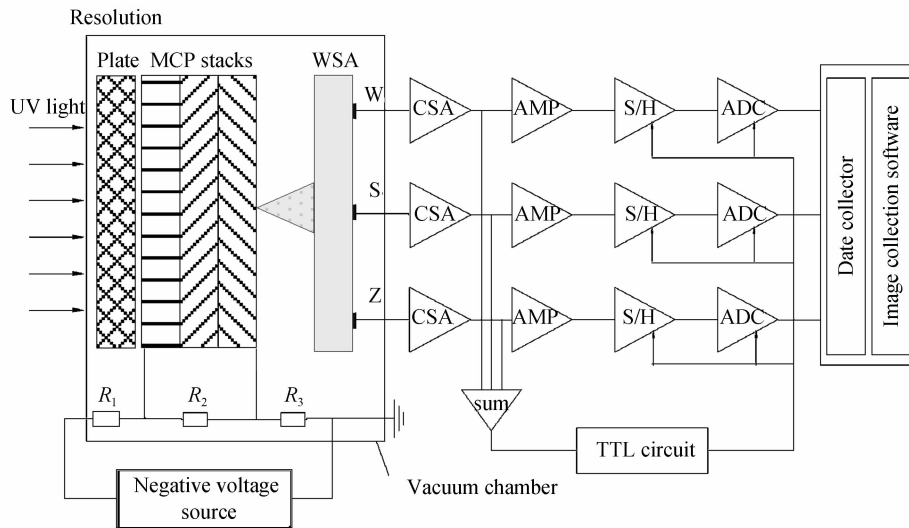


图1 MCP光子计数成像探测器结构原理图
Fig.1 The structure of MCP photon counting imaging detector

电子经MCP倍增后输出的信号被楔条形阳极收集,这个信号再经过随后的位置读出电路,数据采集卡,图像采集软件对信号数据进行存储、传输以及处理.其中位置读出电路^[4]由电荷灵敏前置放大器(CSA)、整形放大器(AMP)、峰值保持电路(S/H)、模数转换器(ADC)以及主要用于去掉叠加脉冲的晶体管逻辑电路(TTL电路)组成.对微通道板光子计数成像探测器进行成像实验时,在微通道板前面安置分辨率板,如图1,通过观察分辨率板成像质量来判断系统的分辨率.

微通道板^[5]是由上百万根微米量级的空心玻璃管熔阵列排列而成的薄圆片,每一个空心管通道相当于一个连续的打拿极倍增器,通道内壁涂有次级发射材料,MCP前后表面镀有金属膜电极,在工作时,薄片两端面上加上高压,由于MCP本身的高阻特性,因此产生的电流很微弱,于是在通道两端形成了很强的电场.当电子、带电粒子、高能光子进入通道后,在外加电场作用下,带有了能量,碰撞通道壁将会产生二次电子,并在电场作用下不断被加速,反复碰撞管壁,电子得到倍增.

楔条形位敏阳极主要作用是接收并感应从微通道板堆输出的电荷信号,考虑到微通道板和阳极收集器之间有效面积的匹配,实验选用圆形的感应型WSA.实验所用的WSA结构如图2,细的绝缘沟道将其分割成楔形(Wedge, W)、条形(Strip, S)、之字形(Zigzag, Z)三个电极.在每个周期里面, W电极面积随Y值线性变化, S电极面积随X值线性变化; Z电极覆盖剩余的周期面积.电子云的质心位置^[6]由式(1)和式(2)给出.

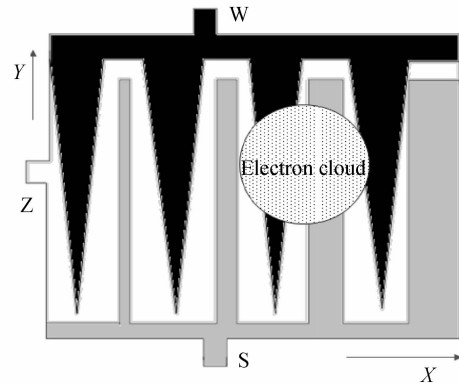


图2 WSA结构
Fig.2 The structure of WSA

$$x = \frac{2Q_s}{Q_w + Q_s + Q_z} \tag{1}$$

$$y = \frac{2Q_w}{Q_w + Q_s + Q_z} \tag{2}$$

式中 Q_w 、 Q_s 、 Q_z 为阳极的三个电极收集到的电荷量.

当电子云落在 WSA 右侧时,条形电极面积大可收集到的电荷也多,表现为较大的 X 值.同理,落在偏上位置面积较大的楔形电极可收集的电荷增多,表现为较大的 Y 值.

根据楔条形阳极的工作原理建立理论模型并编程实现仿真模型,通过楔条形阳极的位置解码公式计算出电子云质心位置,经过大量采集光子,最后统计得到仿真目标的图像.

1.2 影响探测器像质的主要因素及其解决方法

MCP 是以二氧化硅为基本骨架的三维结构,由于一些碱性氧化物的引入,晶格结构遭到破坏,从而形成不稳定的结构特性,很容易吸附气体,如 H_2 ,

H_2O , CO_2 和 NO_2 等^[7]. 另外, MCP 内还含有一定量的金属氧化物, 为使微通道内壁具有良好的二次电子发射特性, 一般都要进行高温氢还原. 进行氢处理工艺时, 金属氧化物被还原, 一些低分子量的原子会移动到表面, 高温下皮料玻璃中的碱也会析出, 这些物质处于空气中会被氧化, 最终在 MCP 表面形成一些金属氧化物的污染物. 除此之外, MCP 在制作过程中还不可避免的遭受水、尘埃、有机物、无机物等杂质污染^[8].

有一些颗粒性杂质在 MCP 出厂之前已经被清除, 但是仍有大量残余气体渗透在 MCP 表面、亚表面及其体内, 在电子倍增过程中, 气体分子被电离, 这些带电离子经过电子倍增, 将会形成离子反馈噪音. 由于残余气体噪音是微通道板堆的主要噪音之一, 然而由于 MCP 特殊的微孔阵列结构, 使得一般的清洗方法无法达到孔内, 为此本文对 MCP 进行预处理以去除残余气体.

2 MCP 的预处理

MCP 预处理包括真空高温烘烤和紫外光电子清刷. 为实现高温烘烤, 本文研制了一套微通道板预处理装置, 该装置不仅可以提供 10^{-5} Pa 的真空环境, 还具有加热保温的功能, 微通道板的高温烘烤和电子清刷均在该真空装置内完成. 实验装置实物如图 3 所示.

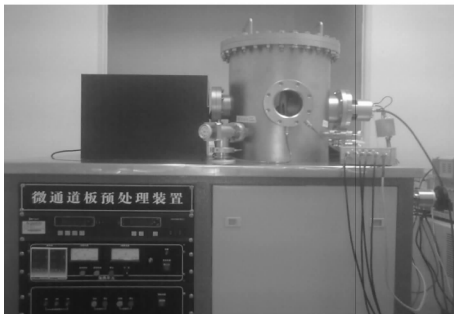


图 3 MCP 预处理装置

Fig. 3 The photo of MCP preconditioning equipment

实验所用三片 MCP 以 Z 型方式级联, 这种排列结构使得 MCP 在增大电子与通道的碰撞几率以提高增益的同时, 在一定程度上也可以抑制离子反馈. 电子清刷选用光源为发射 253.7 nm 紫外波段光的氙灯.

2.1 MCP 的高温烘烤

在真空度达到并稳定在 10^{-5} Pa 之后, 将 MCP 加热到 350°C 时, 并保温 18 h, 随后停止加热, 使之自然冷却. 烘烤过程中, 发现随温度升高, 真空室内真空度急剧降低, 随着烘烤进行, 真空度又会慢慢恢复并重新稳定在 10^{-5} Pa, 在没有 MCP 的时候对真

空室进行同样的烘烤, 真空度几乎没有起伏, 说明 MCP 中有残余气体并被真空泵抽走. 尽管烘烤除去了部分的残余气体, 由于 MCP 特殊的结构, 使得吸附在 MCP 内部的残余气体不能完全解析出来, 因此需要经过紫外光电子清刷来实现.

2.2 电子清刷过程

利用 MCP 在增益饱和时有解析和电离气体的特点, 通过调节 MCP 分压使其工作在饱和状态, 利用电子清刷对其进一步除气. 此时 MCP 的出射电流大约为 $0.2 \mu\text{A}$, 实验选用吉时利公司 6485 型号的皮安表来测量阳极的出射电流.

电子清刷原理如图 4, 氙灯发射的紫外光照射 MCP, 经微通道实现电子倍增后在通道输出端出现大量的电子, 电子轰击过程中解析出的残留气体被输出端这些电子电离, 电离出的正离子在电场的作用下反向加速轰击微通道内壁, 产生更多的二次电子, 这样在入射电流不变的情况下, 将获得更大的出射电流, 这就是“伪增益”的形成.

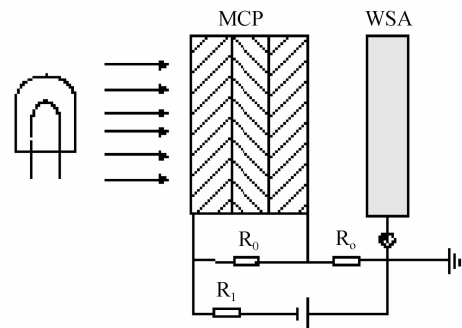


图 4 电子清刷示意图

Fig. 4 The diagram of burn-in procedure

随着电子清刷的进行, 真空室内产生的离子、分子不断被真空泵抽走, 真空度降低, 出射电流值也会下降. 因此需要不断调大电压来保持出射电流值不变. 当压强稳定, 出射电流值基本不变时, 说明 MCP 增益趋于稳定, 杂质气体已去除较彻底, 此时累积出射电量约为 $0.06 \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2}$, 电子清刷完成.

3 实验结果和对比

为了检验预处理的除气效果, 实验分别对比了预处理前后的脉冲高度分布, 暗计数率和暗噪音分布以及图像分辨率.

3.1 MCP 的脉冲高度分布特性

由于在微通道内部的电子碰撞具有无序性, 因此输出电子云大小也是不均匀的. 对这些电子云大小的统计分布即脉冲高度分布 (Pulse Height Distribution, PHD), 脉冲高度分布曲线如图 5 所示. 当 MCP 工作在低增益状态时, 脉冲高度分布呈负指数分布, 随着 MCP 两端分压增大, MCP 增益

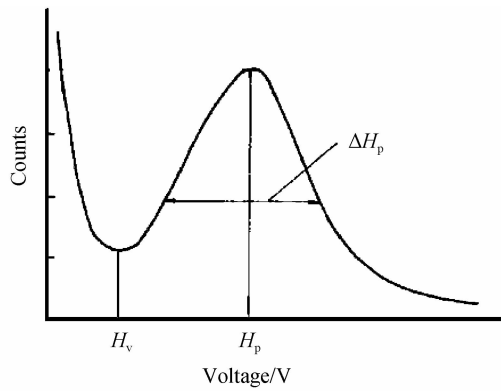


图 5 MCP 的脉冲高度分布
Fig. 5 The PHD of MCP

增大,由于 MCP 微通道输出端的空间电荷饱和效应和静电场的变化,使得电子云尺寸变得更为均匀,此时脉冲高度分布呈准高斯分布^[9]. 其中,“能量分辨率(R_E)”是评价脉冲高度分布特性的好坏的一个重要特征参量^[10],其表达式为

$$R_E = \frac{\text{PHD 峰半高度}}{\text{PHD 峰脉冲高度}} = \frac{\Delta H_p}{H_p}$$

具体参量含义如图 5 所示,显然 R_E 越小,光子计数成像系统的性能越好. 实验测得预处理前后的脉冲高度分布如图 6、7 所示. MCP 光子计数成像探测器的能量分辨率 R_E 在预处理后从 1.488 降低到 1.024,信号的能量分布相对集中,增益特性得到改善.

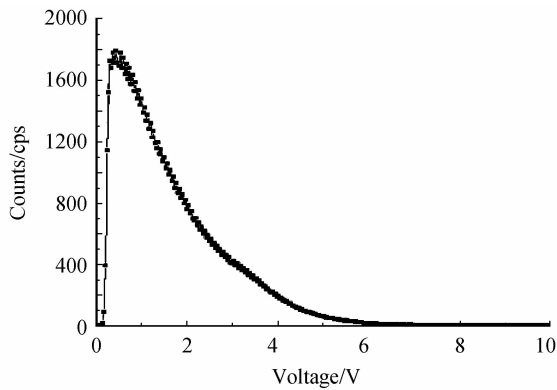


图 6 MCP 预处理前脉冲高度分布
Fig. 6 The PHD of MCP before preconditioning

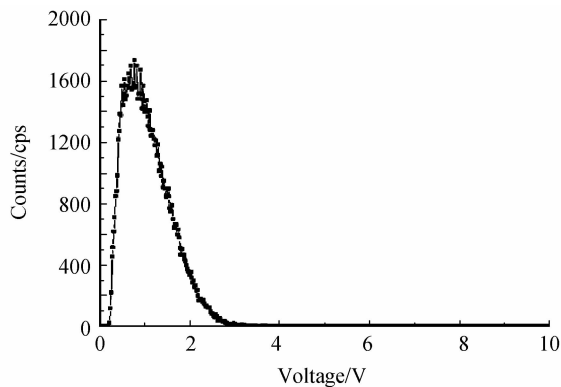


图 7 预处理后脉冲高度分布
Fig. 7 The PHD of MCP after preconditioning

3.2 MCP 的噪音源

MCP 在二次电子倍增过程中,会存在和产生一些背景噪音,如 MCP 本身热电子发射数涨落引起的热噪音、残余气体产生的离子反馈噪音、宇宙射线辐射噪音、MCP 材料中放射性元素⁴⁰K 产生的辐射噪音、来源于器件内部件间的场致发射而导致的固定闪烁点等. 但是,这些噪音和位于中能区的信号相比,分布在不同的能区,上述列举的噪音中,除了热噪音分布在低能区外,其余均分布在高能区.

通常情况下,微通道板残余气体的正离子反馈噪音较信号具有较高的能量^[11],从图 6 可以看出高能区的脉冲数较图 7 要多,即图 6 在 高能区有较大的展宽,表明预处理前 MCP 存在某种程度的离子反馈^[12],而预处理除气之后,从图 7 可以看到,脉冲高度分布曲线变窄并更接近于高斯分布,说明预处理后微通道板的残余气体离子反馈得到了较好的抑制.

预处理前后噪音的图像如图 8 所示,预处理前,暗噪音明显,暗计数较多,暗计数率为 27.09 counts/s · cm²,经过预处理后,暗计数率降到 0.53 counts/s · cm²,暗计数明显降低,由于预处理主要是除气处理,这也表明 MCP 的噪音来源主要是吸附在 MCP 内部的残余气体的离子反馈噪音.

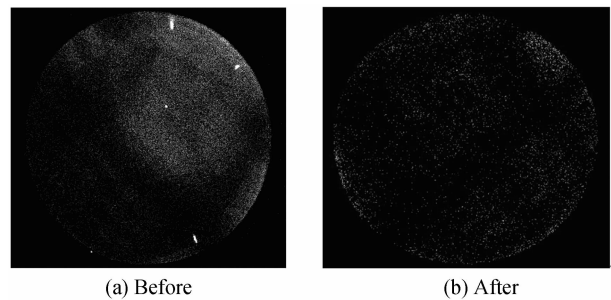
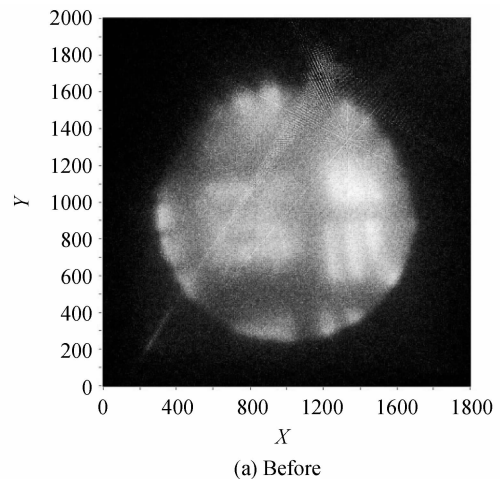


图 8 预处理前后暗噪音分布图像
Fig. 8 The dark noise image before and after preconditioning

3.3 MCP 的成像分辨率

实验利用平行光管产生的准直光束对美国空军标准分辨率标板(USAF1951)成像,图 9 分别为预



(a) Before

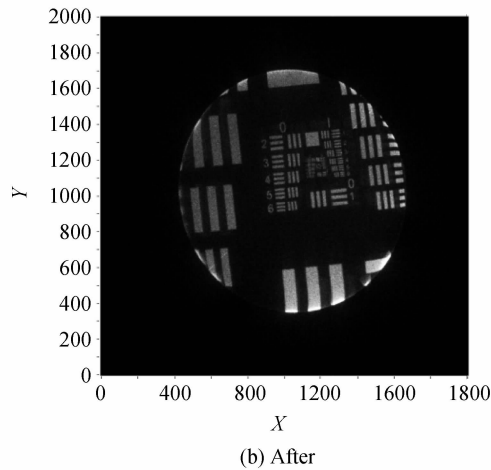


图9 预处理前后分辨率板图像

Fig.9 The resolution image before and after preconditioning
 处理前后分辨率板的图像,预处理前图像模糊难辨,预处理后图像清晰可辨,空间分辨率达到 $125\ \mu\text{m}$,说明预处理除气较彻底.

4 结论

通过对比预处理实验前后数据,可知微通道板最主要的噪音来源于微通道板的离子反馈噪音,经过预处理除气后的微通道板截面上的暗计数率由 $27.09\ \text{counts/s} \cdot \text{cm}^2$ 降至 $0.53\ \text{counts/s} \cdot \text{cm}^2$,脉冲高度分布变窄并进一步接近高斯分布,离子反馈明显被抑制.另外,空间分辨率有明显改善,可以达到 $125\ \mu\text{m}$,上述数据完全满足极紫外相机的成像性能要求.实验结果表明:在经过 18 h 的 350°C 真空烘烤以及累计出射电量达到 $0.06\ \text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的电子清刷以后,微通道板的预处理效果明显,除气较彻底.

参考文献

[1] SIEGMUND O H W. Advances in microchannel plate detectors for UV/visible astronomy[C]. *SPIE*, 2003, **4854**: 181-190.
 [2] WANG Guang-ming, ZHAO Bao-sheng, WEI Pei-yong, *et al.* The research of WSZ extreme ultraviolet detector and the data acquisition circuits[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35** (12): 1823-1826.

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.

- [3] LIU Yong-an, ZHAO Bao-sheng, ZHU Xiang-ping, *et al.* Analysis and testing of wedge-and-strip anode detector characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 750-755.
 刘永安,赵宝升,朱香平,等. 楔条形阳极探测器的性能测试与分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 750-755.
 [4] NI Qi-liang, LIU Shi-jie, CHEN Bo. Investigation on extreme ultraviolet photon-counting imaging detector with position-sensitive anode[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(1): 36-40.
 刘世界,陈波. 极紫外位置灵敏阳极光子计数成像探测器[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(1): 36-40.
 [5] WIZA J L. Microchannel plate detectors [J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1979, **162**(1): 587-601.
 [6] MARTIN C, JELINSKY P, LAMPTON M, *et al.* Wedge-and-strip anode for centroid-finding position sensitive photon and particle detectors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1981, **52**(7): 1067-1074.
 [7] PAN Jing-sheng. Microchannel plate and its main characteristics[J]. *Applied Optics*, 2004, **25**(5): 25-29.
 潘京生. 微通道板及其主要特征性能[J]. *应用光学*, 2004, **25** (5): 25-29.
 [8] WANG Yi-jun, YAN Cheng, ZENG Gui-lin, *et al.* Microchannel plate cleaning technique[J]. *Process Technique and Materials*, 2007, **32**(5): 413-416.
 王益军,严诚,曾桂林. 微通道板清洗技术[J]. *工艺技术与材料*, 2007, **32**(5): 413-416.
 [9] SIEGMUND O H W, VALLERGA J, WARGELIN B. Background events in microchannel plate [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1988, **35**(1): 524-528.
 [10] HUANG Jun-liang. MAMA ultraviolet detector system and high gain MCP(2)[J]. *Infrared Technology*, 1996, **19**(7): 43-45.
 黄钧良. MAMA 紫外探测器系统与高增益 MCP(2)[J]. *红外技术*, 1996, **19**(7): 43-45.
 [11] 向世明,倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2006, 300-305.
 [12] SIEGMUND O H W. Preconditioning of microchannel plate stacks[C]. *SPIE*, 1989, **1072**: 111-118.

Preconditioning Experiment Research of Microchannel Plate Photon Counting Imaging Detector

NI Qi-liang¹, BU Shao-fang^{1,2}, LIU Shi-jie¹, HE Ling-ping¹, ZHANG Hong-ji¹

(1 *Space A, Changchun Insititute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(2 *Graduated University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A preconditioning process encompassed vacuum baking and burn-in with ultraviolet radiation. An equipment of preconditioning of microchannel plate was designed which could provide vacuum environment (10^{-5} Pa at least) as well as heating elements. The heating elements were controlled to reach 350°C and then the vacuum chamber was sustained 350°C for 18 hours in the procedure of bake-out. The burn-in procedure illuminating with ultraviolet radiation (253.7 nm) from a deuterium lamp was achieved when 0.06 Coulomb cm^{-2} was extracted from the MCP stack output. After the preconditioning the image spatial resolution reached to $125\ \mu\text{m}$, the background events rate dropped to be 0.53 counts/s $\cdot\ \text{cm}^2$ from 27.09 counts/s $\cdot\ \text{cm}^2$, the pluse height distribution curve closed to Gauss distribution and turned to be more narrow.

Key words: Microchannel plate; Preconditioning; Pluse height distribution; Extreme ultraviolet