

doi: 10.19855/j.1000-0364.2020.066004

柱面微通道板的制备及其性能研究

尼启良¹, 姜忠志^{1,2}, 刘文光², 王惟彪², 蒲冬冬³, 潘京生³, 张 蓉³, 孙建宁³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049 3. 昆明物理研究所, 昆明 650223)

摘 要: 针对未来空间天文学应用的超分辨率光谱成像仪器的需求, 对低噪声柱面微通道板 (MCP) 的制备方法及其性能进行了研究. 提出了一种将光学抛光与热成型相结合的新的柱面 MCP 制备方法, 利用不含放射性元素的低噪声 MCP 玻璃, 制备出曲率半径为 400 mm、尺寸为 30 mm × 46 mm、长径比为 80:1、通道直径 12.5 μm、通道间距 15 μm 的柱面 MCP, 并将其与感应电荷楔条形阳极 (WSA) 组成光子计数探测器, 对其暗计数率、分辨率进行了检测. 暗计数率约为 0.1 counts/cm² · s.

关键词: 柱面微通道板; 低噪声; 光子计数成像探测器

中图分类号: O436 文献标识码: A 文章编号: 1000-0364(2020)06-0974-06

The fabrication and properties of cylindrical microchannel plate

NI Qi-Liang¹, JIANG Zhong-Zhi^{1,2}, LIU Wen-Guang², WANG Wei-Biao²,
PU Dong-Dong³, PAN Jing-Sheng³, ZHANG Rong³, SUN Jian-Ning³

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: In order to meet the needs of super-resolution spectral imaging instruments in future Chinese space astronomy applications, the fabrication method and performance of low noise cylindrical microchannel plate (MCP) were studied. A new method for preparing cylindrical MCP by combining optical polishing with thermal forming is proposed. Using low noise MCP glass without radioactive elements, cylindrical MCPs with curvature radius of 400 mm, size of 30 mm × 46 mm, length-diameter ratio of 80:1, channel diameter of 12.5 μm and channel spacing of 15 μm is fabricated. A photon counting detector with inductive charge wedge-strip anode (WSA) and cylindrical MCP stack was constructed. cylindrical MCP stack dark count rate and resolution were measured. The dark count rate was about 0.1 counts/cm² · s.

Key words: Cylindrical microchannel plates; Low noise; Photon-counting imaging detector

1 引 言

随着我国空间科学技术的迅速发展, 对 X 射线-紫外波段光子计数成像探测器也有了迫切的需求. 已经立项的“风云三号”有效载荷全球紫外成像光谱仪, 目的在于探测全球电离层在 83.4 nm、130.4 nm、135.6 nm、143 nm 的辐射.

世界空间紫外天文台是由俄罗斯主导、中国及欧洲共同参与研制波段范围在 102 nm ~ 320 nm 之间的综合性大型空间紫外望远镜, 其中我国负责研制长狭缝高分辨率成像光谱仪, 这些工程任务的实现都离不开 X 射线-紫外波段的光子计数成像探测器, 尤其是使用基于罗兰圆结构的高分辨率成像光谱仪, 其焦平面是柱面, 需要使用曲率半径与罗兰圆

收稿日期: 2020-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61675201, 61275152); 吉林省科技发展规划(20160204064GX, 20190302062GX); 国家重点研发计划项目(2018YFB1801900)

作者简介: 尼启良(1966—), 男, 研究员, 博士研究生导师. 研究方向: 软 X 射线-紫外波段空间应用光子计数成像探测器.
E-mail: qiliangni@qq.com

半径相匹配的柱面 MCP 光子计数成像探测器, 以便消除所用光学系统像差的影响, 实现成像光谱仪的超高分辨率. 上面提到的仪器都要求很高的灵敏度, 而灵敏度主要是由 MCP 的暗计数率决定的, 例如, 长狭缝高分辨率成像光谱仪要求所用 MCP 的暗计数率达到 $0.1 \text{ count}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ [1-2], 需要使用所谓的低噪声 MCP, 国内现有的平面 MCP 的暗计数率通常是几个到十几个 $\text{count}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 远远不能满足要求. 从国外能购买到的 MCP 暗计数率厂家通常给的是 $3 \sim 5 \text{ count}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ [3-4], 因此, 自行研制低噪声柱面 MCP 来满足我国空间任务的需求势在必行. 柱面 MCP 光子计数位置灵敏成像探测器最早用于美国卫星 ORFEUS 上的极紫外 (EUV) - 远紫外 (FUV) 高分辨率成像光谱仪, 工作波段范围 $39 \sim 120 \text{ nm}$, 探测器像元分辨率 $30 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, 最高计数率 20 kcounts/s , MCP 曲率半径 540 mm , 尺寸 $95 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, 长径比 $120: 1$, 13° 斜切角, 使用延迟线 (DDL) 阳极, 此后相继应用在美国 FUSE 卫星的 FUV 光谱仪 (工作波段范围: $90 \sim 120 \text{ nm}$, 探测器像元分辨率 $20 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, 最高计数率 40 kcounts/s , MCP 曲率半径 826 mm , 尺寸 $95 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 长径比 $80: 1$, 13° 斜切角, 螺旋延迟线 (HDDL) 阳极, 美国的 Rosetta 和 HORIZON 卫星的 FUV 光谱仪, 工作波段范围: $70 \sim 205 \text{ nm}$, 探测器像元分辨率 $34 \mu\text{m} \times 625 \mu\text{m}$, 最高计数率 30 kcounts/s , MCP 曲率半径 75 mm , 尺寸 $46 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 长径比 $80: 1$, 13° 斜切角, DDL 阳极), 以及美国的 COS 卫星的 FUV 光谱仪 [5-7] (工作波段范围 $115 \sim 177.5 \text{ nm}$, 探测器像元分辨率 $25 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, 最高计数率 15 kcounts/s , MCP 曲率半径 826 mm , 尺寸 $85 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 长径比 $80: 1$, 19° 斜切角, XDL 阳极) 等天文仪器. 针对我国未来空间天文仪器对低噪声柱面 MCP 的需求, 本文给出了我们与北方夜视南京分公司 [8] 合作研制的柱面微通道板制备的新方法, 并使用现有的楔条形阳极数据采集系统对制备出的柱面 MCP 的暗噪声及其成像性能进行了检测.

2 柱面 MCP 的制备

2.1 低噪声 MCP 玻璃制备及玻璃物化性能的研究

降低探测器的背景事件率是提高天体物理学仪器的灵敏度的一个有效方法. 在 MCP 探测器中, MCP 通道内吸附的残余气体分子的电离反馈

和 MCP 玻璃中的 ^{40}K 和/或 ^{87}Rb (取决于制作 MCP 玻璃的成份) 的 β 衰变的残余辐射是 MCP 的背景事件本原的主要贡献者, 前者可随着在真空中的时间增加而衰退, 并且通过真空烘烤和电子清刷可有效降低甚至消除, 但后者与探测器的电压、时间和温度都不相关, 是自始至终都有的. 因此针对光子计数探测应用的 MCP 必须采用一种无放射性同位素含量的低噪声玻璃来制作.

通道电子倍增器对基体材料性能的最基本和必需要求是一个微弱的电导性和合适的二次发射特性, MCP 的电子发射和电导特性很巧妙的来自于烧氢处理这一过程. MCP 玻璃成份的 PbO 组分经过表面还原形成金属的铅粒子, 此为导电机理的基础, 同时碱金属成份在 MCP 基体材料成份中的存在是 MCP 的增益的主要贡献者.

常规 MCP 的玻璃中的碱金属成份通常都包含一定含量的 K 或 Rb, 以 Na 和/或 Cs 和/或 Li 替换了原来玻璃中的 K 和/或 Rb 成份, 可能会造成基体材料二次电子发射特性的变化, 并且玻璃的成份变化还会带来玻璃的一系列物化性能的改变, 将对 MCP 的制作工艺带来很大改变, 所有的制作工艺都要随玻璃的温度粘度关系和化学稳定性的改变而改变, 随之会对 MCP 的制作工艺和最终性能带来根本性的变化.

因此, MCP 成份的调整和改变是在受多方因素影响和制约下的寻求平衡的提高, 在不能破坏这些制约框架下如何寻求突破. 因此研制出一种无放射性同位素的低噪声玻璃, 在结合 MCP 的制作工艺和可接受的性能要求的同时, 同时应在电导性、二次发射特性、化学稳定性, 以及芯皮玻璃的粘度匹配上, 进行综合平衡和互补. 通过对玻璃成份配比的研究, 完成了无钾铷成份的 MCP 玻璃成份的优化设计、制备和物化性能研究, 这种低噪声 MCP 玻璃 (玻璃牌号 NGC) 的实际配比成份如表 1 所示.

表 1 低噪声 MCP 玻璃成份

Table 1 Composition of low noise MCP glass

Oxide	SiO ₂	PbO + Bi ₂ O ₃	Na ₂ O + Cs ₂ O	TiO ₂ + Gd ₂ O ₃ + BaO + Al ₂ O ₃
mol%	65	20.5	3	11.5

玻璃的制备采用的是 2L 铂金坩埚, 装入原料后在中性气氛下置于硅钼棒电阻炉中, 经过玻璃网络体形成、玻璃液澄清和均化过程, 将玻璃液浇注到成型模具内徐冷, 使其固化成型为 $\Phi 125 \times$

200 mm 的柱体. 然后将玻璃柱毛坯放入一个带成型模具的耐热不锈钢圆柱套筒中, 然后装入到玻璃管挤压机的炉子中, 缓慢升温到玻璃的软化温度, 并在这个温度保持足够时间使玻璃充分吸热, 然后通过油压千斤顶施加压力, 从模具中挤压而出的玻璃管, 在一个牵引轮牵引下形成满足特定尺寸规格要求的玻璃管.

MCP 玻璃是由两种玻璃制作而成, 即含有碱金属成份的铅硅酸盐玻璃皮料管和酸溶玻璃芯棒. 这两种不同组分的玻璃首先被制备成具有特定尺寸 of 的玻璃管、玻璃棒, 然后通过玻璃复丝纤维拉制过程, 熔合纤维光学制作、酸蚀除芯处理和氢还原处理等, 制作成 MCP. 与其相匹配的芯玻璃为 X-7, 两者的温度粘度曲线见图 1 所示.

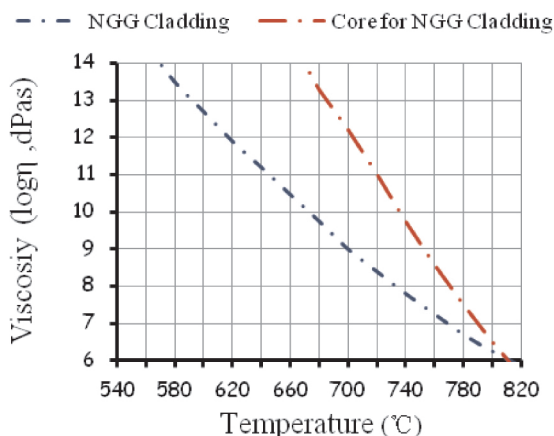


图 1 低噪声 MCP 玻璃及其芯玻璃的温度粘度曲线
Fig. 1 Temperature - Viscosity Curves of Low Noise MCP Glass and Its Core Glass

2.2 低噪声柱面 MCP 制备

传统 MCP 制作方法通常起始于两种玻璃, 一种含有碱金属成份的铅硅酸盐玻璃皮料管和一种酸溶玻璃芯棒, 通过玻璃复丝纤维拉制过程、熔合纤维光学制作, 酸蚀除芯方法和氢还原处理方法, 制成低噪声 MCP. 因此低噪声 MCP 制作方法, 与常规 MCP 的制作方法相比, 其唯一的不同是就其皮玻璃是一种不含钾铷组分的玻璃.

平面 MCP 样品的制作过程包含有可腐蚀芯玻璃和碱铅硅酸盐皮玻璃的单丝复合纤维, 通过一个芯皮玻璃的管棒组合拉制而成, 起始的芯/皮组合的几何尺寸决定最后的通道间距和通道壁厚. 这些单丝纤维以六边阵列排列, 然后被拉制成六边形复丝, 这些复丝排列在一个金属模具中经热压熔合成屏段. 然后这个屏段以一定角度斜切成一定厚度的薄片. 然后经滚圆、倒边、研磨、抛光, 制成 MCP

毛坯板. 通过化学腐蚀除去可酸溶芯玻璃形成通道. 进一步的化学处理是一个高温的氢还原过程, 铅离子在铅硅酸盐玻璃通道的浅表面层被还原成自由金属原子, 在 MCP 通道上形成一个薄的电导膜层, 产生电子倍增器在其通道内所需要的电导和电子发射表面特性. MCP 制作工艺流程图 2 所示.

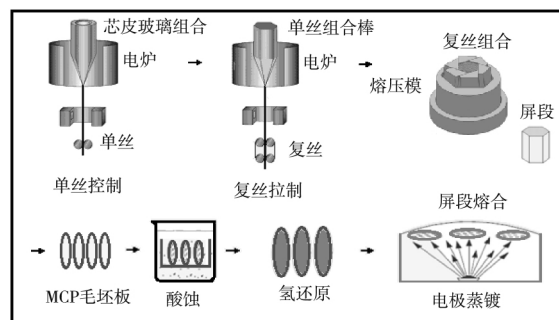


图 2 MCP 制作工艺流程图

Fig. 2 Flow chart of MCP fabrication process

关于柱面 MCP 制备装置的方面的研究在国内外还没有公开的报道, 对于曲面 MCP 的制备方法, 国外相关文献仅提到光学加工及抛光方法, 制备出的柱面 MCP 虽然有精确的曲率半径, 但由于 MCP 使用时有一个斜切角, 导致所制备的柱面 MCP 表面有不同的长径比 (MCP 厚度与通道直径的比值), 而 MCP 的长径比决定 MCP 的增益, 因此, 用这种方法制备的柱面 MCP 的增益是不均匀的. 为了克服这一缺点, 本文提出了将光学加工抛光与热成型相结合的制备方法, 即首先将平面实芯 MCP 毛坯板用热成型的方法加工成具有一定曲率半径的柱面实芯 MCP 毛坯板, 然后用光学抛光的方法将其加工成具有需要曲率半径的柱面实芯 MCP 毛坯板, 这是一种新的方法, 国内外相关文献没有报道过, 此方法的优点是制备的柱面实芯 MCP 既具有精确的曲率半径又具有相同长径比.

本文根据图 1 低噪声 MCP 玻璃及其芯玻璃的温度粘度曲线, 设计了一台高真空高温加热炉, 使用特殊的热弯曲模具将平面实芯 MCP 毛坯玻璃在此炉内加工成具有需要曲率半径的实芯 MCP 毛坯玻璃, 可以避免玻璃在高温加热过程中的氧化, 因此避免了对成品柱面 MCP 性能的影响. 图 3 是所制备的曲率半径 400 mm、尺寸 30 mm × 46 mm、长径比 80: 1、通道直径 12.5 μm、通道间距 15 μm 的柱面 MCP 成品的照片.

3 柱面 MCP 的性能检测

将预处理过的三片柱面 MCP 组成 Z 型结构,

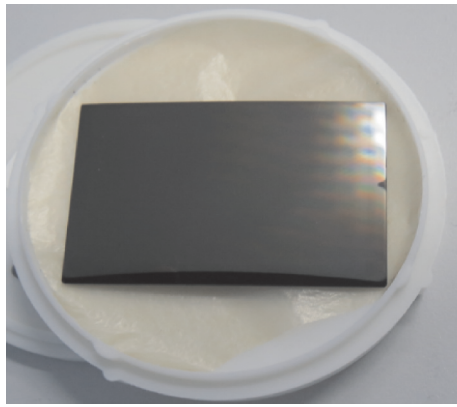


图 3 柱面成品 MCP 照片

Fig. 3 Cylindrical finished MCP photo

并与感应电荷楔条形阳极(WSA) 一起构成光子计数成像探测器, 此时 MCP 堆工作在脉冲计数模式. 采集的暗计数图像, 分析暗计数率的来源, 测量暗计数的脉冲高度分布及暗计数率, 测量探测器空间分辨率. 图 4 给出了柱面 MCP 二维感应电荷位置灵敏阳极成像探测器测试系统结构示意图.

该系统主要包括能产生准直紫外光束的光学系统、置于高真空系统内的感应电荷 WSA 位置灵敏阳极单光子计数成像探测器及其后续的位置读出电路三个部分. 由于 MCP 对紫外光有响应, 所以紫外光源通常用作与工作波段无关的性能检测

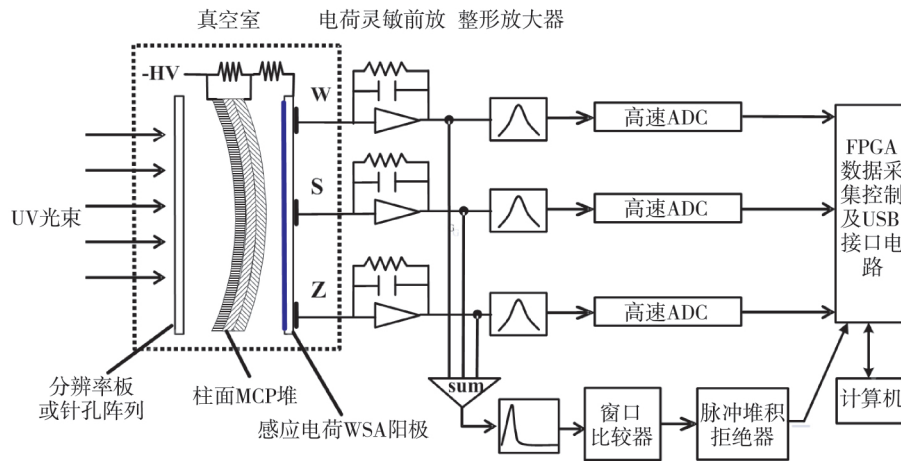


图 4 柱面 MCP 探测器性能测试系统结构示意图

Fig. 4 Structural schematic diagram of cylindrical MCP detector performance test system

的光源. 以针孔阵列或 USFA1951 分辨率板作为探测器成像性能检测物体. 一个输出为负高压的高压电源通过分压电阻为 MCP 堆和阳极提供高压. 单光子在感应电荷 WSA 阳极产生的脉冲信号经过电荷前置放大器变成电压信号, 这些信号有些是叠加在一起的, 需要整形放大器将叠加在一起的脉冲分开并进一步放大. 同时, 将前置放大器输出信号求和后送入一个快的整形放大器, 然后经过窗口比较器产生一个脉冲宽度为几十纳秒的 TTL 脉冲, 此脉冲通过一个脉冲叠加拒绝电路去掉叠加的脉冲, 不叠加的脉冲被用于产生控制 FPGA 的 TTL 脉冲, 这样来自 W、S 和 Z 的信号同时经过一个 FPGA 数据采集控制电路及 USB 接口送入计算机, 再由软件计算出 (X, Y) 坐标, 并将图像显示在计算机屏幕上. 整个电路的最高计数率可以达到 200 kcps.

3.1 MCP 堆脉冲高度分布 (PHD)

对于位置灵敏阳极探测器, 其分辨率与 MCP 堆的增益成正比, 对探测器的脉冲高度分布进行

测量是优化探测器性能的关键. 因为从脉冲高度分布曲线可以获得如下信息: 一是从不同高压下的脉冲高度分布曲线可以获得 MCP 堆在不同高压下的增益, MCP 堆的增益越高, 探测器的分辨率越高; 二是可以获得脉冲高度分布曲线的 FWHM, ($PHD = W/G$, G 代表脉冲高度分布曲线的峰值, 也是该高压下 MCP 堆的增益, W 是曲线的 FWHM 宽度), FWHM 越小, 探测器的整体计数率越高. 通过优化 MCP 像增强器的整体性能, 可以获得最小的 FWHM 及其对应的 MCP 增益和加在其两端的高压数值. 图 5 给出了在 MCP 堆两端加不同高压时, 阳极输出的脉冲高度分布的变化情况. 图 6 是在这些高压下 MCP 堆增益与 PHD 的关系曲线.

3.2 暗计数

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. 因 β

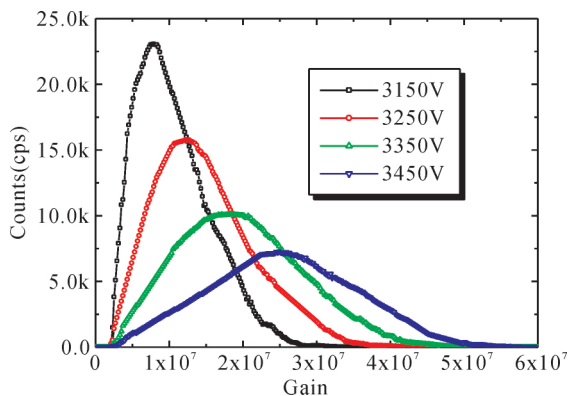


图 5 不同高压下 MCP 堆的输出脉冲高度分布
Fig. 5 PHD of MCP stack at Different High voltage-applied to MCP

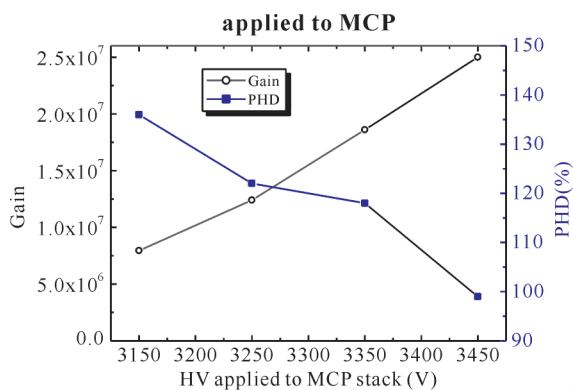


图 6 不同高压下的 MCP 堆增益 (gain) 及 PHD
Fig. 6 MCP stack gain and PHD at different high voltage applied to MCP stack

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。所制备的低噪声玻璃不含钾元素，其成分为 65% SiO₂、20.5% (PbO + Bi₂O₃)、3% (Na₂O + Cs₂O) 和 11.5% (TiO₂ + Gd₂O₃ + BaO + Al₂O₃)，因此，去除了因β射线引起的暗计数，有效降低了 MCP 的暗噪声。图 7 是采集的暗噪声图像，通过设定采集的光子数，并测量图像的采集时间，获得的暗计数率小于 0.1 counts/(s · cm²)，如图 8 所示。加在 MCP 堆两端的电压为 -3450 V，MCP 出射面与感应电荷 WSA 阳极之间的电压为 -300 V，对应 MCP 堆增益约为 2.5 × 10⁷ 电子。

3.3 空间分辨率

探测器的空间分辨率是衡量其性能的重要指标。测量方法是使用紫外准直光束照明放置在探测器前面零距离处的 USAF1951 空间分辨率板，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，如图 9 所示，右测图是局部放大图像，从局部放大

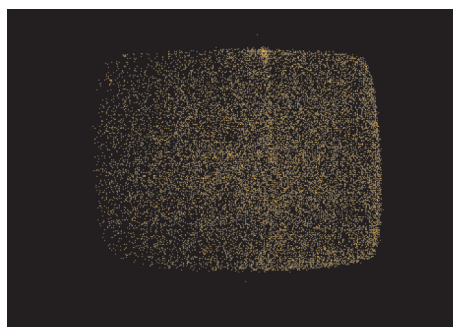


图 7 柱面 MCP 暗噪声图像
Fig. 7 20 Cylindrical MCP dark noise image

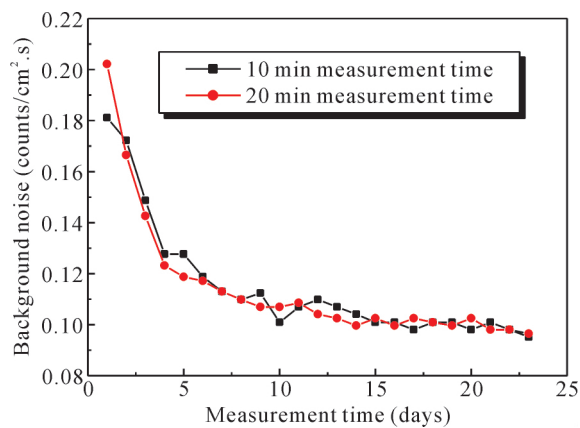


图 8 暗噪声随时间变化曲线(采集时间 23 天)
Fig. 8 Dark noise time - varying curve (acquisition time 23 days)

图像可知探测器能分辨 7.13 线对/毫米(能分辨出分辨率板上第 2 组第 6 个单元)，对应的空间分辨率为 0.14 mm，像元分辨率为 70 μm。加在 MCP 堆两端的电压为 -3350 V，MCP 出射面与感应电荷 WSA 阳极之间的电压为 -300 V，对应 MCP 堆增益约为 1.86 × 10⁷ 电子。

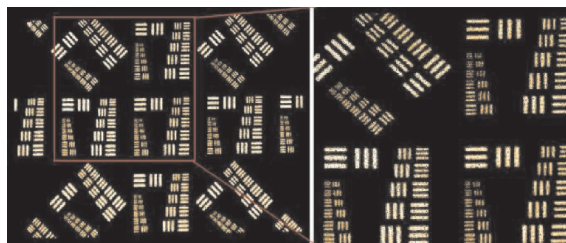


图 9 柱面 MCP 探测器美国分辨率板图像
Fig. 9 Cylindrical MCP Detector US Resolution target Image

4 结论

针对未来空间应用超分辨率光谱成像仪器的需求，与北方夜视南京分公司合作研制出的低声柱面微通道板，利用不含放射性元素的低声 MCP 玻璃，制备出曲率半径为 400 mm、尺寸为

30 mm × 46 mm、长径比为 80: 1、通道直径 12.5 μm、通道间距 15 μm 的柱面 MCP, 并将其与感应电荷楔条形阳极(WSA) 组成光子计数探测器, 对其暗计数率、分辨率进行了检测, 暗计数率约为 0.1 counts/(cm² · s), 空间分辨率 7.13 线对/毫米。

参考文献:

- [1] Huang M, Barstow M A, Chen Z, et al. The long slit spectrograph onboard the world space observatory – Ultraviolet [J]. *Proc. SPIE*, 2008, 7011: 70111Y – 1.
- [2] Liu Y A, Zhao B S, Wei Y L, et al. Progress NUV and FUV MCP – based photon – counting imaging detectors [J]. *Proc. SPIE*, 2011, 8196: 81961M – 1.
- [3] Vallerga J, Tremsin A, Raffanti R, et al. Centroiding algorithms for high speed crossed – strip readout of microchannel plate detectors [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2010, 633: S255.
- [4] Lapington J S. High speed imaging using a capacitive division technique [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2012, 695: 410.
- [5] John Vallerga, Jason McPhate, Anton Tremsin, et al. The current and future capabilities of MCP based UV detectors [J]. *Astrophys. Space Sci.*, 2009, 320: 247.
- [6] Siegmunda O H W, Fujiwaraa K, Hemphilla R, et al. Advances in Microchannel Plates and Photocathodes for Ultraviolet Photon Counting Detectors [J]. *Proc. SPIE*, 2011, 8145: 814501 – 1.
- [7] McPhate J B, Arnaud M, Murray S S, et al. Hubble space telescope: cosmic origins spectrograph FUV detector initial on – orbit performance [J]. *Proc. SPIE*, 2010, 7732: 77322H – 1.
- [8] 潘京生. 微通道板及其成像探测应用的研究 [D]. 长春: 长春理工大学材料科学与工程学院, 2013 (in Chinese) [Pan J S. *Study on microchannel plate and microchannel plate based imaging detection application* [D]. Changchun: School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Science and Technology, 2013.