

极紫外波段微通道板光子计数探测器

卜绍芳^{1,2}, 尼启良^{1*}, 何玲平¹, 张宏吉¹, 刘世界¹

(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: 研究了一种极紫外波段微通道板(MCP)光子计数探测器,用于探测地球等离子体层中极微弱的30.4 nm辐射。通过改变电压、温度等参数对比了该微通道板光子计数探测器的暗噪声和分辨率的变化。结果表明:微通道板探测器的暗噪声主要来源于残余气体离子反馈和热噪声,因此要降低探测器暗噪声,应对微通道进行彻底的预处理除气,并尽量避免探测器在高温状态下工作,常温下经过预处理的微通道板光子探测系统的暗计数率仅为0.34 count/(s·cm²)。系统的分辨率主要受电压和计数率的影响,受温度影响不明显。由于不同的微通道板有不同的耐压范围,过小或过大的电压或计数率都会造成系统分辨率的降低。

关键词: 光子计数探测器;微通道板;暗噪声;分辨率

中图分类号: TN366; TN144 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20120503.0302

Microchannel plate photon counting detector in UV range

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

(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: A Microchannel Plate (MCP) photon detector was developed to detect the 30.4 nm radiation in a plasma layer of the earth. By changing voltages, temperatures and other parameters, the variations of the dark noise and resolution for the MCP detector were compared. The results indicate that the dark noise of the detector comes from the ion feedback of residual gas and the thermal noises mainly. Therefore, to reduce the dark noise, the microchannel should be preprocessed by removing residual gases and the detector could not work at a high temperature state. After preprocessing at the room temperature, the dark noise counting rate of the de-

收稿日期:2012-01-11;修订日期:2012-03-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61077016)

detector has reduced to $0.34 \text{ count/s} \cdot \text{cm}^2$. Furthermore, the temperature has a little effect on the resolution of the detector, and the resolution depends on the variances of voltage or counting rate obviously. With different resist pressure abilities for different MCPs, it demonstrates that the proper voltage or counting rate can provide a better resolution.

Key words: photon counting detector; Microchannel Plate (MCP); dark noise; resolution

1 引言

地球作为太阳系的第三行星,其空间环境受太阳的影响较大。在太阳活动高峰期,地球磁层能较大程度地阻挡太阳风破坏地球的远程通讯,因此,研究地球磁层能为地球航天活动提供可参考的空间天气预报等。等离子体层是地球磁层的一部分,由于 He^+ 会共振散射太阳的 30.4 nm 辐射,因此,基于楔条形阳极的微通道板光子探测器可通过探测 30.4 nm 辐射来实现对地球等离子体层的空间遥感探测。

由于微通道板 (Microchannel Plate, MCP) 光子计数探测器^[1]具有高空间分辨率、低噪声等优点,在国外已经被广泛地应用于从近紫外到 X 射线波段的空间探测。美国宇航局分别于 1992 年和 2000 年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^[2]的 MCP 光子计数成像探测仪,通过开展对等离子体层的极紫外成像探测,首次获得了赤道面上等离子体层的全球分布,并观测到了在太阳扰动期间地球等离子体层的变化。目前,国外已经开始研究基于交叉条纹阳极或游标阳极的 MCP 光子计数成像探测器,美国加利福尼亚大学伯克利分校和英国的莱斯特大学在此方面的研究均处于领先地位。

我国在极紫外探测方面主要开展了基于楔条形阳极的 MCP 光子计数成像探测器的研究。由于 2012 年将是一个太阳活动高峰年,我国计划在 2012 ~ 2014 年期间发射的“夸父计划”3 颗卫星也将利用椭圆轨道卫星通过直接探测地球等离子体层中 He^+ 密度的空间分布来实现对地球等离子体层顶部的极紫外成像探测。此外,计划于 2013 年发射的“嫦娥三号”探月卫星,也把用于探

测地球等离子体层的极紫外相机列为其有效载荷之一。由于月球自转和绕地公转的周期具有一致性,如果在“嫦娥三号”上安置极紫外相机并使其面向地球,则相机将始终指向地球,从而为从侧面连续拍摄探测地球等离子体层提供了有利条件。本文研究的极紫外波段 MCP 光子计数探测器就是“嫦娥三号”极紫外相机的一个关键部件。该探测器的特性主要包括空间分辨率、暗计数率、脉冲高度分布等。本文主要研究了温度和 MCP 堆所加高压对预处理后的探测器的空间分辨率、暗计数率等特性的影响。

2 MCP 光子探测系统的结构及原理

如图 1 所示, MCP 光子探测系统主要由 3 部分组成,即 MCP 堆、楔条形位置灵敏阳极和位置读出电路以及数据采集和图像处理软件系统,其中 MCP 堆用于实现高增益的电子倍增,楔条形位

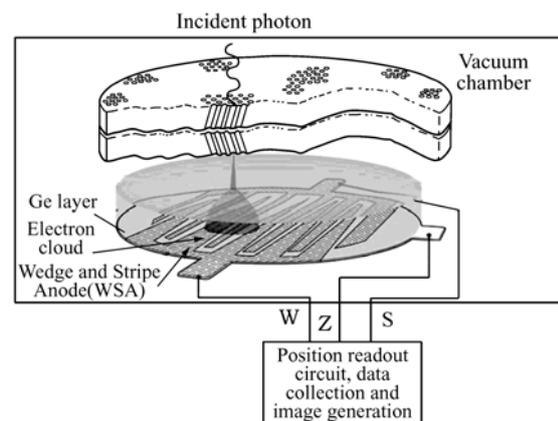


图 1 MCP 光子探测器系统的结构原理简图^[4]

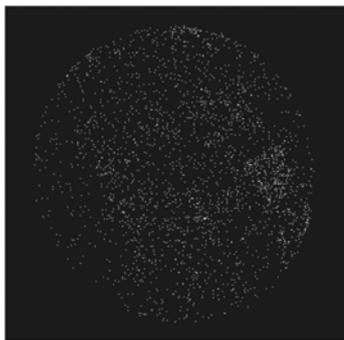
Fig. 1 Schematic structure of microchannel plate photon detecting system^[4]

置灵敏阳极则用于收集从 MCP 输出端输出的电子云信号,被阳极收集的信号经位置读出电路实现放大整形,随后经存储、传输、处理,最终获得入射光子的 (X, Y) 坐标,即二维图像。MCP 光子探测器工作时需要加上负高压,在 MCP 堆输入端和输出端之间以及 MCP 堆输出端与阳极之间通过分压电阻来提供分压,从而为电子运动提供电场。目前 MCP 光子探测器中用于收集电荷的阳极有多种,如电阻阳极、延迟线阳极和游标阳极等,选择楔条形阳极的主要原因^[3]是其直径能与此次极紫外探测器使用的 MCP 的直径匹配度最高。

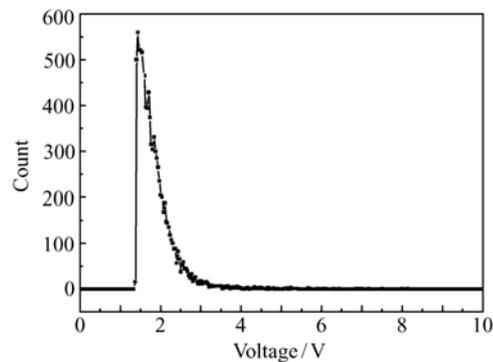
3 MCP 暗计数的一般特性

暗噪声图像的形状如图 2(a)所示,与 MCP 的圆形形状吻合,说明暗计数在 MCP 内分布均

匀,在空间分布上具有随机性。图 2(b)为暗噪声脉冲高度分布曲线,采集时间为 30 min, MCP 脉冲高度分布的曲线形状为负指数分布。对负指数分布的解释^[5]可理解为:暗计数如果在微通道内均匀分布,那么它应该具有各种可能的增益值。由于增益与噪声产生处的通道深度呈线性关系,即距离微通道输入端越远,噪声电子产生倍增的次数越少,那么最终产生的电子云含电子越少,增益也越小。当一些光子在入射到第一片 MCP 时,如果其入射方向正好平行于第一片 MCP 微通道的轴向时,这些光子将穿过第一片 MCP 而从第二片 MCP 微通道内壁开始碰撞并产生电子倍增。由于可产生碰撞的通道距离变短,这样就比较容易解释 MCP 暗噪声多数位于低增益,从而使其脉冲高度分布呈负指数分布。



(a) Dark noise image



(b) Pulse height distribution curve of dark noise

图2 MCP 暗噪声图像和脉冲高度分布曲线

Fig. 2 Dark noise image and pulse height distribution curve of microchannel plate

3.1 MCP 的残余气体噪声

如图 3 所示, MCP 是一个多孔阵列排列而成的很薄的圆片,孔的尺寸一般为微米量级。MCP 的厚度多为零点几个毫米,每一个单通道相当于一个连续的打拿极倍增器。在 MCP 两端施加负电压,在通道两端即形成电场,当电子或高能光子等进入通道并撞击通道壁后就会产生二次电子,二次电子反复碰撞通道壁即实现电子倍增。

正是由于 MCP 的这种多孔结构,使得 MCP 在制作、加工以及保存过程中不可避免地吸附了一些残余气体,这些气体在 MCP 工作状态下会在通道的输出端被大量电子电离,电离出的正离子

在电场作用下会反向加速撞击通道壁产生二次电子,这些二次电子和负离子产生的二次电子一起形成噪声电子,影响系统的信噪比。

将 MCP 光子探测器放在真空室内并在其两端施加负电压,会发现真空度迅速下降,说明 MCP 内有残余气体。如果 MCP 长期工作在这种状态下,不仅影响器件的性能,还将大大降低微通道板的寿命。因此,在使用之前应对其进行除气处理。由于 MCP 是多孔阵列结构,一般的清洗方法无法深入孔内除气,通常通过预处理操作来对 MCP 进行除气。

MCP 的预处理^[7]包括高温真空烘烤和紫外

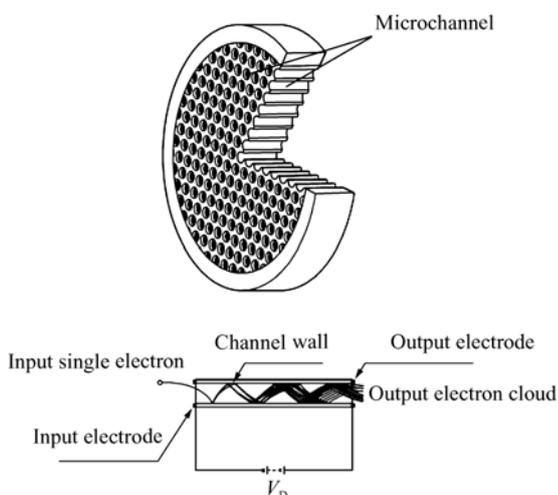


图3 微通道板的结构示意图及单通道电子倍增原理示意图^[6]

Fig. 3 Structure diagram of MCP and the principle schematic diagram of MCP electron multiplication^[6]

光电子清刷两部分。本文建立了MCP堆预处理试验装置,并对极紫外相机所用MCP位置灵敏阳

极光子计数成像探测器的MCP堆进行了预处理实验。高温真空烘烤需要严格控制温度,温度过高超过MCP的承受范围,将导致增益下降,而温度过低又不能充分除气,因此高温真空烘烤的温度一般设在350℃,烘烤时间为18h。紫外光电子清刷是对MCP进一步彻底除气,采用253.7nm紫外光在高压下对MCP进行除气,施加高压一般应使MCP刚好处于饱和增益状态,不同型号的MCP,其增益饱和电压也不同。为了防止清刷强度太大导致微通道二次电子发射层遭到破坏,一般使MCP输出端的出射电流为0.2μA,累积出射电量为0.06C·cm⁻²。刚经过预处理的MCP在高压真空工作状态下时,真空度稳定,MCP光子探测系统具有较低的暗噪声,经过预处理的MCP光子探测系统在室温22℃下暗计数率仅为0.34count/(s·cm²),处于高压工作状态时真空度无明显下降。

3.2 MCP的其他噪声

对经过预处理的MCP光子探测系统进行实验,研究了温度和电压变化对MCP噪声的影响。

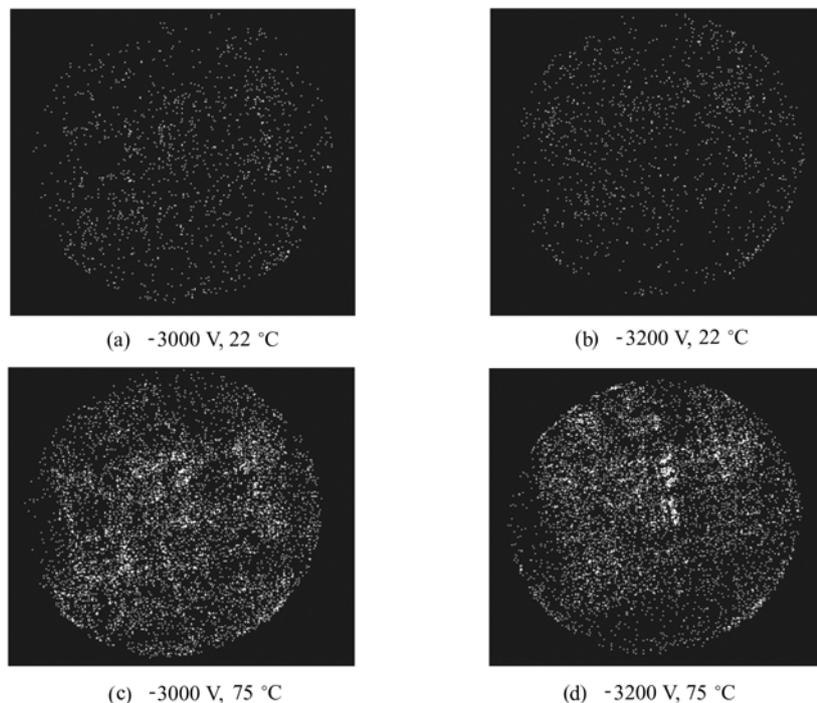


图4 不同电压和温度下暗噪声的分辨率图像

Fig. 4 Resolution images of dark noise obtained at different voltages and temperatures

图4为在不同电压和温度条件下, MCP光子探测系统的暗计数图像。表1为在不同电压和温度下探测器的暗计数率。

从图4和表1可以看到,随着温度的升高,暗计数率显著增大,这说明MCP存在热噪声,即热电子发射噪声^[8],也就是MCP本身的热电子发射数涨落,这些电子能量虽然很低,但是数目很多。另外,随着MCP两端分压的增大,电子增益增大,暗计数率也增大。为此,应尽量避免探测器在高温状态下工作,且在保证MCP处于增益饱和状态时,其两端分压也不宜过高。

表1 探测器在不同电压和温度下的暗计数率

Tab.1 Dark noise count rates at different voltages and temperatures

$t/^\circ\text{C}$	Dark noise count rate/(counts · s ⁻¹ · cm ⁻²)	
	-3 000 V	-3200 V
22	0.6	1.1
75	2.9	3.2

除此之外,有研究表明,MCP通道内壁二次电子发射层本身的一些低原子序数的原子在电场作用下的电迁移和电子撞击下的受激脱附以及MCP材料中的放射性元素40 K的 β 射线蜕变也会造成电子噪声^[9]。但是残余气体噪声和热噪声应是MCP噪声的主要来源,这两种噪声可以通过MCP预处理和控制温度得到抑制。

4 MCP光子探测系统的分辨率特性

一般来说,MCP两端分压越大,其增益越大,分辨率也越高。由于温度对暗计数有较明显的影响,因此,本文针对温度和电压对系统分辨率以及计数率的影响进行了实验。

实验结果表明:信号的计数率受电压变化的影响显著,随着电压增大,计数率也随之变大,但是温度升高,信号的计数率反而会略有下降,-3 200 V的图像整体比-3 000 V图像要明亮均匀,这与-3200 V的计数率较高有关。另外,在

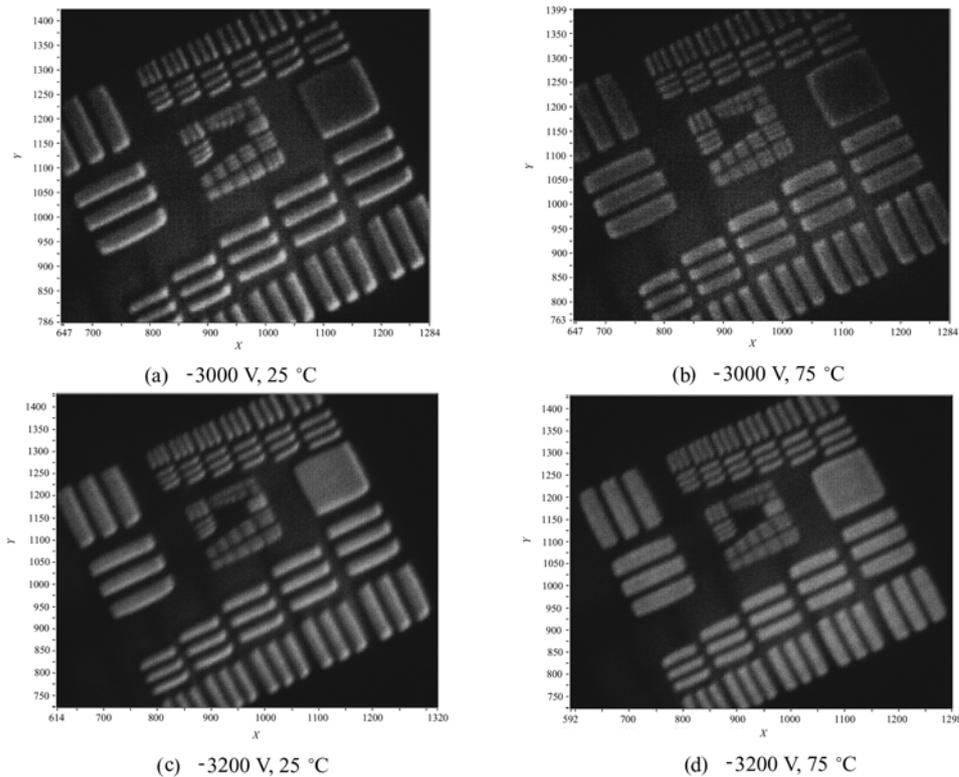


图5 不同电压和温度下的分辨率图像

Fig.5 Resolution images at different voltages and temperatures

-3 000 V时,不论常温还是高温,分辨率均为 5.04 lp/mm,然而在 -3 200 V 时,高温和低温情况下的分辨率均降为 4.00 lp/mm,这说明并非

MCP 两端电压越大,系统的分辨率就越好。当然这也不表明电压越大,增益越大,系统的分辨率会越小。以下的实验针对这一问题进行了研究。

表 2 探测器在不同电压和温度下的信号计数率

Tab.2 Signal count rates at different voltages and temperatures

$t/^\circ\text{C}$	Signal count rate/(counts · s ⁻¹ · cm ⁻²)	
	-3 000 V	-3 200 V
25	0.55×10^3	1.69×10^3
75	0.37×10^3	1.51×10^3

4.1 分辨率与电压和计数率的关系

选用不同型号的 MCP,针对电压与分辨率关系的研究做了大量实验,在室温下,对 MCP 两端施加 -3 800 ~ -4 200 V 的电压,其分辨率图像

如图 6 所示,即从清晰变模糊。为了清楚地观察分辨率,只取分辨率板的中心单元进行放大,可以看到图中有一条明显的斜线,这是 MCP 本身的缺陷造成的。

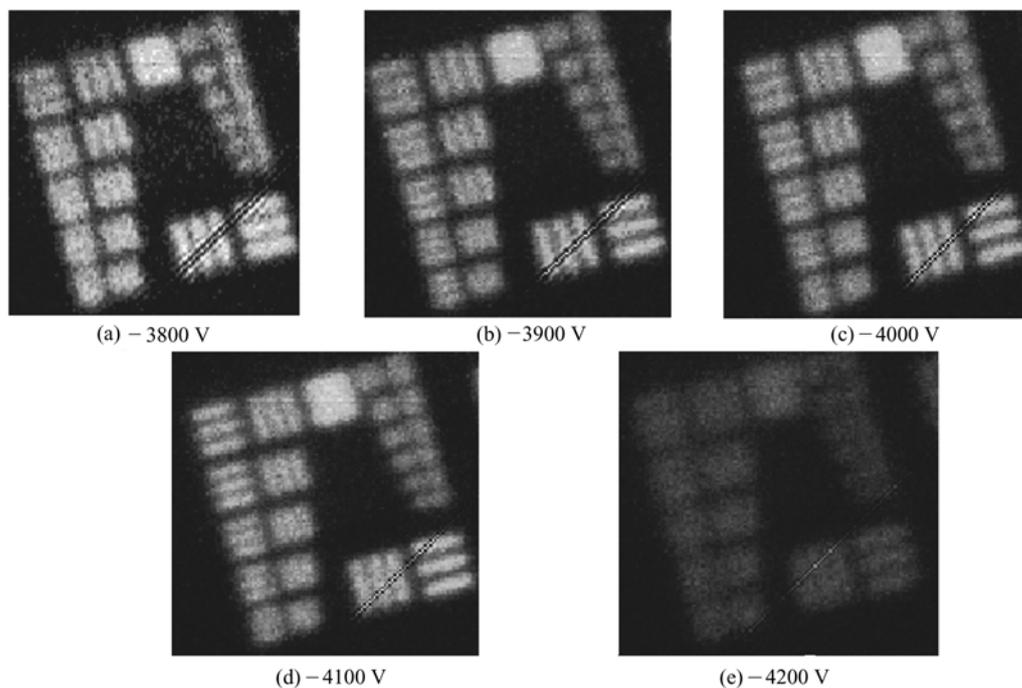


图 6 探测器在不同电压下分辨率板图像的中心部分放大图

Fig.6 Enlarged centre parts of the resolution plate images at different voltages

表 3 为探测器在图 6 所示的不同电压条件下的计数率和分辨率。从表 3 可以看出,随着电压的增大,MCP 光子探测系统计数率增大,其分辨率先增大后减小,说明要获得较好的分辨率,并非电压越大越好,而是要选择适宜的电压。电压过大,分辨率降低可能有多种原因,当电压过大时,

输出脉冲数过多,出现严重的脉冲堆积现象,使得探测器的脉冲堆积拒绝电路^[10]也无法完全将其分开,从而造成对电子云脉冲的质心解码出现误差。另一方面,电压过大,易使 MCP 出现增益疲劳,影响 MCP 的性能。

表3 探测器在图6所示的不同电压下的计数率和分辨率

Tab.3 Signal count rates and resolutions at different voltages corresponding to the images in Fig.6

Voltage/V	Count rate/(count · s ⁻¹ · cm ⁻²)	Resolution/(lp · mm ⁻¹)
-3 800	0.14 × 10 ³	5.04
-3 900	0.29 × 10 ³	5.66
-4 000	0.49 × 10 ³	6.35
-4 100	0.65 × 10 ³	5.66
-4 200	1.55 × 10 ³	4.00

为了进一步验证系统在高计数下存在脉冲堆积现象,实验固定电压为-4 100 V,通过调节光

源来增大探测器系统的计数率,从而可以明显看出分辨率图像从清晰变模糊,如图7所示。

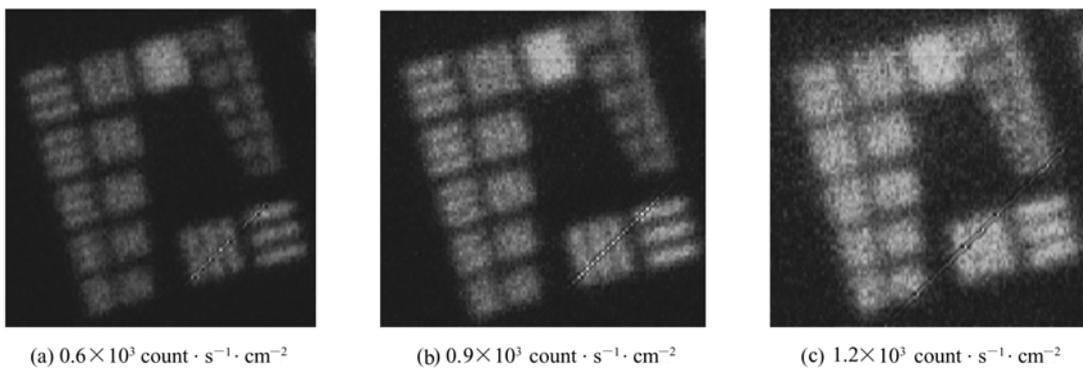


图7 4 100 V下探测器在不同计数率条件下分辨率板图像中心部分放大图

Fig.7 Enlarged centre parts of the resolution plate images of detectors at different count rates at 4 100 V

表4 对应图7中不同计数率下探测器的分辨率,随着计数率增大,分辨率从5.66 lp/mm降为4.00 lp/mm,这说明计数率过大导致脉冲堆积现象,从而使图像模糊。

表4 图7所示条件下探测器的计数率和分辨率

Tab.4 Signal count rates and resolutions corresponding to the images in Fig.7

Count rate/(count · s ⁻¹ · cm ⁻²)	Resolution/(lp · mm ⁻¹)
0.6 × 10 ³	5.66
0.9 × 10 ³	5.66
1.2 × 10 ³	4.00

由此可以得出结论,电压过大或计数率过大,都会造成信号的脉冲堆积,从而使MCP光子探测系统的分辨率降低。

5 结 论

对MCP光子探测系统的噪声特性进行了研究,结果表明:MCP光子计数探测系统的噪声主要来源于MCP的残余气体离子反馈和热噪声,要降低探测器系统的噪声,应对MCP进行彻底的预处理除气并使其尽量避免高温工作,常温下经过预处理除气的MCP噪声计数率为0.34 count/(s · cm²),并且在高压工作下无真空度下降现象。

对探测器系统分辨率的影响因素进行了研究,结果表明:温度升高,将导致信号的计数率略有下降,但是对成像分辨率没有明显影响,系统的成像分辨率随电压增大变化显著,电压越大分辨率越好,但是电压过大或计数率过大,将导致分辨率急剧下降。因此要获得较好的分辨率,需要选择适宜的电压以及合适的计数率。

参考文献:

- [1] SIEGMUND O H W. Advances in microchannel plate detectors for UV/visible astronomy[J]. *SPIE*,2003,4854:181-190.
- [2] 廖震华. 基于楔条形阳极探测器的单光子成像系统[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2008.
MIAO ZH H. The single photon imaging system based on the wedge and strip anode detector[D]. Xi'an: Xian Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS,2008. (in Chinese)
- [3] 尼启良,刘世界,陈波. 极紫外位置灵敏阳极光子计数成像探测器研究[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(1):36-40.
NI Q L, LIU SH J, CHEN B. Investigation on extreme ultraviolet photon-counting imaging detector with position-sensitive anode[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Optics*,2009,2(1):36-40. (in Chinese)
- [4] 何玲平,尼启良,李敏,等. 楔条形阳极光子计数探测器成像性能的检测[J]. 光学精密工程,2009,17(11):2699-2704.
HE L P, NI Q L, LI M, *et al.* Image performance of photon-counting imaging detector with wedge-and-strip anode[J]. *Opt. Precision Eng.*,2009,17(11):2699-2704. (in Chinese)
- [5] SIEGMUND O. H. W, VALLERGA J, WARGELIN B. Background events in microchannel plates[J]. *IEEE T. Nucl. Sci.*, 1988,35(1):524-528.
- [6] 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.
PAN J SH. Microchannel plates and its main characteristics[J]. *Appl. Optics*,2004,25(5):25-29. (in Chinese)
- [7] SIEGMUND O H W. Preconditioning of microchannel plate stacks[J]. *SPIE*,1989,1072:111-118.
- [8] FRASER G W, PEARSON J F, LEES J E. Dark noise in microchannel plate X-ray detectors[J]. *Nucl. Instrum. Methods*, 1987,254:447-462.
- [9] JOSEPH LADISLAS WIZA. Microchannel plate detectors[J]. *Nucl. Instrum. Methods*,1979,162:587-601.
- [10] 尼启良,何玲平,刘世界,等. 使用感应电荷位敏阳极的极紫外单光子计数成像系统[J]. 光学精密工程,2010,18(12):2543-2548.
NI Q L, HE L P, LIU SH J, *et al.* Extreme ultraviolet single photon-counting imaging system based on induced charge position-sensitive anode[J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(12):2543-2548. (in Chinese)

作者简介:卜绍芳(1984—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事紫外与极紫外光学探测方面的研究。

E-mail:shaofangbu@yahoo.cn