

文章编号 1004-924X(2010)12-2543-06

使用感应电荷位敏阳极的极紫外单光子计数成像系统

尼启良¹, 何玲平¹, 刘世界¹, 董宁宁², 陈 波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)

摘要:研制了用于月基极紫外成像相机的二维极紫外位敏阳极光子计数成像探测器原型样机, 该探测器系统主要由工作在脉冲计数模式下的微通道板堆、楔条形感应位敏阳极及相关的模拟和数据处理电路组成。设计和制备了周期为 1.5 mm, 有效直径为 47 mm 的三电极楔条形位敏阳极, 研制了最高计数率为 200 kHz 的前端模拟和数字电路。测量了探测器的暗计数率、脉冲高度分布、增益、线性及空间分辨率等工作特性。测量结果表明, 探测器的空间分辨率为 7.13 lp/mm (即 0.14 mm), 满足月基极紫外相机对空间分辨率的要求。

关键词:极紫外探测器; 光子计数成像探测器; 微通道板; 感应电荷; 楔条形位敏阳极

中图分类号: V447.3; TH724 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101812.2543

Extreme ultraviolet single photon-counting imaging system based on induced charge position-sensitive anode

NI Qi-liang¹, HE Ling-ping¹, LIU Shi-jie¹, DONG Ning-ning², CHEN Bo¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215263, China*)

Abstract: A new prototype of two-dimensional photon-counting imaging system with an induced charge position-sensitive anode in extreme ultraviolet (EUV) region was developed for a moon-based EUV camera. The detector system is mainly composed of microchannel plate (MCP) stacks operating in a pulse-counting mode, a wedge-strip induced-charge position-sensitive anode and correlative analog and data processing circuits. A three-electrode wedge-strip induced-charge position-sensitive anode with a 1.5 mm period and a 47 mm diameter active area was designed and fabricated, and the front-end analog and data circuits with the maximum counting rate of 200 kHz were also developed. The operating characteristics of the prototype MCP detector including the background rate, pulse height distribution, gain, image linearity and the spatial resolution were measured. The measured results show that the spatial resolution has been 7.13 lp/mm (0.14 mm), which means it can completely satisfy the requirement of moon-based EUV camera for the spatial resolution.

收稿日期: 2010-06-18; 修订日期: 2010-10-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40774096, 10878004, 61077016)

Key words: Extreme Ultraviolet (EUV) detector; photon-counting imaging detector; Microchannel Plate (MCP); induced-charge; wedge-strip position-sensitive anode

1 引言

极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)相机是探月二期工程中极具特色的有效载荷,该相机的任务是在月球上拍摄地球等离子体层 30.4 nm 的图像,研究它的三维空间结构及其在磁扰期间的变化。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,需要使用 EUV 位置灵敏阳极光子计数成像探测器。

使用微通道板(Micro-channel Plate, MCP)的位敏阳极光子计数成像探测器已广泛应用于空间成像探测,它由前表面镀有光电阴极材料的 MCP 像增强器、周期性的金属读数电极(称为阳极)和相关的读数电路组成。根据所用读数阳极的不同,光子计数成像探测器可分为以下几种:多阳极微通道板阵列(MAMA)、楔条形阳极(WSA)、电阻阳极(RAE)、延迟线阳极(DLA)和 Vernier 阳极探测器等^[2-4]。

MCP 位敏阳极光子计数成像探测器基于质心法来探测光子的位置,即用位敏阳极直接测量从 MCP 出射的电子云质心,以此来确定入射光子的位置。当具有一定能量的电子云入射到金属阳极表面时,金属表面产生的大量二次电子改变了原来电子云的空间电荷分布,从而导致位置非线性和图像不稳定。为了避免上述问题,Jagutzki O. 等人^[5]首次将感应电荷技术应用于位敏阳极探测器,这一技术使从 MCP 堆出射的电子云直接与电阻膜相互作用后在位于电阻膜后面的金属位敏阳极上产生感应电荷,避免了电子云直接与金属阳极作用产生的负效应,即大大降低了图像位置的非线性和不稳定性。

月基 EUV 相机使用一个工作波长为 30.4 nm 的多层膜球面反射镜收集来自地球等离子体层的 30.4 nm 辐射,反射光被 MCP 探测器接收,因此,它是一个中心遮拦系统,从而要求探测器的阳极直径与 MCP 的直径接近,上面提到的阳极只有 WSA 能满足这一条件。WSA 光子计数成像探测器始于 20 世纪 80 年代^[5],迄今为止,美国和欧洲已相继发射十几颗使用这种探测器的卫

星,对遥远天体进行高精度成像观测^[6-10],但感应电荷 WSA 位置灵敏阳极探测器至今还没有被应用到空间探测。本文详细介绍了本研究小组为 CE-3 的 EUV 相机研制的感应电荷 WSA 位敏阳极光子计数成像探测器原型样机的进展情况,这也是国内首次研制出这种类型的高分辨率位敏阳极光子计数成像探测器。

2 感应电荷楔条形位敏阳极单光子计数成像系统

图 1 给出了感应电荷 WSA 位敏阳极单光子计数成像系统结构简图。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 位敏阳极单光子计数成像探测器及其后续的位置读出电路 3 个部分。由于 MCP 对紫外光有响应,所以紫外光源通常用作检测光源。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。

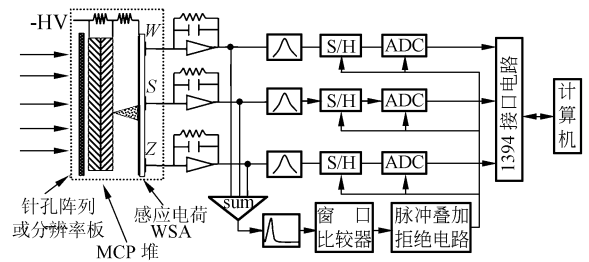


图 1 感应电荷 WSA 位敏阳极光子计数成像探测系统结构简图

Fig. 1 Framework plot of induced charge WSA photon-counting imaging system

感应电荷 WSA 探测器由两块工作在脉冲计数模式下的 MCP 堆和感应电荷 WSA 组成。MCP 堆是长径比为 80 : 1,有效口径为 42 mm、通道直径为 12.5 μm 的两块 MCP 叠加而成的 V 型结构,其孔偏角依次为 $13^\circ/13^\circ$ 。感应电荷 WSA 是一个表面制备了电阻膜(通常是锗膜)而另一个表面制备了 WSA 位敏阳极的电荷脉冲接

收和感应器件,入射到 MCP 堆的光子由其转换成光电子,在高压的作用下光电子经过倍增变成包含 $10^6 \sim 10^7$ 个电子的电子云,电子云入射到电阻膜上,在 WSA 表面产生感应电荷云,经过 WSA 的分割产生电荷脉冲,再由后面的位置读出电路对这些脉冲进行处理来确定感应电荷云的质心位置,即入射的光子位置。图 2 给出了 3 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 的宽度增加一倍,而 W 的宽度不变。感应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 3 个电脉冲的电量,(X, Y) 坐标代表了入射到 MCP 表面的光子位置。

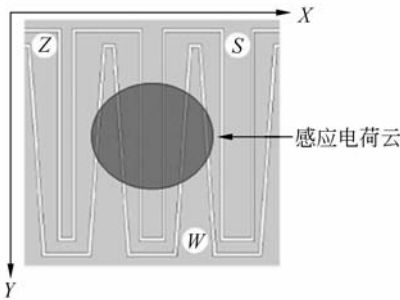
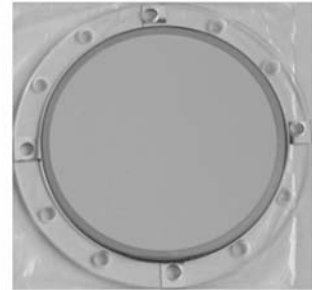


图 2 三电极的 WSA 几何简图

Fig. 2 Schematic diagram of three electrode geometry of WSA

利用传统的光刻技术制备出的圆形 WSA 如图 3 所示,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,绝缘间隙为 $30 \mu\text{m}$,阳极的有效直径为 47 mm,W, S 和 Z 之间的电容分别为 60, 110 和 110 pF, Z 电极的电阻为 100Ω 。单光子在 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触发 14 bit 精度 A/D 转换器和采样保持电路(S/H)的所有 TTL 脉冲,这样来自 W, S 和 Z 的信号同时经过一个 1394 接口送入计算机,再由软件根据式(1)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 kHz。



(a)正面的锗电阻膜
(a) Ge resistance film



(b)背面的铝 WSA
(b) Aluminium WSA

图 3 感应电荷位敏 WSA 照片

Fig. 3 Induced-charge position-sensitive WSA

2.1 脉冲高度分布

对于位敏阳极探测器,其分辨率与 MCP 堆的增益成正比,测量探测器的脉冲高度分布是优化探测器性能的关键。这是因为通过脉冲高度分布曲线可以获得如下信息:(1)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;(2)可以获得脉冲高度分布曲线的 FWHM, $(FWHM = W/G, G$ 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 4 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 5 是在这些高压下 MCP 堆增益与脉冲高度分布的 FWHM 的关系曲线。

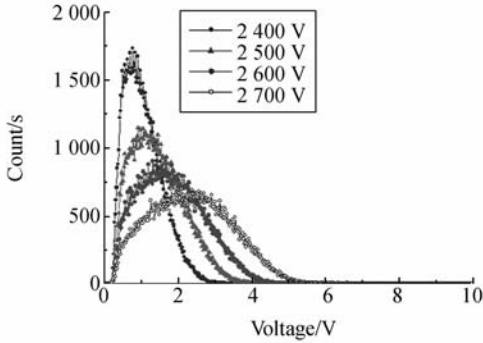


图 4 不同电压下 MCP 堆的脉冲高度分布
Fig. 4 Signal pulse height distribution

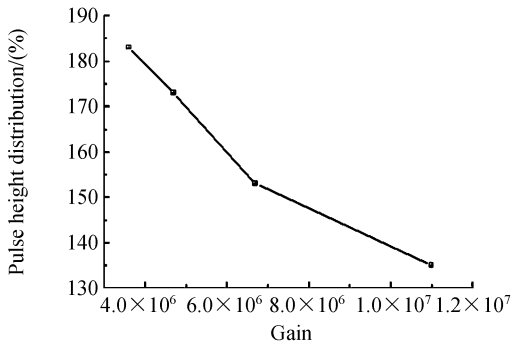


图 5 MCP 堆增益与 FWHM 的关系
Fig. 5 MCP stack gain vs. FWHM

2.2 暗噪声

暗噪声(又称暗计数)是无任何光照条件下探

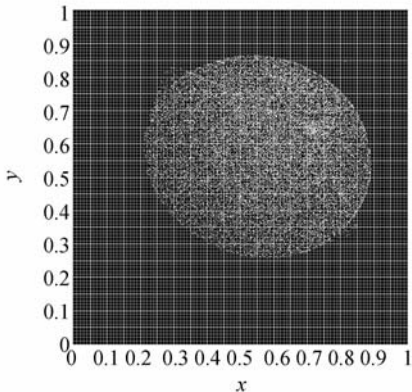


图 6 暗噪声图像
Fig. 6 Background noise image

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 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 6 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 $1 \text{ count/s} \cdot \text{cm}^2$ 。

2.3 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 7 所示。从图像可知该探测器能分辨 7.13 lp/mm(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,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 -300 V ,对应 MCP 增益约为 1.1×10^7 电子。

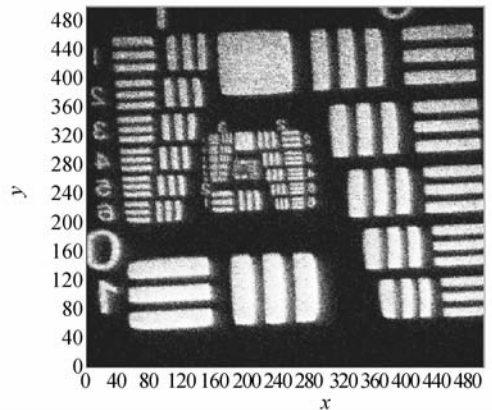
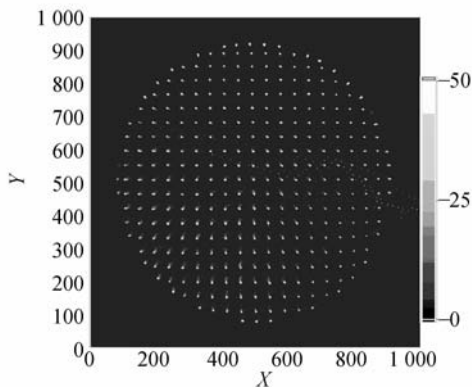


图 7 USAF1951 空间分辨率板图像
Fig. 7 UV image of USAF1951 resolution plate

2.4 探测器线性

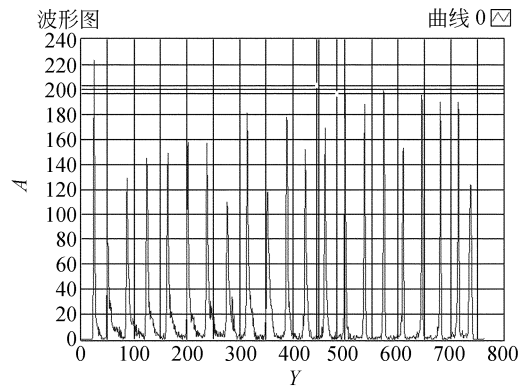
测量探测器线性时,利用充入氦气的空心阴极光源产生的 30.4 nm 的极紫外辐射,经过一个牛顿式的大口径平行光管照射放置在探测器前面的针孔阵列,针孔的直径为 $50 \mu\text{m}$,在水平和垂直

方向排成直线阵列,孔间距为 2 mm。使用上面同样的方法对针孔阵列成像,通过分析每个针孔图像的强度分布,获得该分布的峰值所在位置,峰值所在位置偏离针孔中心数值的统计平均值就是探测器空间线性值。图 8(a)给出了针孔阵列的 EUV 图像,图 8(b)是 X 轴方向的径向针孔阵列的强度分布(Y 轴方向的径向针孔阵列的强度分布与之相近),从图 8 可知探测器图像在直径为 40 mm 范围内的线性好于 $40 \mu\text{m}$,但边缘图像的线性稍差一些,这主要由阳极边缘的电场不均匀所致。



(a) X 轴径向针孔强度分布

(a) Intensity distribution of radial pinhole array in X axis



(b) 针孔阵列的 EUV 图像

(b) EUV image of pinhole array

图 8 图像线性测量结果

Fig. 8 Measured results of image linearity

3 结 论

根据月基 EUV 相机对探测器的要求,研制了二维极紫外楔条形感应电荷位敏阳极光子计数成像探测器的原型样机,使用自行研制的最高计数率为 200 kHz 的模拟和数字前端电路,获得的探测器空间分辨率为 0.14 mm,完全能满足 EUV 相机对探测器空间分辨率的要求。

参考文献:

- [1] PRIEDHORSKY W, BLOCH J J. Optical detection of rapidly moving objects in space[J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44:423-433.
- [2] LAPINGTON J S. Developments in high count rate microchannel plate detectors [J]. *SPIE*, 2005, 5898:85-94.
- [3] LAPINGTON J S. A comparison of readout techniques for high-resolution imaging with microchannel plate detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2004, 525:361-365.
- [4] LAPINGTON J S. Developments in imaging devices for microchannel plate detector [J]. *SPIE*, 2003, 4854:191-203.
- [5] MARTIN C, JELINSKY P, LAMPTON M, *et al.*. Wedge-and-strip anodes for centroid-finding position-sensitive photon and particle detectors [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1981, 52:1067-1074.
- [6] SANDEL B R, BROADFOOT A L. The extreme ultraviolet imager investigation for the image mission [J]. *Space Science Reviews*, 2000, 91:197-242.
- [7] GOLDSTEN J O, HUMM D C. Performance of the wedge-and-strip microchannel plate detectors and electronics for the global ultraviolet imager [J]. *SPIE*, 1999, 3765:408-416.
- [8] BLOCH J, EDWARDS B, *et al.*. On orbit performance of the ALEXIS EUV telescopes [J]. *SPIE*, 1994, 2280:297-309.

- [9] 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)
- [10] 李敏, 范鲜红, 尼启良, 等. 微通道板在 12~40 nm 波段量子效率的实验研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 1-5.
LI M, FAN X H, NI Q L, *et al.*. Quantum efficiency of microchannel plate in 12~40 nm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 16(1): 1-5. (in Chinese)

作者简介:



尼启良(1966—), 男, 辽宁辽阳人, 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的研究。E-mail: niqiliang@yahoo.com



何玲平(1982—), 男, 江西新余人, 博士研究生, 2005 年于长春理工大学获得学士学位, 2007 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事短波段光学技术的研究。E-mail: hlp200201@yahoo.com.cn



刘世界(1979—), 男, 山东即墨人, 助理研究员, 2002 年、2006 年于吉林大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事光学精密机械结构设计的研究。E-mail: Liushj@yahoo.com.cn



陈波(1961—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 1984 年于吉林大学获得学士学位, 主要从事软 X 射线-极紫外波段光学和空间光学的研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn

董宁宁(1981—), 女, 吉林长春人, 助理研究员, 主要从事短波光学技术的研究。E-mail: xiaoshiyao@sina.com.cn