

文章编号 1004-924X(2009)11-2699-06

# 楔条形阳极光子计数探测器成像性能的检测

何玲平<sup>1,2</sup>, 尼启良<sup>1</sup>, 李 敏<sup>1,2</sup>, 刘世界<sup>1</sup>, 陈 波<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**基于楔条形位置灵敏阳极的光子计数成像探测器能够记录入射的单光子或带电粒子位置信息,因而能够在极低的照明条件下实现目标的二维成像。本文研制了一套 WSA 光子计数成像探测器样机,介绍了它的设计结构及工作原理;分析了这类探测器的图像畸变产生的原因,提出了校正图像畸变的方法,并得到了无畸变的图像。以美国空军标准分辨率检测板(USAF1951)为目标进行了分辨率检测,采集的检测图像显示人的裸眼能分辨出检测板的第 2 组第 6 单元条纹。最后,为了消除人眼观测的主观性,通过计算探测器对该单元条纹的成像调制度来确保检测结果的准确性。计算结果显示探测器对该单元条纹的水平、垂直方向成像调制度分别为 57% 和 37%。这一结果表明研制的探测器完全能够分辨该单元条纹,对应的分辨率为 7.13 lp/mm,即探测器空间分辨率达到了 0.14 mm。

**关键词:**楔条形阳极;光子计数成像;分辨率检测;成像调制度;

**中图分类号:**TP212.14;TH724 **文献标识码:**A

## Image performance of photon-counting imaging detector with wedge-and-strip anode

HE Ling-ping<sup>1,2</sup>, NI Qi-liang<sup>1</sup>, LI Min<sup>1,2</sup>, LIU Shi-jie<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** A photon-counting imaging detector with a wedge-and-strip anode (WSA) can record position information on a single photon or incidence particle, so it can acquire the two-dimensional image of an objective under very low lighting conditions. In this paper, a detail description of a detector prototype built by us is firstly given, including its configuration and operating principle, then the imaging distortion of the detector is analyzed, correction methods are proposed and distortion-free images are obtained. Resolution tests are taken using a USAF1951 resolution target placed in front of the detector. The detected image shows that the 6 th element in the 2 nd group of the USAF1951 target can be differentiated by the naked eye. Finally, in order to remove the subjectivity error produced by human eye observation and to ensure measurement accuracy, the imaging modulation index is computed. The computed results show that, for the 6 th element in the 2 nd group of the USAF1951, its imaging

收稿日期:2009-04-08;修订日期:2009-05-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40774096;No. 60677043)

modulation index can reach 57% and 37% in the vertical and horizontal, respectively. This result indicates that proposed detector prototype can differentiate the strips above absolutely with a 7.13 lp/mm, i. e., the spatial resolution reaches 0.14 mm.

**Key words:** wedge-and-strip anode; photo-counting imaging; resolution detection; imaging modulation

## 1 引言

在众多实验室科研活动和空间探测项目中,人们对微弱光信号或粒子的探测需求日益增多,而这类探测的完成都需要使用光子计数探测器。该类探测器可有效地记录单个光子或带电粒子的空间位置信息,能够满足微光条件下的成像需求。在光子计数探测器中,电荷读出系统收集像增强器倍增后产生的电子云,对光子或粒子起位置编码的作用。常用读出系统种类有电阻阳极、楔条形阳极(WSA)以及延迟线阳极等<sup>[1]</sup>,比较而言,WSA能够以较高空间分辨率提供二维的空间信息,且有制作工艺简单、后续电子系统容易制作、功耗低的优点,非常适合在空间探测领域使用。美国已经发射了几颗载有这种探测器的卫星,用于对空间环境的探测;2000年美国发射的IMAGE卫星,就载有基于该探测器的EUV相机,首次实现了地球等离子体层的完整成像<sup>[2]</sup>。

基于探月二期工程CE-3有效载荷EUV相机的需求,本文研制了一套基于优化设计的探测器样机。该样机的设计考虑了各种可能带来成像畸变的因素,并采用了本文提出优化算法,最终获得了无畸变的图像。与一般CCD不同,WSA光子计数成像探测器不存在物理意义上的像元,没有一般的像元尺寸、像元数量等参数来衡量其分辨率,因此需要对其进行分辨率检测。本文以美国空军标准分辨率测试标板(USAF1951)为目标,对研制的样机进行了分辨率检测。为了提高检测的准确性,还对分辨率板的检测图进行了成像调制度分析。

## 2 样机系统结构及成像原理

课题组研制的楔条形光子计数成像探测器样机及分辨率检测装置如图1所示。该装置主要

包括紫外准直光学系统、置于高真空系统内的探测器及后续的电子学系统3个部分组成。由于MCP主要对紫外段线辐射有响应,所以通常使用紫外光源来检测;检测目标物置于MCP前端1~2 mm,紫外光经过准直后垂直入射到该目标。

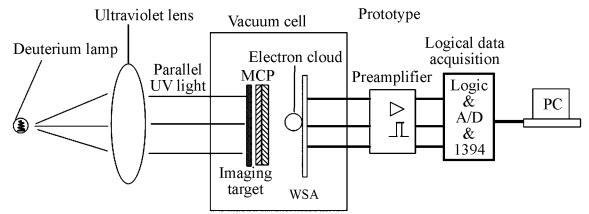


图1 样机系统结构图

Fig. 1 System structure of prototype

WSA光子计数成像探测器的工作原理如图2所示<sup>[3]</sup>,探测器系统主要由微通道板堆(MCP)、WSA位置灵敏阳极和位置读出电路3部分组成。

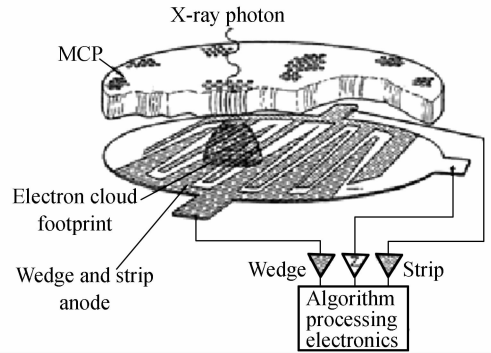


图2 WSA光子计数成像探测器成像原理图

Fig. 2 Diagram of WSA photon-counting imaging detector

### 2.1 MCP堆

MCP是一种电子倍增器件,使用时在其两端加上高压,起到光电转化及电子倍增的作用。入射的光子打在MCP通道内壁激发出光电子,光电子在高压的作用下多次碰撞内壁形成“雪崩”效应,在输出面产生包含大量电子的电子云<sup>[4]</sup>,在电场的作用下,电子云入射到位置灵敏阳极上,并由其确定电子云质心位置,即入射光子的位置。

探测器的空间分辨率与MCP堆的增益成正

比。为了提高增益,本设计将 3 个有效口径为 40 mm、长径比是 40 : 1 的 MCP 叠加在一起,当 MCP 堆两端高压为 3 000 V 时,增益能达到  $10^7$ ,设计的探测器样机中的 MCP 堆就是工作在这个状态。

### 2.2 WSA 位置灵敏阳极

WSA 位置灵敏阳极的作用是收集产生的电子云,并将其转换成电荷脉冲。WSA 是一个平面导电阳极,由细微绝缘间隙将其分割成 Wedge、Strip、Zigzag 三电极。在每个周期,Wedge 电极面积在 Y 方向随它们的长度线性变化,同样 Strip 电极面积在 X 方向随其长度线性变化;Zigzag 电极覆盖剩余的周期面积。电子云的质心位置为<sup>[5]</sup>:

$$\begin{cases} x = \frac{2Q_w}{Q_w + Q_s + Q_z} \\ y = \frac{2Q_s}{Q_w + Q_s + Q_z} \end{cases}, \quad (1)$$

其中  $Q_w$ 、 $Q_s$ 、 $Q_z$  为阳极的 3 个电极收集到的电荷量,常数 2 为归一化系数。

为了避免探测器成像的畸变,设计 WSA 阳极时,需要谨慎考虑它的一些几何参数,包括电极周期大小及整体大小;同时,电极间的信号串扰会造成图像的畸变,本文将提出一种新的图像畸变校正方法。

### 2.3 电子学系统

WSA 阳极输出的 3 个电荷信号都是尖脉冲,不利于精确采集。因此可使用电荷前置放大器、整形放大器将其进一步放大,通过精细调整,最后输出的信号都是幅值不超过 10 V、宽度为  $1 \mu s$  的矩形脉冲。整形后的脉冲由后续的 14 位 A/D 转换器将其数字化,然后采用 1 394 总线将采集到的数据传输至上位机。实验时先将 WSA 阳极平面分为  $N \times N$  个虚拟像元,每个像元用  $(X, Y)$  ( $X, Y \in [1, N]$ ) 来索引;按照式(1)计算出采集的光子在阳极平面内的归一化位置  $x, y$  后,按式(2)把  $x, y$  映射到相应的虚拟像元  $(X, Y)$ :

$$\begin{cases} X = x \times N \\ Y = y \times N \end{cases}, \quad (2)$$

$X, Y$  为该光子所落在的虚拟像元的位置索引。将该索引像元的灰度值加 1 就表示该位置捕获了一个光子。通过对大量采集光子进行统计,最终能获得目标图像。

## 3 图像畸变及其矫正方法

### 3.1 调制、边缘畸变及校正

式(1)表示的电子云质心解码算法要求阳极的每个电极的分割电荷量都与电子云降落在阳极上的位置成线性比例关系。当电子云面积与电极周期相比过小或过大时,这个要求就不能满足,建立在这个要求上的质心解码算法求出的电子云的位置也就会出现偏差。当电子云过小时,电极对电子云欠采样,电极收集的电量不再与电子云的质心位置成线性关系。这样导致按上述公式计算出来的质心位置与电子云真正的质心位置是有偏差的,即带来“调制扭曲”(Modulation effect)<sup>[6]</sup>。当电子云面积过大时,电子云边缘会超出楔条形阳极的工作区域,超出的电子将被电极的连接带收集到,甚至无法被收集,这部分电子与电子云质心无法建立线性关系。这种情况下采集到的图像会出现“边缘畸变”<sup>[7]</sup>。

为了避免上述两种成像的畸变,在设计楔条形阳极探测器时,需要根据实际情况选择大小合适的电极周期长度,然后通过控制 MCP-Anode 间距及电场,获得大小与电极周期长度匹配的电子云。综合各种制约因素,本文制作的 WSA 周期长度为 1.2 mm,共 40 个周期,有效工作面积为 48 mm,而 MCP 口径为 40 mm,保证 WSA 能收集到 MCP 边缘出射的电子云团。WSA 空间结构定下来之后,通过反复试验,最终确定 MCP-WSA 之间电压及距离为 300 V 和 10 mm,此时电子云大致能覆盖 2~3 个阳极周期,这个大小是合适的,采集的图像能避免产生前面所述的两种畸变,如图 3 所示。

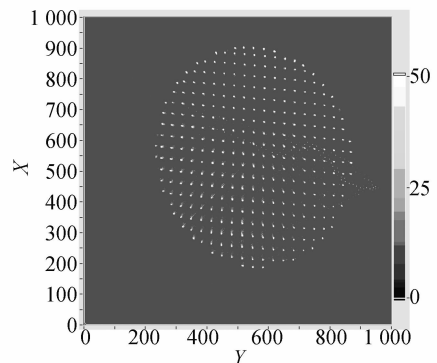


图 3 串扰图像

Fig. 3 Image with cross talk

### 3.2 电极间信号串扰带来的畸变及校正算法

图 3 中虽然没有出现上述两种图像畸变,但还是可以看出图像整体形状存在畸变。由于阳极电极间存在电容,3 个电极相互之间会产生信号串扰,按照式(1)、(2)算法处理出来的图像呈椭圆形(见图),而 MCP 口径是圆的,正常情况下获取的图像也应该是圆的。出现这种现象,主要是因为信号串扰使电极收集到的电荷中除了有光子事件产生的电子云电荷外,还含有电极间电容相互耦合产生的串扰电荷<sup>[8]</sup>。为此,本文提出了一种新的算法对采集到的电荷量进行修正,消除了信号串扰产生的图像畸变:

$$\begin{cases} a = ws + wz + sz \\ b = ws \cdot wz + ws \cdot sz + wz \cdot sz \\ Q'_z = Q_z(1 - ws - a + b) + Q_w(b - wz) + Q_s(b - sz) \\ Q'_w = Q_w(1 - sz - a + b) + Q_s(b - ws) + Q_z(b - wz) \\ Q'_s = Q_s(1 - wz - a + b) + Q_w(b - ws) + Q_z(b - sz) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x' = \frac{2Q'_w}{Q'_w + Q'_s + Q'_z} - x_0 \\ y' = \frac{2Q'_s}{Q'_w + Q'_s + Q'_z} - y_0 \end{cases} \quad (4)$$

$ws, wz, sz$  为 3 个电极之间的信号串扰强度,  $Q_w, Q_s, Q_z$  是各个电极采集到的电荷量,通过式(3)能够消除采集的电荷量中所含有的信号串扰部分;  $x_0, y_0$  为位置偏移量(使目标中心位于图像中心)。按照上述优化的解码算法,采集的图像基本消除了信号串扰带来的图像畸变,如图 4 所示。

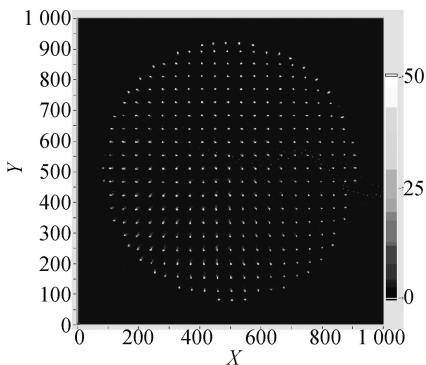


图 4 优化算法图像

Fig. 4 Optimized image

### 4 分辨率检测

普通 CCD 一般都用像元尺寸、像元数量等参数来表示它们的分辨能力。WSA 光子计数探测器没有实际的像元, MCP 作为它的感光面,自身不能记录入射粒子的位置,所以无法直接提供系统分辨率信息;而 WSA 阳极虽然能记录 MCP 降落电子云质心位置,但每次它都是作为一个整体对质心位置的记录。本文重构图像时将 WSA 阳极面板分割成  $N \times N$  个虚拟像元并不能准确反映探测器的实际分辨能力。因此,需要对探测器进行分辨率检测。检测原理图如图 1 所示,检测目标放置在 MCP 前面 1 mm 处,探测器收集该目标透射过来的光子。

在进行光学检测时,通常使用分辨率板作为检测目标,其中根据美国空军 1951 年制定的分辨率标准(即 USAF1951)制作的分辨率检测板应用最广。该检测板包含了不同空间频率的明暗条纹,分别赋予了不同的组号和单元号。观察者通过观测成像图片,仔细识别出系统所能分辨的最细条纹,记录下该条纹的组号和单元号,通过计算或查表能够得到该条纹的对应空间频率。图 5 为对一块分辨率标准检测板所成的灰度值图像,图 6 是对图 5 中方框部分的放大。通过观察能够发现该图像所能分辨的最细条纹单元为图 6 中方框部分,该单元条纹编号为第 2 组第 6 单元。通过生产厂家提供的分辨率对应表,可以知道该单元条纹对应的空间频率为 7.13 lp/mm,对应线宽为 0.14 mm,这可以认为是我们的探测器所能达到的分辨率。

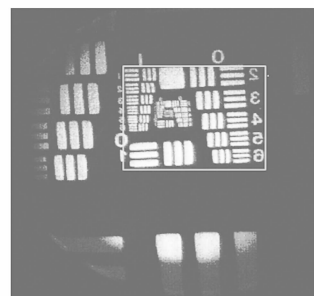


图 5 分辨率板成像检测结果图

Fig. 5 Image of resolution chart

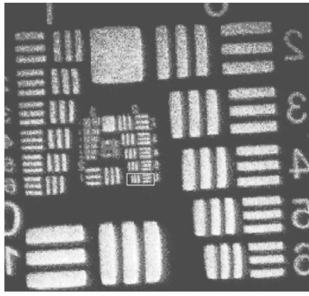


图 6 图 5 方框部分放大图

Fig. 6 Magnified figure of elected part in Fig. 5

人眼直接观察检测图得出分辨率的方法虽然方便, 但却存在人的主观性因素, 不同人的观测结果可能不同, 同一人不同时间的观测结果也可能不同。为了消除人眼观测主观性的缺点, 本文计算了探测器对第 2 组第 6 单元条纹的成像调制度 ( $M$ )。  $M$  的定义为: 最大亮度与最小亮度的差与它们的和的比值, 即:

$$M(\%) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\%, \quad (5)$$

很明显,  $M$  介于 0 和 1 之间。  $M$  越大, 意味着反差越大, 图像越容易分辨。 当最大亮度与最小亮度完全相等时, 反差完全消失, 这时的  $M$  等于 0。 黑白相间条纹的物调制度为 100%, 但是没有成像系统能将条纹百分百的转移到像平面上, 当空间频率增加时, 像的  $M$  也将随之降低。

对第 2 组第 6 单元的垂直条纹选取了水平方向一排虚拟像元, 对其水平条纹选取垂直方向一列虚拟像元, 分别读取了它们灰度值。 图 7、图 8 分别是它们的灰度值分布图, 红色的线条是其分布的拟合曲线。 本文计算了该单元条纹水平方向和垂直方向的  $M$ , 计算结果如表 1 所示。

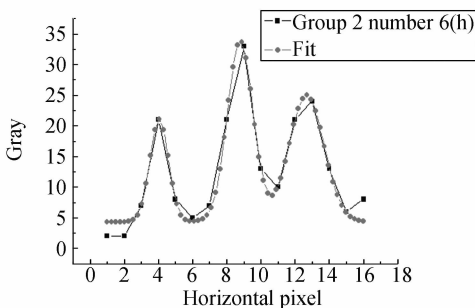


图 7 水平方向像元灰度值分布

Fig. 7 Gray level distribution in horizontal direction

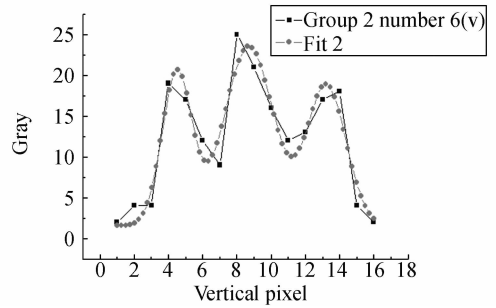


图 8 垂直方向像元灰度值分布

Fig. 8 Gray level distribution in vertical direction

表 1 第 2 组第 6 单元条纹成像调制度

Tab. 1 Strips imaging modulation for the 6th element in the 2nd group

像元方向		$I_{\max}$	$I_{\min}$	$M$	$M_{\text{ave}}$
垂直方向	条纹 1	21	4	68%	
	条纹 2	33	9	57%	57%
	条纹 3	25	9	47%	
水平方向	条纹 1	21	9	40%	
	条纹 2	24	10	41%	37%
	条纹 3	19	10	31%	

对于正常人来说, 人眼的调制度阈值为 3%, 目视系统的极限分辨率大致等于  $M$  为 3% 时所对应截止空间频率<sup>[9]</sup>; 摄影系统极限分辨率所对应的  $M$  相对要高 (>10%)<sup>[10]</sup>。 本文的探测器对第 2 组第 6 单元条纹的纵向、横向  $M$  分别达到了 57% 和 37%, 这表明探测器完全能够分辨该单元条纹, 即空间分辨率达到了 0.14 mm。

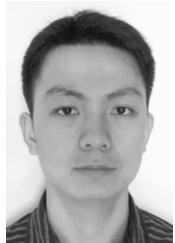
## 5 结 论

本文详细介绍了探测器样机的系统结构及成像原理; 分析了探测器存在的成像畸变, 提出了优化方案, 并最终获得了无畸变的图像; 以标准分辨率测试板 USAF1951 为目标, 对样机的分辨率进行了检测。 通过人眼观察, 所获得的图像能分辨到 2 组 6 单元条纹, 即空间频率 7.13 lp/mm; 为了消除人眼观察的主观性, 还对探测器对该单元条纹的成像调制度进行了计算。 计算结果表明, 提出的 WSA 光子计数成像探测器样机完全能分辨该单元条纹, 即空间分辨率达到了 0.14 mm。

## 参考文献:

- [1] LAPRADE B N. Advancement in microchannel plate technology[J]. *SPIE*, 1992,1655: 150-178.
- [2] SANDEL B R, BROADFOOT A L, CURTIS C C, *et al.*. The extreme ultraviolet imager investigation for the IMAGE mission[J]. *Space Science Reviews*, 2000,91:197-242.
- [3] LAPINGTON J S. Charge position readout devices for imaging photon detectors [J]. *Satellite Instrumentation, IEEE Colloquium on*, 1988;4/1-4/3.
- [4] 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]. *Apply Optic*, 2004, 25(5):25-29. (in Chinese)
- [5] MARTIN C, JELINSKY P, LAMPTON M, *et al.*. Wedge-and-strip anode for centroid-finding position-sensitive photon and particle detectors[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1981,52(7):1067-1074.
- [6] SMITH A, KESSEL R, LAPINGTON J S, *et al.*. Modulation effects in wedge and strip anodes[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989,50(11):3809-3518.
- [7] VALLERGA J V, KAPLAN G C, SIEGMUND O H W, *et al.*. Imaging characteristics of the extreme ultraviolet explorer microchannel plate detectors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1989, 36(1):881-886.
- [8] GOLDSTEN J O, HUMM D C, PAXTON L J, *et al.*. Performance of the wedge-and-strip microchannel plate detector and electronics for the Global Ultraviolet Imager[J]. *SPIE*, 1999,3765:408-416.
- [9] 杨志文. 光学测量[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1994.  
YANG ZH W. *Optical Measurement*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1994. (in Chinese)
- [10] 郝道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.  
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 1998. (in Chinese)

## 作者简介:



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年于中国科学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



尼启良(1966—),男,辽宁辽阳人,博士研究生,2003年于中国科学院研究生院获得理学博士学位,主要从事软 X 射线和紫外光学的研究。E-mail: niqiliang@yahoo.com



李敏(1981—),女,山东博兴人,博士研究生,主要从事短波段光学技术的研究。E-mail: liminciomp@sohu.com



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,主要从事航天光学精密机械结构的设计。E-mail: Liushj@yahoo.com.cn

## 导师简介:



陈波(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,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