

远紫外光子计数成像探测器检测方法与分析

张宏吉, 何玲平, 王海峰, 郑鑫, 韩振伟, 宋克非, 陈波

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 130039

摘要 为实现极光光谱中远紫外波段 N_2 LBH(140~180 nm)辐射成像探测的需求,采用远紫外光子计数成像探测器对其进行探测。探测器主要由 CsI 光电阴极、V 形叠加微通道板堆、感应式楔条形位敏阳极等构成。首先构建远紫外波段辐射定标测量装置,其主要由真空室、真空位移台、标准传递探测器、远紫外掠入射单色仪、真空紫外光源、信号处理地检设备等组成;然后测试探测器的量子效率、分辨率、暗噪声、极限计数率等;最后分析测试数据。实测结果表明,探测器在工作波段的量子效率最高可达 12.9%,空间分辨率为 88.3 μm ,暗计数率为 0.87 counts/($\text{s}\cdot\text{cm}^2$),探测器系统计数率有效测试范围为 0~350000 counts/s,能够满足探测极光的 N_2 LBH 辐射成像需求。

关键词 探测器;光子计数成像探测器;微通道板;远紫外;极光光谱

中图分类号 O433.1; TN23

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.060401

Testing Method and Analysis of Far Ultraviolet Photon Counting Imaging Detector

Zhang Hongji, He Lingping, Wang Haifeng, Zheng Xin, Han Zhenwei, Song Kefei, Chen Bo

State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130039, China

Abstract In order to realize imaging detection requirements of the far ultraviolet (FUV) band (140-180 nm) radiation of N_2 LBH in the auroral spectrum, we used the far ultraviolet photon counting imaging detector to detect it. The detector is mainly composed of CsI photocathode, V stack microchannel plates, induction type wedge and strip anode. First, the calibration device of FUV radiation is constructed, which is mainly composed of vacuum tank, vacuum displacement platform, standard transfer detector, FUV grazing incidence monochromator, vacuum ultraviolet light source, inspection equipment of signal processing, etc. Then, the quantum efficiency, resolution, dark noise, limit count rate, and other main performances of the detector are tested in detail. Finally, test data obtained are analyzed. Test results indicate that the maximum quantum efficiency of the detector at the working waveband is 12.9%, spatial resolution is 88.3 μm , dark count rate is 0.87 counts/($\text{s}\cdot\text{cm}^2$), and the effective test range of the count rate of the detector system is 0-350000 counts/s. The technical specifications of the developed detector meet the requirements of radiation imaging for N_2 LBH in the auroral spectrum.

Key words detectors; photon counting imaging detector; microchannel plate; far ultraviolet; auroral spectrum

OCIS codes 040.5160; 040.7190; 030.5260; 040.3780

1 引言

极光是由来自地球磁层或太阳的高能粒子流电离高层大气形成的,一般出现于高磁纬地区的上空,其光谱范围包括可见光和紫外光^[1]。对极

光 N_2 LBH(140~180 nm)辐射成像的探讨有助于深入研究磁暴和磁层亚暴期间地球磁场的扰动,以及地球等离子体层顶粒子刻蚀和重填的动力学特性等^[2]。对极光进行探测时,要求传感器必须既能响应极强的极光信号和气冕辐射(>10 kR),

收稿日期: 2017-11-08; **收到修改稿日期:** 2018-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(U1631117)

作者简介: 张宏吉(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事紫外波段光电探测器方面的研究。

E-mail: ciomphongji@126.com

同时又能响应极弱的极盖区辐射($< 20 \text{ R}$), 动态响应范围需达到 10^4 。这些要求决定了所使用的探测仪器必须具有成像噪声低、探测灵敏度高和动态范围较大等优点。

目前, 用于紫外辐射成像的探测器有 CCD、增强电荷耦合器件 (ICCD)、时间延迟积分 CCD (TDICCD)、电子倍增 CCD (EMCCD) 和位敏阳极型光子计数成像探测器, ICCD 和位敏阳极型光子计数成像探测器比较适合于紫外波段微弱辐射的探测。CCD 一般需要采取深度制冷措施才能抑制暗电流的影响, 从而提高探测器的信噪比, 这极大地增加了整套系统设计的难度, 不利于航天任务的进行。基于微通道板 (MCP) 的光子计数成像探测器能够探测离子、单个光子、带电粒子等辐射信号 (微通道板具有一定光电转化能力, 量子效率通常较低, 需要镀制光电阴极以提高量子效率), 探测器暗计数率能够低至 $0.5 \text{ counts}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 以下, 探测器的有效探测面积可以做到很大 (更利于大口径探测系统的实现), 能够满足空间紫外辐射的探测要求, 已经被广泛应用于空间紫外辐射探测中^[3-4]。

MCP 光子计数成像探测器主要由光电阴极、MCP、位敏阳极和相应的读出电路构成。国外已对光子计数成像探测器进行了深入研究, 美国伯克利分校和英国莱斯特大学自 20 世纪 70 年代至今已发表了大量的研究成果。目前为止, 国外已经成功地将楔条形 (WSA) 位敏阳极、交叉线位敏阳极、延迟线位敏阳极、MAMA 型位敏阳极与 Vernier 位敏阳极等多种形式的阳极应用于探测器中。国内研究光子计数探测器起步较晚, 中国科技大学、清华大学、

中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 (以下简称“长春光机所”) 等科研机构先后进行了研究工作。2013 年, 长春光机所将 WSA 阳极光子计数成像探测器应用于嫦娥三号极紫外相机, 实现了月基观测地球等离子体层, 并将我国自主研发的光子计数成像探测器成功地应用到空间探测仪器上^[4-15]。

相比可见光波段, 远紫外波段探测器在研制与性能测试方面具有独特性, 本文针对探测极光的 LBH (140~180 nm) 紫外波段辐射需求, 对研制的星载远紫外光子计数成像探测器的各项性能指标进行了详细的测试与分析。

2 远紫外光子计数成像探测器

探测器采用密封管形式进行真空封装, 光学窗口材料采用 MgF_2 , MCP 级联堆由 2 片电阻约为 $150 \text{ M}\Omega$ 、直径为 33 mm 的 MCP 叠加而成, MCP 表面镀制 CsI 阴极, 实现了探测器在 140~180 nm 波段具有较高的量子效率。图 1 为远紫外光子计数成像探测器的结构简图与实物图。为避免电子云直接落到位敏阳极上进行电荷收集而导致的静电场畸变和电子云偏差较大等缺点, 本设计采用感应电荷式阳极收集电荷。该感应电荷式阳极基底为相对介电常数 $\epsilon = 2.3$ 的石英玻璃, 基底厚度为 2 mm, 一侧镀制高阻感应层, 另一侧制备 WSA 位置解码图案, 阳极通过感应电荷的方式来读取高阻层收集到的从 MCP 堆出射的电荷云。探测器通过 3 根镀金信号电极将三路信号引出, 对电荷脉冲信号进行整形、放大等处理, 进而采集电子云中心位置信息。

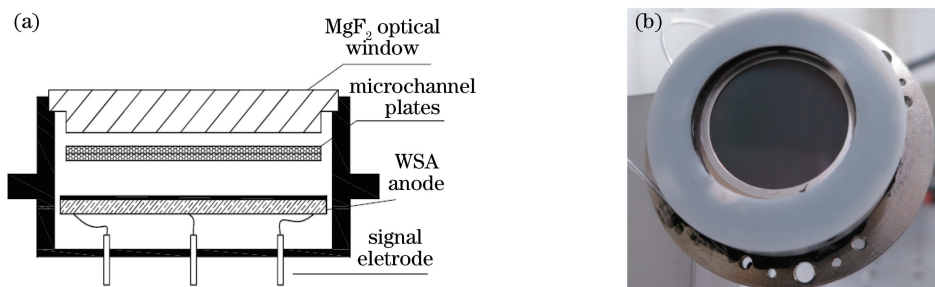


图 1 远紫外光子计数成像探测器的 (a) 结构示意图与 (b) 实物图

Fig. 1 (a) Structure diagram and (b) actual image of photon counting imaging detector

图 2 为远紫外光子计数成像探测器的工作原理, MCP 级联堆后面安装 WSA 位置灵敏阳极, 阳极接收经 MCP 放大后的电子云, 最终由阳极上的 3 个电极将获得的光电脉冲信号输出到远紫外光子计数成像探测器外部, 经信号处理系统整形放大后, 通

过 A/D 数据采集卡转化成数字信号输入计算机, 最后使用成像软件中的电荷云质心计算公式解码位置图像。电荷云质心计算公式为

$$X = \frac{2Q_s}{Q_w + Q_s + Q_z}, \quad (1)$$

$$Y = \frac{2Q_w}{Q_w + Q_s + Q_z}, \quad (2)$$

式中： Q_w 、 Q_s 和 Q_z 分别为 WSA 位敏阳极引出的 3 个电极 W、S 和 Z 采集到的电荷脉冲值。

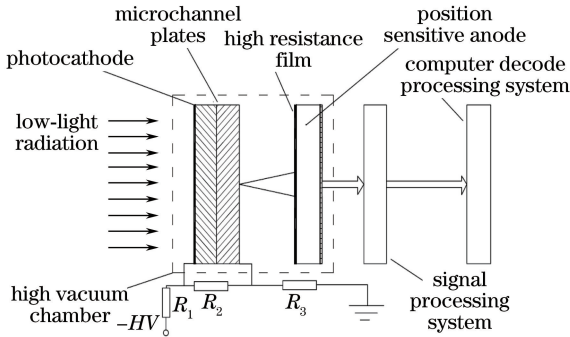


图 2 远紫外光子计数成像探测器工作原理

Fig. 2 Working principle diagram of photon counting imaging detector

图 3 为研发的 WSA 位敏阳极解码条纹设计图, 3 个电极(W、S、Z)之间彼此用绝缘沟槽进行物理隔离。W 为楔形解码条纹, 其宽度沿 Y 轴连续性增加; S 为条形解码条纹, 其宽度沿 X 轴离散性增加; 其余部分为 Z 形解码条纹。WSA 阳极的设计遵循以下原则: 最大化阳极的周期, 最大化 $F = f_{\max} - f_{\min}$, 选择具有低介电常数的基底。

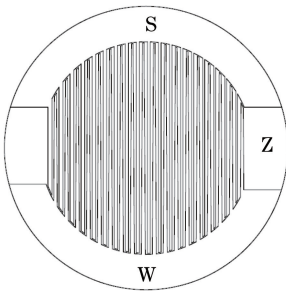


图 3 WSA 位敏阳极设计图

Fig. 3 WSA position sensitive anode design

裸的 MCP 在 140~180 nm 波段范围内的量子效率极低, 为提高探测器的光电转化效率, 一般采用在 MCP 前放置 CsI、KBr 和 KI 等光电阴极的措施来提高量子效率。经过理论分析与实验测试可知, CsI 光电阴极的量子效率最高, 抗辐照能力较强, 故本研究选用 CsI 作为光电阴极材料^[14]。CsI 光电阴极有反射式和透射式 2 种制备方式: 以入射光窗为基底和以 MCP 为基底。如以入射光窗为基底, 一般镀制入射式 CsI 光电阴极。考虑综合牢固度等因素后认为, 膜层厚度在几十纳米左右可达到最佳性能, 光电阴极薄膜各疏密层的厚度掌握难度大, 量子效率对厚度变化非常敏感。如以 MCP 为基底, 一

般镀制反射式光电阴极, 膜层厚度可在 400~1200 nm 较宽的范围内达到最佳性能, 受厚度与膜层状态的影响不大^[16]。通常 MCP 上下表面都镀有镍铬电极, 可以作为镀制反射式 CsI 光电阴极的基底, 而且在 MCP 上镀制光电阴极, 可以使光电阴极与位敏阳极距离更近, 具有减小光电子弥散、降低图像扭曲变形和提高探测器分辨率的优点。本研究采用热蒸发镀膜方式在 MCP 表面制备反射式 CsI 光电阴极, 光电阴极膜层厚度约为 600 nm, 浸入微通道板孔内深度约为 10 nm。

在使用 MCP 前, 采取高温烘烤与电子清刷进行预处理。为保证探测器的性能指标长时间稳定不变, 探测器封装完成后还要再次进行高温烘烤和强光照射等老炼处理。

3 探测器性能测试与分析

3.1 量子效率

图 4 为远紫外光子计数成像探测器量子效率(QDE)测试的检测装置示意图。该检测装置由真空紫外灯、掠入射单色仪和真空样品室组成, 由这三部分构成测试所需要的真空环境, 整个光辐射通路在真空腔体内进行传递。其中, 掠入射单色仪由前准直光学系统、远紫外波段光栅色散系统、后准直光学系统组成, 前后准直光学系统采用掠入射传递方式, 可以在较宽的光谱范围内提高远紫外波段辐射亮度, 以提高定标精度, 光栅色散系统利于准确选择测试波长。将待测探测器和标准二极管固定在真空室中的安装支架上, 抽真空至气压 $\leq 6 \times 10^{-4}$ Pa。调整光路, 使真空紫外灯经过掠入射单色仪分光产生远紫外波段单色辐射分别照射到探测器和标准二极管上。调整光栅, 在 120~200 nm 波段范围内(间隔 5 nm)逐波段测试探测器的光子计数值(实际接收到的光辐射量)和标准二极管的电压值(入射光总辐射量)。通过已知的标准二极管各波段的量子效率进行计算, 再经过数据拟合, 最终得出待测探测器的光谱响应分布。

由于标准探测器与待测探测器灵敏度不同, 2 个探测器无法同时工作在全有效口径内(标准探测器刚正常输出信号时, 待测探测器光子计数率已处于饱和状态无法使用), 文中采取在待测探测器窗口前紧贴放置孔径光阑的办法解决 2 个探测器数据采集匹配的问题, 孔径光阑尺寸与标准探测器有效孔径一致。由于氙灯光源的辐射在空间分布不均匀, 外加平行光管又会导致光辐射过弱而无法进行测

试,因此测试时将氙灯直接通过狭缝形成的点光源作为目标辐射源。标准探测器通过调整三维位移台进行扫描巡峰,当采集到最大数值时进行记录,再以同样的方式调整待测探测器的位置,当待测探测器输出最大值时进行记录。2个探测器采集完1组数据所需时间应低于2 min,对单一光强幅值进行长时间数据监测后发现,此时间内光源辐射强度基本不变。为减小待测探测器信号采集系统漏记信号的概率,测试时光强最大时计数率小于20000 counts/s。

图5为探测器量子效率测试信号处理电路示意图。首先测量某一波段单位时间内入射到待测探测器接收面上的光子数(M_d),再利用标准探测器测量入射光的绝对强度,计算出标准探测器的量子效率 P_e ,进而求出标准探测器的输出电压 V_d 为

$$V_d = M_d \times P_e \times e \times R, \quad (3)$$

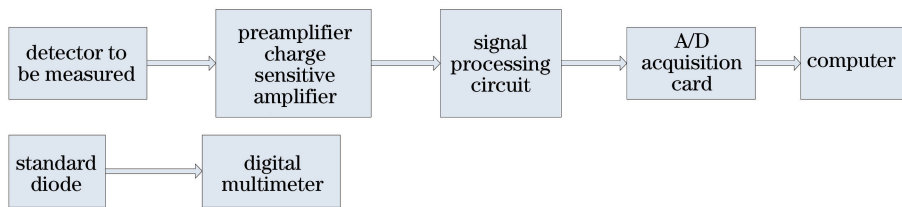


图5 探测器量子效率测试信号处理电路示意图

Fig. 5 Schematic of signal processing circuit for detector quantum efficiency

根据测试结果计算得出的远紫外光子计数成像探测器的光谱响应曲线如图6所示,在140~180 nm波段,探测器的量子效率从12.9%降到1.3%。探测器量子探测效率的测量误差主要为标准探测器传递误差、待测探测器测量误差与标准探测器信号测量误差。由厂家提供的测试报告可知,标准探测器传递误差为5%;由于信号采集系统存在漏计情况,待测探测器得到的计数率存在误差,经过计数率标定测试后可知,当探测器计数率<20000 counts/s时,采集系统计数误差<2.5%;标准探测器信号强度通过数字万用表进行测试,通过采集光源强度波动范围得到标准探测器测量误差为5%,经计算后可知探测器量子效率的测量误差<9.7%。

3.2 空间分辨率

探测器空间分辨率测试环境为暗室、室温、大气环境。探测器分辨率与光辐射波段无关,所以实验光源可以选用普通氙灯、汞灯或其他紫外光源。光源经过平行光管形成平行光入射到探测器前窗口,将刻有美国空军 USAF1951 透射式空间分辨率板1组和2组图案的掩模板紧贴在探测器入射光窗处,给探测器加高压(-2600 V),采集10 s曝光时间的探测器

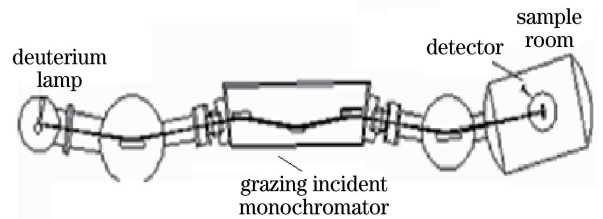


图4 探测器光谱扫描检测装置示意图

Fig. 4 Schematic of detector spectral scanning detector

式中: e 为元电荷; R 为标准二极管负载的电阻值。

单位时间内待测探测器实际接收到的有效光子数为 M_e ,同一时间内到达标准二极管与待测探测器的入射光子数一致,该波段待测探测器的量子效率 P_λ 为

$$P_\lambda = \frac{M_e}{M_d} = \frac{M_e \times P_e \times e \times R}{V_d}. \quad (4)$$

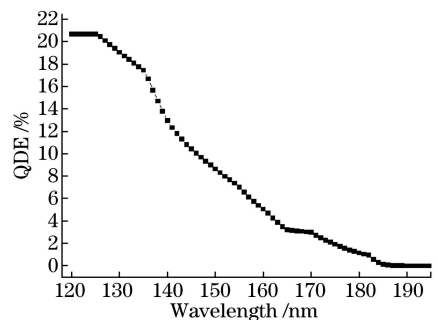


图6 探测器光谱响应分布测试曲线

Fig. 6 Spectral response distribution curve of detector

成像图案和局部放大图像,如图7所示。分辨率板上的每一组线的线对对应不同的分辨率,探测器所能分辨的最窄线对就是它的空间分辨率。由测试结果可知,该探测器的分辨率为5.66 lp/mm(分辨率板上2组第4个单元),对应探测器像元分辨率为88.3 μm 。

3.3 暗噪声

远紫外光子计数成像探测器的暗噪声主要来源于场发射、宇宙射线及MCP材料带来的放射性衰变效应。将探测器的暗噪声(即暗计数率)定义为无任何光照情况下在单位时间内探测器本身产生的脉冲个数。为避免数据采集时间过短带来的随机误

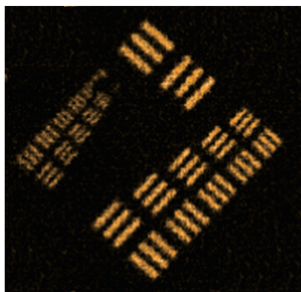


图7 探测器 USAF1951 空间分辨率板图像

Fig. 7 Image of USAF1951 spatial resolution plate in detector

差,设置单次暗计数采集时间为 600 s,采集 3 次,计算得到暗噪声的平均值。图 8 为采集探测器暗噪声数据得到的图像,表 1 为探测器暗噪声采集数据,探测器有效面积为 4.52 cm^2 ,600 s 内采集到的光子数分别为 2352 个、2371 个和 2325 个,通过计算可知探测器的暗计数率为 $0.87 \text{ counts}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$,探测器在暗背景时的测量误差为 1%。通过测试可知,所研制探测器的暗噪声水平与国际上同类探测器的水平一致,可以满足航天仪器对微弱辐射的探测需求。

表 1 探测器暗噪声数据

Table 1 Dark noise data of detector

Test number	Dark count	Dark count rate / $(\text{counts}\cdot\text{s}^{-1})$	Calculated value of dark noise / $(\text{counts}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2})$
1	2352	3.92	0.87
2	2371	3.95	0.88
3	2325	3.88	0.86

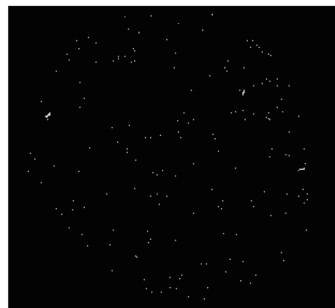


图 8 探测器暗噪声采集图像

Fig. 8 Detector dark noise acquisition image

3.4 探测器系统计数率线性度标定

探测器系统包括探测器与信号处理电路两部分。信号处理电路是制约光子计数成像探测器实际应用时能达到最高计数率的主要因素,对于同一个探测器,信号处理电路能力越强,探测器的动态范围越大。在实际应用中,受到研制成本、功耗等外部因素的限制,探测器通常需要根据待探测目标特性在计数率与分辨率之间进行平衡设计,两者不可兼得。为满足极光光谱中 N_2 LBH (140~180 nm) 辐射成像的探测需求,在满足成像分辨率的条件下,将探测器与信号处理电路作为一个整体进行了计数率线性度标定。

探测器输出的电荷脉冲需要电子学系统经过信号提取、放大、整形及 A/D 量化等处理后输入计算机进行成像解码。探测器电子学系统原理框图如图 9 所示。

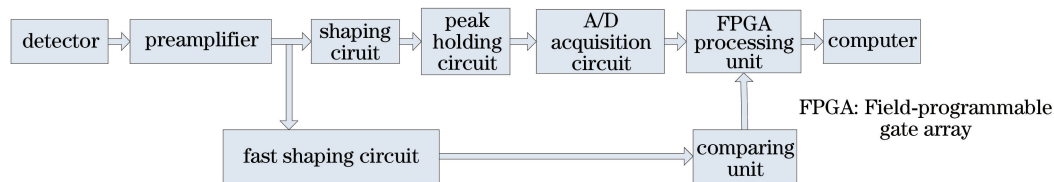


图 9 探测器电子学系统原理框图

Fig. 9 Principle block diagram of detector electronic system

如图 9 所示,探测器输出的电荷脉冲信号由于受到信号整形时间、信号峰值保持电路漏计、A/D 数据采集卡速率上限制约以及需要对有脉冲叠加的信号进行剔除操作等影响,对紫外辐射实际信号强度的探测会出现漏计,电子云中心位置计算会出现偏差,导致了探测数据的偏差与成像分辨率下降。

为对计数误差进行有效校正,需要在不同强度的辐射源条件下进行探测器计数率线性度测试。此项测试是为了标定探测器系统的计数率线性度,只需要在任一固定波长下进行测试即可,测试结果适用于其他工作波段。测试装置如图 10 所示,将待测

探测器与标准探测器安装在三维位移台的同一平面上,暗室借用真空罐构成,测试环境为大气状态,选用汞灯作为辐射光源,光源前放置规格为 253.7 nm 波段的窄带滤光片,以保证单波段光辐射输出,在光源前放置可调孔径光阑进行光强调节。采用在待测探测器窗口前放置孔径光阑的方式实现与标准探测器不同灵敏度的匹配。信号处理系统与所研制探测器作为一个整体进行测试,探测器在工程应用时也是与该系统进行匹配使用,测试过程与量子效率测试过程类似。

利用量子效率测试环节的计算公式,最终得到

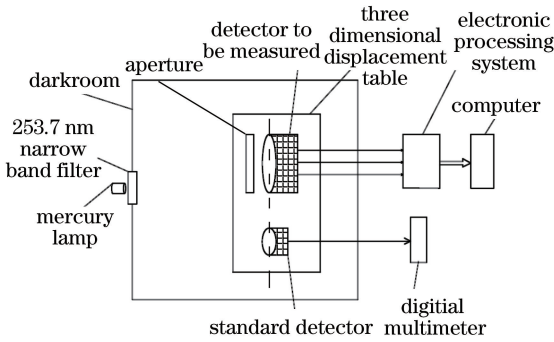


图 10 探测器计数率线性度标定测试装置示意图

Fig. 10 Schematic of measuring the linearity of count rate of detector

如图 11 所示的探测器系统计数率线性度曲线,横坐标为标准探测器输出端采集到的光子计数率,纵坐标为待测探测器采集到的光子计数率。

从图 11 可以看出:当光强较弱时,探测器系统最终采集到的光子计数率近似于线性增大;当光强增至大于 90000 counts/s 时,探测器漏计越来越多,探测器系统采集到的光子计数率非线性增大;当光强增至 350000 counts/s 时,探测器系统光子采集能力达到上限;随着光强继续增大,由于电荷脉冲相互

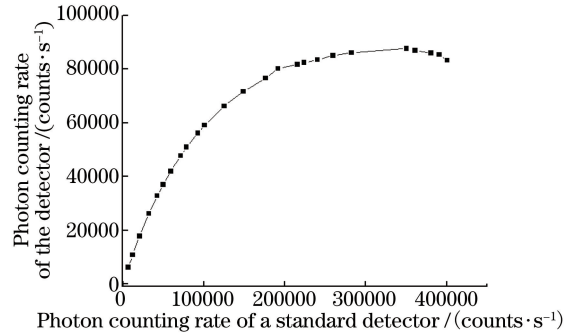


图 11 探测器系统计数率线性度标定

Fig. 11 Calibration of count rate linearity of detector system

叠加的情况越来越严重,大量有效信号被剔除,最终采集到的光子计数率反而呈现下降趋势。

为验证不同计数率下探测器的成像分辨率,在探测器前放置 1 个矩形分辨率板,调整探测器采集光子计数率,采集不同计数率情况下的探测器图像。图 12 为不同计数率下探测器分辨率成像的变化结果,可以看出:当光强增大到 352300 counts/s 时,探测器成像图像已经稍有模糊,但仍能正常成像;当光强增至 365800 counts/s 时,探测器成像图像的清晰度已经明显下降。

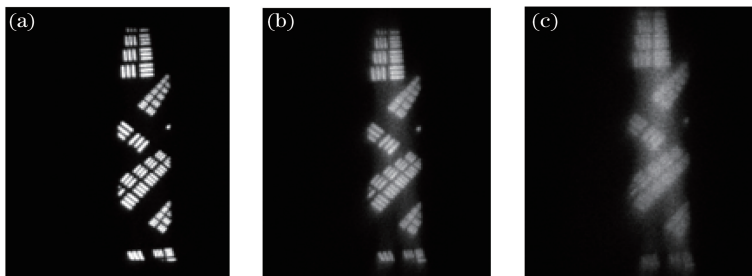


图 12 不同光强条件下探测器的分辨率。(a) 81200 counts/s; (b) 352300 counts/s; (c) 365800 counts/s

Fig. 12 Resolution detector at different light intensities. (a) 81200 counts/s; (b) 352300 counts/s; (c) 365800 counts/s

5 结 论

为了满足极光 N_2 LBH(140~180 nm)远紫外波段辐射需求,研制了空间用远紫外光子计数成像探测器。该探测器使用 2 片 V 形叠加的 MCP 堆与 WSA 位敏阳极,在 MCP 上镀制高光电转换效率的 CsI 光电阴极,以提高光电转换效率。为保证所研制的探测器能够满足空间探测需求,对探测器的空间分辨率、量子效率、暗噪声以及探测器系统线性度等进行测试。实测结果表明,探测器在工作波段的量子效率最高为 12.9%,空间分辨率为 $88.3 \mu\text{m}$ (相当于 5.66 lp/mm),暗计数率为 $0.87 \text{ counts}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$,探测目标强度的计数率 $< 350000 \text{ counts/s}$ 时,可以进行有效探测。研制的远紫外光子计数成像探测器的

主要性能指标与国际先进同类探测器一致。采用的探测器定标方法已在探月工程和风云三号卫星载荷研制中得到应用。

致谢 感谢中国电子科技集团公司第五十五所赵文锦高级工程师、汪述猛工程师、王涛工程师等在远紫外光子计数成像探测器研制过程中给予的大力支持。

参 考 文 献

- [1] Mende S B, Heetderks H, Frey H U. Far ultraviolet imaging from the image spacecraft: 1. system design [J]. Space Science Reviews, 2000, 91: 243-270.
- [2] Liou K. Polar ultraviolet imager observation of

- auroral breakup [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, 115(A12): A12219
- [3] He L P, Chen B, Zhang H J, *et al.* Radiation calibration of EUV space cameras [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1036-1041.
何玲平, 陈波, 张宏吉, 等. 极紫外波段空间相机的辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5): 1036-1041.
- [4] Ni Q L. Optimization for spatial resolution and count rate of a far ultraviolet photon-counting imaging detector based on induced charge position-sensitive anode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0804001.
尼启良. 远紫外光子计数成像探测器分辨率及计数率的优化[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0804001.
- [5] Ni Q L. Study on characterisitic performance of a MCP-based photon-counting imaging detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1104001.
尼启良. 极紫外微通道板光子计数成像探测器性能研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1104001.
- [6] Han S L, Chen B, Ni Q L, *et al.* Electron cloud diffusion property of photon counting detector based on induction readout [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1732-1736.
韩素立, 陈波, 尼启良, 等. 光子计数探测器感应位敏阳极的电子云扩散[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1732-1736.
- [7] Lei Y F, Long J H, Liu J Y, *et al.* Design of framing image tube with large detection area [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0904009.
雷云飞, 龙井华, 刘进元, 等. 大探测面积分幅变像管设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0904009.
- [8] Zong F K, Zhang J J, Lei B G, *et al.* Design of X-ray framing camera with single perspective[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0523001.
宗方轲, 张敬金, 雷保国, 等. 单一视角 X 射线分幅变像管设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0523001.
- [9] Liu Y A, Li L S, Liu Z, *et al.* Study on position-sensitive anode in photon counting imaging detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0523001.
刘永安, 李林森, 刘哲, 等. 光子计数成像探测器位敏阳极研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0523001.
- [10] Song J, Zhao B S, Sheng L Z, *et al.* Selection of MCP for array X-ray pulsar navigation detector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 402-407.
宋娟, 赵宝升, 盛立志, 等. X 射线脉冲星导航探测器的微通道板甄选[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 402-407.
- [11] Liu Y G, Zhao F F, Hu H J, *et al.* Properties of photon counting imaging detector with Au photocathode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0123002.
刘永安, 赵菲菲, 胡慧君, 等. 采用金阴极的光子计数成像探测器的性能[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0123002.
- [12] Siegmund O H W, Lampaton M, Bixler J. Operational characteristics of wedge and strip image readout[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1986, 33(1): 724-727.
- [13] Siegmund O H W, Lampaton M, Bixler J, *et al.* Wedge and strip image readout systems for photon-counting detectors in space astronomy[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(12): 2139-2145.
- [14] Lapington J S. High speed imaging using a capacitive division technique [J]. *Nucler Instruments & Methods in Physics Research A*, 2012, 695: 410-414.
- [15] Xing Y, Chen B, Jin F Y, *et al.* The partition noise research of MCP photon counting imager detector based on Vernier anode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(6): 0604002.
邢研, 陈波, 金方圆, 等. 基于 Vernier 阳极微通道板光子计数成像探测器分割噪声的研究[J]. *光子学报*, 2016, 45(6): 0604002.
- [16] Fan L, Li Y K, Chen T, *et al.* Recent progress in research on CsI thin film photocathodes [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2015, 30(3): 225-232.
樊龙, 黎宇坤, 陈韬, 等. 碘化铯薄膜光阴极的研究进展[J]. *无机材料学报*, 2015, 30(3): 225-232.