

doi: 10.3788/gzxb20164504.0423007

空间热离子成像探测器

李林森^{1,2}, 刘永安¹, 孔令高³, 刘舵^{1,2}, 强鹏飞¹, 赵宝升¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 西安交通大学研究生院, 西安 710119)

(3 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

摘 要:研制一种用于热离子、紫外、X 射线等多种目标源的成像探测器。该探测器输出为一张目标源的灰度图像, 该图像的灰度等级及其分布对应目标源的强度分布, 图像的灰度分布均匀性对应目标源的束流均匀性。以紫外光源作为目标源对探测器的性能参量进行实验测试, 实验结果表明该探测器的空间分辨率优于 $120\ \mu\text{m}$, 输出均匀性优于 97%, 输入输出正比性误差小于 $\pm 4\%$ 。

关键词:成像探测器, 热离子, 紫外, 灰度分析, 均匀度

中图分类号: P352

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0423007-5

Detector for Space Thermal Ion Imaging

LI Lin-sen^{1,2}, LIU Yong-an¹, KONG Ling-gao³, LIU Duo^{1,2}, QIANG Peng-fei¹, ZHAO Bao-sheng¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710119, China)

(2 Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710119, China)

(3 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

Abstract: A kind of space thermal-ion imaging detector was investigated, which can be used in detecting a variety of target source such as thermion, ultraviolet, X-rays etc. The output of the detector is a grayscale image of the target source, the detail information including the gradation level and gradation distribution of the image are obtained based on the intensity and thermal-ion uniformity of the target source. This paper conducted experiments to test the detector with target source of ultraviolet light. Performance parameters as follows have been detected; the resolution is better than $120\ \mu\text{m}$; the input-output linearity error is $< \pm 4\%$ and the output uniformity is better than 97%.

Key words: Imaging detector, Thermionic, Ultraviolet, Gradation analysis, Uniformity

OCIS Codes: 230.0040; 040.1880; 120.6085; 110.2970

0 引言

空间热离子是指能量几十电子伏特以下的低能离子, 其广泛存在于地球电离层中。电离层是太阳剧烈活动引起灾害性空间天气的主要发生区域, 对人类航天活动的安全及导航、通信系统的正常运行有着重要影响^[1-3]。因此, 电离层探测一直是国内外空间探测的研究热点。近年来, 国外实施的以电离层为主要探测目标的探测计划有美国的国防卫星计 (Defence

Meteorological Satellite Program, DMSP), 通信/导航故障预报系统 (Communications/Navigation Outage Forecasting System, C/NOFS) 计划, 以及 2013 年发射的 SWARM 探测卫星。其中: DSMP 卫星系列搭载有离子漂移计和能量粒子探测器, 为研究极区电离层等离子体对流和低纬电离层漂移以及极光粒子沉降提供了极为宝贵而丰富的长期观测资料^[4-5]。C/NOFS 计划中每颗卫星均搭载数台离子探测仪, 通过对低纬度电离层进行监测实现对电离层大气闪烁的预报^[6-7]。

基金项目:国家自然科学基金 (No. 41404124) 和中国科学院空间科学战略性先导专项 (No. XDA04060202) 资助

第一作者: 李林森 (1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空间离子探测器。Email: guoerlls@163.com

导师: 赵宝升 (1959-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为单光子计数探测。Email: open@opt.ac.cn

通讯作者: 刘永安 (1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为光电成像器件与技术。Email: liuyua@opt.ac.cn

收稿日期: 2015-09-25; **录用日期:** 2016-01-04

<http://www.photon.ac.cn>

SWARM 探测卫星搭载有电场仪,可对离子流进行三维成像探测^[8-9],用于研究电离层电场特性.在这些电离层探测计划中,热离子均是重点探测要素之一.而我国对电离层的探测研究也在不断深入,其中用于电离层监测的电磁探测小卫星预计 2016 年发射.未来的探测计划包括已列入空间科学先导专项的“磁层—电离层—热层耦合小卫星星座探测计划”.这一系列科研计划的实施对提高我国热离子探测研究的地位,使我国的空间科学进入国际最先进的行列具有非常重要的意义.

热离子探测研究的重点是对离子流进行三维成像探测,对比不同空间天气条件下各能量段离子流运动状态的变化,进而为相关科学问题进行服务.为使探测器具有成像探测能力,并具有较大的探测面积^[10-13].本文以离子-电子转换型探测器为基础,研制出一种用于热离子、紫外线、X 射线等多种目标源的成像探测器.配合离子光学系统,该探测器具有一定的能量分辨能力,可对目标源中不同能量段的离子流进行相对强度分析.对单一能量目标源,该探测器可对目标源束流的形状、均匀性进行测试分析.

1 热离子成像原理

热离子成像仪由前端的离子光学系统和后端的成像探测器组成.典型的离子光学系统的工作原理如图 1,两个同心的球状偏转栅网所加电压分别为 V_0 、 V_1 ,在栅网之间形成一个偏转电场,离子流进入该电场区域后在电场力的作用下发生偏转,其中具有较高能量的离子将偏向探测器输入端的边缘,反之则偏向探测器输入端的中心^[14-15].假设一质量为 m ,带电量为 q ,速度为 v 的离子沿水平方向飞入偏转电场(场强为 E),该离子在偏转电场中的渡越时间为 t ,经理论计算,该离子最终运行到偏离探测器中心距离 X 的位置由式(1)和式(2)联立解出.

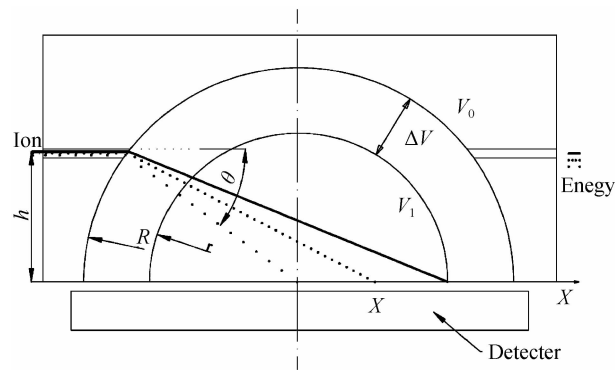


图 1 热离子成像原理
Fig. 1 Schematic image of thermal ion detection

$$X = \frac{m v h}{q E \sin \theta} + \frac{1}{2} v t + \cot \theta t - R \cos \theta \quad (1)$$

$$R \cos \theta - v t - \frac{3}{2} \frac{q E \cos \theta}{m} t^2 = \sqrt{r^2 - \left(h - \frac{1}{2} \frac{q E \sin \theta}{m} t^2 \right)^2} \quad (2)$$

当目标源由多个能量段(v)的离子流组成时,探测器输入端的特定区域将接收到确定能量段的离子流.

热离子成像仪的结构如图 2,主要包括离子通道、偏转栅网及探测器.探测器输入端为离子-电子转换器,后接光锥组件(包括荧光屏与 CCD 相机).像增强器与 CCD 耦合一般采用成像物镜或者光锥做为中继元件.由于光锥与 CCD 耦合效率高、体积小、重量轻,本文采用光锥做为中继元件与 CCD 进行耦合.在探测器输入端,本文将荧光屏直接制作在光锥输入端以提高耦合效率.

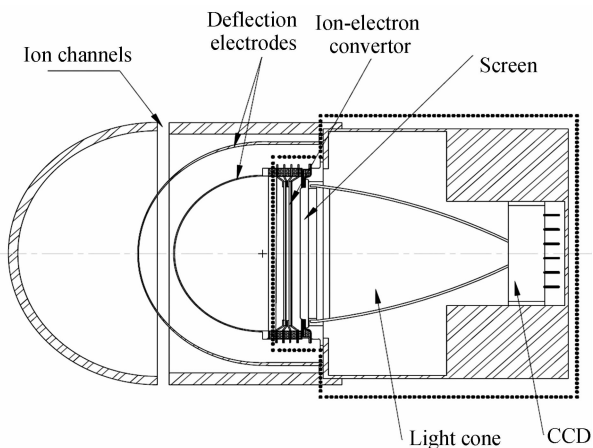


图 2 热离子成像仪结构
Fig. 2 Structure image of thermionic imager

当探测器输入端有离子流入射时,经过离子-电子转换产生的电子流在高电压加速下轰击荧光屏使荧光屏发光.在荧光屏上得到一副目标源的灰度图像,该图像由光锥传输至光锥输出端,由 CCD 进行采集,该灰度图像即为探测器的输出.在探测器的线性响应范围内,探测器输出图像某位置的灰度值可表征探测器入射端相应位置接收到的离子流强度.通过处理软件保存并计算该灰度图像各像素点的灰度值,可获得离子流的相对流强分布,即

$$\sum_{SE_i} G_i / G = R_i \quad (3)$$

式中 G 表示所有像素点灰度值总和, $\sum_{SE_i} G_i$ 表示能量为 E_i 范围内灰度值之和, R_i 表示能量为 E_i 的离子流占总离子流强的百分比.如目标源离子流总强度 I 已知,则各能量段离子流的强度 I_i 为

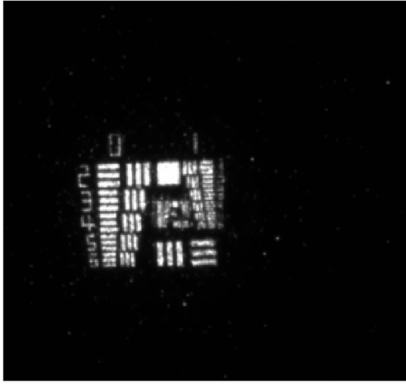
$$I_i = I R_i \quad (4)$$

2 探测器性能测试

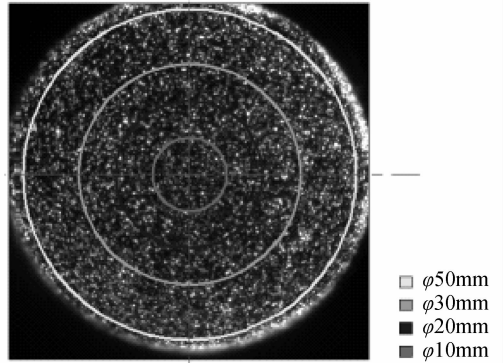
2.1 空间分辨率测试

对于成像探测器,空间分辨率是探测器的重要指

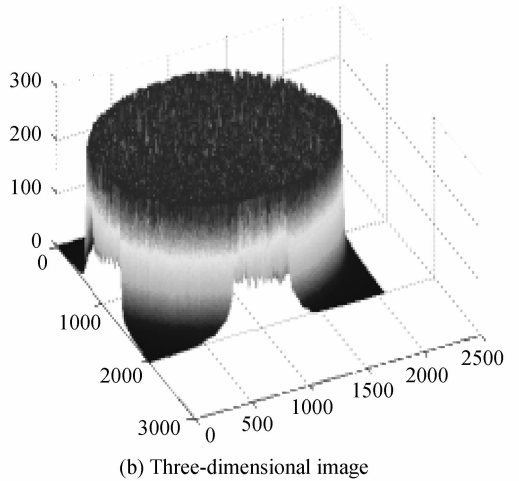
标,本文使用紫外灯为目标源,将 USAF1951 空间分辨率测试模板图像经平行光管投影在探测器输入面上进行测试,直接采集荧光屏上的图像,对探测器的空间分辨率进行测试,测试结果显示探测器分辨率优于 $120\ \mu\text{m}$,如图 3.



(a) Gray scale image



(a) Gray scale image



(b) Three-dimensional image

图 4 输出图像均匀性测试结果
Fig. 4 Uniformity result of the output image

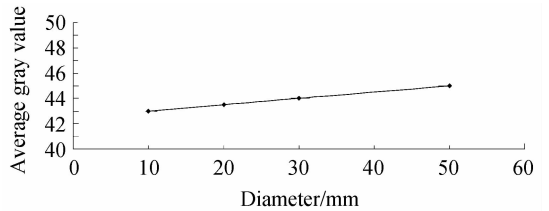


图 5 输出图像均匀性
Fig. 5 The uniformity of the output image

图 3 探测器空间分辨率测试结果

Fig. 3 Spatial resolution of image obtained from thermionic imager

2.2 输出均匀性测试

输出均匀性是指在均匀入射源照射下,探测器输出图像灰度的均匀性.本文探测器提取荧光屏图像的灰度信息,间接测试目标源的均匀性及强度分布.影响其测试准确度的因素包括:探测器增益的均匀性,光锥传输的均匀性以及荧光屏的发光均匀性.该探测器输出的不均匀性会在测试过程中引入测试误差.

为评价该探测器的精确度,对探测器的输出均匀性进行实验测试.实验使用均匀紫外光源照射探测器输入面,对荧光屏上的灰度图像进行采集,之后将采集到的图像按不同直径进行分割,由软件测得测试图像不同半径区域内的灰度平均值,并对测试结果进行对比,测试结果如图 4.测试结果显示灰度等级偏差小于 3%,即热离子探测器不同位置处均匀性优于 97%,如图 5.根据此测试结果可知,该探测器测试误差小于 3%.

2.3 输入与输出的线性偏差测试

使用该探测器对目标源进行测试必须满足输出与输入的线性变化关系,即当目标源强度线性变化时,输出图像的灰度平均值也相应的线性变化.否则,探测器不能反映目标源的真实信息.输入输出的线性关系取决于探测器的线性增益范围和荧光屏发光强度的线性范围.线性关系越好,测试误差也越准确.

实验采用均匀的紫外光源照射探测器入射端,在光源端增加不同数量的减光片得到强度线性变化的入射光,依次记录入射光功率,采集探测器输出灰度图像,并用软件计算不同数量减光片时相应的输出图像的灰度平均值,实验测得该探测器的输入输出正比性结果为:该探测器输入输出正比性偏差小于 $\pm 4\%$.实验数据处理结果如图 6.实验表明:在探测器未饱和

前,该探测器的输入与输出具有较好的线性关系.当目标源流强度太高导致探测器过早进入饱和状态,如图7,即使此时探测器的输入线性增强,输出图像的灰度值也不会变化,此情况下探测器输入与输出不再保持线性变化关系,不能对目标源进行定量分析.

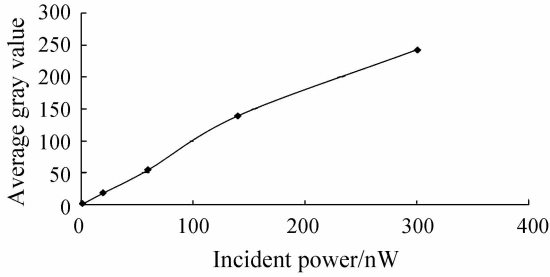


图 6 输入输出正比性

Fig. 6 Proportional relationship between the input and the output

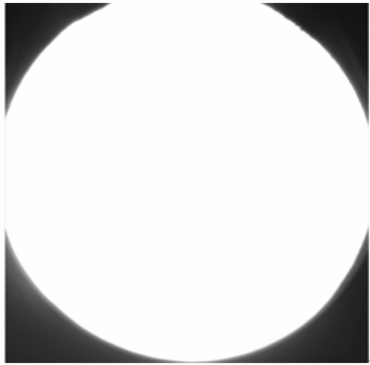
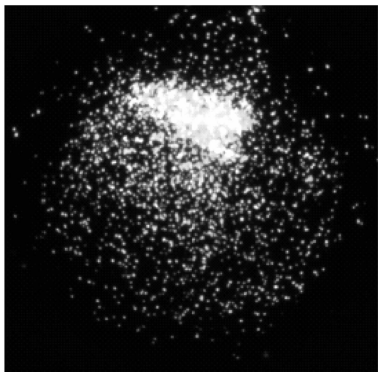


图 7 饱和状态输出图像

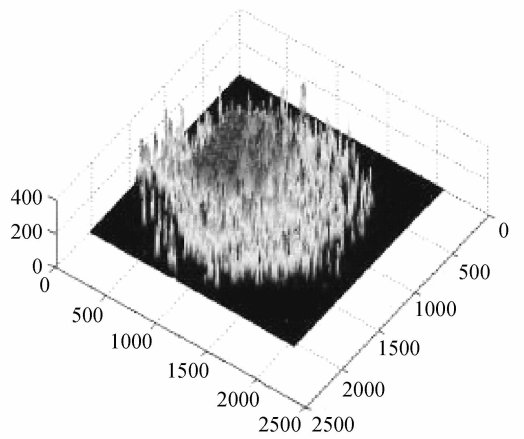
Fig. 7 Output image of the detector in saturated condition

2.4 非均匀离子源测试

为反映该探测器对非均匀目标源的测试能力,本文以电离真空计做为非均匀离子源,分别使用电离真空计的正常工作和去气模式对探测器进行对比实验.实验结果显示:当其他实验条件不变,只切换真空计的两种工作模式时,真空计逸出的离子流量差异很大.正常工作模式下,有少量离子逸出真空计,被探测器接收,如图8.而在去气模式下,大量离子逸出真空计,探测器输出图像中间大片区域灰度值已经饱和,如图9.



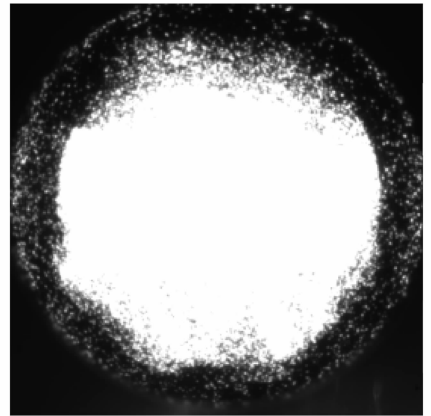
(a) Gray scale image



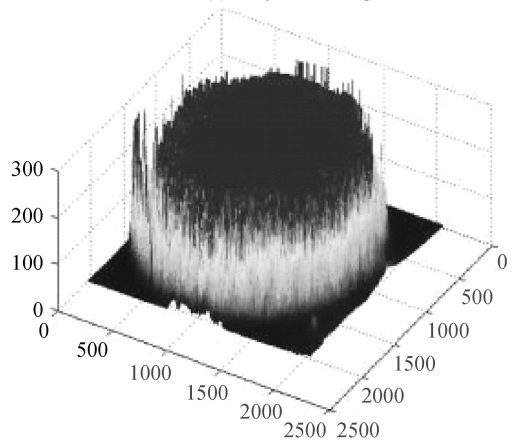
(b) Three-dimensional image

图 8 真空计正常工作模式下测试结果

Fig. 8 Test result when the vacuum gauge is working under the normal mode



(a) Gray scale image



(b) Three-dimensional image

图 9 真空计去气工作模式下测试结果

Fig. 9 Test result when the vacuum gauge is working under the degassing mode

3 结论

在探测器线性范围内,在保证输入输出线性关系的前提下,对目标源进行成像探测,以目标源灰度图像的灰度均匀性间接测试目标源强度分布,配合后端图

像处理软件,直观且较为准确的对多种目标源的强度分布进行测试,并对其进行均匀性分析,该方案在类似研究领域具有重要的应用潜力.

致谢 感谢中科院国家空间科学中心对本文研究的支持.

参考文献

- [1] CHRISTENSEN E F, LÜHR H, KNUDSEN D, *et al.* Swarm an earth observation mission investigatinggeospace[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**(1): 210-216.
- [2] RISHBETH H. F-region links with the lower atmosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, **68**(3): 469-478.
- [3] ROBERT F, PFAFF R F. The near-earth plasma environment [J]. *Space Science Reviews*, 2012, **168**(1): 23-112.
- [4] MARCHAND R. Test-particlesimulationofspace plasmas[J]. *Communications in Computational Physics*, 2010, **8**(3): 471-483.
- [5] FEJERB G, TRACYB D, PFAFFR F. Equatorial zonal plasma drifts measured by the C/NOFS satellite during the 2008 - 2011 solar minimum. [J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2013, **118**(6): 3891-3897.
- [6] COLEY W R, HEELISR A, HAIRSTONM R, *et al.* Ion temperature and density relationships measured by CINDI from the C/NOFS spacecraft during solar minimum[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, **115**(A2): 2313-2315.
- [7] FEJERB G. Low latitude ionospheric electrodynamics [J]. *Space Science Reviews*, 2011, **158**(1): 145-166.
- [8] MARCHAND R BURCHILI J K, KNUDSEN D J. Modelling electrostatic sheath effects on swarm electric field instrument measurements[J]. *Space Science Reviews*, 2010, **156**(1): 73-87.
- [9] YAU G, JAMES W. The Canadian enhanced polar outflow probe (e-POP) mission in LWS [J]. *Advances in Space Research*, 2006, **38**(8): 1870-1877.
- [10] SHENG Li-zhi, ZHAO Bao-sheng, ZHOU Feng, *et al.* Performance of the detection system for X-ray pulsar based navigation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9): 1071-1076.
盛立志,赵宝升,周峰,等.X射线脉冲星导航探测器性能研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(9): 1071-1076.
- [11] SONG Juan, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* Research on shared anode used for the large area array MCP detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0803002.
宋娟,赵宝升,盛立志,等.基于MCP大面阵X射线探测器共享阳极的研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8): 0803002.
- [12] ZHU Hong-quan, WANG Kui-lu, XIANG Shi-ming, *et al.* MTF measurement and analysis of micro-channel plate image intensifies[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 1983-1987.
朱宏全,王奎禄,向世明,等.微通道板像增强器的调制传递函数的测量与研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 1983-1987.
- [13] NI Qi-liang, BU Shao-fang, LIU Shi-jie, *et al.* Preconditioning experiment research of microchannel plate photon counting imaging detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6): 658-663.
尼启良,卜邵芳,刘世界,等.微通道板光子计数成像探测器预处理试验研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(6): 658-663.
- [14] KAISER L M. The stereo mission: an overview [J]. *Advances in Space Research*, 2005, **36**(8): 1483-1488.
- [15] MARCHAND R, MACKAY J L F, KABIN K. Consistency check of a global MHD simulation using the test-kinetic approach[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2008, **50**(7): 074007-110.