

文章编号 1004-924X(2017)11-2865-07

基于 CCD 和 CsI 闪烁体的硬 X 射线成像

陆 波, 王于仁, 杨彦佳, 崔苇苇, 陈 勇*

(中国科学院高能物理研究所 粒子天体重点实验室, 北京 100049)

摘要:根据 CCD 的工作特点, 采用曝光控制和多帧图像叠合技术, 研制了基于 CCD 和 CsI 闪烁体的硬 X 射线成像探测器, 以提高对硬 X 射线的探测效率。搭建了实验平台, 以微加工技术制作的镍准直器为成像目标进行了实验验证。实验中, 利用⁵⁵Fe 放射源对 CCD 进行直接成像; 然后利用²⁴¹Am 放射源同时对 CCD 和硬 X 射线成像探测器分别进行直接成像和间接成像。最后, 对图像中出现的拖影、清晰度渐变和区域亮度不同等现象进行分析。分析结果表明: 相比 CCD 本身, 这种技术不仅拓展了探测器的可响应能区, 而且提高了量子效率, 并且在²⁴¹Am 放射源照射下, 实现了对硬 X 射线的高分辨成像, 其空间分辨优于 50 μm 。该器件可作为位置灵敏探测器应用于未来空间天文观测。

关键词:X 射线成像; 电荷耦合器件(CCD); CsI 闪烁体; 空间分辨率

中图分类号:TN386.5; O434.19 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172511.2865

Hard X-ray imaging based on CCD and CsI scintillator

LU Bo, WANG Yu-sa, YANG Yan-ji, CUI Wei-wei, CHEN Yong*

(Key Laboratory for Particle Astrophysics,

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: ychen@ihep.ac.cn

Abstract: In consideration of the working characteristics of a Charge Coupled Devices (CCD), an imaging detector based on CCD and CsI scintillator was presented by using flexible exposure control and multi-frame superpositioning techniques to improve the detection efficiency of hard X-ray. An experimental platform was built, in which a nickel collimator based on a micromachining techniques was adopted as the imaging spatial target. In the experiment, the ⁵⁵Fe X-ray source was adopted for direct imaging of CCD itself. Then, the ²⁴¹Am X-ray source was used for both direct imaging by CCD itself and indirect imaging by the hard X-ray imaging detector. Finally, some phenomenon exhibited in the images such as drag shadows, clarity gradients, and different area brightness were analyzed. The results indicate that the techniques presented not only expands the responsive energy range, but also improves the quantum efficiency significantly as comparing with CCD itself. In addition, under exposure with ²⁴¹Am X-ray sources, hard X-ray imaging with a spatial resolution better than 50 μm was achieved. The imaging detector is promising to be a position sensitive detector for future space astronomical observations.

Key words: X-ray imaging; Charge Coupled Device(CCD); CsI scintillator; spatial resolution

收稿日期: 2016-12-09; 修订日期: 2017-01-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11603027, No. 11403024); 中国科学院重点部署项目大科学前沿与交叉课题

1 引言

在各种 X 射线探测器中,光电耦合器件 (Charge-Coupled Device, CCD) 同时具有卓越的能量分辨力与空间分辨力,在 X 射线天文探测领域有着非常广泛的应用,国际上著名的 X 射线天文卫星如 XMM-Newton^[1]、Chandra^[2]、Hitomi^[3-4]和 eROSITA^[5-6]等都将 CCD 作为有效载荷的核心探测器。然而,CCD 对硬 X 射线能段的探测效率很低^[7]。一般地,当 X 射线能量超过 15 keV 时,CCD 的量子效率 (Quantum Efficiency, QE) 急剧下降至 10% 以下。因此,在需要探测硬 X 射线时,单一的 CCD 探测器很少被直接应用。

在硬 X 射线空间观测中,需要空间分辨力较高的位置灵敏探测器,一方面它可以作为成像探测器对天体进行成像观测;另一方面它可以与分光晶体等设备结合,进行高能量分辨的能谱观测。例如 NuSTAR 卫星,它采用像素尺寸约为 0.6 mm×0.6 mm 的碲锌镉 (CZT) 探测器^[8]进行硬 X 射线的成像观测。由于探测器的像素尺寸会限制其空间分辨能力的进一步提高,考虑到 CZT 等探测器的像素尺寸很难大幅变小,亟需发展新的高位置灵敏的硬 X 射线探测器。

CCD 的成像能力受限于探测器本身的温度与电子学性能。CCD 的暗电流噪声与温度正相关,其运行往往需要 173 K 以下的低温环境。例如,在 XMM-Newton 天文望远镜的有效载荷 EPIC 中,CCD 工作在 153 K 附近^[1]。

CCD 成像需要控制好曝光时间。一方面,过少的光子通量使得 CCD 需要更长的曝光时间来积累足够的光子,由此带来的直接后果就是增加了暗电流噪声。另一方面,对于高能天文卫星所广泛采用的全帧 CCD,在整帧读出时还会接收到信号光子,而这些光子的位置信息无法准确得到,因而在图像里形成另外一种噪声,这就要求尽可能减少读出次数,提高读出速度,并增加曝光时间。因此,为了获得更好的图像质量,有必要根据探测条件实时调整曝光时间。

对于天文成像而言,单次曝光的图像光子数较少,图像质量不高,一般采用多帧图像叠合的方法提高图像质量。本文采用曝光时间实时可调的

曝光控制技术,能够有效平衡累积的信号光子与固有噪声,并通过多帧图像叠合进一步提高图像信噪比。为了提高对硬 X 射线的探测效率,利用 CCD 接收柱状结构的碘化铯 CsI(Tl) 闪烁体发出的闪烁光信号,实现了对硬 X 射线的高空间分辨成像探测^[9]。

2 CCD 成像技术

2.1 曝光控制技术

典型的 X 射线 CCD 读出系统框图如图 1 所示,该系统主要由以下几个部分组成:模拟前端 (AFE),提取有效信号并将其转换为数字码流;控制单元,对数字码流进行打包并发送至上位机,提供系统所需的控制信号,接收来自上位机的模式转换指令;驱动电路,产生 CCD 所需的直流驱动电平与驱动时钟;供电网络,提供系统所需的偏置电压^[10]。

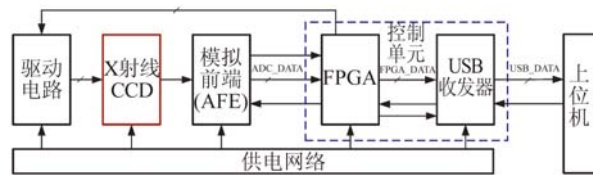


图 1 典型的 X 射线 CCD 读出系统框图

Fig. 1 Block diagram of a typical X-ray CCD readout system

得益于现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 的可编程特性,曝光控制技术通过对曝光时间的实时可编程实现。然而,为了弱化在帧读出过程中诸如突发的光子信号与暗电流噪声等非理想因素的影响,帧读出时间越短越好。为此,本文设计了一种快速读出的电子学系统。

在读出完成后,CCD 还存有读出过程中所到达部分光子形成的“残像”,因此这里设计了一个快速清屏的操作,该操作能够在较短的时间 (135 ms) 内把这些光子信号转移清除掉。

曝光控制技术是通过快速读出与清屏操作的组合实现的,可精确控制曝光时间。

2.2 多帧图像叠合技术

多帧图像叠合技术实际上是一个积分过程,将不同像素上噪声的统计涨落在整个 CCD 图像

内均匀化,同时通过时间积累增强信号。

从频谱理论的角度来看,这种积分操作实际上滤除了信号与噪声的高频分量,是一种低通滤波效应,提高了图像的信噪比。

2.3 基于 CCD 和闪烁体的复合成像技术

本文采用 CsI 闪烁体直接耦合在 CCD 感光面上的复合探测器来实现硬 X 射线探测。当 X 射线照射时,闪烁体受激电离,退激时产生可见光光子,并被 CCD 收集。基于此原理,复合探测器可对硬 X 射线进行探测。

传统闪烁体产生的次级可见光光子具有各向同性特征,不利于提高空间分辨率。对复合探测器而言,这个缺点会使可见光光子在相邻的像素中扩散,恶化成像质量。为了解决这个问题,目前闪烁体被加工成多种结构,如像素结构^[11-12]、孔阵列结构^[13-14]、针结构^[15]和柱结构^[16]等。本文采用一种由滨松公司出品的柱状结构的 CsI(Tl) 闪烁体屏,型号为 ACS-J8734, CsI 厚度为 150 μm。这种闪烁体屏可使闪烁光通过柱状晶体传播,能够实现对比传递函数(CTF)为 12% @ 10 lp/mm 的空间分辨能力。

本文采用的 CCD 为 e2v 公司的背照式 CCD,型号为 CCD47-10,其像素尺寸为 13 μm × 13 μm。CCD 表面没有镀膜,可以直接探测低能 X 射线。CsI(Tl)的发光效率与背照 CCD 的量子效率随波长的变化如图 2 所示,可见两者的峰值波长较为接近。

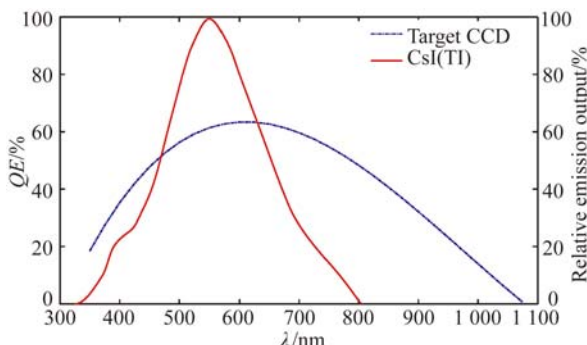


图 2 CsI (Tl)的相对发光效率和 CCD 实际 QE 曲线
Fig. 2 Relative emission output of CsI (Tl) and practical QE curve of target CCD

3 实验与结果

3.1 实验装置

本文采用如图 3 所示的实验装置。由于降低温度是抑制 CCD 探测器暗电流噪声的有效手段,将 CCD 置于一个不锈钢材质的真空腔体中,且与冷板直接接触。读出电子学系统中的前置放大器也置于真空腔体中,并采用聚酰亚胺隔热垫与冷板隔热。冷板采用液氮制冷。X 射线源为 ⁵⁵Fe 和 ²⁴¹Am,悬挂于 CCD 正上方约 15 cm 处。读出电子学的其它部分(DAQ)与上位机均置于真空腔体外的常温常压环境中,CCD 工作所需的直流驱动电平与驱动时钟通过真空连接器(CNT)传输,而 CCD 输出信号通过 SMA 线缆传输。

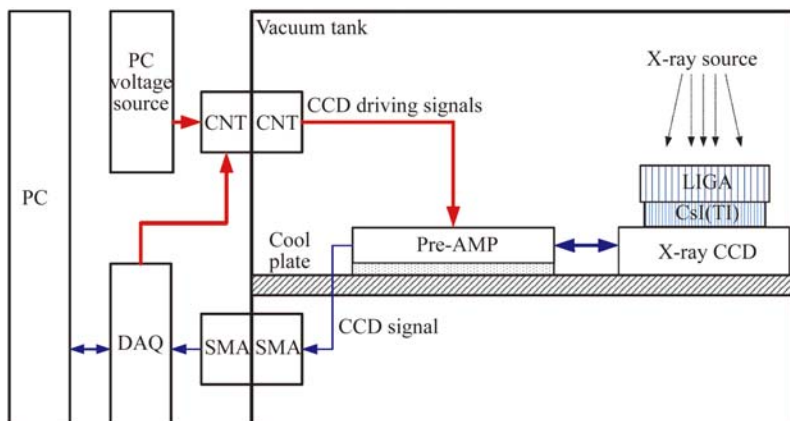


图 3 真空低温实验装置
Fig. 3 Schematic of vacuum cryogenic experimental facility

3.2 成像目标

本文利用一种采用微加工技术制作的镍准直器作为成像目标,如图 4 所示。这种特殊的准直器采用 X 射线光刻、电镀和铸造(LIGA)工艺加工而成,加工误差在微米量级^[17]。

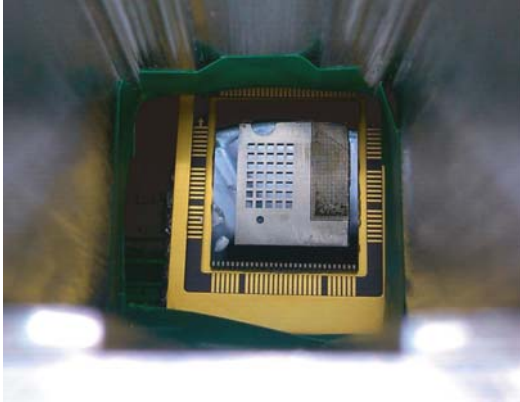


图 4 准直器和 CCD 探测器照片
Fig. 4 Photograph of collimator and CCD

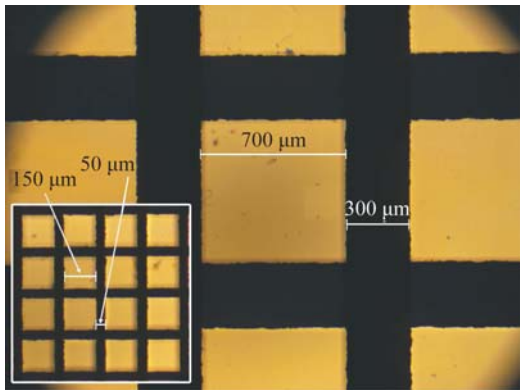


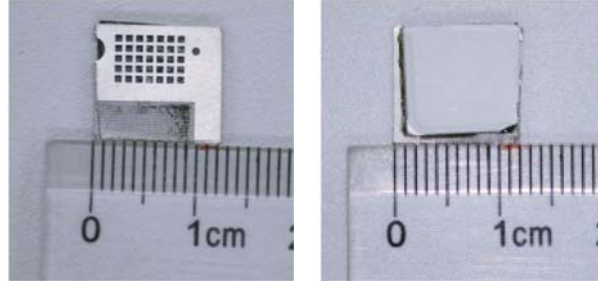
图 5 准直器显微图
Fig. 5 Micrograph of collimator

图 5 给出了该准直器的显微图。该准直器主要由两个区域构成:一是大孔区(图 5);二是小孔区(图 5 左下小图)。相关特征尺寸如表 1 所示。

表 1 准直器关键尺寸
Tab. 1 Dimension of collimator (μm)

参数	值
大孔尺寸	700×700
大孔壁厚度	300
小孔尺寸	150×150
小孔壁厚度	50

本文将 CsI 闪烁体屏裁成约为 10 mm×10 mm 的尺寸,以匹配 CCD 的有效成像区。为了防止实验过程中振动引起的闪烁体屏位移,将闪烁体屏粘合在较重的准直器上,粘合后闪烁体屏的正反面照片如图 6 所示。



(a)正面照片 (a)Front view
(b)反面照片 (b)Back view

图 6 粘合后的闪烁体屏与准直器
Fig. 6 Photos of collimator stuck with scintillator plate

3.3 软 X 射线成像

作为对硬 X 射线成像的参考,本文首先采用 1mCi ⁵⁵Fe 放射源对准直器进行直接软 X 射线成像。实验条件如表 2 所示。利用曝光控制技术将单帧曝光时间优化为 125 s,单帧、4 帧和 12 帧叠合图像分别如图 7(a)~图 7(c)所示。

表 2 软 X 射线成像条件
Tab. 2 Conditions for soft X-ray imaging

参数	值
X 射线源	⁵⁵ Fe (1mCi)
CCD 温度/K	164~143
帧率/Hz	0.1
曝光时间/s	125
闪烁体	不使用

由图 7 可知,图像的清晰度随着叠合帧数的增加得到了显著的改善,特别是右上方角小孔区的最小间距变得越来越清晰。此外,由于在 CCD 像素转移过程中,X 射线光子进入了那些本应被遮挡的像素,在单帧图像中大孔区的左右两侧存在拖影现象。此现象随着叠合帧数的增加逐渐弱化,当叠合帧数达到 12 帧时几乎消失。很明显,对于软 X 射线成像,多帧叠合后的图像质量要优于单帧图像。

值得一提的是,图 7 中从右上角到左下角图

像清晰度逐渐变差,这个现象在小孔区显得尤为明显。这是因为 X 射线源实际上位于图像的右

上角附近,X 射线在这一区域是正入射,并朝着左下角方向,入射角度逐渐增大。

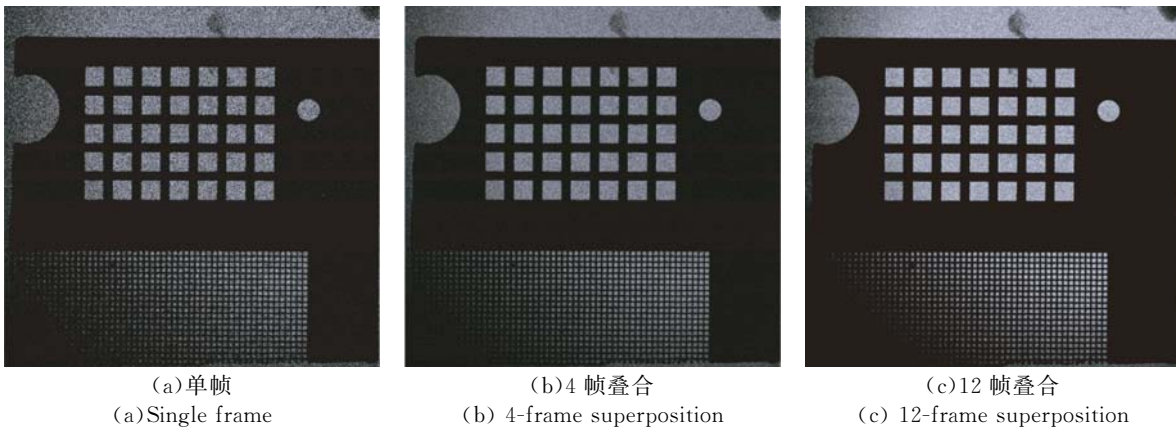


图 7 CCD 对准直器的软 X 射线成像结果

Fig. 7 Soft X-ray image of collimator captured by CCD

3.4 硬 X 射线成像

为了验证复合探测器对硬 X 射线的成像能力,本文采用 $100 \mu\text{Ci } ^{241}\text{Am}$ 放射源对 LIGA 准直器进行成像。优化的实验参数见表 3。其中,曝光时间为 120 s,帧率为 0.2 Hz。单帧、4 帧和 12 帧叠合图像分别如图 8(a)~图 8(c)所示。

表 3 硬 X 射线成像条件

Tab. 3 Conditions for hard X-ray imaging

参数	值
X 射线源	^{241}Am (100 μCi)
CCD 温度/K	173~153
帧率/Hz	0.2
曝光时间/s	120
闪烁体	使用

由图 8 可以看出,LIGA 准直器的像(包括小孔区)可被清晰地辨认。每张图像中都有三个区域,一是位于内部的最亮的闪烁体成像区(区域 1);二是位于中间的最暗的准直器阴影区(区域 2),此区域内无闪烁体;三是位于外围的硬 X 射线直接照射区(区域 3)。这个现象的产生是由于闪烁体屏的面积略小于准直器(见图 6),而 CCD 的有效成像面积最大(见图 4),而且 CCD 本身对 ^{241}Am 具有部分响应能力^[10,18]。这些现象验证了复合探测器成像技术的有效性。

在硬 X 射线图像中,可以分辨出小孔孔壁(见图 8(c)),说明其分辨力仍可达 $50 \mu\text{m}$,且与软 X 射线成像类似,清晰度随着叠合帧数的增加得到了显著的改善。很明显,对于硬 X 射线成像,多帧叠合后的图像质量同样要优于单帧图像。

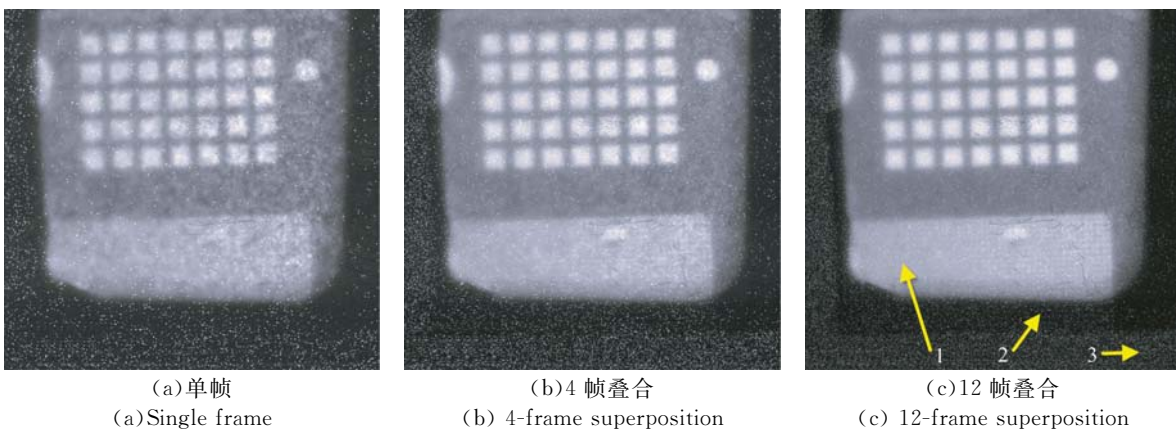


图 8 复合探测器对 LIGA 准直器的硬 X 射线成像结果

Fig. 8 Hard X-ray images of LIGA collimator captured by compound detector

4 结 论

本文研制了一种基于 CCD 和 CsI(Tl) 闪烁体的复合探测器,采用曝光控制技术、多帧图像叠合技术,并且利用⁵⁵Fe 与²⁴¹Am 放射性同位素获得了准直器的软 X 射线与硬 X 射线图像,分析了

图像中所出现的拖影、清晰度渐变和区域亮度不同等现象。实验结果表明:采用曝光控制技术与多帧图像叠合技术,利用复合探测器可以在硬 X 射线能段实现高空间分辨率成像,空间分辨优于 50 μm 。此类复合探测器可作为位置灵敏探测器应用于未来空间硬 X 射线晶体的分光能谱和成像的探测。

参考文献:

- [1] SHORT A D, KEAY A, TUMER M J L. Performance of the XMM EPIC MOS CCD detectors [J]. *SPIE*, 1998,3445:13-27.
- [2] GARMIRE G P, BAUTZ M W, FORD P G, *et al.*. Advanced CCD imaging spectrometer (ACIS) instrument on the Chandra X-ray observatory [J]. *SPIE*, 2003, 4851:28-44.
- [3] TSUNEMI H, HAYASHIDA K, TSURU T G, *et al.*. Soft X-ray Imager (SXI) onboard ASTRO-H [J]. *SPIE*, 2016, 9905:990510-1-990510-11.
- [4] NAKAJIMA H, INOUE S, NAGINO R, *et al.*. Performance of front-end mixed-signal ASIC for on-board CCD camera[J]. *SPIE*, 2014, 9154:91541C-1-91541C-7.
- [5] ROBRADJE J, eROSITA-nearby young stars in X-rays [EB/OL]. arXiv:1510.01161 [astro-ph. SR]. 2015.
- [6] MEIDINGER N, ANDRITSCHKE R, HALKER O, *et al.*. Systematic testing and results of X-ray CCDs developed for eROSITA and other applications [J]. *SPIE*, 2006, 6276:627618-1-627618-11.
- [7] TAWA N, MUKAI K, IKEGAMI K, *et al.*. Optimization of a scintillator-deposited charge-coupled device with Monte-Carlo simulation [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007, 573:119-121.
- [8] KITAGUCHI T, BHALERAO V, COOK W R, *et al.*. Inflight performance and calibration of the NuSTAR CdZnTe pixel detectors [J]. *SPIE*, 2014, 9144:91441R-1-91441R-7.
- [9] 陆波,陈勇,朱玥,等. 基于 X 射线 CCD 的复合成像技术研究 [C]. 拉萨:第二十九届全国空间探测学术研讨会,2016:376-384.
- [10] LU B, CHEN Y, ZHU Y, *et al.*. Researches on a composite detector technique based on X-ray CCDs [C]. 29th National Symposium on Space Exploration, Lhasa, Tibet, 2016:376-384. (in Chinese)
- [11] LU B, CUI W W, WANG Y S, *et al.*. Design and optimization of the readout system for X-ray CCDs [J]. *Chinese Physics C*, 2012, 36 (9): 846-850.
- [12] KIM B J, CHA B K, JEON H, *et al.*. A study on spatial resolution of pixelated CsI(Tl) scintillator [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007, 579:205-207.
- [13] YAO D, GU M, LIU X, *et al.*. Fabrication and performance of CsI(Tl) scintillation films with pixel-like columnar-matrix structure [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, 62(3): 699-703.
- [14] SIMON M, ENGEL K J, MENSER B, *et al.*. X-ray imaging performance of scintillator-filled silicon pore arrays [J]. *Medical Physics*, 2008, 35(3): 968-981.
- [15] HORMOZAN Y, YUN S H, SVENONIUS O, *et al.*. Towards high-resolution X-ray imaging using a structured scintillator [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2012, 59(1):19-23.
- [16] MIYATA E, TAWA N, MUKAI K, *et al.*. High resolution X-ray photon-counting detector with scintillator-deposited charge-coupled device [C]. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, Rome, Italy, 2004:1014-1018.
- [17] YAO D, GU M, LIU X, *et al.*. Fabrication and performance of micron thick CsI(Tl) films for X-ray imaging application [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2016, 63(3):1827-1831.
- [18] ZHANG T C, YI F T, WANG B, *et al.*. Fabrication of micro pore optics with smooth sidewall using X-ray lithography [J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 20(10):2005-2010.

[18] SCHLOSSER D M, HUTH M, HARTMANN R, *et al.*. Direct and indirect signal detection of 122 keV photons with a novel detector combining

a pnCCD and a CsI(Tl) scintillator [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2016, 805:55-62.

作者简介:



陆 波(1984—),男,浙江舟山人,助理研究员,2010 年于复旦大学获得硕士学位,主要从事高能粒子探测器读出 ASIC 设计。E-mail: lubohep@outlook.com

通讯作者:



陈 勇(1970—),男,江苏海门人,研究员,1992 年于复旦大学获得学士学位,1998 年于中国科学院高能物理研究所获得博士学位,主要从事高能天文实验与数据分析。E-mail: ychen@ihep.ac.cn