

高时间分辨X射线探测器的研制

王朝敏¹, 陈 勇², 王小东¹, 何 达¹, 刘 恋¹, 李博乐¹, 刘昌林¹

¹重庆光电技术研究所, 重庆

²中国科学院高能物理研究所, 北京

Email: wangchaomin99@163.com

收稿日期: 2020年9月3日; 录用日期: 2020年9月17日; 发布日期: 2020年9月24日

摘 要

在核科学、深空探测、脉冲星导航等领域需要探测X射线光子, 识别其能量大小及到达探测器的时间。探测器对X射线到达时间的分辨精度关系到脉冲星导航精度, 以及对一些频率较高的脉冲星的利用, 是器件的关键指标, 对探测面积较大的探测器来说, 采用普通的帧转移结构, 典型时间分辨精度约为20 ms, 不能满足要求。高时间分辨X射线探测器采用新型结构, 做有128 × 128个探测区, 单个探测区包括8个CCD单元, CCD单元尺寸为14 μm × 102 μm。各探测区的信号通过CCD转移“汇集”后以“并联”的方式同时到达输出端。当器件以典型频率500 kHz工作时, 器件的时间分辨精度为16 μs, 测得能量分辨率为130 eV@5.9 keV。器件工作时X射线的光子数很少, X射线光子信号的叠加是小概率事件, 在统计时忽略不计。

关键词

探测器, X射线, 高时间分辨, CCD

The Development of X-Ray Detector with High Temporal Resolution

Chaomin Wang¹, Yong Chen², Xiaodong Wang¹, Da He¹, Lian Liu¹, Bole Li¹, Changlin Liu¹

¹Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing

²Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing

Email: wangchaomin99@163.com

Received: Sep. 3rd, 2020; accepted: Sep. 17th, 2020; published: Sep. 24th, 2020

Abstract

X-Ray photons need to be detected in order to recognize the energy size and the time that the

photons arrived at the detector surface into the domain of nuclear science deep space exploration and X-ray pulsar navigation. The resolution accuracy of X-Ray detector is the key performance which is related to the use of high frequency pulsars and the accuracy of pulsar navigation. As traditional X-Ray detectors with large detect area do not match the need of time resolution accuracy with the structure of frame transfer and a typically 20 ms time resolution. A new structure of X-Ray detector with high temporal resolution has been developed with a total detect area array of 128 (V) \times 128 (H) and 8 cells including in a single detect area except the cell size is 14 μm \times 102 μm . The signals that come from each detect cell area will combine with each other by means of transferring gate driving timing, and the combined signals from deferent parts of detect array will reach to the output port in parallel. The X-Ray detector has a performance of 130 eV@5.9 keV resolution and 16 μs temporal resolution under the frequency drive of 500 kHz. As well, there will be a few number of photon arriving at the surface of the X-Ray detector when it works, and therefore it will be very small probability event that the X-Ray photons superpose with each other, and the event will be ignored in statistic of X-Ray photons.

Keywords

Detector, X-Ray, High Temporal Resolution, CCD

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

开展 X 射线探测技术研究, 其研究成果可用于航天器自主导航试验领域, 更好地开发利用脉冲星信息资源[1]。同时还能促进核科学、现代天文学、空间物理学和天体测量学等学科领域的发展[2]。2016 年 11 月 10 日, 航天科技集团第五研究院发射了脉冲星导航试验卫星(XPNAV-1), 其目的是实测脉冲星发射的 X 射线信号, 尝试验证脉冲星导航技术体制的可行性, 搭载了两种类型的探测器载荷: 一个是准直型微通道板探测器, 探测面积为 2400 cm^2 ; 另一个是聚焦型 SDD 探测器, 聚焦镜头口径为 17 cm。2017 年 6 月 15 日, X 射线空间天文卫星“慧眼”成功发射, 探索利用 X 射线脉冲星进行航天器自主导航的技术和原理并开展在轨实验, 使用的 X 射线探测器为 CCD, 最高时间分辨精度为 400 μs 。为了提高探测器的时间分辨精度, 本文采用首创的新型结构, 研制的高时间分辨 X 射线探测器的时间分辨精度达到了 16 μs 。

2. 器件结构

传统的帧转移 CCD 结构见图 1, 信号电荷转移路径如图中箭头所示, 典型时间分辨精度为 20 ms [3] [4]。高时间分辨 X 射线探测器由 128 \times 128 个探测区构成, 一个探测区由 8 个 CCD 单元构成, CCD 单元尺寸为 14 μm \times 102 μm , 采用 ϕ_1 、 ϕ_2 两相结构, 一个探测区的结构如图 2 所示, 图中的箭头表示信号的转移方向; 两个探测区通过一个 CCD 单元相连, 实现信号汇集。汇集后的信号通过 CCD 单元跟另外的两个相连; 4 个探测区的结构如图 3 所示, 探测区增加的形式以此类推。各探测区之间的位置关系好比树枝末端之间的关系, 信号向树干汇集, 各探测区的信号同时到达输出放大器, 实现 X 光子到达探测器的高时间分辨。在实际使用时, X 射线的光子数很少, 多光子信号的叠加是小概率事件, 不会对数据统计结果造成影响。高时间分辨 X 射线探测器识别 X 射线光子到达时间, 分辨光子能量大小, 不分辨空间位置。

为了使器件为方形, 探测区数量只能以 4 为倍数往上翻, 比如 32 \times 32 之后是 64 \times 64, 64 \times 64 之后

是 128×128 ，探测区的数量不是连续可调，因此要调整芯片的尺寸较为困难，需要调整探测区的尺寸或探测区的数量[5][6]，参见图4~图6。

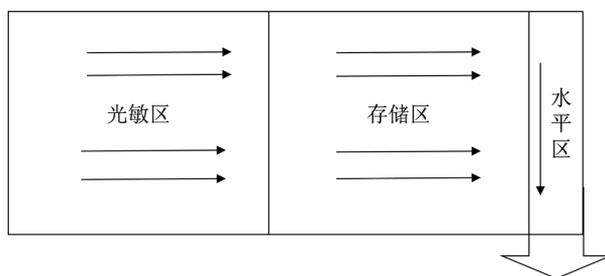


Figure 1. Traditional structure of frame transfer CCD
图 1. 传统的帧转移 CCD 结构示意图

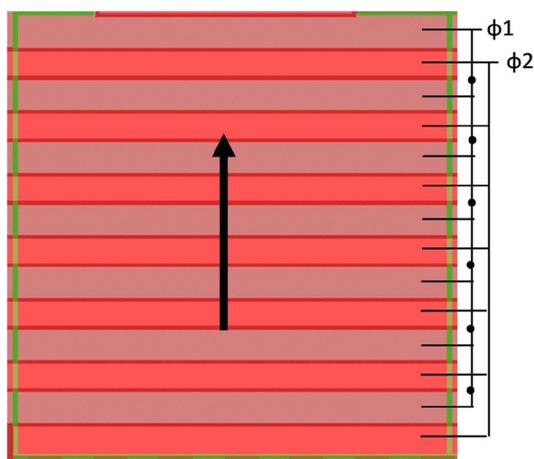


Figure 2. Structure of single detect region
图 2. 一个探测区的结构示意图

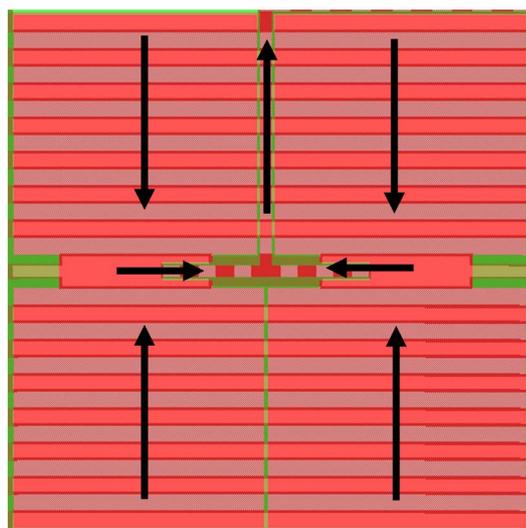


Figure 3. Signal transfer paths of four detection areas
图 3. 四个探测区信号转移路径示意图

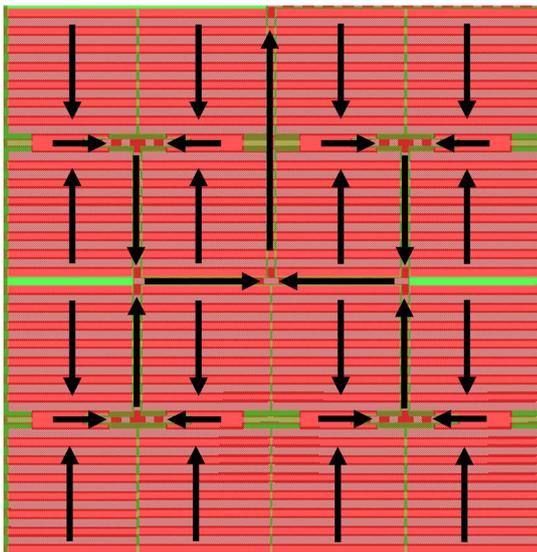


Figure 4. Signal transfer paths of sixteen detection areas
图 4. 16 个探测区信号转移路径示意图



Figure 5. Photo of high time resolution X-ray detector
图 5. 高时间分辨 X 射线探测器实物照片



Figure 6. Photo of drive and signal processing circuit
图 6. 驱动及信号处理电路实物照片

3. X 射线高灵敏的宽耗尽区结构

宽耗尽区设计技术关系到器件对 X 射线的响应，是高时间分辨 X 射线探测器的关键技术之一。普通 CCD 使用的衬底电阻率为 $30 \Omega \cdot \text{cm}$ ，工作时当埋沟最大电势为 12 伏时，衬底耗尽区深度为 6 微米，这样的耗尽区宽度对 X 射线的响应是不够的，因为能量为 500 eV~10 keV 的 X 射线在硅里的穿透深度为 $0.5 \mu\text{m} \sim 105 \mu\text{m}$ 。需要大幅度增加衬底的电阻率，以提高器件对 X 光的响应，最终采用的衬底电阻率为 3000

$\Omega\cdot\text{cm}$ 。当埋沟最大电势为 12 伏时，衬底耗尽区深度为 60 微米，较传统的 6 微米提高了一个数量级。

$$V = \frac{qN_A x_p^2}{2\varepsilon_{\text{si}}} \quad (1)$$

根据泊松方程可得衬底耗尽区深度 x_p 与埋沟最大电势 V 及衬底掺杂浓度 N_A 的关系，见公式(1)。式中 q 为电子电量， ε_{si} 为硅的介电常数。

4. 测试结果

器件可工作在探测模式或调试模式，由器件的驱动脉冲决定。图 7 是探测模式下高时间分辨 X 射线探测器的输出波形，实际探测 X 光子时，由于 X 光子数很少，大部分时候输出只有极小的暗电流，偶尔有一个 X 光子的信号输出，图中的信号幅度是调试时对可见光的响应，正式用于探测 X 光子时需要屏蔽可见光。图 8 是调试模式下高时间分辨 X 射线探测器的输出波形，由于在探测模式下，CCD 持续转移，持续输出，CCD 转移效率难以评判，调试模式下，CCD 时钟先停下来积分，之后再转移，可根据拖尾的情况评判 CCD 的转移效率。一个 X 射线光子在硅里可产生多个信号电子，每 3.65 eV 的能量产生一个信号电子，5.9 keV 的 X 射线光子可产生 1616 个信号电子，每次实际产生的电子数存在一定的涨落，图 9 是对 ^{55}Fe 发出的 5.9 keV 的 X 射线的探测，FWHM(半波宽度)为 130 eV。器件的转移效率、暗电流、噪声的测试结果见表 1；由于器件实际工作时信号电荷包很小，转移效率测试时电荷包也较小，约为 2000 e⁻，接近器件应用时的典型状态；器件实际使用时环境温度为 -20℃，为了低的暗电流，低的噪声，高的能量分辨率。

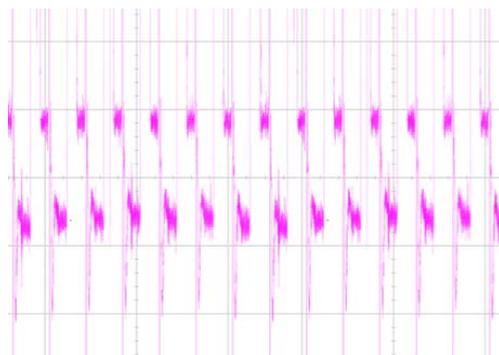


Figure 7. Output waveform of detect mode
图 7. 探测模式下输出波形

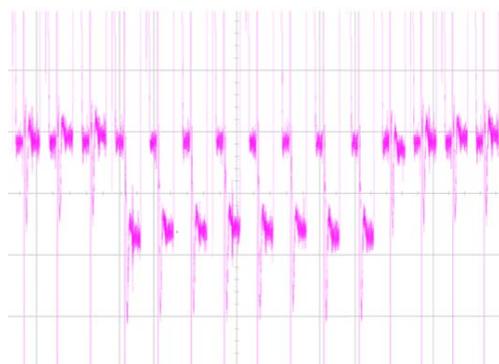


Figure 8. Output waveform of modulate mode
图 8. 调试模式下输出波形

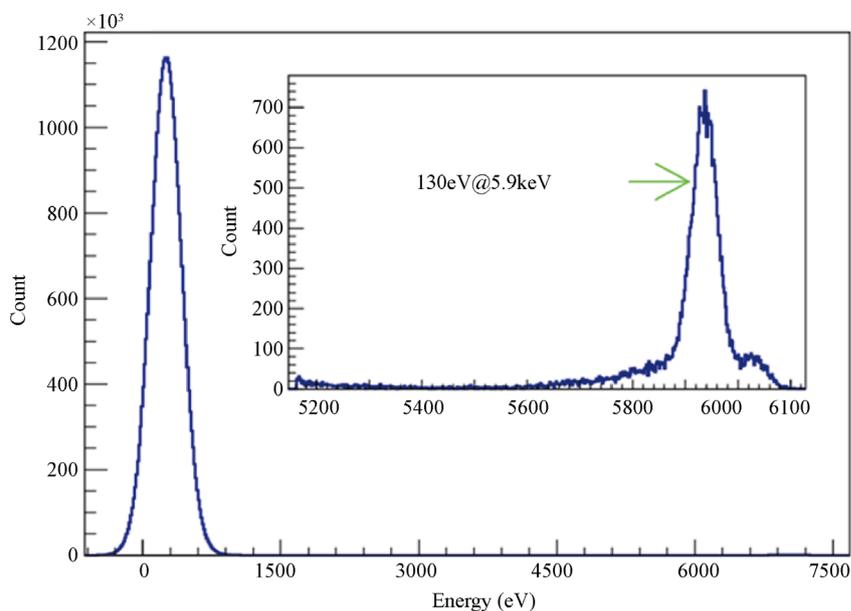


Figure 9. Detect result of X-ray energy spectrum by ^{55}Fe source
图 9. 对 ^{55}Fe 发出的 X 射线能谱的探测

Table 1. Parameters of high time resolution X-ray detector
表 1. 高时间分辨 X 射线探测器实测参数

转移效率(信号电子数约为 2000, 应用时典型状态), 测试频率 500 kHz		
器件编号	测试结果(常温)	测试结果(-20℃)
F05-19-2-10-9	0.999959	0.999977
F05-19-2-6-28	0.999985	0.999992
F05-19-2-6-33	0.999974	0.999991
暗电流, 测试频率 500 kHz		
器件编号	测试结果 V_D (mV/s) (常温)	测试结果 V_D (mV/s) (-20℃)
F05-19-2-10-9	5452.38	280.85
F05-19-2-6-28	3523.81	301.19
F05-19-2-6-33	4857.14	263.06
注: 暗电流为无光照时积分时间 1 s 输出的电压幅度, 用 V_D 表示。500 kHz (2 μs) 连续转移模式时理论上暗电流 = (2 μs)/(1 s) * 8 * V_D = 2/1000000 * 8 * V_D , “8” 为连续转移模式下累加的像元数。		
噪声, 测试频率 500 kHz		
器件编号	测试结果(e ⁻) (常温)	测试结果(e ⁻) (-20℃)
F05-19-2-10-9	33.6	6.4
F05-19-2-6-28	34.2	6.7
F05-19-2-6-33	36.8	6.5

5. 结论

基于完整的 CCD 工艺线, 采用专利技术“一种高时间分辨的 CCD 探测器结构”, 研制的器件在应用单位中国科学院高能物理研究所粒子天体物理实验室模拟典型环境下进行了试用, 时间分辨精度为 16 μs , 能量分辨率为 130 eV@5.9 keV, 器件将用于后期的脉冲星导航试验[7] [8] [9]。

参考文献

- [1] Meidinger, N., Andritschke, R., Ebermayer, S., *et al.* (2009) CCD Detectors for Spectroscopy and Imaging of X-Rays with the eROSITA Space Telescope. *Proceedings of SPIE*, **7435**, 743502. <https://doi.org/10.1117/12.825234>
- [2] Meidinger, N., Bonerz, S., Englhauser, J., *et al.* (2004) CCD Detector Development for the DUO and the ROSITA Mission. *Proceedings of SPIE*, **5501**, 66-77. <https://doi.org/10.1117/12.551505>
- [3] 汪朝敏, 李平, 郑渝, 等. 埋沟电荷耦合器件最佳工作点及最大电荷处理量的计算[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 386-389.
- [4] 汪朝敏. 一种高时间分辨的 CCD 探测器结构[P]. 中国专利, CN201910479235.6. 2019-06-04.
- [5] 汪朝敏, 郑渝, 董杰, 等. 高帧频 64×64 元蓝光响应增强 CCD[J]. 半导体光电, 2016, 37(5): 615-617.
- [6] 廖乃馒, 刘昌林, 张明丹, 等. CCD 多晶硅层间复合绝缘介质研究[J]. 半导体光电, 2019, 40(4): 455-458.
- [7] 钟四成, 廖乃馒, 罗春林, 等. CCD 栅介质工艺对多晶硅层间介质的影响[J]. 半导体光电, 2017, 38(3): 345-348.
- [8] 龙飞, 廖乃馒, 向华兵. LPCVD 多晶硅形貌对氧化层击穿特性的影响[J]. 半导体光电, 2013, 34(2): 244-246.
- [9] 袁安波, 李睿智, 向鹏飞. 大面阵内线转移 CCD 二次金属铝刻蚀残留研究[J]. 半导体光电, 2017, 38(3): 365-368.