

用于脉冲星导航的 X 射线光子计数探测器研究

胡慧君^{1)2)†} 赵宝升¹⁾ 盛立志¹⁾²⁾ 赛小锋¹⁾ 鄢秋荣¹⁾²⁾ 陈宝梅¹⁾²⁾ 王朋¹⁾²⁾

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2011 年 3 月 21 日收到; 2011 年 4 月 2 日收到修改稿)

研制了用于脉冲星导航的 X 射线光子计数探测器原理样机, 该探测器主要由对 X 射线灵敏度较高的 CsI 光电阴极、微通道板电子倍增器和收集阳极组成. 对 X 射线光子计数探测器灵敏度、时间分辨率和整个系统的死时间进行了测试, 实验结果表明该探测器的灵敏度在 5 keV 时可达 5.2×10^3 A/W, 时间分辨率可达到 1.1 ns, 系统整体的死时间为 100 ns.

关键词: 脉冲星导航, 光子计数探测器, 灵敏度, 时间分辨率

PACS: 97.60.Gb, 07.85.-m, 07.05.Fb

1 引言

1974 年美国喷气推进实验室的德恩斯博士首次提出基于射电脉冲星的行星际飞行航天器自主轨道确定方法, 开创了脉冲星导航技术研究的先河. 但是脉冲星在射电频段辐射信号极其微弱, 为进行脉冲信号检测, 需口径达到 25 m 探测天线, 要求信号积分时间长达 24 h 才能获得足够的信噪比, 且绝大部分天体辐射和银河系散射信号分布于整个射电频段, 掩盖了微弱的脉冲星射电信号, 不利于有用信号的检测、提取和噪声剔除. 1981 年, 美国通信系统研究所的切斯特和巴特曼提出了利用 X 射线脉冲星为航天器导航的构想. 由于 X 射线集中了脉冲星的绝大部分辐射能量, 因此选择脉冲星的 X 射线辐射作为探测信号, 有利于减少弱信号的积分时间和提高脉冲到达时间测量的分辨率. 2003 年, Sheikh^[1] 初步论证了基于 X 射线脉冲星的航天器自主高精度轨道确定的可行性, 掀起了 X 射线脉冲星导航研究的热潮. 2004 年美国国防部国防高级研究计划局 (DARPA) 启动了“基于 X 射线源的自主导航定位”研究计划. X 射线脉冲星导航的关键技术之一是研制具有单光子分辨能力的 X 射线光子计数探测器. 由于 X 射线脉冲星的辐射能流非常微弱, 对探测器的灵敏度要求就非常高. 另外根据脉冲星导航原理^[2], 脉冲星导航系统的定位精度取决

于脉冲到达时间 (time of arrival, TOA) 的测量精度, 因此 X 射线光子计数探测器必须具备足够高的时间分辨率.

本文介绍了基于 MCP 的光子计数探测器的组成及工作原理, 测试了该探测器的灵敏度、时间分辨率和系统的计数率, 给出了初步获取的 X 射线脉冲轮廓.

2 探测器组成和工作原理

图 1 为基于 MCP 的光子计数探测器示意图, 由输入窗、光电阴极、微通道板和收集阳极组成^[3,4]. 文献 [5] 报道了聚酰亚胺材料对 1—10 keV 的软 X 射线的透过率很高, 因此输入窗选择了 25 μm 的聚酰亚胺材料. 文献 [6] 对 CsI 光电阴极与 Au 光电阴极在软 X 射线波段的量子效率进行了比较, 在 2—10 keV 波段 CsI 光电阴极的量子效率大于 1, 对提高探测的灵敏度非常有利, 因此在 MCP 输入面蒸镀了 800 nm 的 CsI 光电阴极. MCP 是一种大面阵的高空间分辨的电子倍增探测器, 两块“V”型堆叠的 MCP 可提供 10^6 的电子增益, 适于极微弱的 X 射线脉冲星脉冲辐射的探测. MCP 作为电子倍增系统, 其渡越时间约几个纳秒, 渡越时间弥散约几十个皮秒, 响应时间非常短, 时

† E-mail: huhuijun@opt.ac.cn

间分辨率非常高,满足X射线脉冲星导航光子计数探测器对时间响应和时间分辨率的要求.收集阳极用以接受MCP输出的二次倍增电子,获取入射光子时间信息.

图2为实验系统示意图^[7].X射线球管辐射的X射线经斩波器调制为脉冲形式,将X射线脉冲衰减至单光子水平,高灵敏、低噪声具有时间分辨能力X射线单光子计数探测器,记录单个光子到达时间,经过足够长时间的采集获得大量的X射线光子到达时间数据,然后将X射线光子叠加到一个周期以获取波形稳定且信噪比较高的累积脉冲轮廓^[8].设采集时间为 N 个周期,每个周期分为 N_b 个区格(bin),按(1)式将 N 个周期内的光子叠加到一个周期获取X射线脉冲星累积脉冲轮廓.

$$f(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(i, j), \quad (1)$$

$I(i, j)$ 表示发生在时间 $t(i, j)$ 中的光子事件的次数, $t(i, j)$ 如(2)式所示:

$$t(i, j) = iT + jT_b, \quad (2)$$

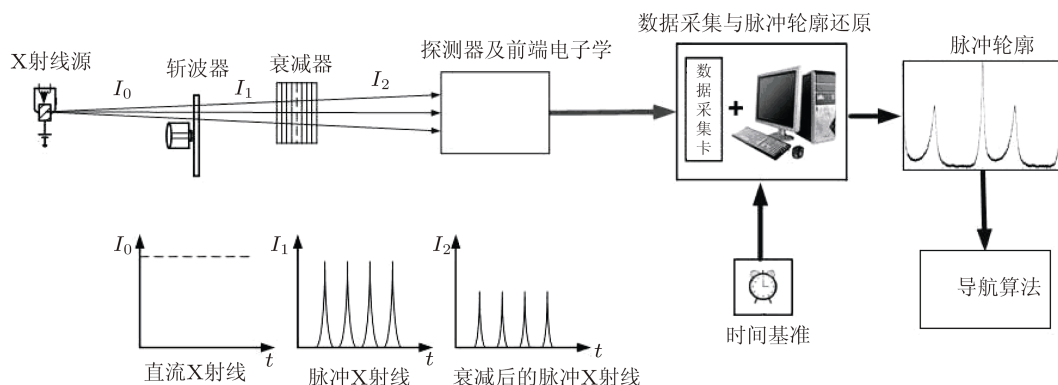


图2 实验系统示意图

3 实验结果与讨论

3.1 灵敏度测试

试验中,X射线源辐射能量约为5 keV,通过调节X射线管的阳极电流控制X射线的辐射功率.利用美国IRD公司的AXUV100 G硅探测器作为标准探测器,利用美国吉时利6487皮安表检测输出电流,测量不同阳极电流下标准探测器的输出电流.根据标准探测器的灵敏度^[10],计算出的X射线的辐射功率如图3所示.

从图3可知,X射线辐射功率与X射线管阳极

其中 $i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, N_b$, T 为脉冲周期, T_b 为时间区格的大小.为保证系统时钟的长期稳定,减小计时误差,需采用标准时钟对系统进行定期校正.按(1)式得到的X射线脉冲星的累积脉冲轮廓与X射线脉冲星的标准轮廓比较,就可以计算出TOA^[9].

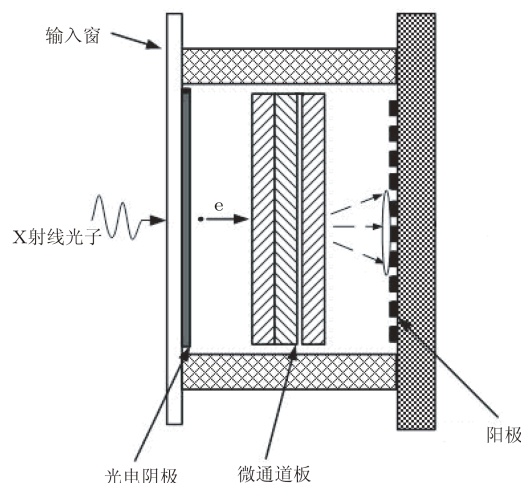


图1 MCP光子计数探测器示意图

电流成线性关系,采用线性拟合,得到

$$P = (-0.05036 + 0.00448I_a)[\text{pW}]. \quad (3)$$

其中 P 的单位为 pW.在测量MCP的光子计数探测器的灵敏度时,利用(3)式可得到任意X射线管阳极电流下的X射线功率.实验中,分别测试了裸MCP探测器和镀有800 nm CsI反射式阴极的MCP探测器的灵敏度.测量MCP的光子计数探测器在不同X射线功率下的输出电流,就可得到探测器输出电流与入射X射线功率的关系图.图4为镀有800 nm CsI反射式阴极的MCP探测器的灵敏度测量曲线.由图4中曲线的斜率可得

到 MCP 的光子计数探测器的灵敏度在 5 keV 时为 5.2×10^3 A/W. 图 5 为两种探测器灵敏度比较, 800 nm 的 CsI 反射式阴极 MCP 探测器灵敏度相对于裸 MCP 提高近 10 倍.

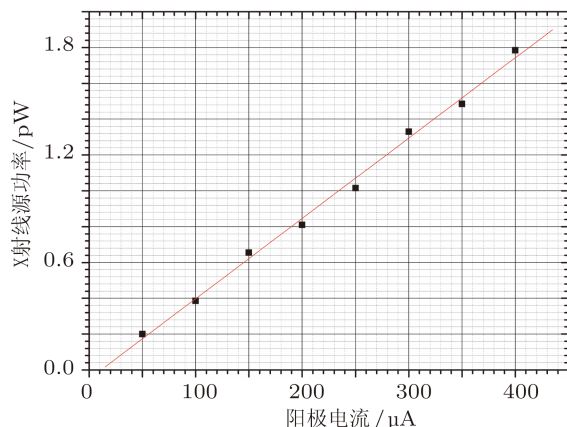


图 3 X 射线源功率标定图

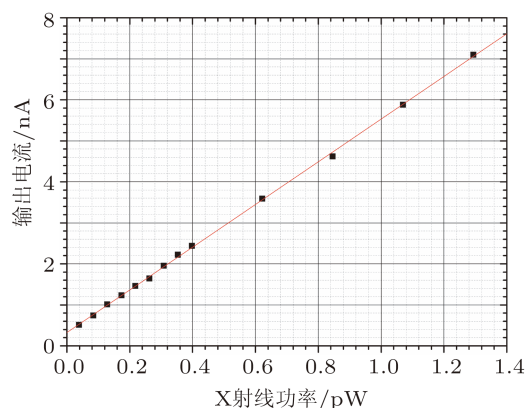


图 4 MCP 探测器输出电流与入射 X 射线功率的关系

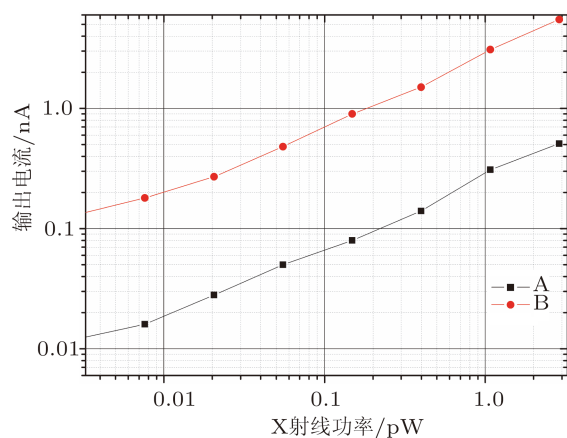


图 5 反射式 CsI 阴极 MCP 与裸 MCP 光子计数探测器的比较 A 为裸 MCP 探测器; B 为 800 nm CsI MCP 探测器

3.2 时间分辨率测试

探测器阳极与电子读出之间的阻抗匹配是影

响探测器输出信号时间特性的原因之一. 如图 6 所示, 图 6(a) 中探测器输出信号出现振荡现象, 振荡持续大约 30 ns, 若将这样的振荡信号送入后续的定时电路 (constant fraction discriminator, CFD) 会造成定时错误. 图 6(b) 中探测器的输出信号消除了振荡现象, 脉冲的半峰全宽 (FWHM) 约为 2 ns. 图 6(a) 中出现振荡的原因是收集阳极为一直径为 50 mm 的平板阳极, 其与后续读出的接口、传输线等的阻抗不匹配, 造成了信号的反射. 图 6(b) 中, 收集阳极设计为蛇形微带线如图 7 所示, 其特性阻抗为 50Ω , 与后续的 SMA 接口及同轴电缆的阻抗相匹配, 基本上消除了因信号反射引起的振荡现象, 输出信号的时间特性明显得到了改善.

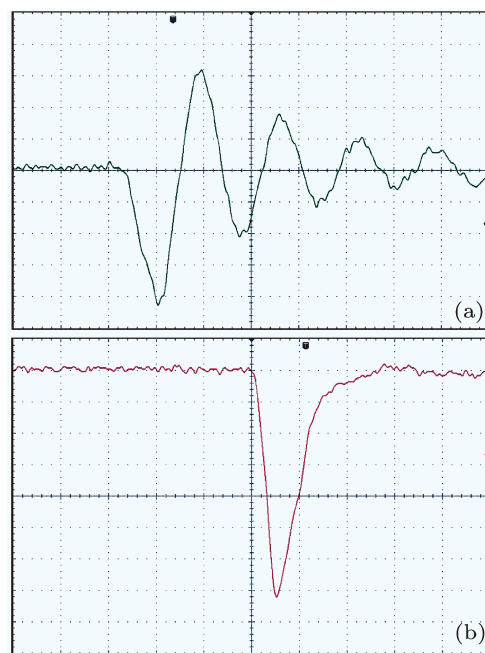


图 6 探测器输出信号 (a) 阳极输出不匹配; (b) 阳极匹配输出

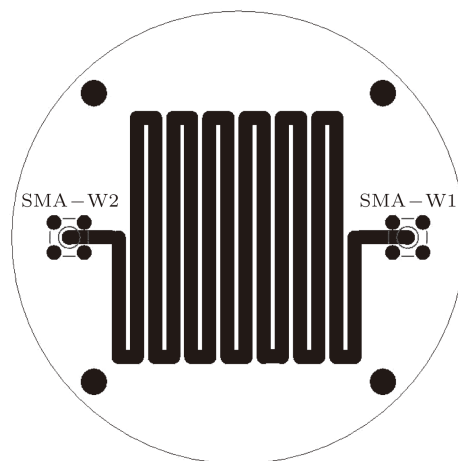


图 7 微带线收集阳极

另外, MCP 输出面与收集阳极之间的加速电压也是决定输出信号脉冲的 FWHM 的一个重要原因. 实验中, 保持 MCP 的增益电压不变, MCP 输出面与阳极的间距为 5 mm, 从 100 V 开始逐渐增大加速电压, 发现输出信号脉冲的 FWHM 从约 3 ns 逐渐减小, 到 600 V 时 FWHM 基本稳定在 1.1 ns, 且输出信号脉冲的 FWHM 最小, 如图 8 和图 9 所示. 因此为得到好的时间特性, 除确保阳极与电子读出的阻抗匹配外, 还要选择合适的加速电压.

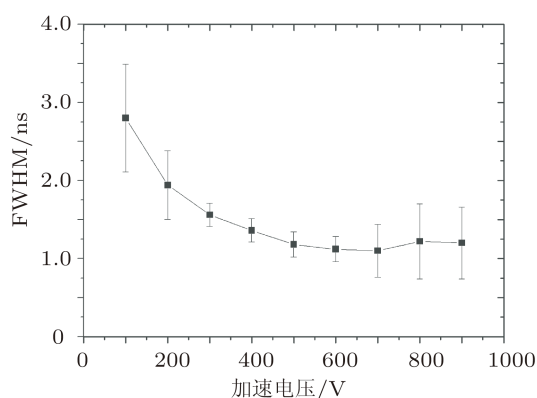


图 8 加速电压与输出信号脉冲 FWHM 的关系

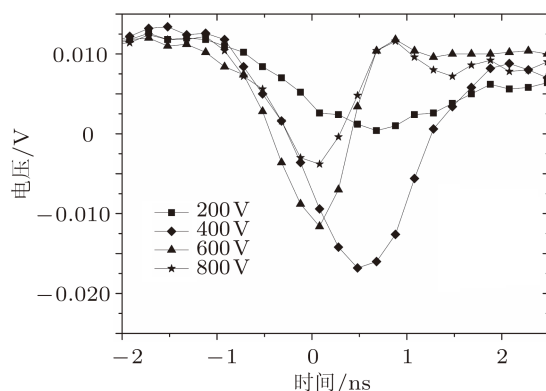


图 9 不同加速电压下的阳极输出波形

3.3 模拟系统整体的死时间

极弱光源的光子发射过程是一种离散且相互独立的 Poisson 随机过程, 探测器在一段时间 T 内探测到 n 个光子的概率为 $P(n, T) = (mT)^n \cdot \exp(-mT)/n!$, m 表示光子的平均发射速率. 根据 Poisson 分布的性质^[11]可知, 相邻光子到达时间间隔 t 服从负指数分布: $p(t) = m \exp(-mt)$.

实验中将 X 射线调节至功率约 3×10^{-14} W, 探测器输出信号为分立的光电脉冲, 对如图 2 所示的模拟系统的计数率进行了测试, 对模拟系统记录的大量光子到达时间的相邻时间间隔进行了统计.

如图 10 所示, 横轴表示相邻两个光子达到时间的间隔, 纵轴表示在某一时间间隔内光子事件出现的次数. 从图 10 中可知, 系统记录的光子的时间间隔最小截止于 100 ns, 100 ns 以下没有光子被统计到. 将 X 射线光源调至最强 (管流由平时的 $10 \mu\text{A}$ 增大到 $150 \mu\text{A}$), 统计的结果与图 10 基本类似, 排除了由于弱光源本身计数率低造成的影响, 可认为 100 ns 的死时间完全是由探测系统决定的. 另外, 图 10 并不是严格服从负指数分布, 这主要是因为探测器的探测效率小于 1, 当有 S 个输入光子时可能只有一个输出电脉冲, 实际统计的时间间隔相当于“ S 倍间隔”, 根据文献 [11] 中的结论小时间间隔内光子出现的频率应该会有所减小.

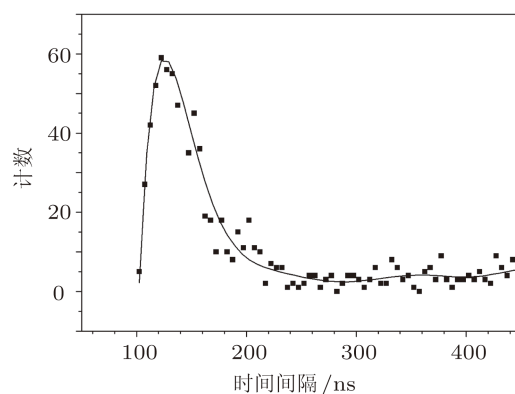


图 10 时间间隔统计图

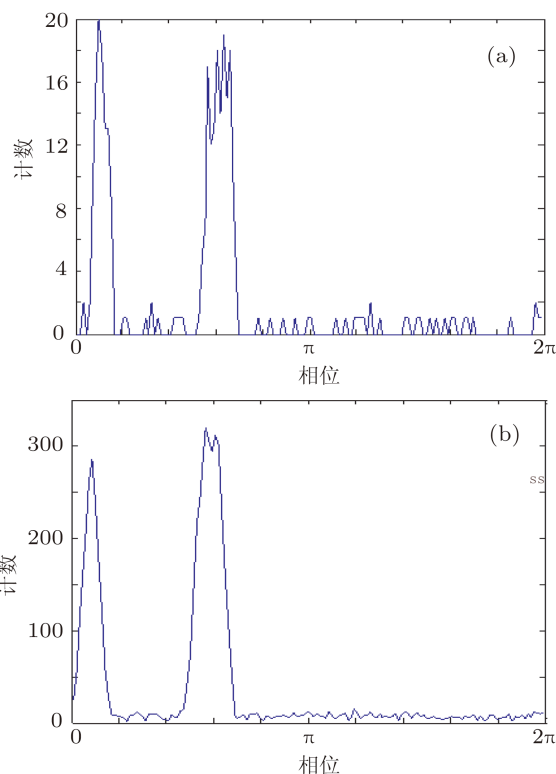


图 11 累积脉冲轮廓 (a) 累积时间 15 s; (b) 累积时间 300 s

由文献 [11] 可知, 探测器计数的损失率为

$$\eta = \frac{m - n}{m} = m\tau, \quad (4)$$

其中, n 为探测系统实测的计数率, m 为进入探测的光子计数率, τ 为探测器的死时间. 由 (4) 式可知, 计数的损失率与探测器的死时间成正比, 为减小计数的损失率, 需设法减小探测器的死时间. 由前面的分析可知, 探测器本身输出的信号的 FWHM 为 3 ns 以下, MCP 的时间响应也在几纳秒的量级, 因此可判断电子读出系统的时间响应慢是造成系统 100 ns 死时间的主要原因. 为此, 在后续的工作中要加强对电子读出系统的改善.

3.4 累积脉冲轮廓

实验中, 将 X 射线脉冲源调制周期为 150 ms, 主峰与次峰间隔为 1/4 周期, X 射线源强度通过改变 X 射线发生器的控制电压、电流及 X 射线源至探测器的距离来调控, 将其调至单光子脉冲状态. 单光子脉冲信号经过电子读出系统记录每个单光子电脉冲信号到达时间, 最后通过 X 射线脉冲轮廓的构造 (1) 式重现 X 射线脉冲轮廓. 图 11 为不同累积时间获取的累积脉冲轮廓图. 图 11(a) 累积时间

为 15 s, 图 11(b) 累积时间为 300 s, 可以看出随着累积时间的增长, 累积脉冲轮廓的波形趋于光滑, 噪声的影响逐渐削弱, 信噪比逐渐提高. X 射线脉冲信号非常微弱, 呈现出单光子状态, 单个光子的到达时间是随机事件. 由于 X 射线脉冲信号具有周期性, 大量的光子到达时间的统计分布是确定的, 即特定相位占有光子的几率是确定的, 但是噪声光子的到达时间不满足这样的统计规律, 因此只要经过足够长时间的积分, 信号得以加强, 噪声相对得以抑制, 就能获取高信噪比累积脉冲轮廓.

4 结 论

研制了基于脉冲星导航的 X 射线光计数探测原理样机, 对探测器的灵敏度、时间分辨率和系统的计数率进行了测试. 制作的 800 nm 的 CsI 反射式光电阴极, 其灵敏度相对裸 MCP 探测器提高近 10 倍, 在 5 keV 时约为 5.2×10^3 A/W, 探测器的输出信号的 FWHM 约为 1.1 ns, 时间分辨率可达到 1.1 ns. 整个探测系统的死时间约 100 ns, 依据脉冲轮廓的构造原理, 获得了 X 射线脉冲累积轮廓. 该研究对于开展 X 射线脉冲星导航核心技术攻关及相关理论研究具有重要意义.

-
- [1] Sheikh S I, Pines D J, Ray P S, Wood K S, Lovellette M N, Wolff M T 2004 *Proceedings of 14th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conference* Maui, HI, February 8–12, 2004 p105
 - [2] Sheikh S I, Pines D J 2006 *J. Guid. Contr. Dyn.* **29** 49
 - [3] Zhang X H, Zhao B S, Liu Y A, Miao Z H, Zhu X P, Zhao F F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1779 (in Chinese) [张兴华, 赵宝升, 刘永安, 繆震华, 朱香平, 赵菲菲 2009 物理学报 **58** 1779]
 - [4] Zhang X H, Zhao B S, Miao Z H, Zhu X P, Liu Y A, Zou W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4238 (in Chinese) [张兴华, 赵宝升, 繆震华, 朱香平, 刘永安, 邹玮 2008 物理学报 **57** 4238]
 - [5] Grande M, Maddison B J, Howe C J, Kellett B J 2009 *Planet. Space Sci.* **57** 717
 - [6] Rideout R M, Pearson J F, Fraser G W, Lees J E, Brunton A N, Bannister N P, Kenter A T, Kraft R P 1998 *Proc. SPIE* **3445** 384
 - [7] Hu H J, Zhao B S, Sheng L Z, Yan Q R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029701 (in Chinese) [胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 鄢秋荣 2011 物理学报 **60** 029701]
 - [8] Yang T G 2008 *Chin. J. Space Sci.* **28** 330 (in Chinese) [杨廷高 2008 空间科学学报 **28** 330]
 - [9] Taylor J H 1991 *Proc. IEEE* **79** 1054
 - [10] <http://ird-inc.com/axuvhighnrg.html>
 - [11] Wu Z H 1997 *Atomic Nucleus Physics Experiment Method* (3) (Beijing: Atomic Energy Press) p22 (in Chinese) [吴治华 1997 原子核物理实验方法 (3) (北京: 原子能出版社) 第 22 页]

X-ray photon counting detector for x-ray pulsar-based navigation

Hu Hui-Jun^{1)2)†} Zhao Bao-Sheng¹⁾ Sheng Li-Zhi¹⁾²⁾ Yan Qiu-Rong¹⁾²⁾
Chen Bao-Mei¹⁾²⁾ Wang Peng¹⁾²⁾

1) (State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

2) (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 21 March 2011; revised manuscript received 2 April 2011)

Abstract

A prototype of x-ray photon counting detector is proposed for x-ray pulsar navigation. The detector consists of CsI photocathode, micro-channel plate (MCP) electron multiplier, collect anode and electronic readout. The sensitivity, the temporal resolution, and the dead time are tested, and the results show that the sensitivity of the detector is 5.2×10^3 A/W at 5 keV, the temporal resolution is 1.1 ns, and dead time is 100 ns.

Keywords: pulsar navigation, photon counting detector, sensitivity, temporal resolution

PACS: 97.60.Gb, 07.85.-m, 07.05.Fb

† E-mail: huhuijun@opt.ac.cn