

# 一种监测低能 X 射线的 Si 探测器

王培玮, 徐 沔

(中国计量科学研究院, 北京 100013)

**摘要:** 低能(50 keV 以下)光子探测器广泛应用于外大气层核爆监测, 天体物理现象研究。采用半导体探测单元试制了低能 X 射线探测器模块。说明了配置多探测器系统的方法, 并介绍了探测单元模块的设计、主要试验和技术指标。室温下噪声等效输入光子能量为 2.1 keV。

**关键词:** Si 光电二极管探测器; 低能 X 射线; X 射线爆发

中图分类号: O572.212

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)05-0600-03

## Si Detector for Monitoring Low Energy X-ray

WANG Pei-wei, XU Mian

(National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Low energy (less than 50 keV) photon detector is applied extensively to monitoring exoatmosphere nuclear detonation and investigating astrophysical phenomenon. A low energy X-ray detector modular with Si-PD element was developed. The method was explained for scheming multi-detector system. Its design, detector test and technologic characteristics were described. Under room temperature, the noise equivalent input photon energy is 2.1 keV.

**Key words:** Si photodiode detector; low energy X-ray; X-ray burst

低能(50 keV 以下)光子探测技术有广泛的应用, 外大气层核爆监测就是倍受关注的一个方面。美国最早研制的星载 X 射线探测仪器在 60 年代初安装于 VELA 卫星, 用以监测核爆禁试协定。随后, 运载在 GPS 系列卫星上的 X 射线爆发探测器(BDX)或爆发探测剂量计(BDD)提供对全球外大气层核爆的监测。这类射线爆发探测系统也长期用于天体物理现象的研究, 并有重要的发现(如宇宙 X 射线爆发等)。目前, 欧美、俄罗斯、日本等一些国家均积极从事这类探测技术的研究。

探测单元早期采用闪烁体-光电器件配置, 随后为 Si(Li)探测器, 目前廉价的半导体 Si 光电二极管探测单元也能得到很好的结果, 性能优良的 CdTe 及 CZT 器件也是探测单元的选择。本工作采用半导体 Si 光电二极管探测单元试制低能 X 射线探测器模块。

### 1 探测单元能量响应特性(效率曲线)

天文现象或人工核爆产生的射线爆发(脉冲)具有复杂的组合性能特点, 包括能谱成分和时间特性等, 这为监测和识别射线爆发(脉冲)

的来源和类型提供物理基础。采用不同响应的单元探测器组合成探测器系统,单元探测器各自具有特定的能量响应特性(效率曲线),得到的射线能区-时间(时序)数据用以进行射线爆发事件的识别。监测低能 X 射线爆发的组合系统的示例由如图 1 所示的不同效率曲线的 5 个单元探测器组成。图中说明为 5 种设计的窗材料 Be、Al 厚度及芯片 Si 层厚度(cm),并示出设计 5 对应于 11.3 keV 处的峰效率 0.735 6。

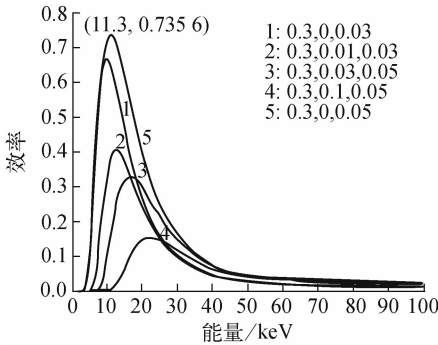


图 1 5 种 X 射线探测器的效率曲线

Fig. 1 Efficiency curves of five X-ray detectors

光子辐照探测单元材料(包括滤片、探测器晶片等)相互作用的结果导致入射光子束衰减及部分光子束能量沉积(材料吸收能量)。王同权等<sup>[1]</sup>给出 X 射线在靶材料内  $T$  深度(质量厚度)处的能量沉积(表示为吸收剂量)为:

$$D(T) = \int_0^\infty R(E) \cdot I(T, E) dE = \int_0^\infty dE \cdot R(E) \cdot I_0(E) \cdot e^{-\int_0^T \frac{\mu}{\rho} dx} \quad (1)$$

其中:  $I_0(E)$  为入射 X 射线强度(光子注量);  $I(T, E)$  为  $T$  深度处的 X 射线强度;  $\frac{\mu}{\rho}$  为 X 射线的质量衰减系数。

$R(E)$  为响应函数,可表示为:

$$R(E) = E \cdot \frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \quad (2)$$

其中:  $\frac{\mu_{en}(E)}{\rho}$  为 X 射线的质量能量吸收系数。

据此可进一步计算不同射线能量在材料中总的能量沉积及得到相应的效率曲线(能量响应)。因此,探测器响应曲线低能端主要由滤片的材料和厚度决定。常用低原子序数材料(铍、

碳或铝)对入射光子进行过滤选择,而高能端响应的下降主要由 Si 芯片的灵敏层厚度决定。

## 2 探测器的探测单元

低能光子探测器基本单元实际采用无窗型 Si-PD,灵敏层厚 300  $\mu\text{m}$ 。入射灵敏面积为 10 mm $\times$ 10 mm。另加 3 mm Be 窗,达到设计的能量响应要求。

为了防止外界电磁干扰、降低系统噪声,探测单元和前置放大器安装在屏蔽壳体内,输入、输出信号采用高频屏蔽电缆。还采用了半导体热电(Peltier 效应)制冷器,以进一步降低噪声。

## 3 探测器的电子学线路

探测器电子学线路包括前置放大器、主放大器和输出电路。

前置放大器为电荷灵敏放大器,采用 H4083、A250 两种单元器件进行性能试验比较。电荷灵敏前置放大器与主放大器间用具有极-零匹配的微分电路交流耦合<sup>[2-4]</sup>。主放大器采用 INA110、INA129 和 A275 单元器件,通过 RC 微分-积分脉冲成形设计,得到准高斯(3 极)型输出脉冲,以满足输出信号上升时间和脉宽的要求。

针对低能光子弱信号探测的需要,器件的选择突出低噪声、高灵敏度要求。为满足项目对功耗的限制,选用了低电源电压设计和低功耗器件。系统线路板经试验均采用多层板结构。

单元探测器线路原理示意图示于图 2。

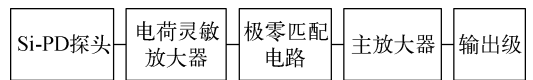


图 2 系统线路原理示意图

Fig. 2 Scheme of system circuitry principle

## 4 系统试验

系统性能试验和技术指标测试主要参考文献<sup>[5-7]</sup>的方法。

### 4.1 探测器对不同能量光子的探测性能

探测器对入射光子能量的线性响应是基本

的探测性能。试验中选用下列放射源得到不同能量的光子： $^{137}\text{Cs}$ 源光子能量为31.8、32.2和36.3 keV； $^{241}\text{Am}$ 源光子能量为13.9、17.8和59.54 keV； $^{129}\text{I}$ 源光子能量为29.4、29.7、33.6、34.4和39.58 keV； $^{166}\text{Ho}$ 源光子能量为48.2、49.1和80.57 keV以及Cu靶8.04 keV特征荧光X射线等。

不同能量的 $\gamma$ 、X光子的探测器响应信号经多道分析器采集分析,得到探测器响应与光子能量的关系,如图3所示(图中实验所用多道分析器未经绝对校准,两组道数间没有直接比较关系)。结果线性相关为0.99。

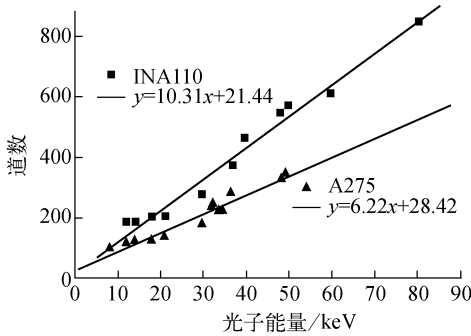


图3 光子能量与探测信号的关系

Fig. 3 Relation of photon energy and detected signal

#### 4.2 探测器电路特性参数试验

采用A275、INA110芯片的两套电子线路系统组装调试后测得的主要性能参数列于表1。其中系统放大倍数、输出电阻及脉冲宽度还可在应用中根据需要进行调整。动态范围为等效折合成的入射光子能量范围。图4为实测的输出波形。

表1 系统特性参数实测结果

Table 1 Test result on characteristic parameter of system

性能参数	数值	
	系统1(A275)	系统2(INA110)
放大倍数	3 000	2 500
动态范围, keV	50	80
输出电阻, $\Omega$	100	50
上升时间, ns	900	900
脉冲宽度, $\mu\text{s}$	2	2
噪声(FWHM), keV(室温)	2.4	2
功耗, mW	76.2	770

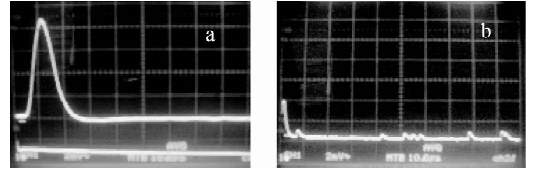


图4 输出脉冲波形

Fig. 4 Output pulse profile

a——输入阶跃信号; b——核衰变 $\gamma$ 光子探测脉冲

## 5 结论

研制的基本探测器单元由用户进行了性能检验,主要指标与研制结果一致,系统具有好的工作稳定性。

在此项工作中,得到中国计量科学研究院万国庆、王载勇、徐春长及高秋来等的帮助,在此一并致谢。

## 参考文献:

- [1] 王同权,魏晓东,李宏杰,等. X射线的衰减和能量沉积计算[J]. 原子能科学技术,2007,41(4): 399-403.  
WANG Tongquan, WEI Xiaodong, LI Hongjie, et al. Calculation of X-ray attenuation and energy deposition[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(4): 399-403(in Chinese).
- [2] MOSHER C H. Pseudo-Gaussian transfer functions with superlative baseline recovery [J]. IEEE, 1976, NS-23(1): 226-228.
- [3] GOULDING F S, LANDIS D A. Signal processing for semiconductor detectors[J]. IEEE, 1982, NS-29(3): 1 125-1 141.
- [4] LANDIS D A, CORK C P, MADDEN N W, et al. Transistor reset preamplifier for high rate high resolution spectroscopy [J]. IEEE, 1982, NS-29(1): 619-624.
- [5] 王宗仁. 核仪器电子技术[M]. 北京:原子能出版社,1977.
- [6] 徐钧山,张宝全. 核电子学实验[M]. 北京:原子能出版社,1982.
- [7] 汲长松. 核辐射探测器及其实验技术手册[M]. 北京:原子能出版社,1990.