

碲锌镉探测器的数字核信号处理系统设计

曾国强¹ 魏世龙¹ 夏源¹ 李强¹ 徐亚东² 葛良全¹ 介万奇²

1 (成都理工大学 地学校技术重点实验室 成都 610051)

2 (西北工业大学 航空学院 西安 710072)

摘要 设计了完整的碲锌镉(CdZnTe, CZT)探测器数字核信号处理系统, 包含了低功耗偏压电源、低噪声电荷灵敏放大器、数字梯形多道脉冲幅度分析器及数字上升时间甄别器。在考虑探测器与后端数字多道优化匹配前提下设计了低噪声电荷灵敏放大器; 数字多道脉冲幅度分析器(Digital Multi-Channel Pulse Height Analyzer, DMCA)通过高速模数转换器将模拟核信号离散化后, 在现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)中实现数字核脉冲信号处理; FPGA 芯片中以快慢双通道梯形形成形器为核心, 针对碲锌镉探测器空穴收集不完全的问题, 设计了数字上升时间甄别模块, 有效消除了空穴拖尾效应, 显著提升碲锌镉探测器的能量分辨率。从实验结果可知, 针对西北工业大学提供的 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的准半球结构碲锌镉探测器对 ^{241}Am 的分辨率最佳可达 3.6%, 对 ^{137}Cs 的分辨率可达 0.96%。

关键词 碲锌镉探测器, 电荷灵敏放大器, 核信号处理系统, 上升时间甄别, 数字脉冲幅度分析器

中图分类号 TL82

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110401

碲锌镉(CdZnTe, CZT)探测器为复合型化合物半导体探测器, 具有较大的禁带宽度和高原子序数, 在室温工作条件下对 ^{55}Fe (5.9 keV)、 ^{125}I (27.5 keV)、 ^{241}Am (59.5 keV)、 ^{57}Co (122 keV)、 ^{137}Cs (662 keV) 以及 ^{60}Co (1.17 MeV, 1.33 MeV) 的 γ 射线, 不仅有较高的能量分辨, 同时还具有较高的探测效率, 填补了闪烁体探测器和 HPGe 探测器在 X、 γ 射线的探测应用领域中的不足, 从而得到一种在室温下工作, 既有高的探测效率又有较好能谱特性和清晰成像能力的探测器^[1-3]。目前国内的西北工业大学、重庆大学、清华大学等高校在碲锌镉探测器的晶体生长、电极制备及探测器封装上做了较多工作也取得了很好的进展^[4-6]。CZT 探测器与硅 Pin、HPGe 等其他探测器有所不同, 完全自主开发并成功应用于产品的核信号设计较少见诸报道, 较多是采用国外 Amptek、Canberra 等公司的电荷灵敏放大器与数字多道脉冲幅度分析器(Digital Multi-Channel Pulse Height Analyzer, DMCA)获取实验室级别的核脉冲信号与实用谱线, 尤其是能够克服 CZT 探测器空穴捕获拖尾效应而设计的 DMCA 在国内未见有报道。

本文的研究采用的是西北工业大学准半球结构的碲锌镉探测器, 探测器尺寸为: $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 2\text{ mm}$, 探测器的漏电流小于 10 nA, 等效输出电容在 5 pF 以内, 工作偏压为 200–400 V^[7]。

1 数字核信号处理系统

CZT 探测器的表面是很薄的金属电极, 这些电极在偏压电源提供的偏压作用下在探测器内部产生偏压电场。当有电离能力的射线与 CZT 晶体作用时, 晶体内部产生电子和空穴对, 并且数量和入射光子的能量成正比。带负电的电子和带正电的空穴分别朝不同的电极运动, 最终被收集起来, 该电荷信号经过电荷灵敏前置放大器(Charge Sensitive Pre-amplifier, CSA)变成电压脉冲, 其幅度与入射光子的能量成正比。该脉冲信号输入到带上升时间甄别的 DMCA 中对信号进行脉冲幅度分析和上升时间判别, 如图 1 所示。

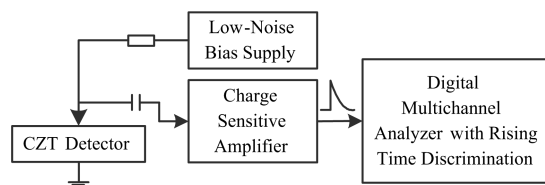


图1 系统整体框图

Fig.1 Block scheme of system.

由于 CZT 探测器中空穴载流子的漂移距离与寿命较短, 导致电荷收集不完全, 信号的幅度减小, 上升时间变长, 使得系统的能量分辨率变差, 因此

在 DMCA 中设计了数字上升时间甄别模块, 将电荷收集不完全的信号丢弃掉, 然后做计数率补偿, 从而提高系统的能量分辨率。

2 低噪声低功耗电荷灵敏放大器设计

图 2 为 CZT 探测器的 CSA 原理图。电荷灵敏放大器主要有直流耦合和交流耦合两种, 直流耦合方式下探测器的漏电流与信号电流一起流入电荷灵敏放大器, 由于漏电流的原因会使电荷灵敏放大器的输出有直流漂移, 如果采用传统的并联电阻放电方式设计 CSA, 由并联电阻泄放反馈电容上的电荷, 则为保证获得最低的噪声, 并联电阻应该越大

越好, 但在直流耦合方式下, 越大的并联放电电阻, 则会带来越大的直流漂移, 也就限制了并联放电电阻的阻值, 使 CSA 的输出噪声变大, 因此通常设计专门的复位电路在 CSA 输出满幅度时复位 CSA, 但复位型 CSA 的设计难度较大, 复位电路对 CSA 的影响比较难以控制, 同时复位信号也带来了一定的死时间。交流耦合方式尽管没有并联电阻带来的直流漂移问题, 但由于采用了交流耦合电容, 因此交流耦合电容与 CSA 的等效输入电容之间会有电荷分压的关系, 使得信号输出幅度变小, 信噪比略有变差, 但因其设计结构简单、计数通过率较高而广为使用。

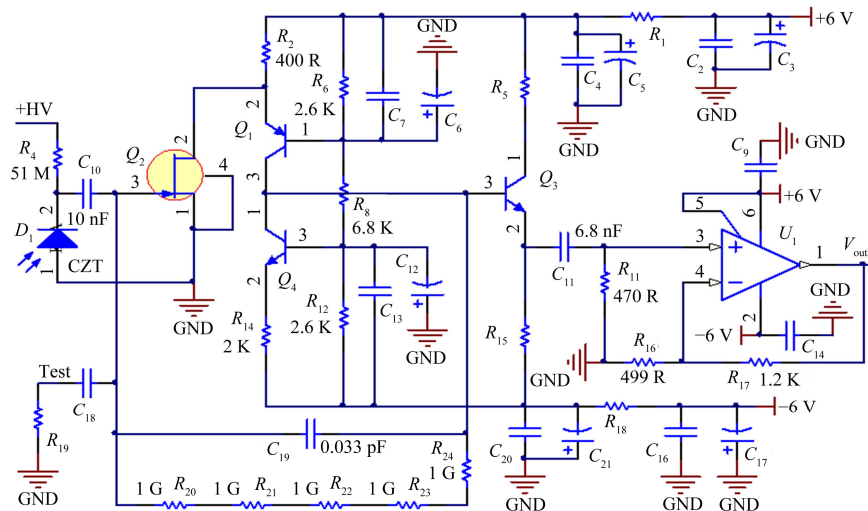


图 2 与 CZT 探测器匹配低噪声电荷灵敏放大器
Fig.2 Low noise charge sensitive amplifier matching with CZT detector.

图 2 中 R_4 为探测器的偏置电阻, R_4 与交流耦合电容 C_{10} 构成一个放电回路, 时间常数 $\tau_1 = R_4 \times C_{10} = 0.5 \text{ ms}$, 而 CSA 自身的反馈电阻 $R_{20} \sim R_{24}$ 与反馈电容 C_{19} 构成一个放电回路, 时间常数 $\tau_2 = 5 \text{ G} \times 0.033 \text{ pF} = 0.16 \text{ ms}$; CSA 后级的微分成形电路 C_{11}, R_{11} 的时间常数为 $3.2 \mu\text{s}$, 显然远小于 τ_1 和 τ_2 , 因此不会带来明显的极零点。电阻 R_4 太小则不仅会给 CSA 输出信号带来极零点, 还会使探测器的噪声变大, 因此通常要保证偏置电阻上的压差为 0.5 V 情况下, 噪声最低^[8], 考虑到 CZT 探测器的漏电流在 10 nA 以内, 因此偏置电阻选择在 $50 \sim 200 \text{ M}$ 比较合适, 可根据实际探测器的漏电流来选择最合适的电阻大小。

交流耦合电容 C_{10} 与 CSA 的输入等效电容构成电容分压关系, 如果 C_{10} 太小, 电荷的耦合不完整, 会有损失。而 C_{10} 太大, 则探测器及偏压电源的低频噪声会耦合到 CSA 使系统噪声增加, 因此通常选择 10 nF 为宜。

在选用电荷灵敏放大器的第一级结型场效应晶体管(Junction Field-Effect Transistor, JFET)时, 除了需要考虑 JFET 自身的 G_m 、 C_{iss} 、等效噪声等参数以外, 还需要考虑与前端探测器的匹配问题, 由文献[9]可知当探测器的自身等效电容与前放第一级 JFET 的 C_{iss} 相等时, 可获得最高的信噪比。因此对于小电容探测器, 可选用 2N4416、2SK152; 对于大电容探测器则可选用 2N6550、2SK147, 或者多个 JFET 并联。本文选用的碲锌镉探测器为半球形结构, 其等效电容较小, 低于 5 pF , 故选用 2N4416 作为第一级前放 JFET。

本文设计的电荷灵敏放大器采用典型的折叠型电路结构^[10]。 R_6, R_8, R_{12} 构成偏置电路, 用以设定合适的静态工作点。 R_{12}, R_{14}, Q_4 构成恒流源, 设三极管的开启电压为 0.6 V , 由于 R_{12} 的电压为 2.6 V , 那么流过 R_{14} 和三极管 Q_4 的电流为 1 mA , 因此流过三极管 Q_1 的电流也约为 1 mA 。另外 R_2, R_4, Q_1 也构成恒流源, 保证 R_2 流过的电流为 5 mA ,

由于流入 Q_1 的电流为 1 mA，那么通过电阻 R_2 流入 JFET (Q_1) 漏极的电流为 4 mA。查 2N4416 数据手册可知，4 mA 漏电流在允许的 I_{dss} 范围之内，同时设置 JFET 的漏电压为 4 V，可保证 2N4416 获得较佳的噪声特性。另外，由于 R_{12} 、 R_{14} 、 Q_4 构成了恒流源，成为了三极管 Q_1 的有源负载，大大地提高了电路的开环增益。

为尽可能提高信噪比，本文采用 OPA683 高速低噪声电流型运算放大器对前级输出的信号进一步放大。由于前级输出信号的时间常数 τ_1 、 τ_2 较大，不能直接对该信号进行放大，否则在高计数率情况下，放大器的输出会满幅度过载，因此本文先对前

级放大器输出的信号进行了一次 CR 微分整形，信号被调整为 $3.2 \mu s$ 宽度的指数信号，然后才经过 OPA683 放大输出，OPA863 静态工作电流仅为 1 mA 左右，但可输出 200 mA 左右的驱动电流，是低噪声的电流型运算放大器，因此适合用于对 CSA 前级信号的放大及对后级电路的推动。

3 低功耗偏置电源设计

图 3 为本文设计的一种低功耗偏压电源。该电源主要由升压控制器、开关场效应管、倍压整流电路和电子滤波器构成^[11-12]。

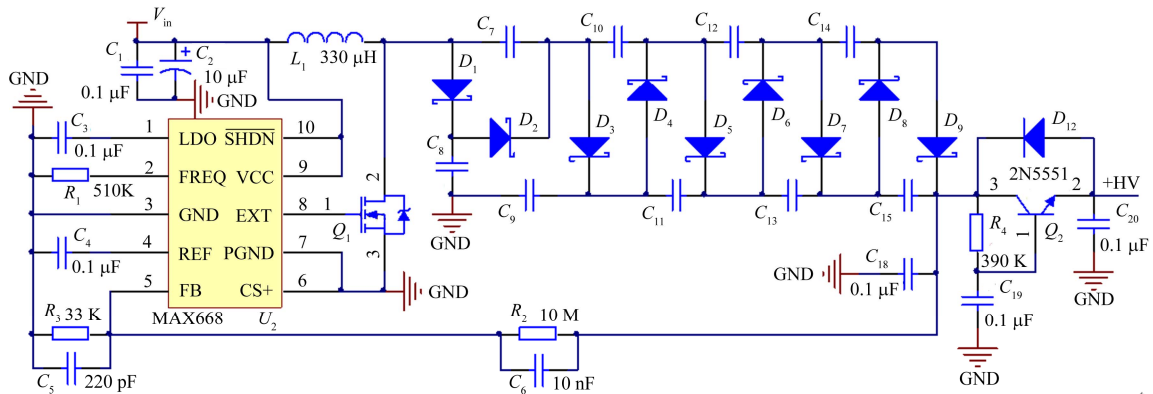


图 3 350 V 低功耗低噪声偏压电源设计
Fig.3 Scheme of 350 V low voltage and ripple bias power supply.

MAX668 为 1.8–28 V 宽输入电压范围的升压控制器。其转换效率可达 90% 以上，采用电流脉宽调制模式(Pulse Width Modulation, PWM)，可由外部电阻选择 100–500 kHz 范围的振荡频率，实际应用时需要针对实际的电感特性微调该外部电阻，可实现最优的电源转换效率与电压稳定性。该控制器还具备关断功能，可在不需使用高压电源时关闭 MAX668，达到减小电源损耗的目的。因此，该升压控制器很适合在手持式电源系统中应用。

图 3 中 D_1 – D_9 和 C_7 – C_9 组成 4 级电容倍压电路。图 3 中的二极管最好选择低导通压降，正向导通时间和反向恢复时间短，反向击穿电压高的肖特基二极管，本文采用的是 MBRS3201T3，其反向击穿电压 200 V，正向压降 0.59 V，反向恢复时间小于 35 ns。最后的电压输出级采用 2N5551 构成电子滤波器进一步降低电源噪声，同时更重要的是提高电流输出能力，能够保证带负载时电源电压的稳定性。

经实测该偏压电源在输入电源电压为 9 V 时最高输出电压可达到 800 V，输出电流可达 100 μA 以上。本文的 CZT 探测器工作电压为 300–400 V 之间，因此调节偏压电源输出电压在 350 V 左右，在偏压电源 5 V 供电，并输出高压给 CZT 探测器时，实测

工作电流为 5 mA 左右，因此整体功耗极低，比较适合低功耗的手持式 CZT 探测器系统的应用。图 4 为多层板设计制作的小体积偏压电源模块^[13]。

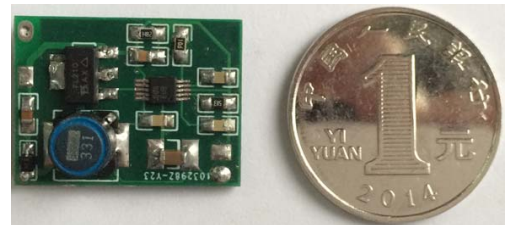


图 4 偏压电源实物图
Fig.4 Photography of bias power supply circuit board.

4 上升时间甄别的 DMCA 设计

通常，CZT 探测器的空穴寿命在 1 μs 左右，小于空穴的收集捕获时间，会导致所感生的电流信号明显降低，从而使电荷灵敏放大器输出信号的上升时间变大，幅度变小，使得全能峰往左偏移，形成空穴拖尾，也称为电荷捕获效应。电荷捕获效应通常在硅、锗探测器中不明显，而在 CZT 这种复合型探测器中则较明显，由于所获取的谱线存在空穴的拖尾，导致分辨率下降。因此为保证有较高的能量

分辨率, 需要设计带上升时间甄别功能的多道脉冲幅度分析器^[14-17]。采用传统模拟电路实现上升时间甄别^[18], 在上升时间变化不大时尚可, 当上升时间变化较大, 譬如达到几百纳秒级别时, 则需要设计有多达 10 级的 LC 延迟线电路, 导致电路庞杂, 不太适合手持式 CZT 探测器系统的要求, 因此需要考虑设计数字式的上升时间甄别器。在设计之初并不十分清楚 CZT 探测器最合适的成形时间, 如果采用传统的模拟高斯成形电路设计, 则面临繁杂耗时的硬件电路调试工作, 也无法达到最优的成形效果, 因此本文设计了基于 FPGA 与高速模数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 为核心的 DMCA。该脉冲幅度分析器能够实现以 $0.75\ \mu\text{s}$ 为步进的成形时间调节、时间常数可动态配置、快通道触发阈值可调等功能。本文在 DMCA 基础上, 还设计了数字式上升时间甄别模块。DMCA 的硬件电路框图如图 5 所示。在图 5 中, 前置放大器输出的信号经过缓冲跟随器/放大器实现阻抗变换, 信号放大后输入到电流型程控衰减器, 该衰减器由 14 bit 分辨率的高速乘法数模转换器 AD5453 构成, 经过程控衰减后的信号再次被高速线性放大; 由于前放输出信号有正有负, 因此需要进行极性转换得到正脉

冲信号; 在数字多道中, 为能将核脉冲信号中的噪声信号全部采集到, 需要叠加一个直流分量, 保证噪声信号的负半周最大值大于零, 否则噪声信号不能被完整采集, 使系统中白噪声变为非白噪声, 大大降低数字滤波的效果。为此需要有程控的直流分量叠加电路, 保证进入高速模数转换器的信号始终大于零。经过抗混叠电路后, 核脉冲信号输入高速模数转换电路, 采用的是最大采样率为 65 MHz 的 AD9235, 离散后的高速数字信号序列被送入到 CycloneIV 系列 FPGA 芯片实现快慢双通道的数字梯形成形、相关功能模块实现数字滤波、极零相消及脉冲幅度提取等。

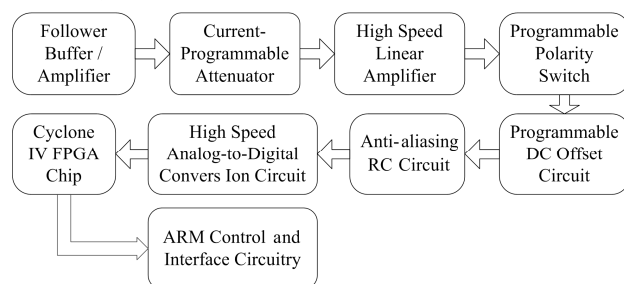


图 5 DMCA 电路设计框图
Fig.5 Electronic scheme of DMCA.

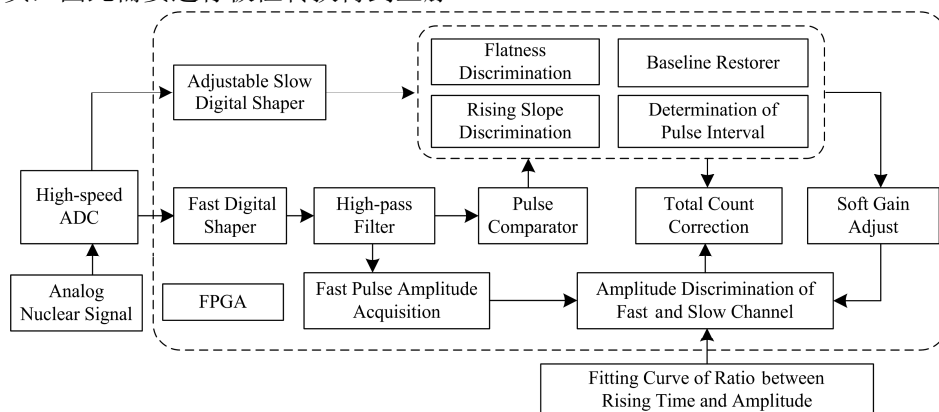


图 6 带上升时间甄别的多道脉冲幅度分析器 FPGA 内部设计框图
Fig.6 Block scheme of FPGA designed for DMCA with rise time discriminator.

数字上升时间甄别模块的 FPGA 逻辑设计框图如图 6 所示。由图 6 可知, 上升时间甄别器以快慢双通道数字梯形成形器为核心, 其中快通道的成形时间固定为 120 ns, 而可调慢成形通道其成形时间为 $0.75\text{--}18\ \mu\text{s}$ 数控可变, 设上升时间甄别器的甄别系数为 K , 其表达式为 $K=A/B$, 其中 A 为快通道成形信号的幅度值, B 为慢通道成形信号的幅度值。上升时间甄别的过程如图 7 所示。

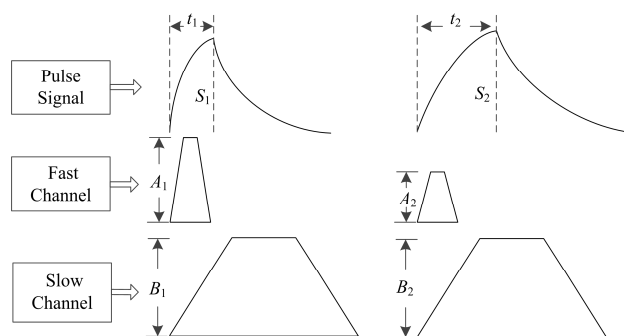


图 7 上升时间甄别示意图
Fig.7 Diagram of the rise-time discrimination.

当确定了慢通道的成形时间后, 上升时间为 t_1 的脉冲信号分别经快通道、慢通道成形后, 得到了幅度值为 A_1 的快通道梯形成形信号与幅度值为 B_1 的慢通道梯形成形信号, 对应 $K_1=A_1/B_1$; 同理, 当脉冲信号的上升时间为 t_2 时, 对应 $K_2=A_2/B_2$; 以此类推, 对于不同上升时间的信号其 K 的取值不同, 这是由于快通道的成形时间很短, 仅为 120 ns, 因此当上升比较缓慢的信号经过快通道成形后, 原始信号的上升沿未能全部被积分, 故成形后信号的幅度较小, 从而使得 K 值发生改变。据此可以建立不同上升时间的信号与 K 之间的关系, 通过判断 K 的值, 筛选所需上升时间的信号, 进而实现上升时间甄别的功能。

因此, 在实际应用中只要分别针对不同的慢通道成形时间, 分别测定出输入脉冲信号的上升时间与 K 之间的关系, 并存入 FPGA 系统中。进行上升时间甄别时, FPGA 自动将该上升时间转化为与 K 的关系, 凡是大于该值的信号则丢弃, 小于该值的信号则保留。

图 8 为 DMCA 的实物图, 尺寸为 $5.9\text{ cm} \times 5.9\text{ cm} \times 0.8\text{ cm}$ 。该 DMCA 板可通过 RS232、USB 等接口与上位机通信, 上位机可将系统工作的各项参数(如硬增益、软增益、上升甄别时间、信号的时间常数、成形时间、快通道触发阈值等)进行在线设定, 同时也可将 DMCA 的工作状态(如原始信号脉冲、成型后的信号波形、系统谱线等)参数读出, 以便于系统最佳工作参数(如信号时间常数、上升甄别时间、快通道触发阈值等)的设定。

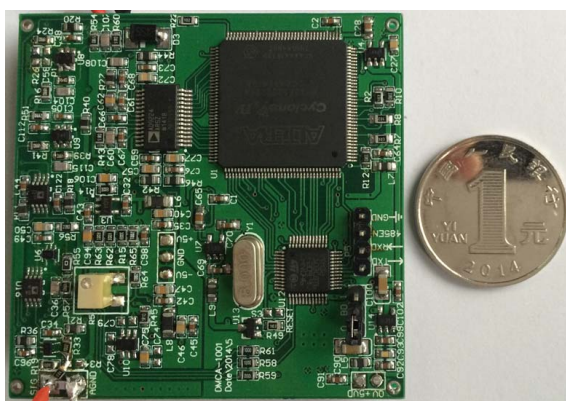


图 8 DMCA 的实物照片
Fig.8 Photograph of DMCA circuit board.

5 实验与应用

该 CZT 探测器的数字核信号处理系统可应用于 X 射线成像、核素识别等系统中。系统测试采用的是西北工业大学准半球结构的 CZT 探测器, 探测

器尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。系统测试主要针对低能 X 射线和中能 γ 射线的测量, 并与传统探测器进行对比试验。

5.1 电荷灵敏放大器对 γ 射线输出响应测试

将 CZT 探测器与电荷灵敏放大器连接后放置在金属屏蔽盒内, 所有输入输出采用 BNC (Bayonet Nut Connector) 接口连接, 以屏蔽电磁干扰。在探测器的一面将金属屏蔽盒开一个 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的窗, 并粘接镀铝膜, 以减小屏蔽盒对 γ 射线的吸收。测量时, 选用 ^{137}Cs 作为 γ 射线源, 将其与探测器正对, 相距约 5 cm, 使用 TDS1012B 型示波器测得电荷灵敏放大器对 ^{137}Cs 的 γ 射线响应波形如图 9 所示。

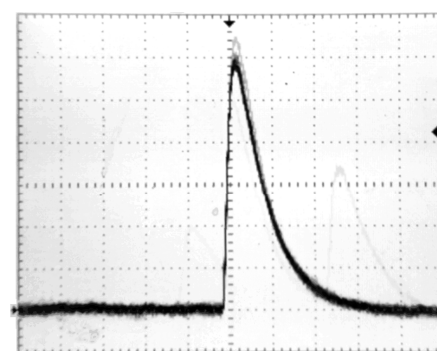


图 9 CSA 对 ^{137}Cs 源 γ 射线输出响应
Fig.9 Output waveform of CSA in ^{137}Cs γ -ray detection.

5.2 低能 γ 射线探测中的应用

CZT 探测器对低能 γ 射线的测量选取活度为 $1.776 \times 10^7\text{ Bq}$ 的 ^{241}Am 源 (59.5 keV), 测试时将其放置在金属屏蔽盒内屏蔽外界干扰, ^{241}Am 源与 CZT 探测器正对, 相距约 5 cm, 测量时间为 100 s。

图 10 给出了系统在测量 ^{241}Am 源时, 没有采用上升时间甄别(图 10(a))和采用了上升时间甄别(图 10(b))测量得到的谱线, 限于篇幅, 图 10 中只给出了 50–200 道的谱线情况(谱线分辨率为 2048)。由谱线可知, 在系统未采用上升时间甄别时, 由于 CZT 探测器的空穴载流子的寿命较短, 导致电荷收集不完全, 使得到的脉冲信号幅度明显降低, 因此谱线有较严重的拖尾, 使系统的分辨率降低, 约为 8.5%。而采用上升时间甄别后, 将有电荷损失的信号甄别掉, 提高了系统的分辨率, 目前能够做到最好的分辨率可达 3.6%。

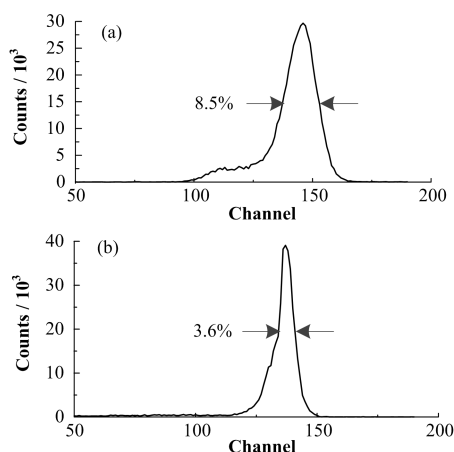


图 10 测量 ^{241}Am 源有无上升时间甄别对比
Fig.10 Results of rise time discriminator when measuring ^{241}Am source.

5.3 γ 射线探测中的应用

CZT 探测器对中能 γ 射线的测量选取活度为 2.967×10^6 Bq 的 ^{137}Cs 源(662 keV)。与测试低能 γ 射线时一样,将探测器与电荷灵敏放大器放置在金属屏蔽盒内进行屏蔽。测试时, ^{137}Cs 源与 CZT 探测正对,相距约 5 cm,测量时间为 30 min。

图 11 给出了系统在测量 ^{137}Cs 源时,没有采用上升时间甄别(图 11(a))和采用了上升时间甄别(图 11(b))测量得到的谱线,限于篇幅,图 11 中只给出了 0–600 道的谱线情况(谱线总道数为 2048)。由图 11 可知,在系统未采用上升时间甄别时,系统分辨率为 2.9%左右;而采用上升时间甄别后,分辨率可达 0.96%。

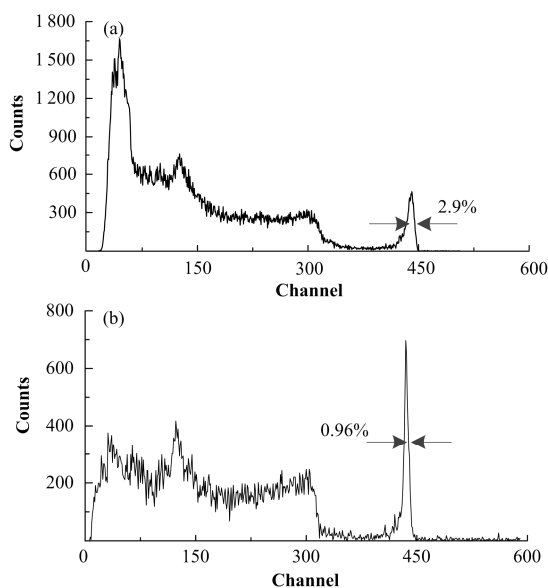


图 11 测量 ^{137}Cs 源有无上升时间甄别对比
Fig.11 Results of rise time discriminator when measuring ^{137}Cs source.

6 结语

从 CZT 探测器自身原理、特性作为核信号处理系统设计的出发点,考虑探测器与前置放大器的优化匹配设计,在 DMCA 基础上设计上升时间甄别器,从而构建完整的 CZT 核辐射探测的信号处理系统。从实验结果来看,效果是显著的,上升时间甄别技术的准确性实际上是有赖于快、慢两个通道的准确脉冲幅度提取的。对于快通道,由于其成形时间短,因此受各种噪声的影响大,从而使得其基线波动较大,增大了准确提取脉冲幅度的难度。为解决该问题,需要设计优异的高通滤波器滤除基线及低频噪声的干扰,同时尽可能降低信号处理系统路的高低频噪声,从而提高快通道脉冲幅度提取的准确度。对于慢通道,它受到探测器、前置放大器、供电电源等低频噪声影响,慢通道成形信号叠加在这种缓慢变化的低频噪声之上,此时如果仍只使用高通滤波器来滤除基线,就会造成梯形信号的梯形平顶发生畸变,幅度信息丢失。为解决这一问题,采用了数字式的基线估计方法:利用白噪声信号的功率谱密度与其功率的平方呈反比的关系,采用泛函变分方法对噪声估计,得到噪声最小时对应的冲击响应函数,进而得到噪声的基线^[19]。除此之外,选择合适的慢通道成形时间、合适的工频干扰抑制、良好的地线布局与屏蔽设计也可提高基线估计的准确度。下一步的工作将开展 CZT 探测器、电荷灵敏放大器在低温下对 X 射线的探测工作,并设计低噪声复位型电荷灵敏放大器测试 CZT 探测器对低能 X 射线的探测性能。

参考文献

- 李霞, 褚君浩, 李陇遐, 等. 室温 CdZnTe 核辐射探测器研究进展[J]. 趋势与展望, 2008, 33(11): 941–946
LI Xia, CHU Junhao, LI Longxia, *et al.* Development of room temperature CdZnTe nuclear radiation detector[J]. Outlook and Future, 2008, 33(11): 941–946
- 王凯, 王莹, 曲延涛. 碲锌镉探测器温度响应实验研究及分析[J]. 辐射防护, 2013, 33(6): 340–342
WANG Kai, WANG Ying, QU Yantao. Research and analysis of temperature response of CZT detectors[J]. Radiation Protection, 2013, 33(6): 340–342
- 张岚, 李元景, 朱维彬, 等. 碲锌镉探测器对低能 X 射线的探测[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(3): 517–520
ZHANG Lan, LI Yuanjing, ZHU Weibin, *et al.* Study on self-adapting processing method in radiant image[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(3): 517–520

- 517–520
- 4 徐慧超, 张金洲, 沈浩元. 用于 X 荧光分析的半导体探测器[J]. 常熟理工学院学报, 2006, **20**(2): 91–93
XU Huichao, ZHANG Jinzhou, SHEN Haoyuan. The semiconductor detectors for X-ray fluorescence analyse[J]. Journal of Changshu Institute of Technology, 2006, **20**(2): 91–93
- 5 蒋建, 肖沙里, 蔡欣. CZT 像素阵列核探测器的噪声分析[J]. 光电子技术, 2011, **31**(2): 98–102
JIANG Jian, XIAO Shali, CAI Xin. Noise analysis of array pixellated CZT detector[J]. Optoelectronic Technology, 2011, **31**(2): 98–102
- 6 张秋实, 卢闫晔, 谢肇恒, 等. 用于医学成像的碲锌镉单极型探测器研究进展[J]. 半导体光电, 2013, **34**(2): 171–179
ZHANG Qiushi, LU Yanye, XIE Zhaoheng, *et al.* Progresses in the development of CdZnTe unipolar sensing detector for medical imaging[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, **34**(2): 171–179
- 7 王涛, 徐亚东, 查钢强, 等. 室温辐射探测器用 CdZnTe 晶体生长及其器件制备[J]. 机械科学与技术, 2010, **29**(4): 546–550
WANG Tao, XU Yadong, ZHA Gangqiang, *et al.* Detector grade CdZnTe crystal growth and device fabrication[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, **29**(4): 546–550
- 8 Cremat Inc. CR-150-R5 evaluation board application guide[OL]. <http://www.cremat.com/CR-150-BOX-R5.pdf>, 2014
- 9 Spieler H. Introduction to radiation detectors and electronics[R]. USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1998
- 10 Noulis T, Fikos G, Siskos S, *et al.* Noise analysis of radiation detector charge sensitive amplifier architectures[C]. Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, 2008: 486–489
- 11 曾国强, 葛良全, 赖万昌. 手持式辐射仪高压直流电源的设计[J]. 电测与仪表, 2008, **45**(6): 46–49
ZENG Guoqiang, GE Liangquan, LAI Wanchang. Design of high voltage power supply used in handheld radiometer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, **45**(6): 46–49
- 12 谭承君, 曾国强, 葛良全, 等. 手持式 X 荧光仪电源系统的设计[J]. 核电子学与探测技术, 2014, **34**(3): 380–384
TAN Chengjun, ZENG Guoqiang, GE Liangquan, *et al.* Design of the power system for handheld X-ray fluorometer[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, **34**(3): 380–384
- 13 曾国强, 葛良全, 熊盛青, 等. 数字技术在航空伽马能谱仪中的应用[J]. 物探与化探, 2010, **34**(2): 209–212
ZENG Guoqiang, GE Liangquan, XIONG Shengqing, *et al.* The application of digital spectroscopic technique to airborne gamma-ray investigation[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, **34**(2): 209–212
- 14 葛良全, 曾国强, 赖万昌, 等. 航空数字 γ 能谱测量系统的研制[J]. 核技术, 2011, **34**(2): 156–160
GE Liangquan, ZENG Guoqiang, LAI Wanchang, *et al.* The development of a digital airborne gamma-ray spectrometry[J]. Nuclear Techniques, 2011, **34**(2): 156–160
- 15 Fernandes L M P, Simoes P C P S, dos Santos J M F. Digital rise-time discrimination of large-area avalanche photodiode signals in X-ray detection[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, **49**(4): 1699–1703. DOI: 10.1109/TNS.2002.801518
- 16 Toke J, Quinlan M J, Gawlikowicz W. A simple method for rise-time discrimination of slow pulses from charge-sensitive preamplifiers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2008, **A595**: 460–463. DOI: 10.1016/j.nima.2008.07024
- 17 Niemela A, Sipila H, Ivanov V I. Improving CdZnTe X-ray detector performance by cooling and rise time discrimination[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1996, **A377**(2): 484–486. DOI: 10.1016/0168-9002(96)00028-9
- 18 Jordanov V T, Pantazis J A, Huber A C. Compact circuit for pulse rise-time discrimination[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1996, **A380**: 353–357. DOI: 10.1016/0168-583X(94)00570-2
- 19 肖无云, 魏义祥, 艾宪芸. 多道脉冲幅度分析中的数字基线估计方法[J]. 核电子学与探测技术, 2005, **25**(6): 601–604
XIAO Wuyun, WEI Yixiang, AI Xianyun. Digital baseline estimation method for multi-channel pulse height analyzing[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, **25**(6): 601–604

Design of digital nuclear signal processing system for CdZnTe detector

ZENG Guoqiang¹ WEI Shilong¹ XIA Yuan¹ LI Qiang¹ XU Yadong² GE Liangquan¹ JIE Wanqi²

1(Nuclear Technology Key Laboratory of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610051, China)

2(College of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract Background: CdZnTe (CZT) detector has excellent detection efficiency and resolution toward gamma ray at room temperature. It is a beneficial supplement to HPGe and scintillator detectors. Digital multi-channel analyzer (DMCA) plays significant role for high resolution spectrometer of CZT. **Purpose:** This study aims to overcome the effect of “hole tailing” for CZT detector by implementing digital nuclear signal processing system. **Methods:** A low noise charge sensitive amplifier is designed by considering optimal matching of detector and digital multi-channel analyzer. High speed analog-digital converter transforms the analog signal to discrete digital sequence signal. Digitized signals are processed by Field Programmable Gate Array (FPGA) chip in the DMCA. In this FPGA chip, fast-slow dual channel trapezoidal shaper and digital rise time discriminator are designed to overcome the problem of charge trapping of CZT detector. Digital rise time discriminator could eliminate the effect of “hole tailing” and improve the energy resolution of CZT detector. **Results:** For the 4 mm×4 mm×2.5 mm capture plus structure of CZT detectors offered by Northwestern Polytechnical University, the best resolution is up to 3.6% for ²⁴¹Am source, and up to 0.96% for ¹³⁷Cs source. **Conclusion:** The optimal matching of each unit circuit in the whole digital nuclear signal processing system could improve the energy resolution for CZT detecting system. Digital multi-channel analyzer with rising time discriminator has significant advantage for CZT detecting system.

Key words CZT detector, Charge sensitive amplifier, Nuclear signal chain, Rise time discrimination, Digital pulse amplitude analyzer

CLC TL82