

半导体探测器匹配读出及数字化处理技术的研究

汇报人:胡传皓 先进核辐射探测技术与仪器团队

huchuanhao17@cdut.edu.cn

13982011264



半导体探测器性能特征



半导体探测器读出电路设计



数字化处理算法设计



半导体探测器具有快速的时间响应、宽的线性范围、高的能量分辨率等优点

















☆ 优异的性能, 适用于X射线、 低能γ射线 能谱测量 等领域!!







☆ 研究半导体探测器工作机理,建立探测器能量响应的特征数学表达式;

☆ 完成半导体探测器最佳匹配前置读出电路的研制,实现半导体探测器的高精度电荷信号读出、低噪声
快电流信号读出、微弱电流信号读出等关键技术!!

☆开展半导体探测器数字化处理算法研究。

 ◆ 半导体探测器:
 硅/锗基探测器(Si-PIN、SDD、PIPS、Si-APD 高纯锗探测器)
 化合物半导体探测器(CdZnTe、CdTe、Pbl₂)
 钙钛矿探测器(CsPbBr₃、MAPbBr₃)





半导体探测器性能特征



半导体探测器读出电路设计



数字化处理算法设计



- 半导体探测器信号产生与特征分析 >>
- ◆ Shockly-Ramo定理
- $Q = -q\varphi_0(\mathbf{x})$ $i = q\mathbf{v} \cdot \mathbf{E}_0(\mathbf{x})$
 - 载流子数目; 权电场、权电势大小; 三要素 漂移速度!
- ◆Q: 电极上感应的电荷;
- ◆q: 电场空间中移动的总电荷量;
- ◆ φ₀(x): 空间点电荷x处的权电势;
- ◆i:电极上感应的电流;
- ◆ v:空间点电荷的运动速度;
- ◆ E₀(x):空间点电荷x处的权电场强度;



















半导体探测器信号噪声分析 串联噪声 并联噪声(电流噪声) (电压噪声) 1/F噪声 Serial Detector Amplifier Detector Bias circuit Resistor Vns Vnas1/f www R_s **V**_{nas} nbp i_{nap}Ø Indp 🖗 Noiseless CD amplifier 放大器电压 或电流噪声 热噪声 热噪声 探测器电流 (探测器偏 (1/F噪声是 (任何串联 噪声 电压噪声主 置电阻) 的电阻) (漏电流) ☆ 尽可能抑制噪声! 体)



★探测器匹配读出技术

☆ 读出电路噪声特征分析模型



☆ 读出电路电容匹配分析模型



$$\begin{split} \text{ENC}_{a}^{2} &= 2kT \frac{\chi}{\omega_{\text{T}}} \frac{(C_{\text{D}} + C_{\text{I}})^{2}}{C_{\text{I}}} \frac{h_{\text{I}}}{\tau_{\text{M}}} = 2kT \frac{\chi}{\omega_{\text{T}}} \frac{h_{\text{I}}}{\tau_{\text{M}}} \Big[\Big(\frac{C_{\text{D}}}{C_{\text{I}}} \Big)^{\frac{1}{2}} + \Big(\frac{C_{\text{D}}}{C_{\text{I}}} \Big)^{\frac{1}{2}} \Big]^{2} C_{\text{D}} \,. \\ \\ \text{ENC}_{a} &= \text{ENC}_{a\text{CM}} \frac{1 + m}{2m^{\frac{1}{2}}} \\ \hline \text{支撑大探测器结电容读出电路设计} \end{split}$$



★探测器匹配读出技术

☆提出了复位/混合复位型读出电路结构

复位型读出电路,采用复位开关代替反馈电阻,极大降低电阻热噪声



支撑极高分辨率X射线探测器读出电路设计

混合复位型读出电路,采用电阻与开关实现 双网络复位



支撑高计数率&高能量分辨率读出电路设计



★探测器匹配读出技术

☆Multi-JFETs型读出电路结构



JFET并联+JFET恒流源的电路结构: JFET并联--实现对PIPS、金硅面垒等大面 积半导体探测器的结电容的匹配,减小ENC; JFET恒流源--单载流子传输,极低的噪声, 可与输入级JFET自洽,保证稳定工作。

支撑大结电容探测器能谱读出



★探测器匹配读出技术的应用

(1) 复位型读出电路

典型探测器: Si-PIN、SDD探测器

无反馈电阻电荷灵敏前放,避免了反馈电阻Rf热噪声,可显著提升能量分辨率,主要应用于硅漂移、 硅PIN等高分辨探测器,且可工作于高计数率场合!





★探测器匹配读出技术的应用

(1) 复位型读出电路

典型探测器: Si-PIN、SDD探测器

采用源极复位工作方式,高信噪比输出,可广泛应用于X荧光测量等极高能量分辨率的测量领域





★探测器匹配读出技术的应用

(2) 大结电容探测器匹配读出电路





典型探测器:金硅面垒、PIPS



★探测器匹配读出技术的应用(2) 大结电容探测器匹配读出电路

 $C_{Ai} = C_D + C_S$



Ao足够大



Φ35mm<mark>,</mark> PIPS探测器



Cs-137能量响应

CHIDC- F840





◆ 全系列探测器读出电子学部件



完成了系列化电荷/电流/电压灵敏前置放大器的研制,可适用于半导体、气体、闪烁体探测器,实现 高精度电荷信号读出、低噪声快电流信号读出、微弱电流信号读出,国产领域里面最齐全,完整!



半导体探测器性能特征



半导体探测器读出电路设计



数字化处理算法设计



数字化多道脉冲幅度分析器





<mark>核心单元:极低的系统电子学噪声</mark>

✓ 高采样率,高垂直分辨率ADC电路

✓ FPGA, SOC电路



★最优匹配数字成形滤波技术





(1) 针对探测器高脉冲通过率的自适应滤波成形算法





(2) 针对化合物半导体的"空穴俘获"效应抑制的算法







(2) 针对化合物半导体的"空穴俘获"效应抑制的算法

使用西北工业大学研制的CdZnTe探测器开展能谱测量, 开启算法后,能量分辨率由FWHM=3.25@662keV,提升到FWHM=1.27@662keV

Ele Edit View 数据库操作 Help	Eile £dit View 数据库操作 Help
· 参数设置与算机	· 参数设置与联机
R3232485 USB ▼ 化器鉄机 硬増益: 1 倍 軟増益: 2000 ▼ 正极性 直索编移量: 2000 ▼ 広极性 直索编移量: 2000 ▼ 広振性 □ 2000 ▼ 5000 × 50000 × 5000 × 5000 × 5000 × 5000 × 5000 × 5000 × 5000	R2322 485 USB ▼ (公器紙料、 種理論: 1 倍 軟増論: 2000 ▽ 正极性 直流编移量: 200 変化 高圧: 600 伏 上 500 斜砂 ▽ KTD 测量周期: 100 秒 启动定时现置 単次手动照量
選ば音楽様式 - ほどんは至こ 0.0.8 - (1.5.2) (1.5.0) - (1.5.0) - (1.5.0) - (1.5.0) (1.5.0) - (1.5.0)	诺技術者模式 ▼ 満好小協業: 2048 ▼ 成用分1日 600 ▼ (Math Bill)営業計 2.2 (204) 中通過結めが原信: 10 〒 100 Math T 50 Math 対余則量时间: 杉 ▽ 计数率計像 108:
	and a set a
其他功能	
SNTF机本底 查看频谱图 谱线无处理模式 PWN线频至: 1000 108平:	SNIP和本展 查看频谱图 国际无处理模式 ▼ PWN.频率: 1000 10电平:
不寻輪 ▼ 设置2000 读取10端口 最立意用	不得能 マ いったたい (法男の)パロ 最充高明
PWMAGER: 500	
FWHM=3.25%	FWHM=1.27%
Ready	Ready NUM



(3) 针对大体积HPGe探测器的多点能量沉积修正算法

问题:入射射线能量在探测器内部多点沉积,形成持续较长的多峰电流信号,恶化能量分辨率





(3) 针对大体积HPGe探测器的多点能量沉积修正算法

MSE多点能量沉积校正算法

关闭多点能量沉积正功能(20%HPGe) Co-60(1.332MeV), FWHM:1.73keV;





(4) 针对大体积HPGe探测器的散射事例甄别算法

高纯锗康普顿散射事例甄别

高纯锗探测器发生康普顿散射时,散射光子逃逸出探测器,能量未完全沉积,成 为散射本底,导致测量精度下降,因此需要甄别并扣除散射事例,提高分析精度。 口法一:HPGe+环形符合探测器,时间符合甄别散射事例;成本高,效果好;

口法二:单HPGe,<mark>算法甄别</mark>散射事例;成本低,新技术;





(4) 针对大体积HPGe探测器的散射事例甄别算法

高纯锗康普顿散射事例甄别

采用卷积神经网络方法甄别散射事例,使得康普顿抑制比达1.47,最小可探测活度 (MDA)优化了25.1% (Co-60),取得了一定效果,算法仍有较大提升空间。







◆ 全系列核脉冲分析处理器







汇报人:胡传皓 先进核辐射探测技术与仪器团队

huchuanhao17@cdut.edu.cn

13982011264