

基于时变基线扣除技术的稳定能量分辨率数字脉冲处理器



贺静奎¹, 黄土琛^{1,*}, 李航旭²

1. 中山大学中法核工程与技术学院, 珠海 519082
2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049



中国科学院高能物理研究所

研究背景与意义

SDD与晶体管复位电荷灵敏前放

凭借大有效面积、低输出电容、优异能量分辨率以及可通过紧凑型热电冷却器（TEC）冷却等突出优势，硅漂移探测器（SDD）已被广泛应用于X射线荧光（XRF）光谱仪、同步辐射光源、天体物理和粒子物理实验等领域。随着同步辐射装置、自由电子激光、以及现代X射线源亮度和功率的持续提升，探测系统面临高通量的X射线。因此，在高计数率下保持优异能量分辨率是电子学设计的关键指标之一。

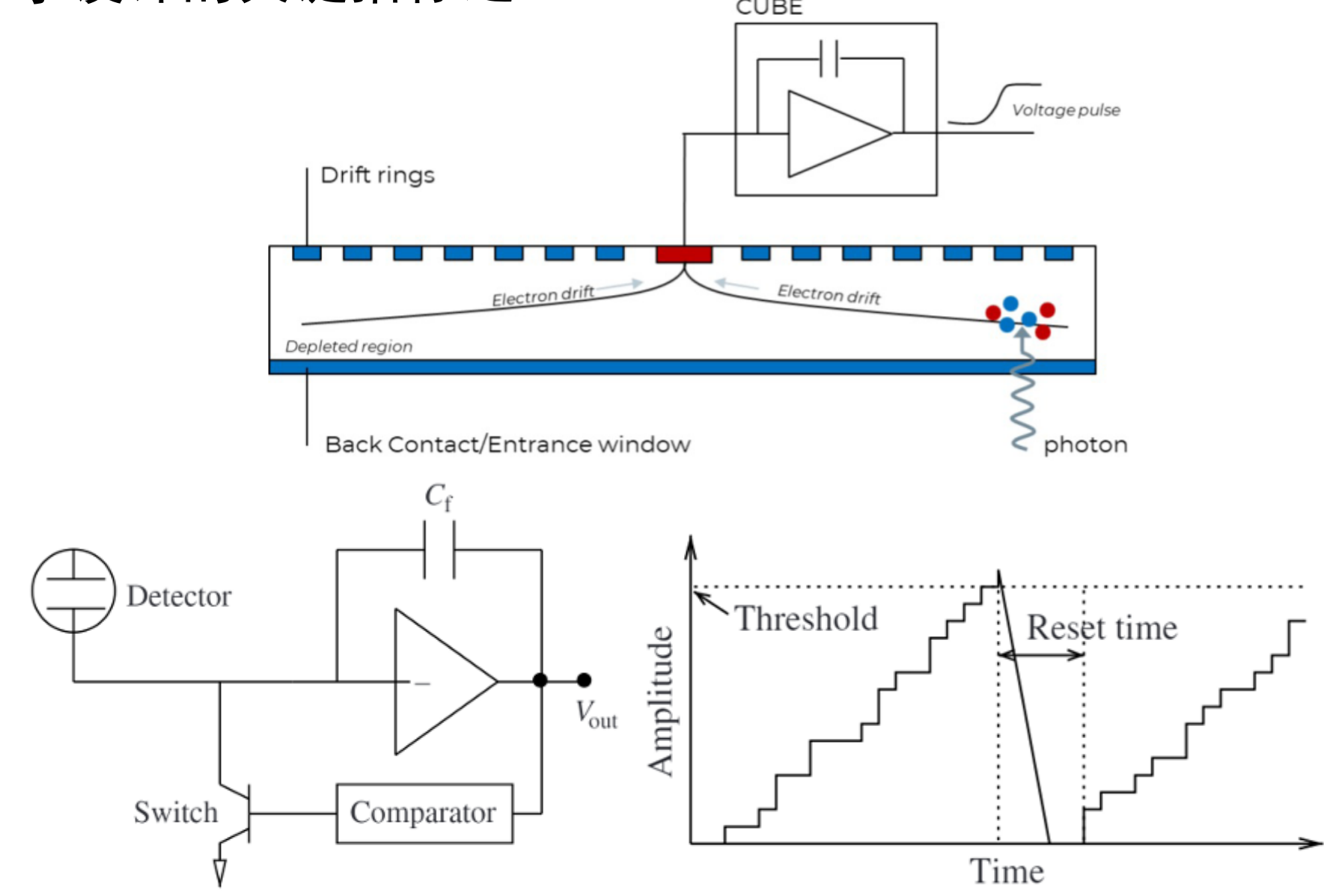


图1 SDD与晶体管复位电荷灵敏前放工作原理

复位型前放没有反馈电阻热噪声，常用于具有极佳能量分辨的探测器。X射线入射到SDD产生的电流在前放反馈电容上积分形成阶跃电压。由于SDD漏电流，前放输出是漏电流引起的斜坡信号与入射光子产生的阶跃脉冲叠加。通常斜坡信号的摆幅远大于单个X射线产生的阶跃。Amptek和KETEK前放的典型增益为3-5mV/keV，5.89keV射线信号幅度<30mV。直接采样前放信号要求ADC具有足够的有效位数以减小量化噪声。

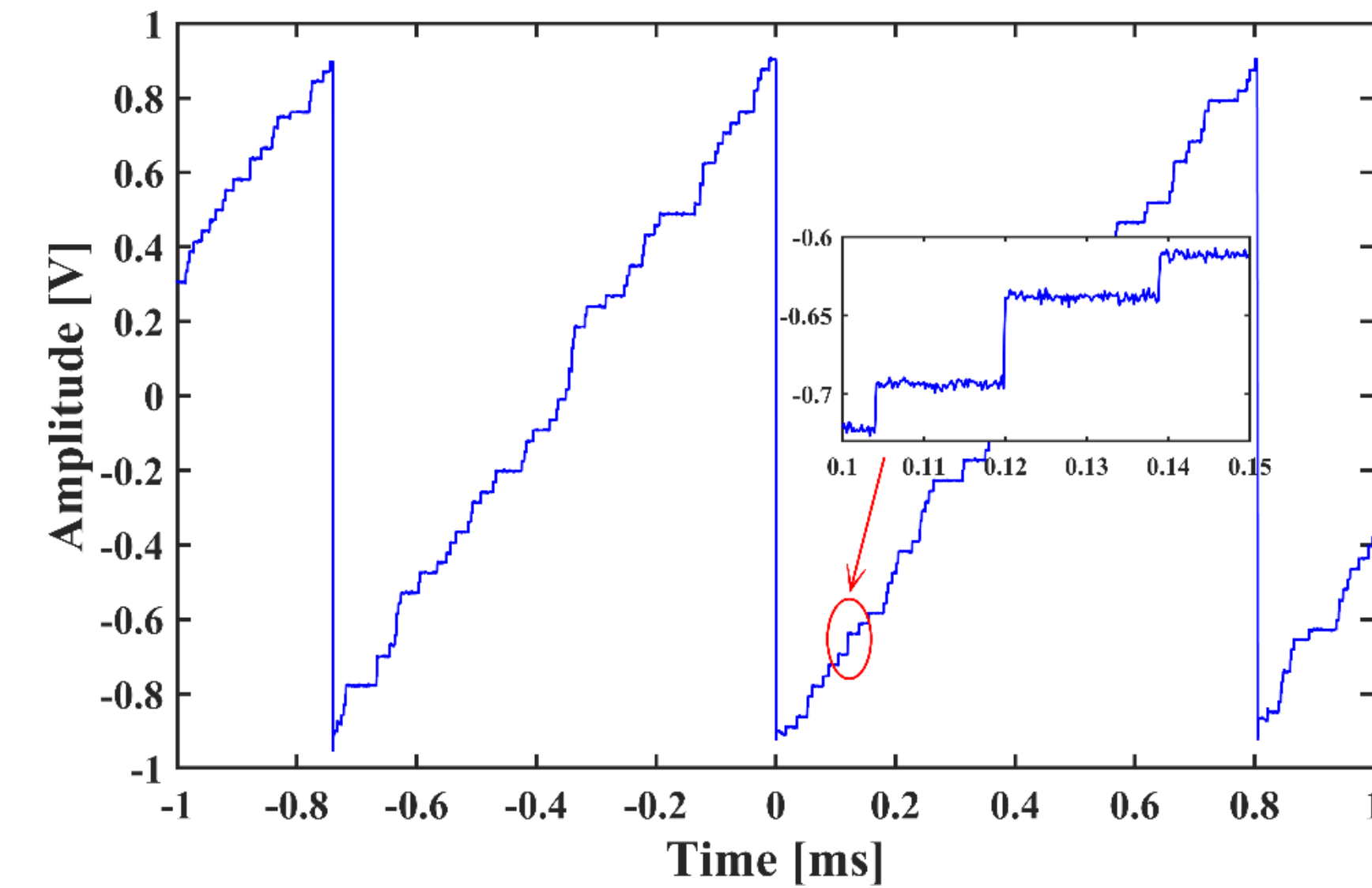


图2 ⁵⁵Fe放射源照射下示波器抓取的晶体管复位前放输出波形

晶体管复位前放数字化技术

- Abba: 4个20位40Msps交错式ADC实现160Msps直接采样前放信号，128eV@2μs/50kcps，但需定制ASIC；
- CR微分：最简单的信号放大方法，但本文揭示耦合电容的非理想特性会导致梯形畸变、分辨率恶化；
- XIA：斜坡减法专利，压缩信号动态范围以降低ADC有效位数要求，但在计数率变化条件下鲁棒性降低；
- 时变基线扣除：FPGA控制DAC动态调整减法器电路反向端以放大信号，实现高计数率下的稳定分辨率。

输出信号特征	应用实例
微分电路	指数信号，可放大
斜坡减法	斜坡信号，可放大
数字减法	阶跃信号，可放大
直接采样	阶跃信号，不可放大

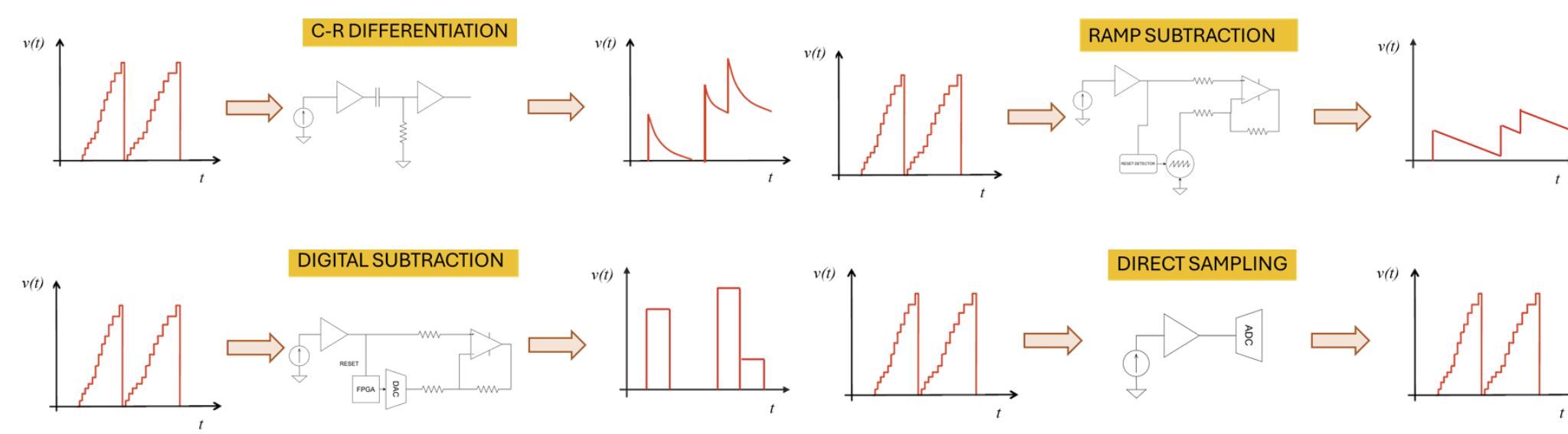


图3 四种晶体管复位前放数字化技术

数字化技术对比

微分电路引起梯形畸变

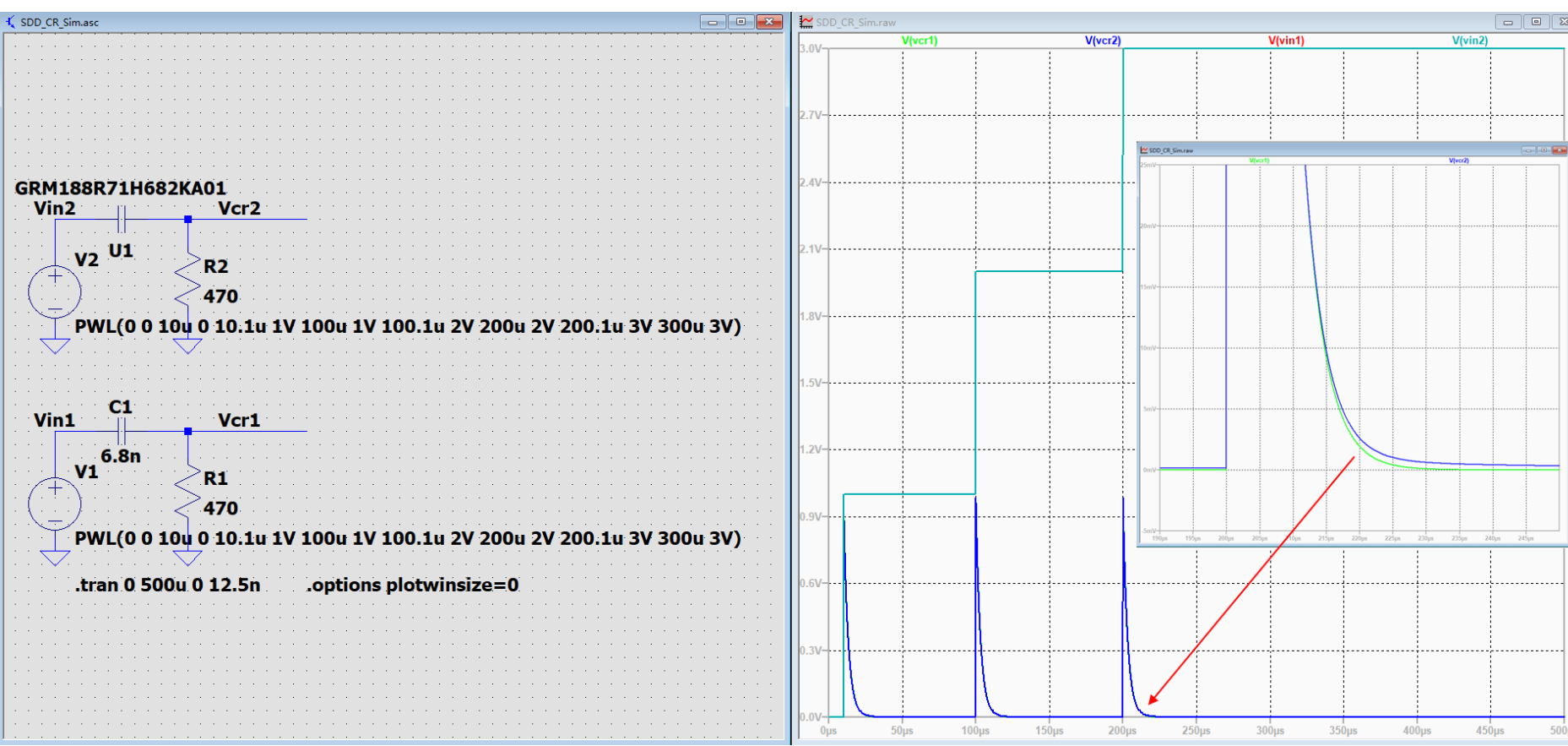


图4 理想与实际电容CR微分电路输出信号差异仿真结果

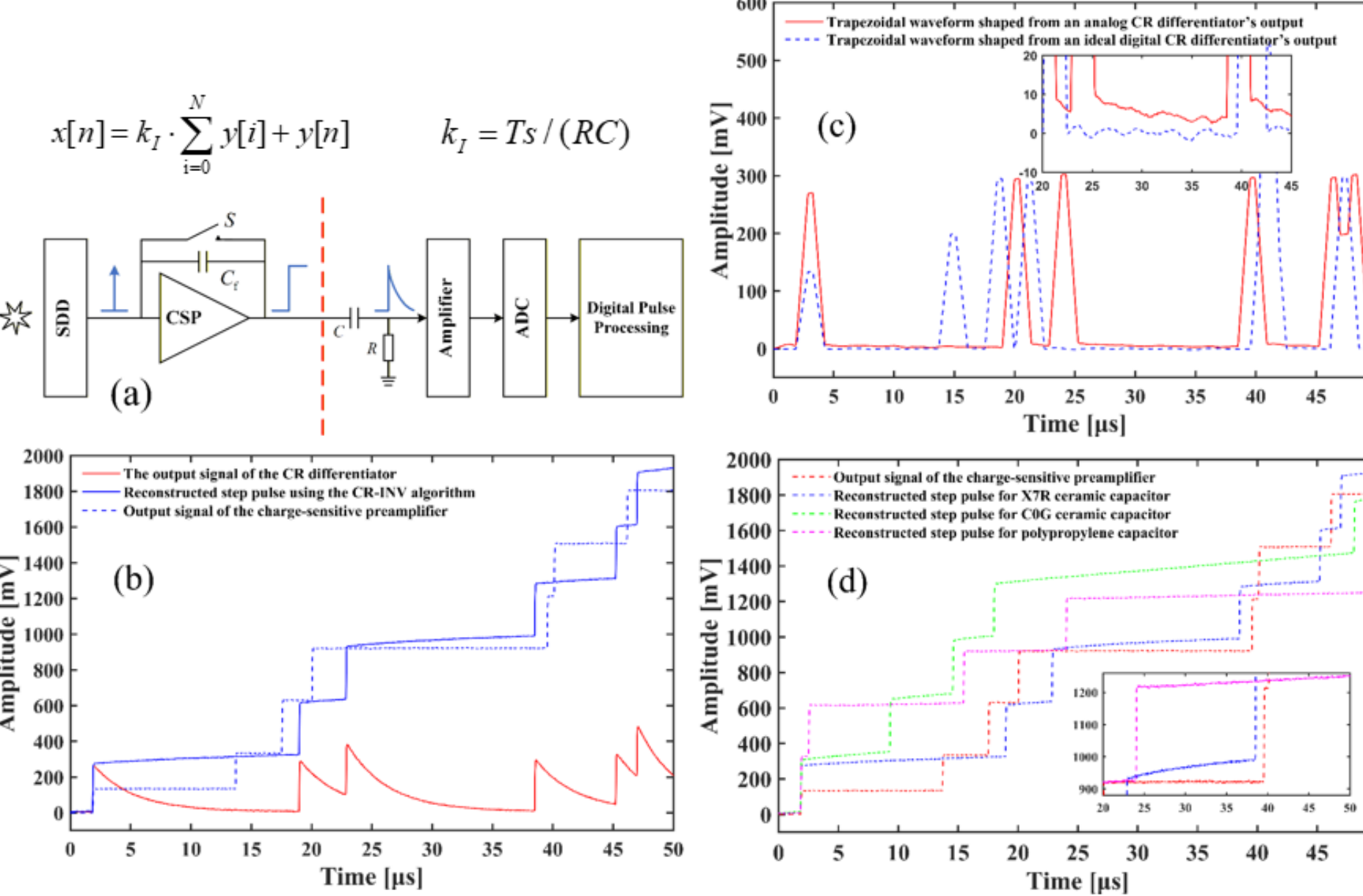


图5 (a) CR微分DPP架构；(b) 对比前放阶跃与指数脉冲还原的阶跃；(c) CR微分电路引起的梯形畸变；(d) 对比不同材质电容的畸变程度

斜坡减法DPP与时变基线扣除DPP

斜坡减法DPP工作原理

- DAC控制电流积分器生成与前放输出斜率相近的锯齿波，根据信号速率调节锯齿波斜率，并在复位时更新；
- 前放信号减去锯齿波信号后放大，匹配ADC输入范围；
- 计数率快速变化情况下，信号超量程需引入额外复位。

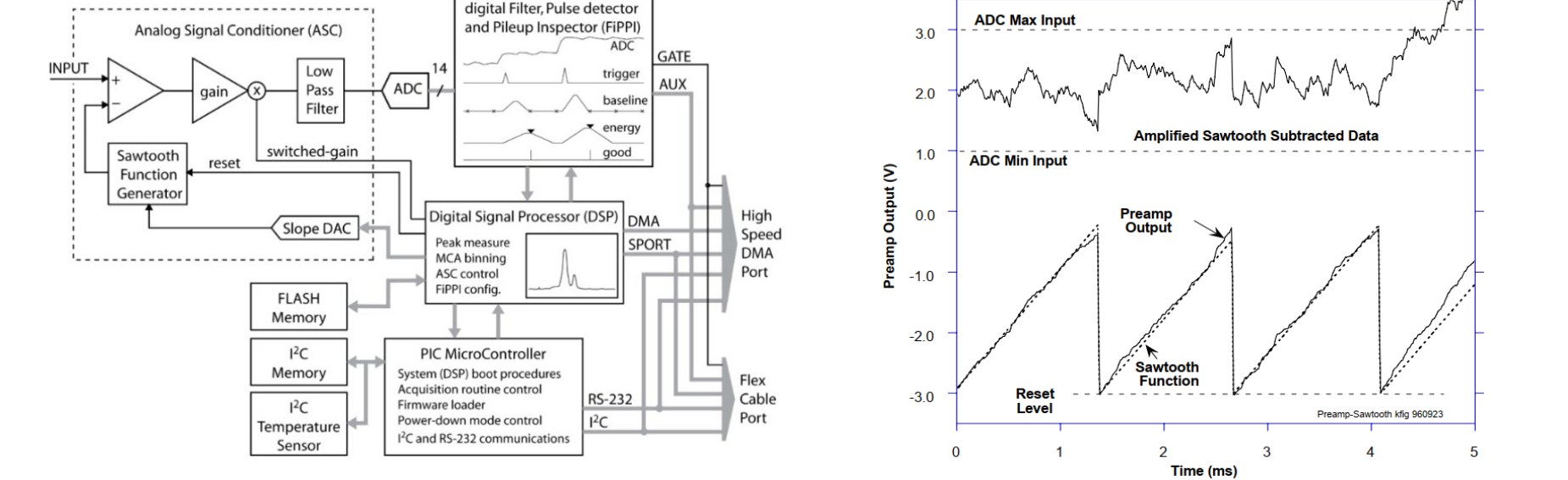


图6 XIA斜坡减法DPP架构与工作原理示意图

时变基线扣除DPP工作原理

- 双通道ADC采集，CHA采集前放信号用作DAC更新参考值；CHB采集放大后信号用于PHA算法；
- 放大信号超过阈值或ADC量程时DAC跟踪到前放幅度。

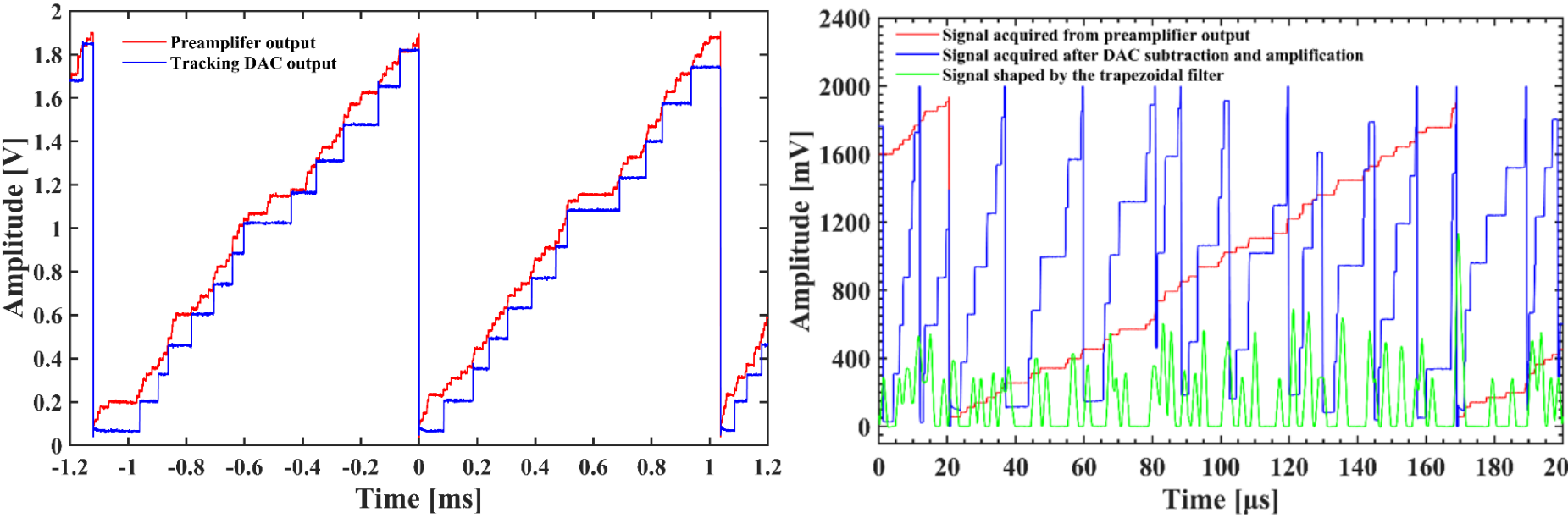


图7 时变基线扣除DPP工作原理。DAC跟踪前放输出（左图）；DPP采集的前放信号、放大信号，与梯形信号（右图）。

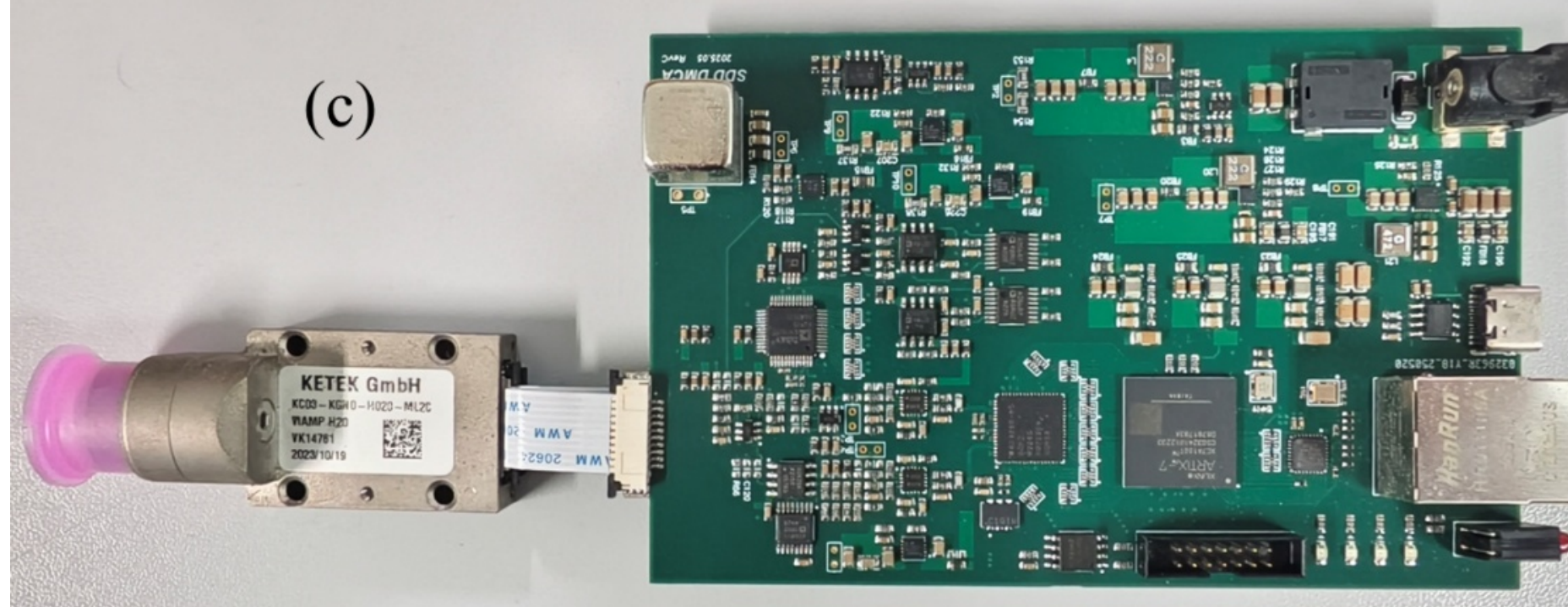
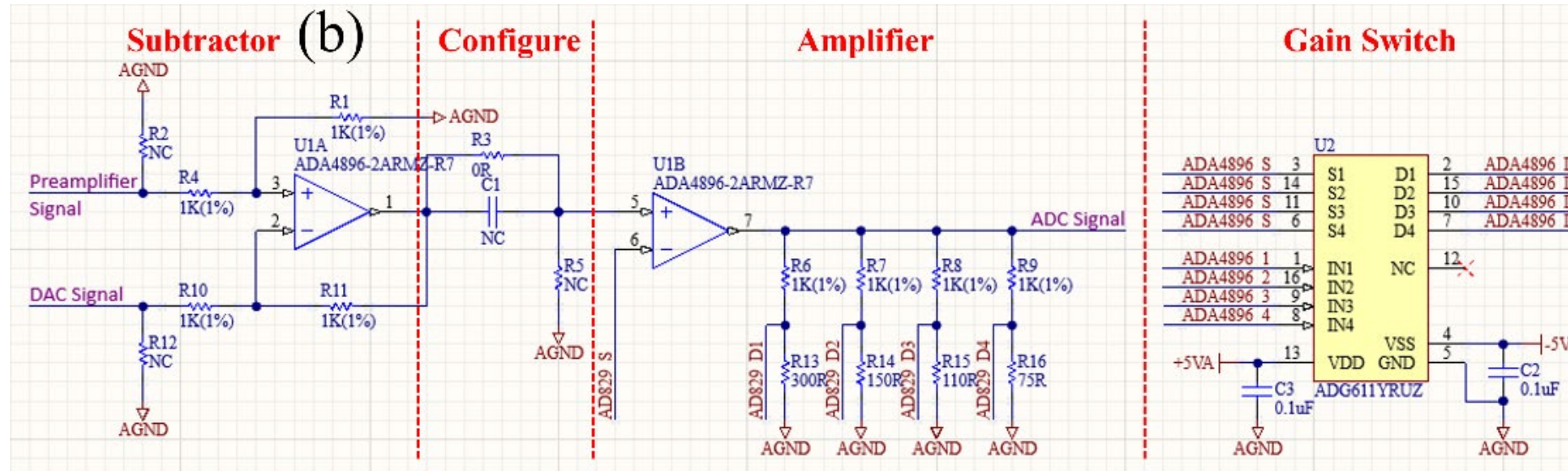
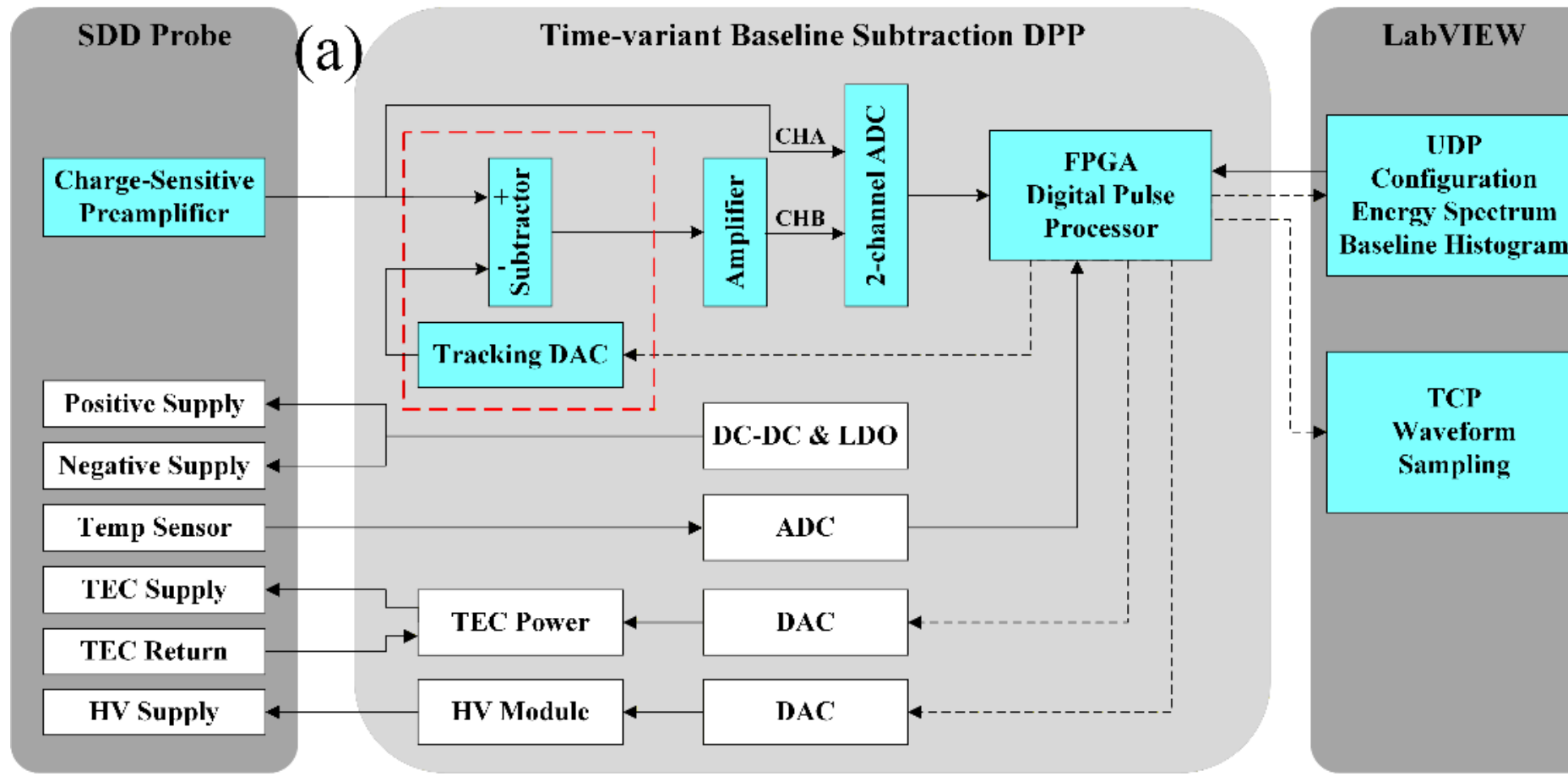


图8 (a) 时变基线扣除DPP系统框图；(b) 减法器与放大电路原理图；(c) 探测器与DPP电路板实物图

研究结果与对比

对比实验条件

- PID算法控制SDD工作温度恒定-45℃；偏压-168V；
- KETEK VIAMP-KC 3.0 H20探头，前放增益5mV/keV；
- KETEK AXAS-D-H20探测器，内置XIA斜坡减法DPP；
- DPP三种配置：微分电路、时变基线扣除、直接采样；
- 除了直接采样外，放大电路均实现40keV的动态范围；
- ICR通过非瘫痪系统模型矫正：

$$ICR_m = TrigCnt / AccumTime$$

$$ICR_t = ICR_m / (1 - ICR_m \cdot \tau_{df})$$

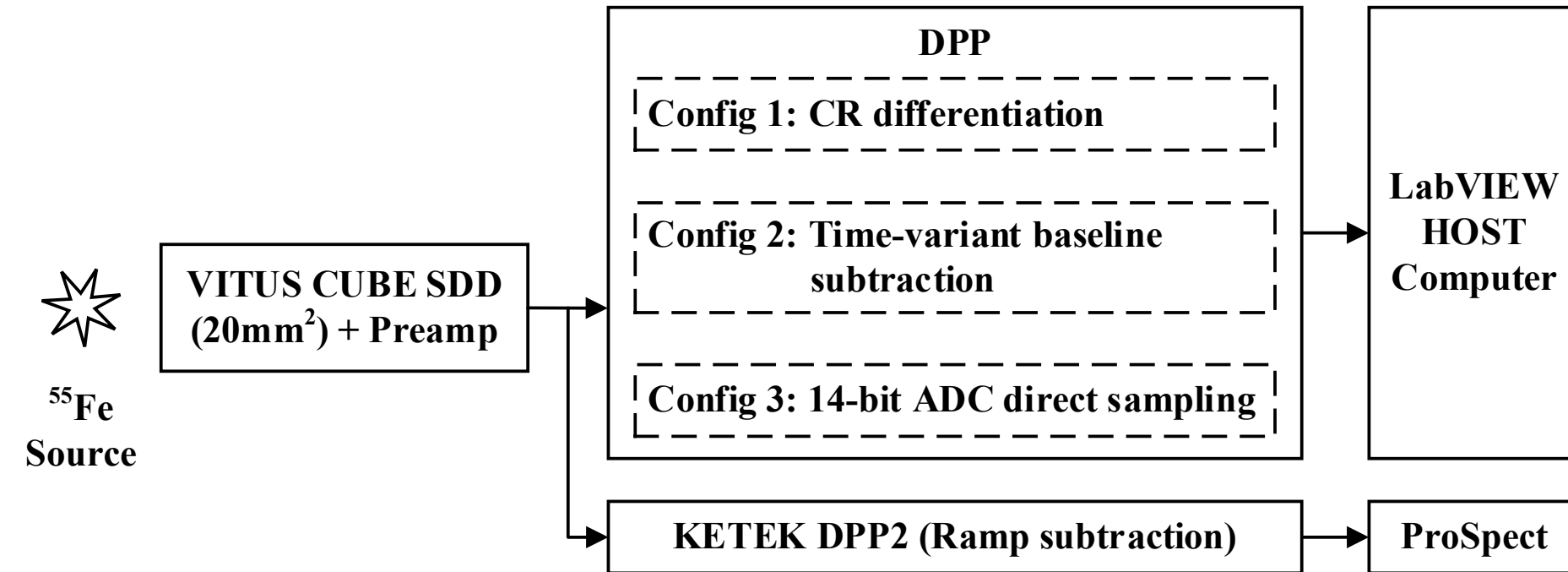


图9 四种DPP性能对比实验方案框图

对比实验结果

- CR微分DPP的分辨率随ICR升高而急剧恶化；
- CR微分DPP的基线直方图随ICR升高而偏离准高斯。

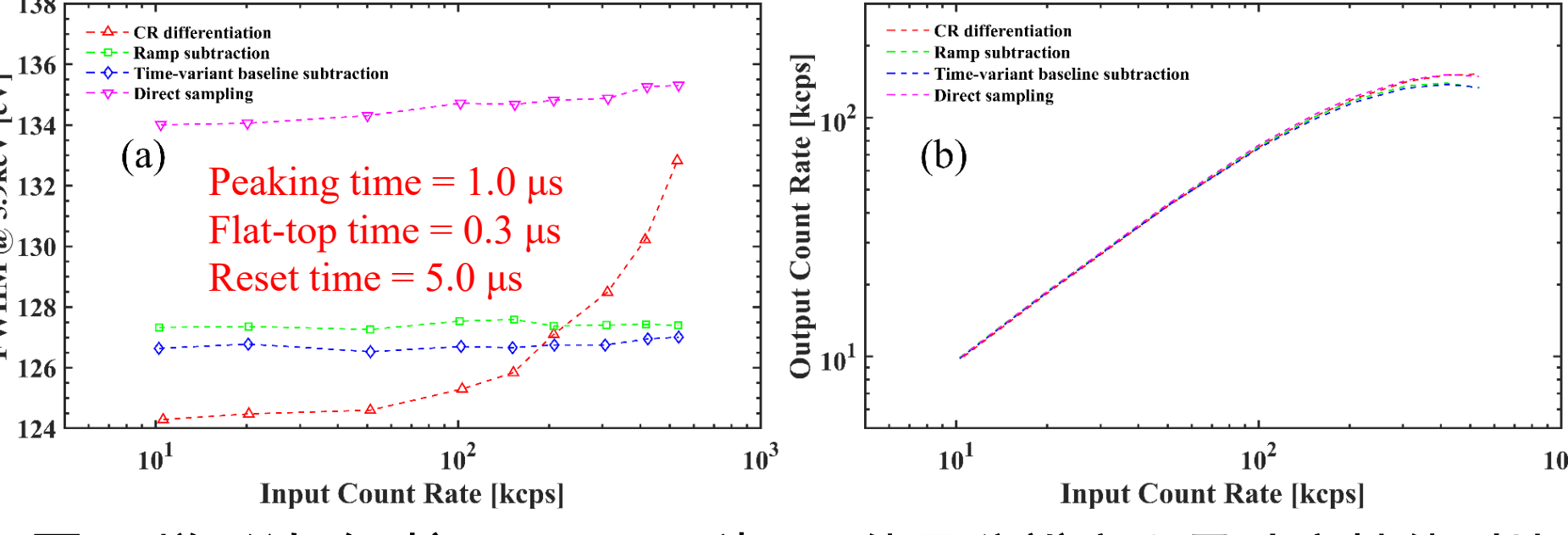


图10 梯形达峰时间1.0μs下四种DPP能量分辨率和吞吐率性能对比

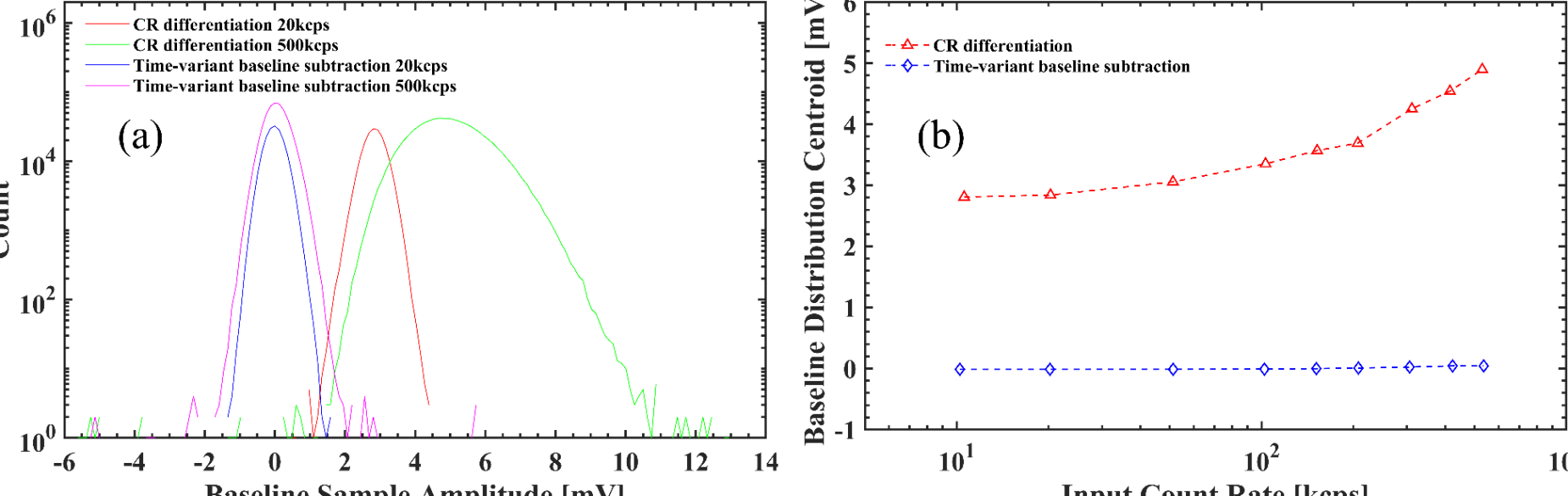


图11 CR微分与时变基线扣除DPP的基线直方图与基线质心对比

- 时变基线扣除DPP的分辨率随ICR升高而保持稳定；吞吐率与达峰时间相关，两项性能均与XIA相近。

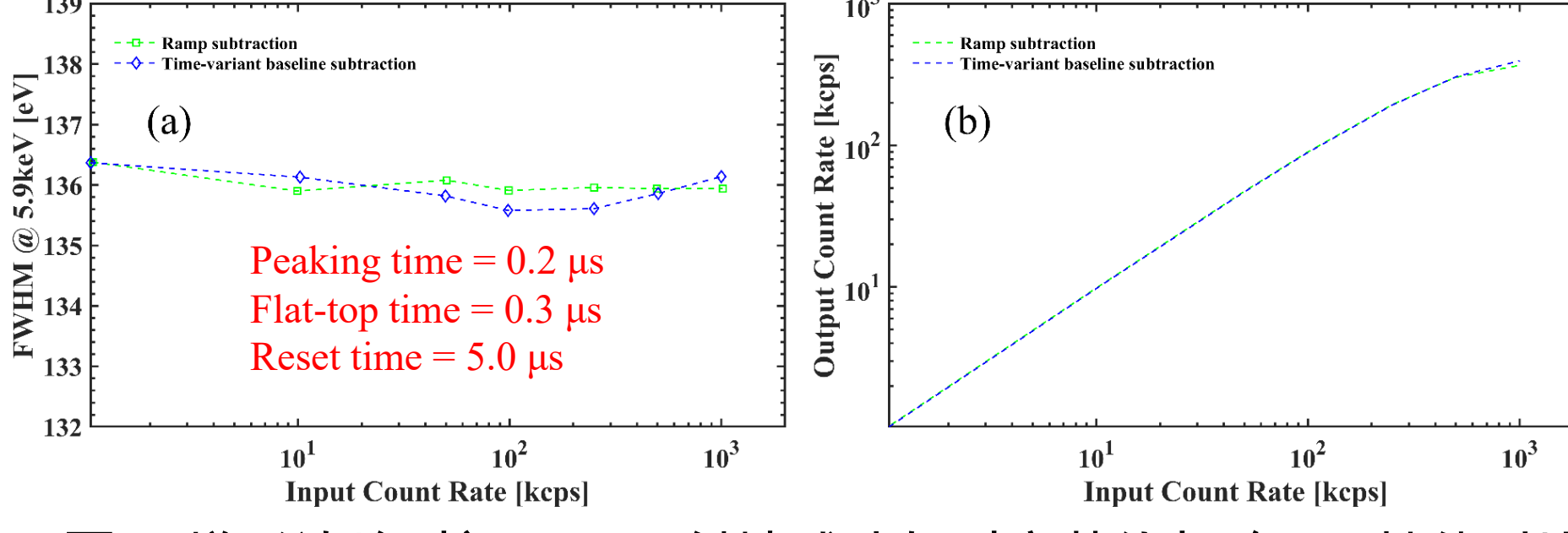


图12 梯形达峰时间0.2μs下斜坡减法与时变基线扣除DPP性能对比

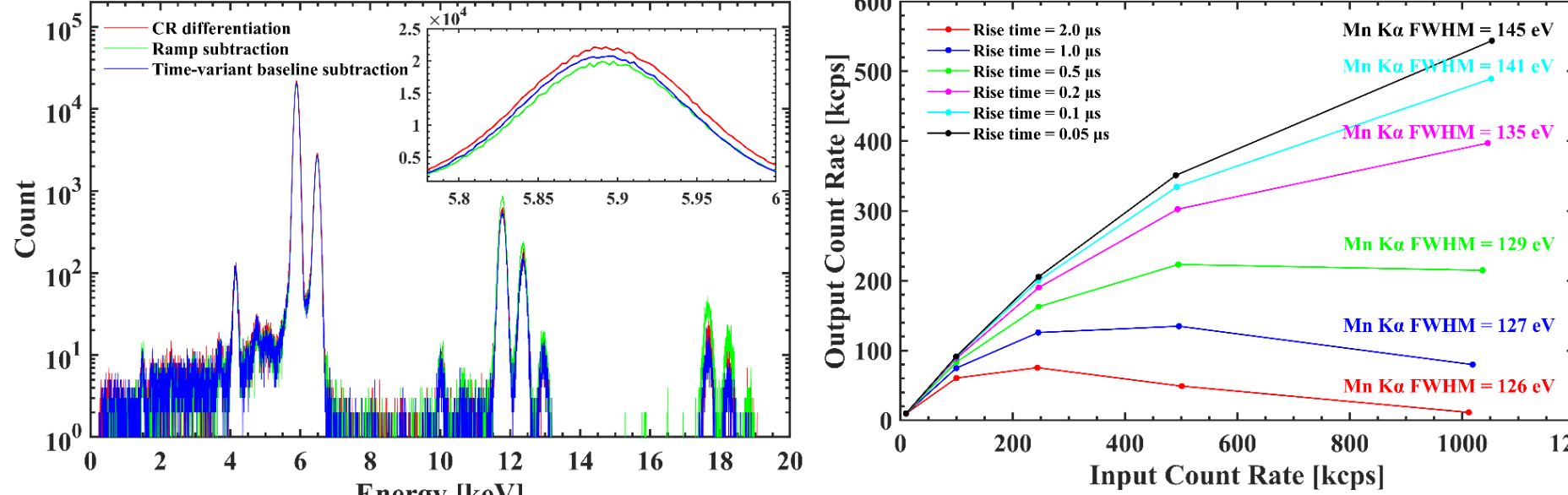


图13 ⁵⁵Fe典型能谱对比；不同达峰时间下时变基线扣除DPP吞吐率

结论与展望

- 本文开发了一种时变基线扣除DPP，通过DAC动态跟踪电荷灵敏前放输出，利用减法器提取入射粒子脉冲，从而无需交流耦合电容，避免了电容的非理想特性导致的信号畸变。在相同有效位数ADC采样下，与CR微分、斜坡减法和直接采样方法进行了实验对比，结果表明，所开发的DPP展现出优异的能量分辨率稳定性，在-45℃工作温度下，10到500kcps的ICR范围内，对5.89 keV X射线保持126.7±0.3 eV的分辨率。
- 基于最大似然估计的实时堆积脉冲解码算法正在开展研究，在保证分辨率的前提下，突破线性滤波吞吐率理论上限。

文章原文

J. He et al., "A Digital Pulse Processor With Stable Energy Resolution at High Count Rates Using Time-Variant Baseline Subtraction," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 73, no. 5, pp. 2067-2077, May 2026.