



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

基于SCA的SiPM波形数字化 原型ASIC设计

秦家军 赵雷

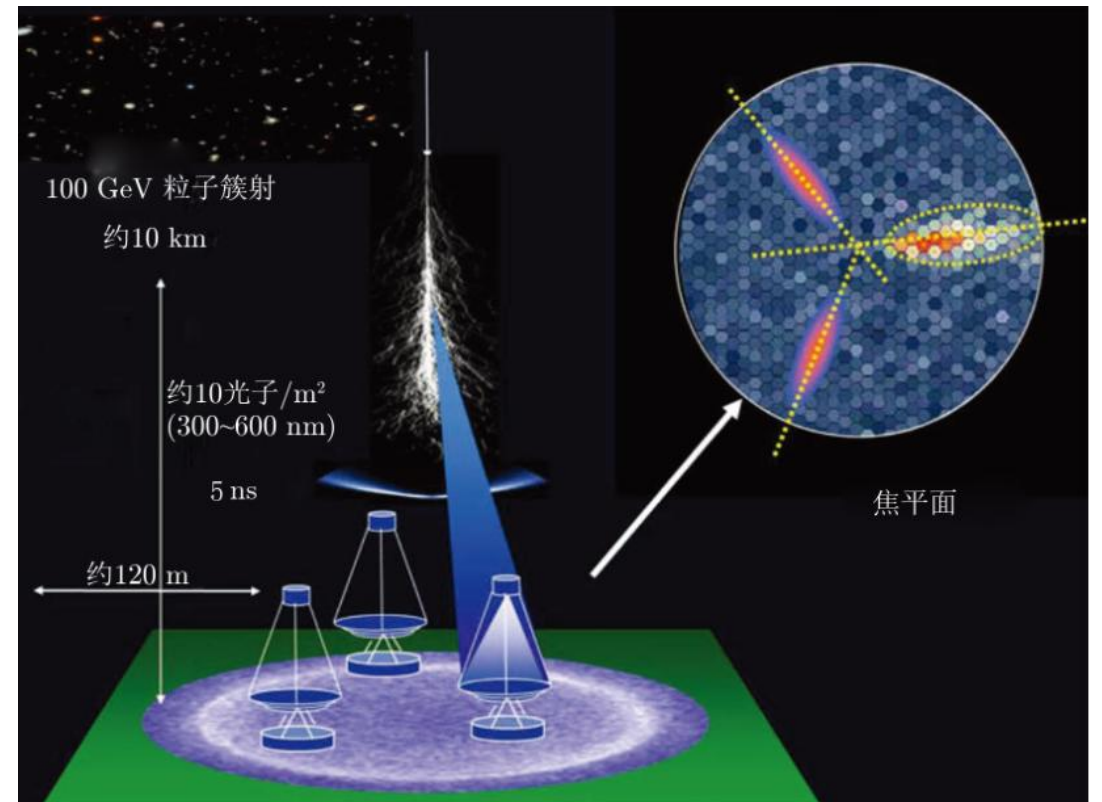
中国科学技术大学 近代物理系
第六届半导体辐射探测器研讨会
2026年4月17日 上海

目录

- ❖ 研究背景
- ❖ 原型ASIC芯片设计
- ❖ 性能测试
- ❖ 总结

成像大气切伦科夫望远镜

- ❖ 伽马宇宙射线探测
- ❖ 成像大气切伦科夫望远镜 (IACT)
- ❖ 光电器件
 - 光电倍增管 (PMT)
 - 增益高、性能稳定
 - 强光下损坏、尺寸大
 - VERITAS、MAGIC、H.E.S.S.
 - 硅光电倍增管 (SiPM)
 - 工作电压小、磁场不敏感、月光下可探测
 - 体积小、量产价格低
 - LHAASO WFCTA



天文学进展, 2021, 39(3): 350-376

IACT中SiPM读出

❖ 分立器件前端+FADC

- 信号脉宽大

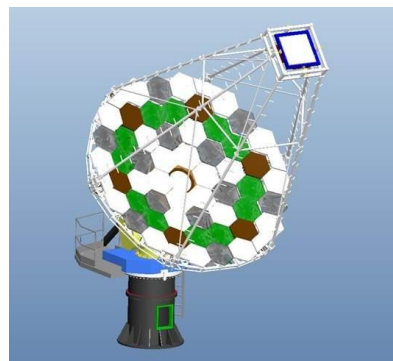
- 大面积SiPM寄生电容大
- 前端电子学与SiPM之间的寄生等

- 功耗高

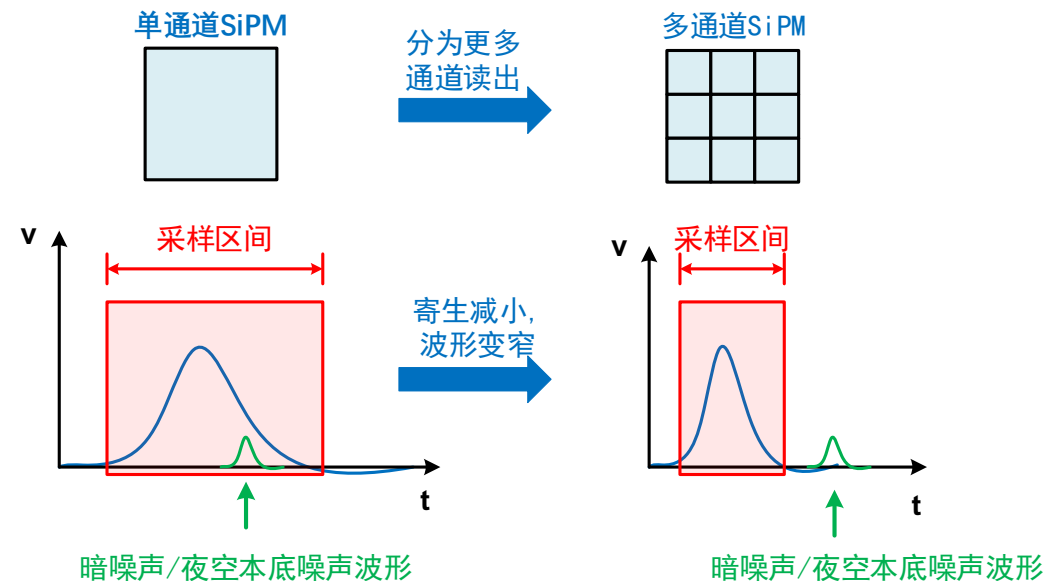
❖ 分量程多通道覆盖大动态范围



LHAASO WFCTA探测模块

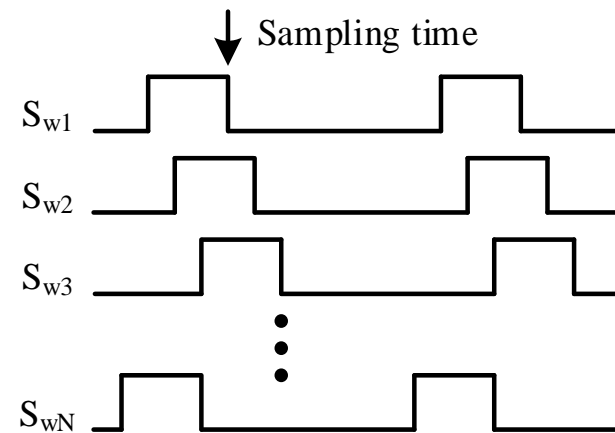
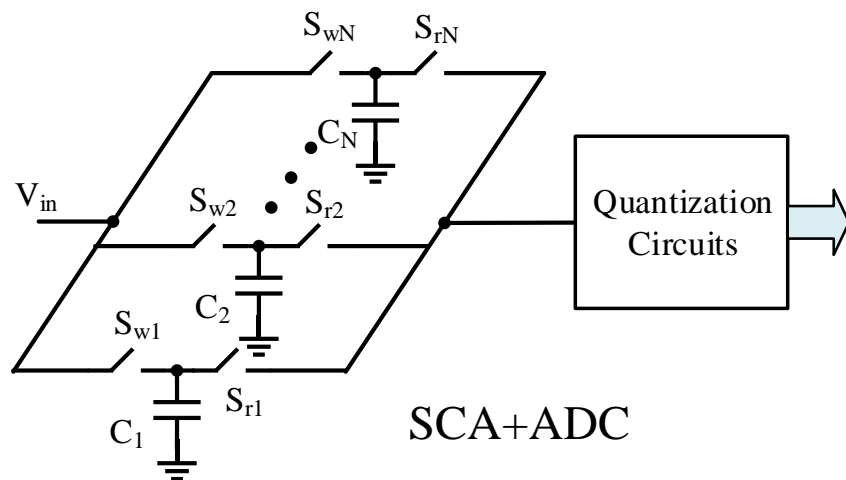


LACT



需要研究多通道集成、大动态范围、可在前端实现高速波形数字化的SiPM读出电子学

开关电容阵列



- ❖ 基本思路：高速模拟采样配合较低速率的量化
 - 解决了高速采样和低功耗之间的矛盾
 - 功耗低、低成本、易于多通道集成
 - 系统复杂度较低
- ❖ 此技术适用于事例偶发的核与粒子物理实验
- ❖ 需要在采样率和采样深度之间进行折中

目录

❖ 研究背景

❖ 原型ASIC芯片设计

❖ 性能测试

❖ 总结

方案设计

- SiPM像素数量多，输出信号**动态范围**大



- 双增益通道

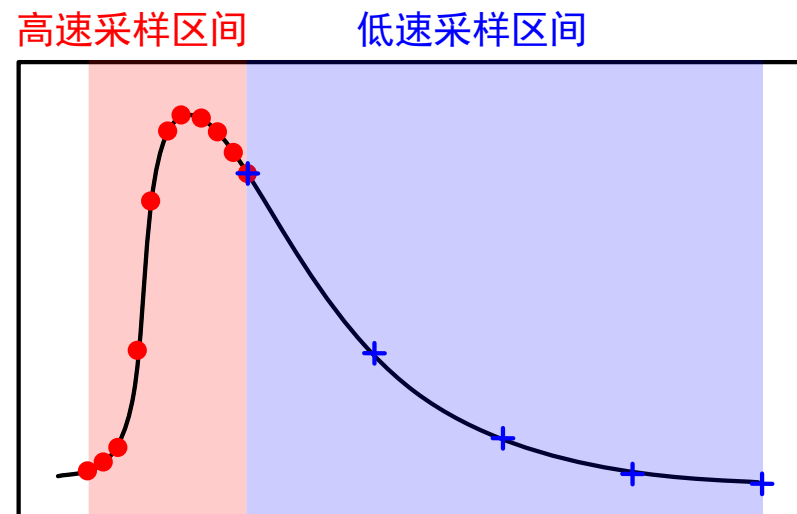
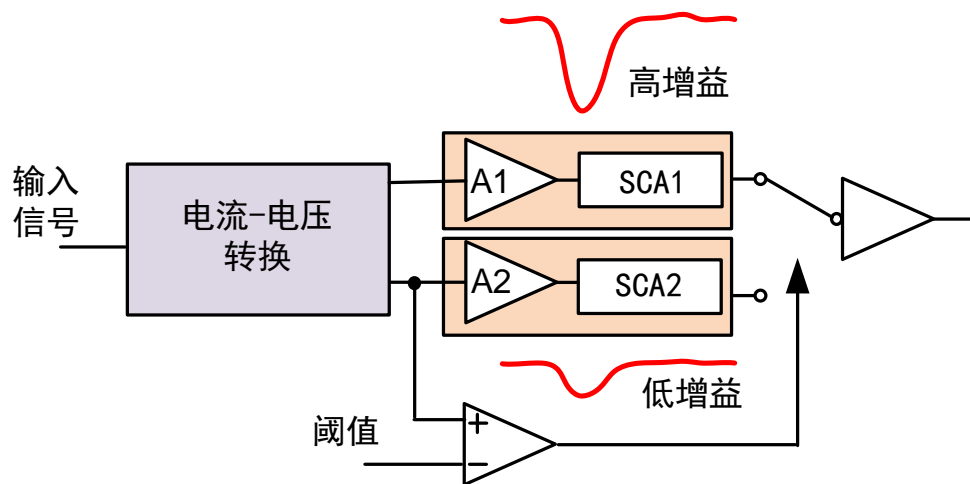
- SiPM波形特征为前沿快、后沿慢

- 低速采样，会损失波形前沿信息

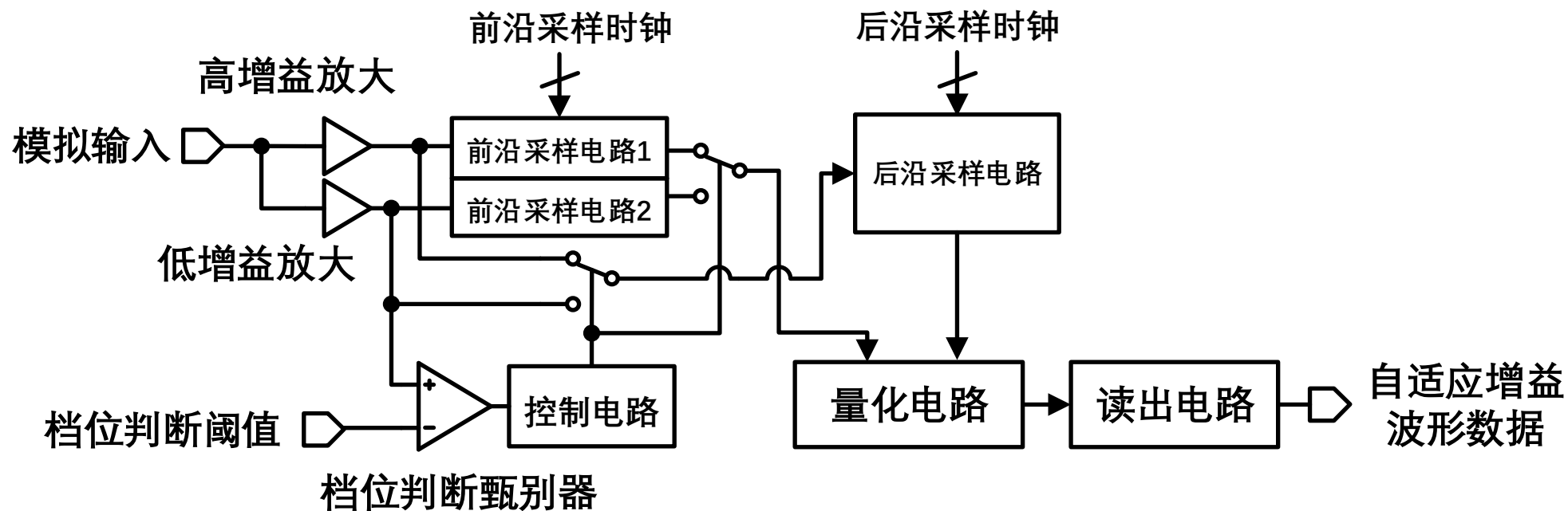
- 高速采样，为了覆盖完整波形需增加采样深度，增加面积和功耗



- 双频率采样



方案设计



- 前沿采样电路：分为两部分，对双增益波形的前沿进行采样
 - 双增益采样单元可以进一步合并，只需要两个独立的采样-保持电路，而驱动、读出电路共用
- 后沿采样电路：只对增益选择之后的波形后沿进行采样

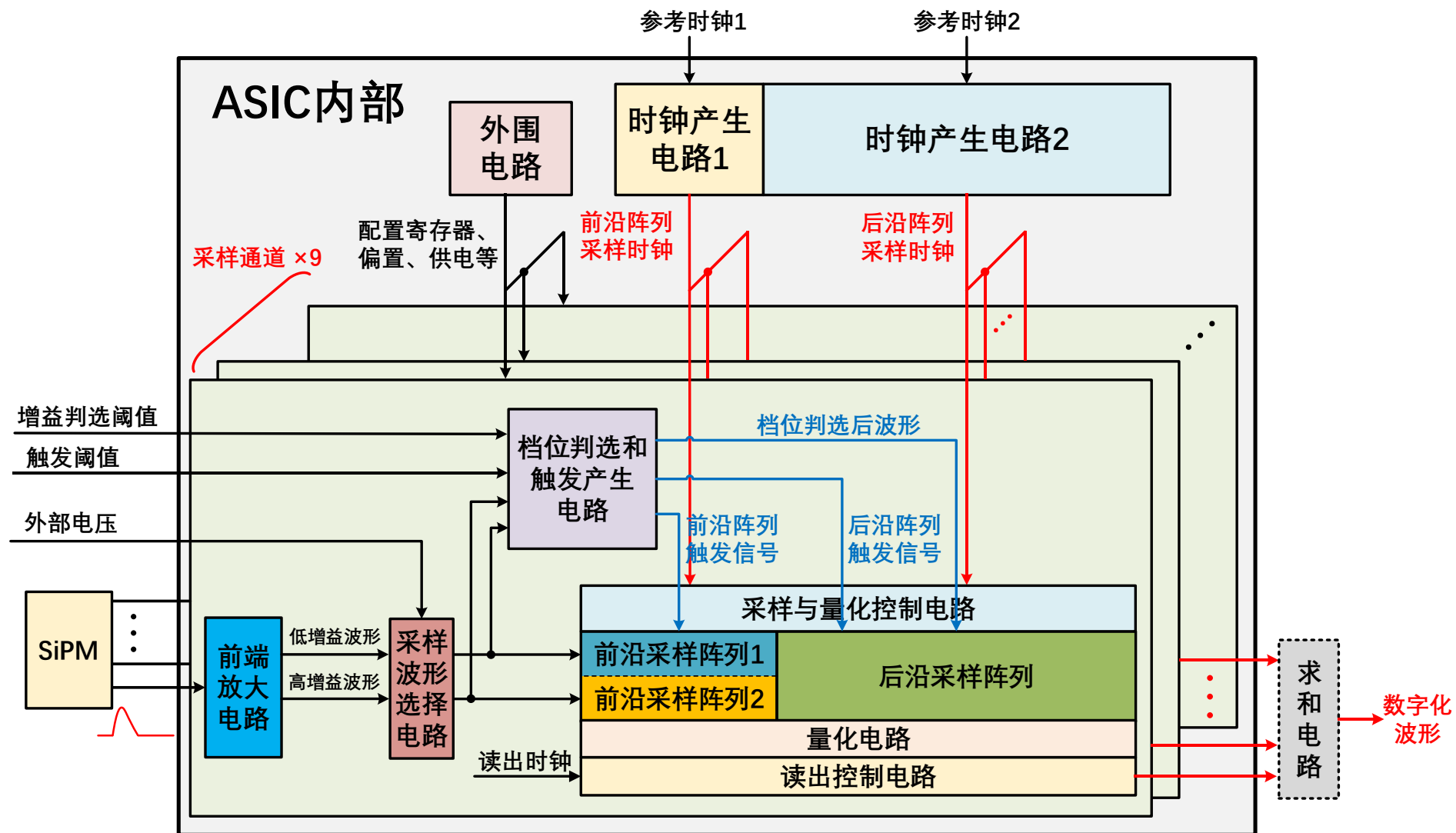
芯片整体结构

❖ 采样率

- 前沿阵列2 Gsps
- 后沿阵列1 Gsps

❖ 采样深度

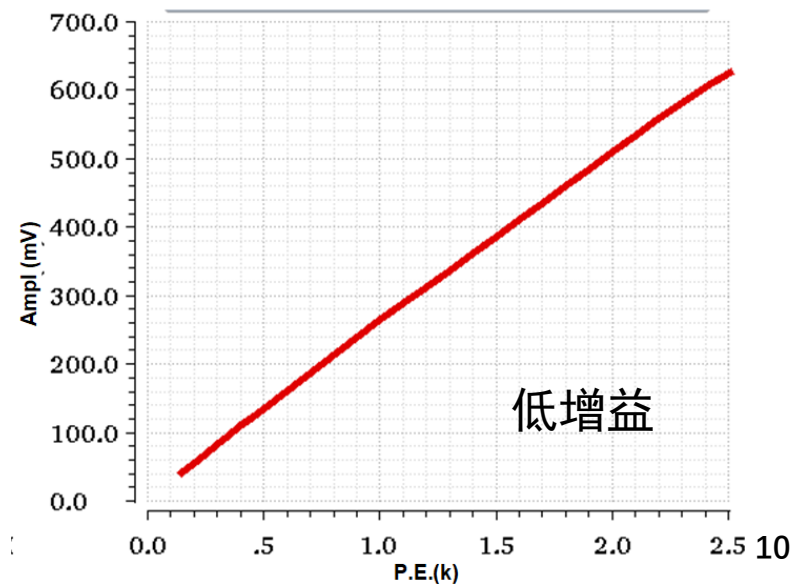
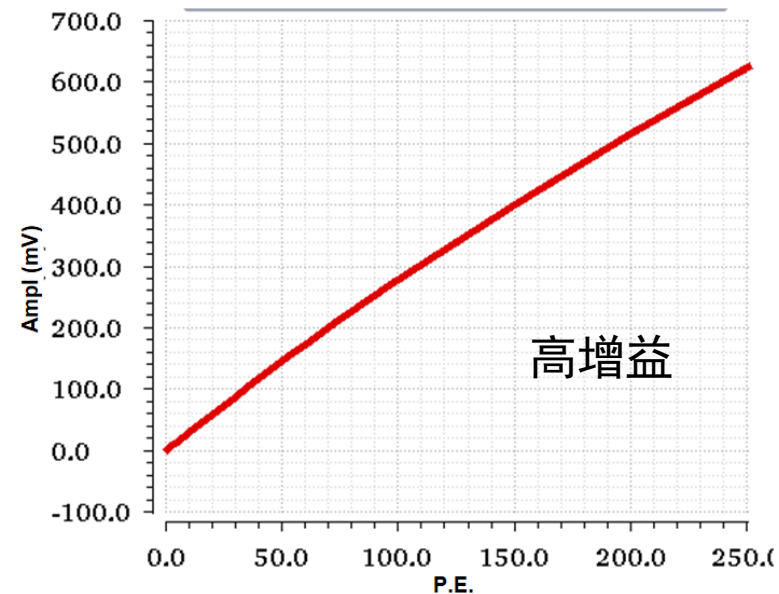
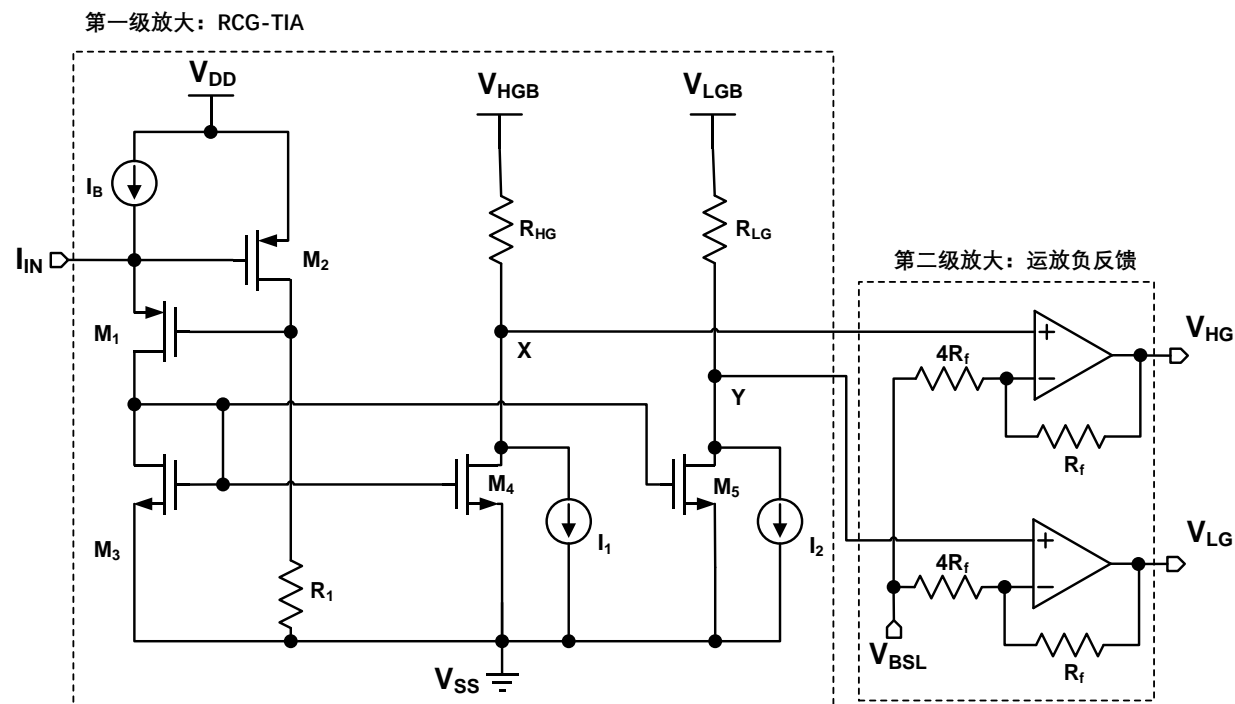
- 前沿阵列16
- 后沿阵列128



前端放大电路

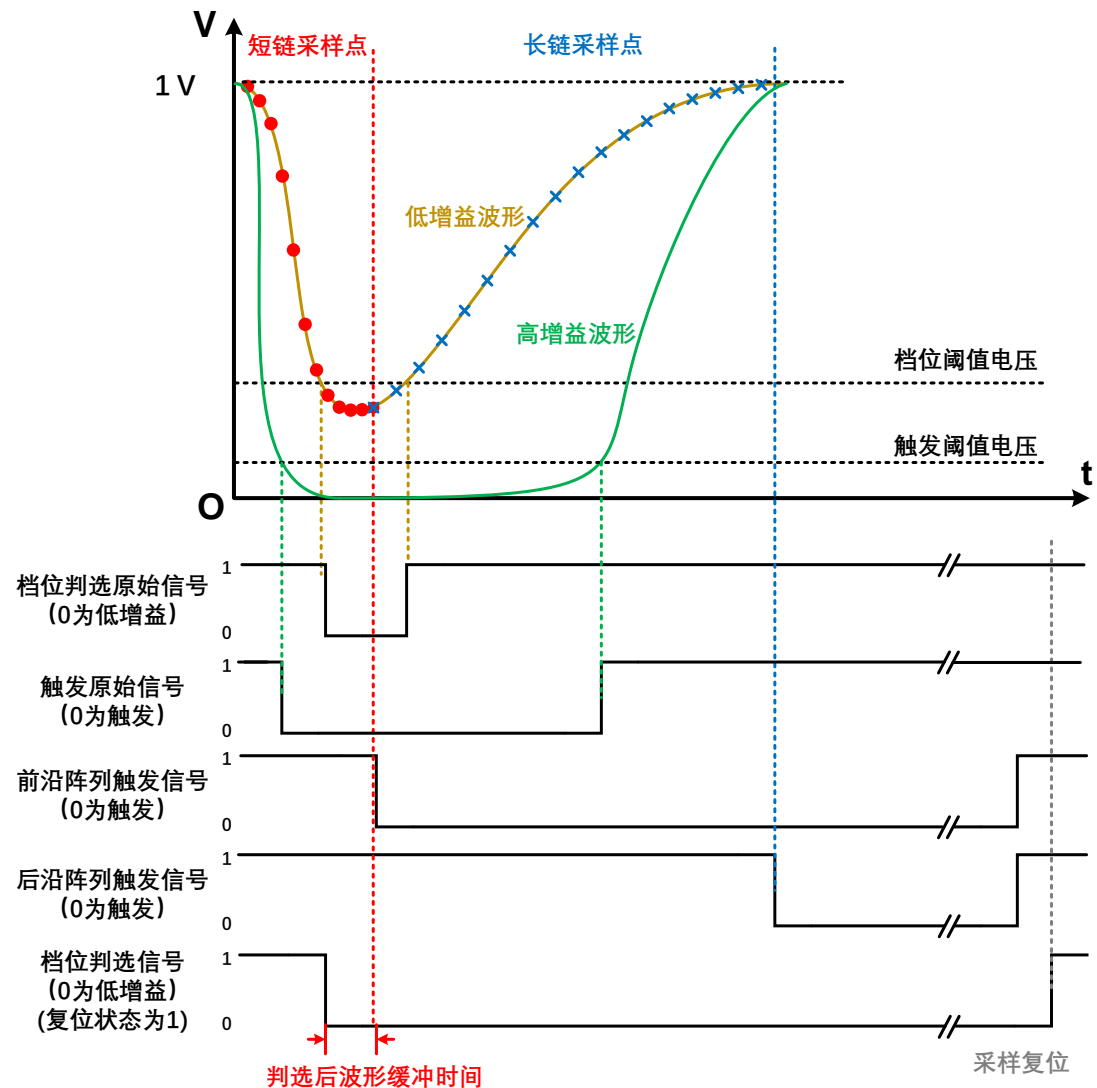
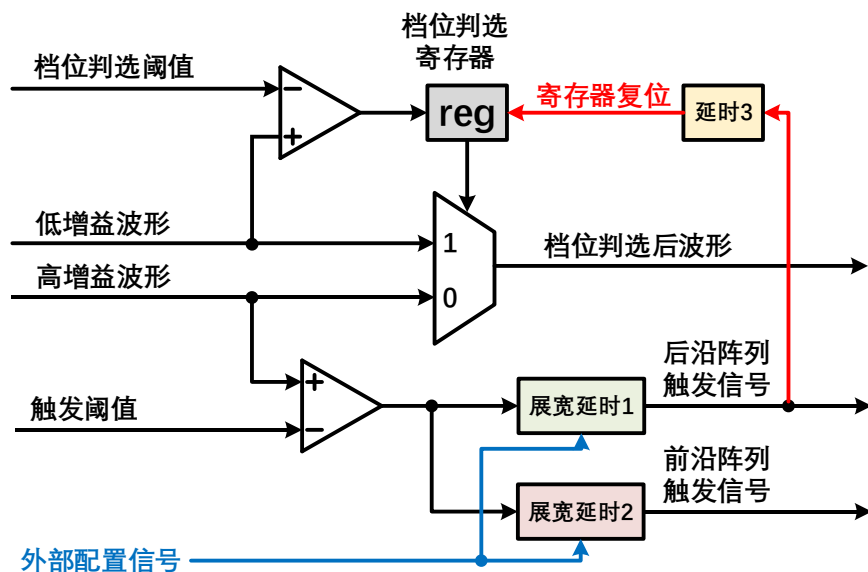
• ASIC前端放大电路结构

- 第一级：调节型共源共栅(RGC)-TIA结构、双增益
- 第二级：运放负反馈，驱动及继续放大



采样时序控制

- 增益判选信号
 - 低增益波形甄别
 - 在前沿结束前已经得到，直到本次读出结束复位
- 采样控制信号
 - 高增益波形甄别
 - 延时展宽两次，分别作为前沿、后沿采样停止信号



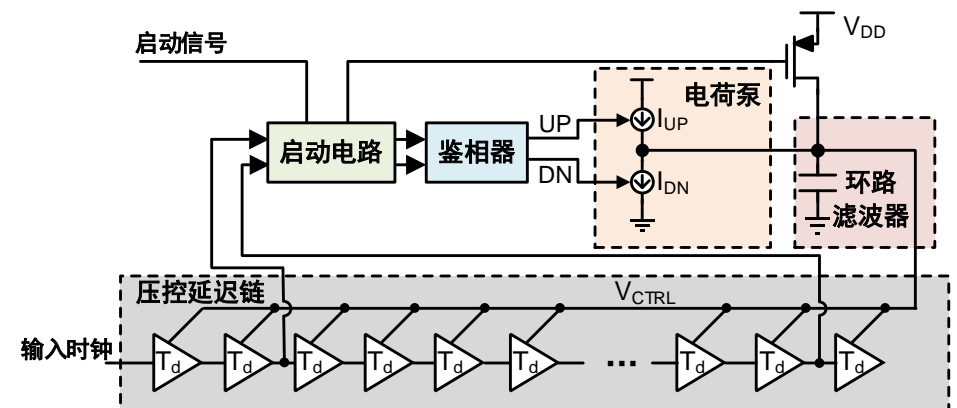
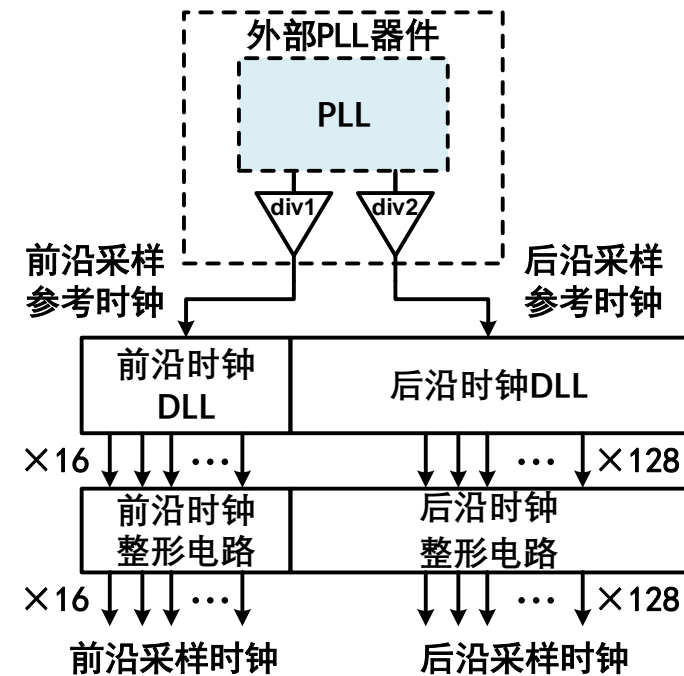
采样时钟产生电路

❖ 双采样时钟电路

- PLL产生两个相位对齐、频率不同的参考时钟
- 两个DLL电路分别延时形成两组采样时钟，采样率不同

❖ DLL电路

- 启动电路
- 鉴相器
- 电荷泵
- 环路滤波器
- 延时单元
 - 前沿采样链延时0.5 ns
 - 后沿采样链延时1 ns



目录

❖ 研究背景

❖ 原型ASIC芯片设计

❖ 性能测试

❖ 总结

测试内容与测试平台

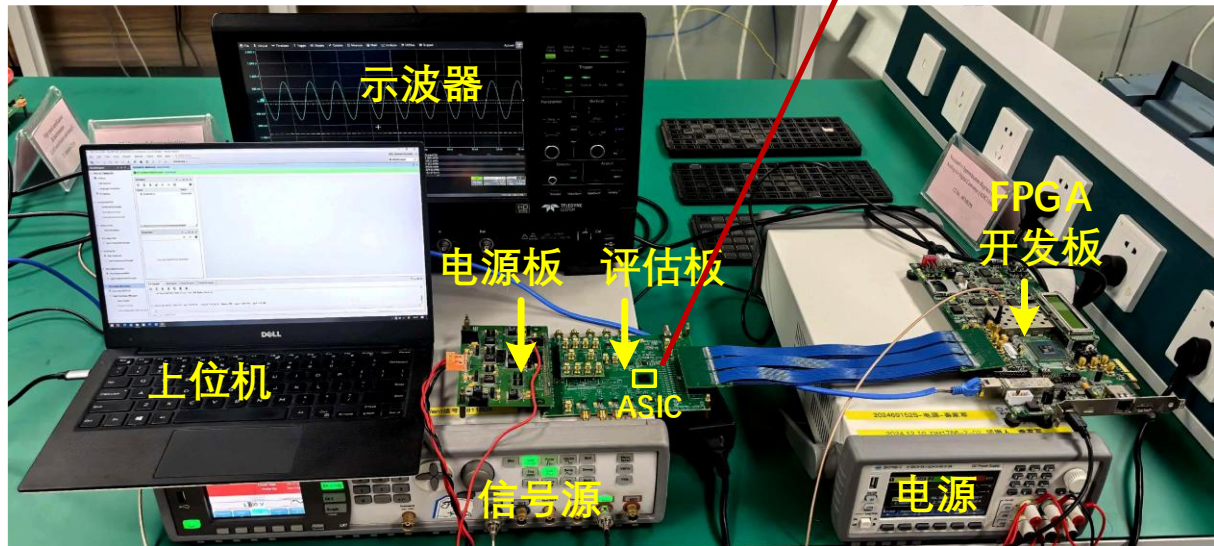
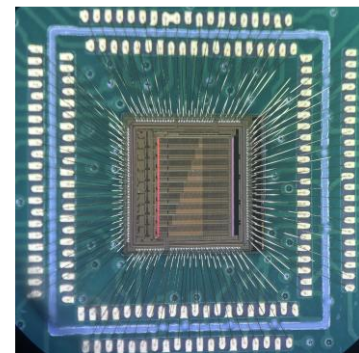
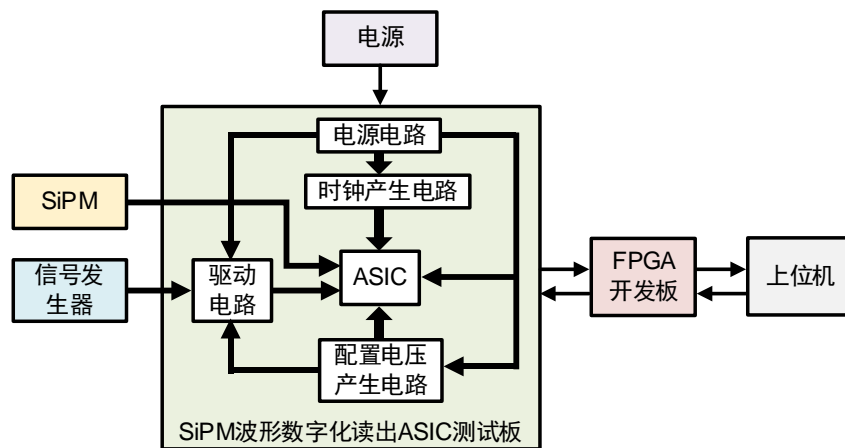
❖ 静态性能测试

- 直流刻度
- 采样间隔刻度

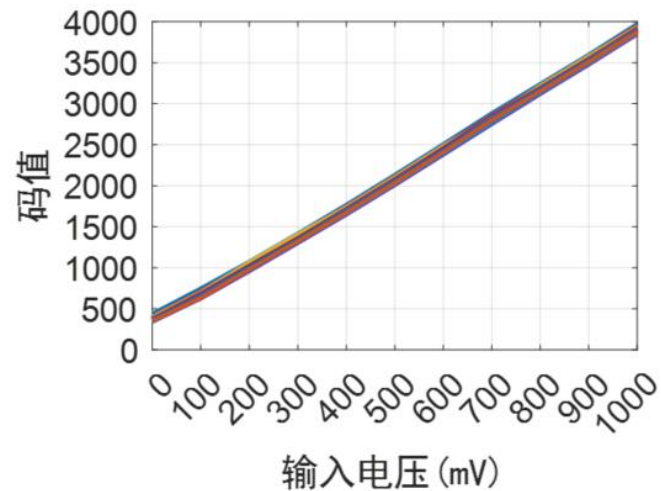
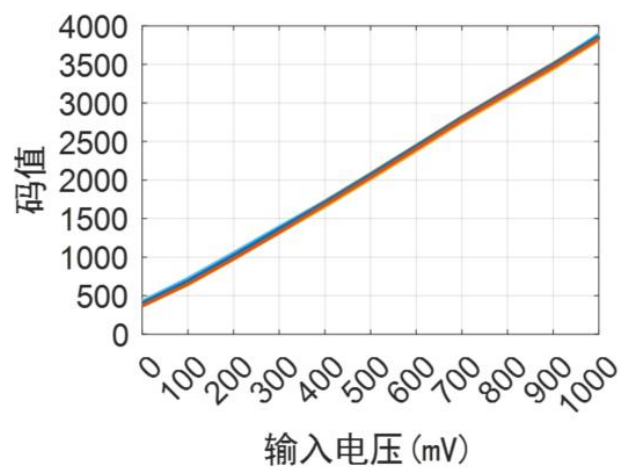
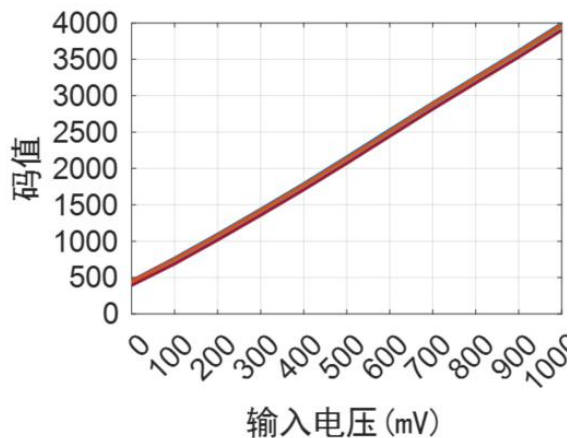
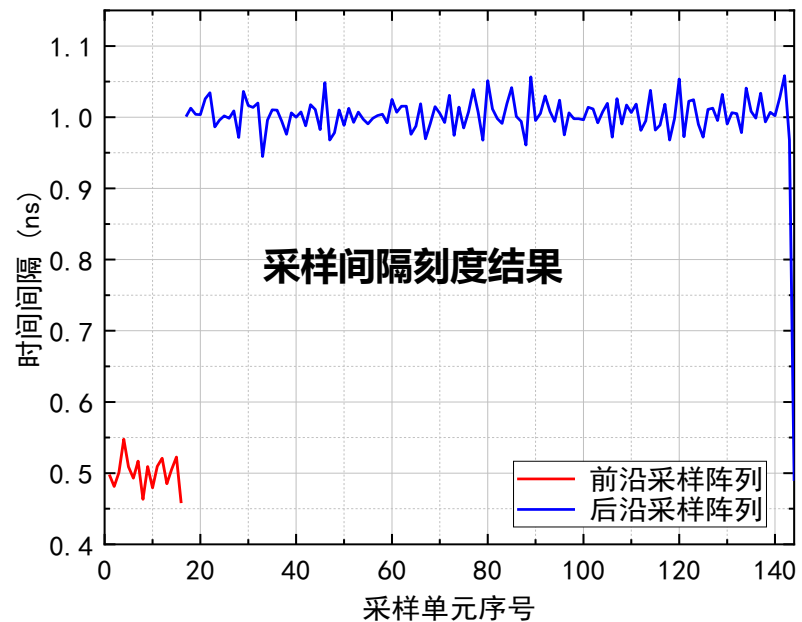
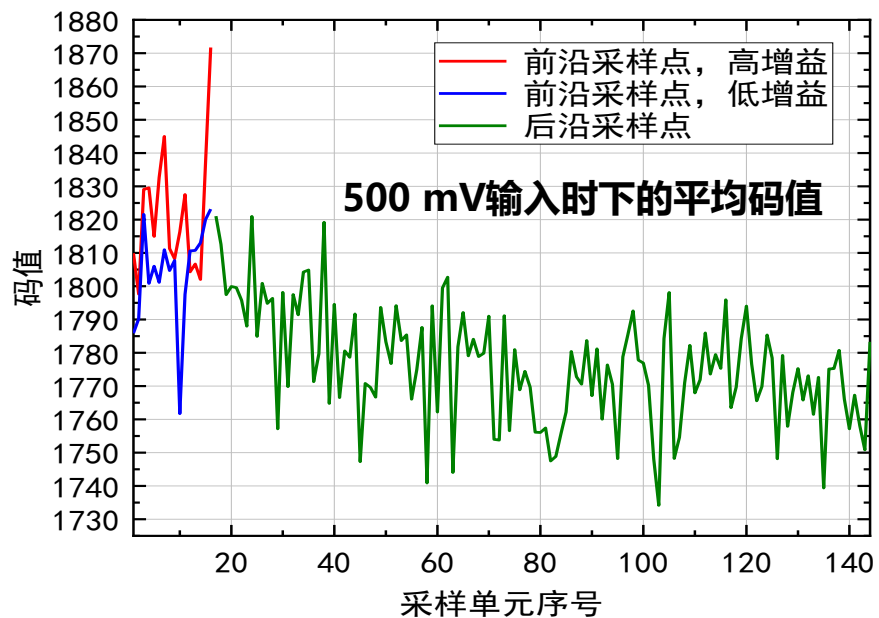
❖ 瞬态波形采样

❖ 电子学精度测试

❖ 与SiPM初步联测

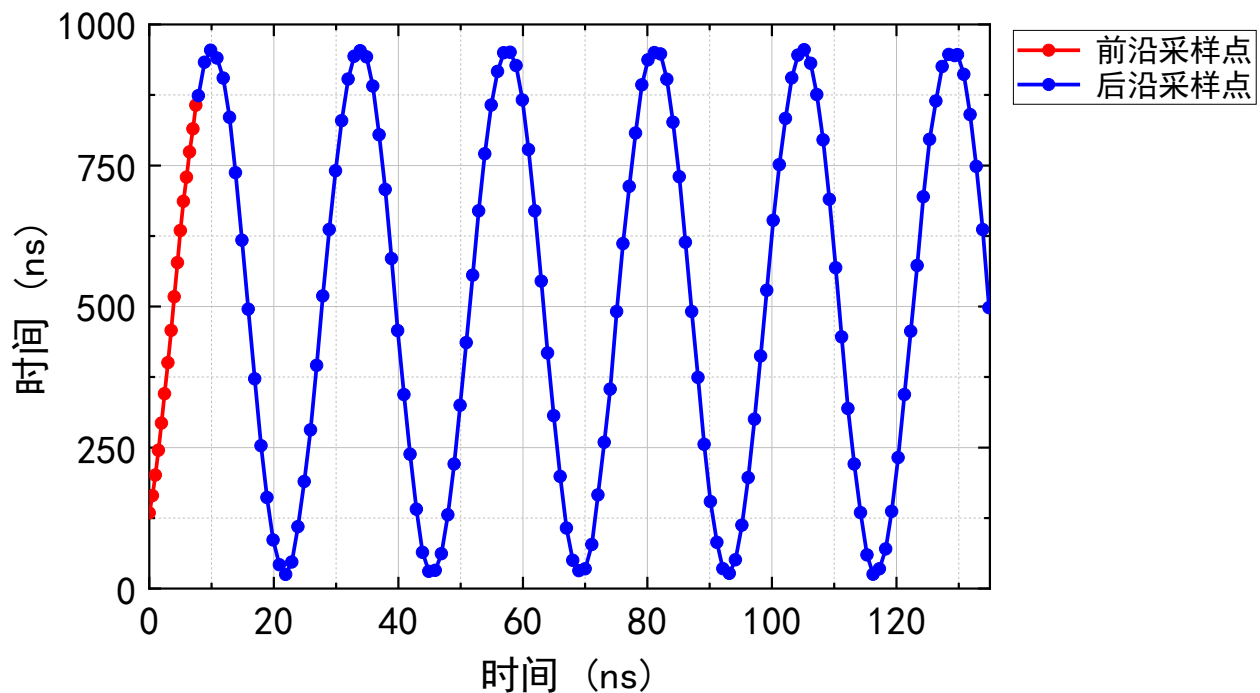


静态性能

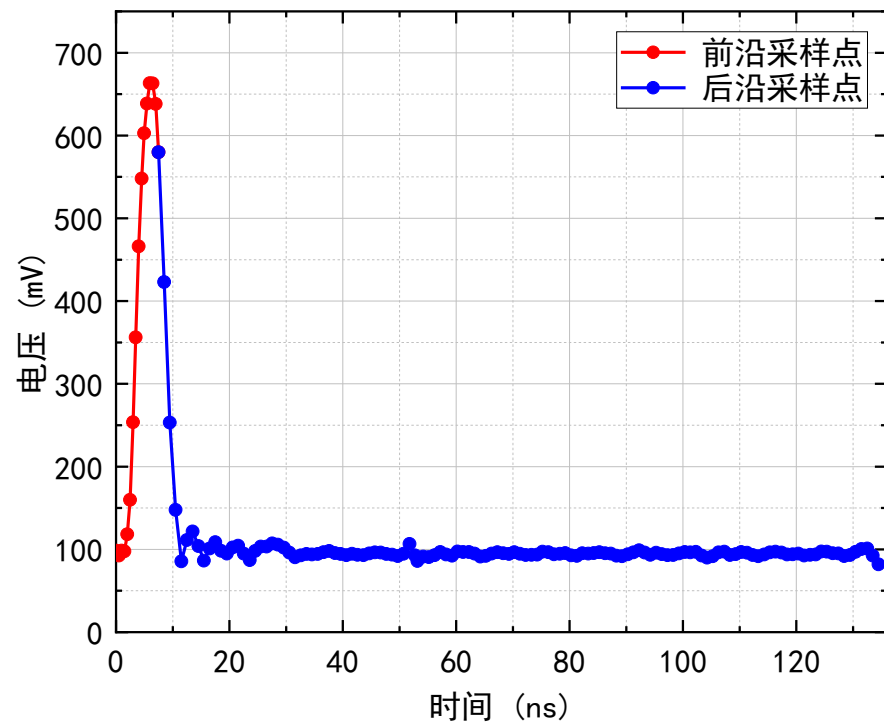


瞬态波形采样

❖ 正弦波形采样：42 MHz、0.5 Vdc、1 Vpp

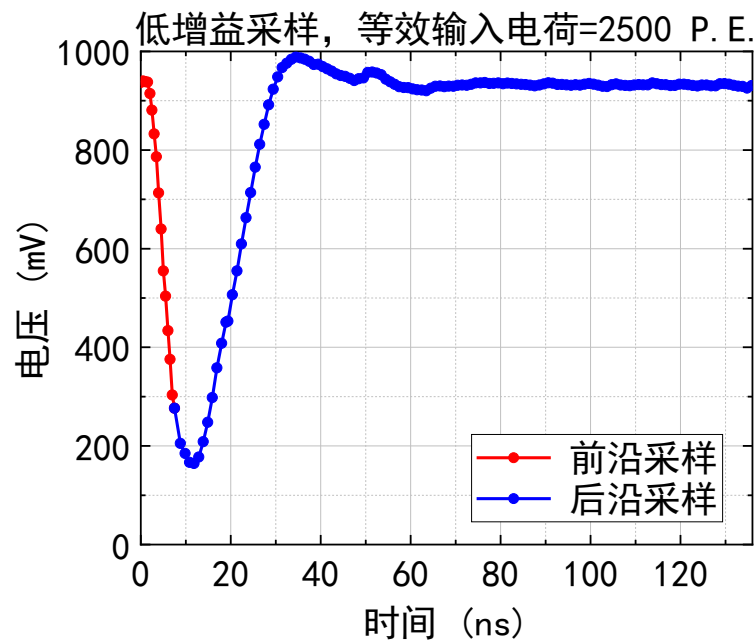
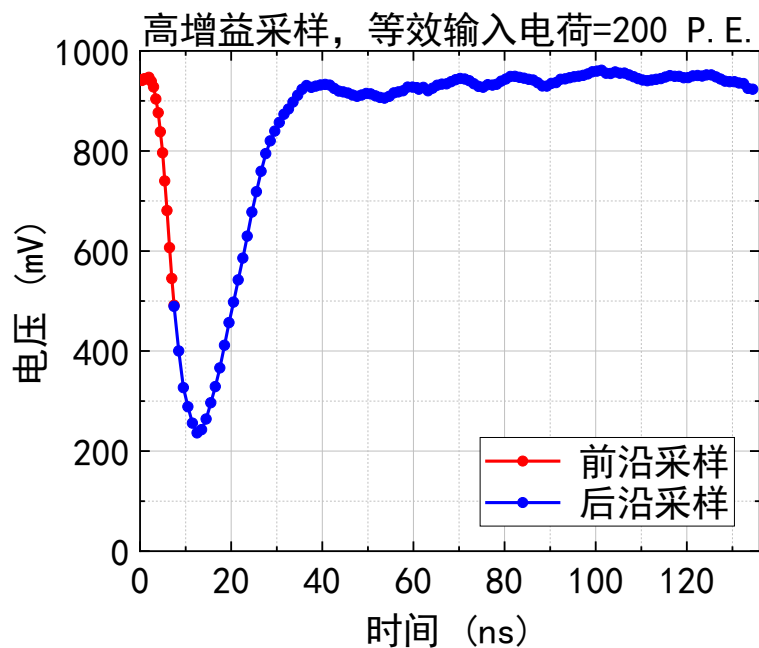
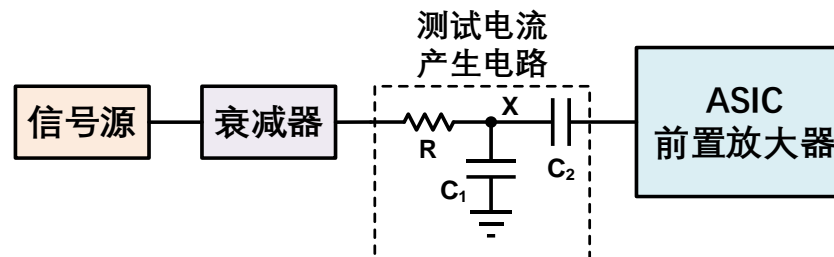


❖ 脉冲波形采样：前沿宽度3 ns、后沿宽度3 ns、全宽5 ns、基线100 mV、幅度500 mV



瞬态波形采样

- ❖ 使用测试电流产生电路产生测试电流信号、扫描输入幅度
- ❖ 大信号、小信号测试波形



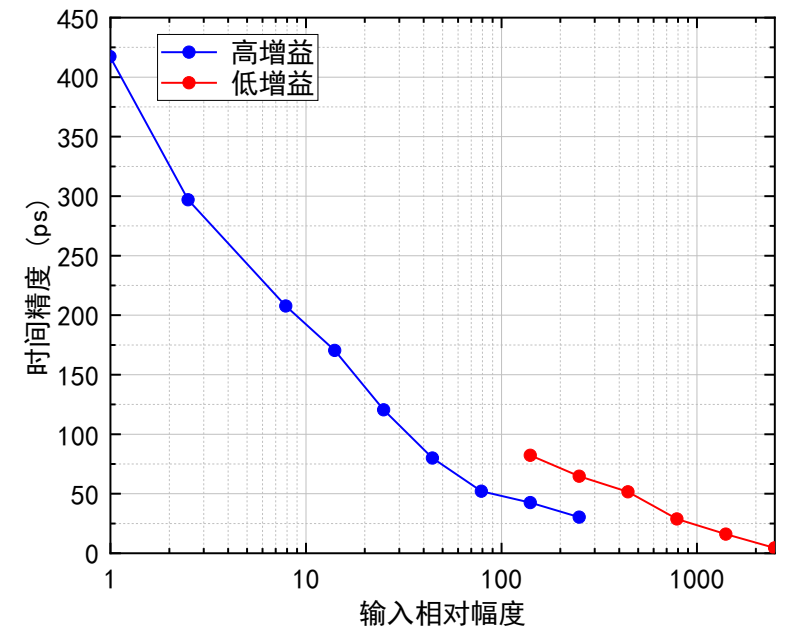
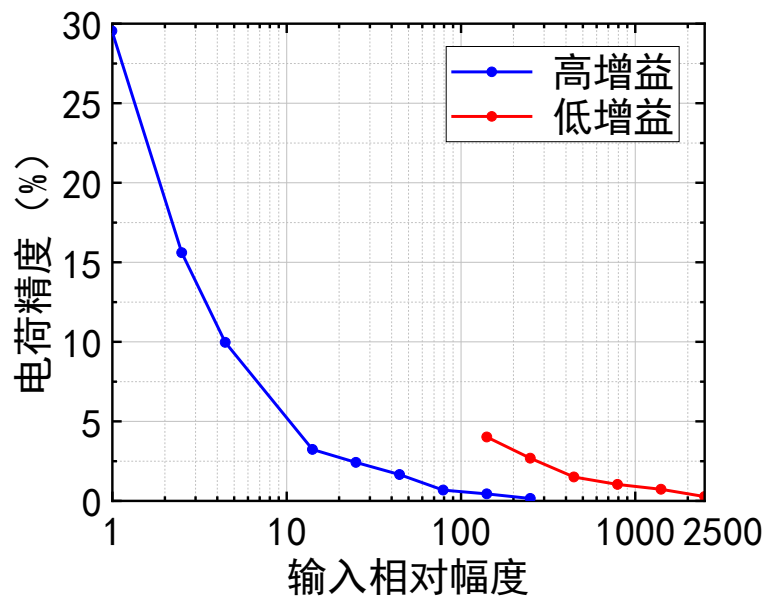
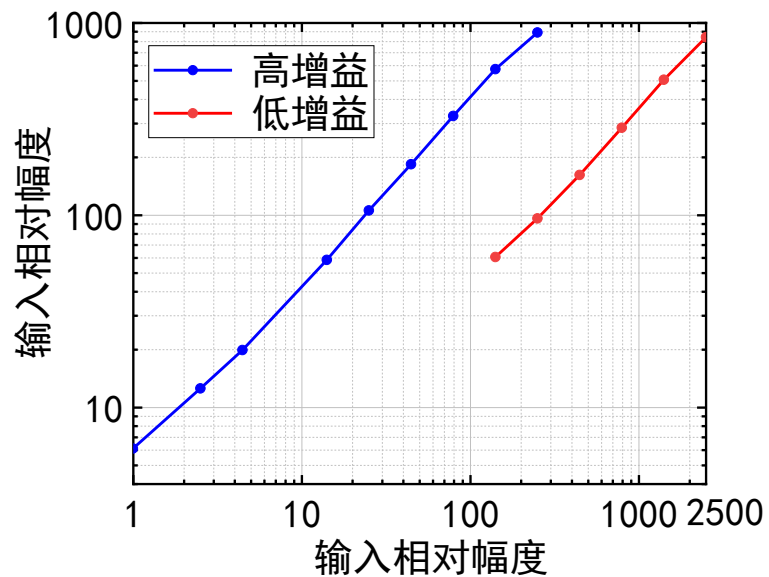
电子学精度测试

❖ 改变衰减器系数，扫描输入范围，重复1000次，对采样波形计算：

➤ 输入动态范围

➤ 输入电荷精度

➤ 前沿定时精度（恒比定时）

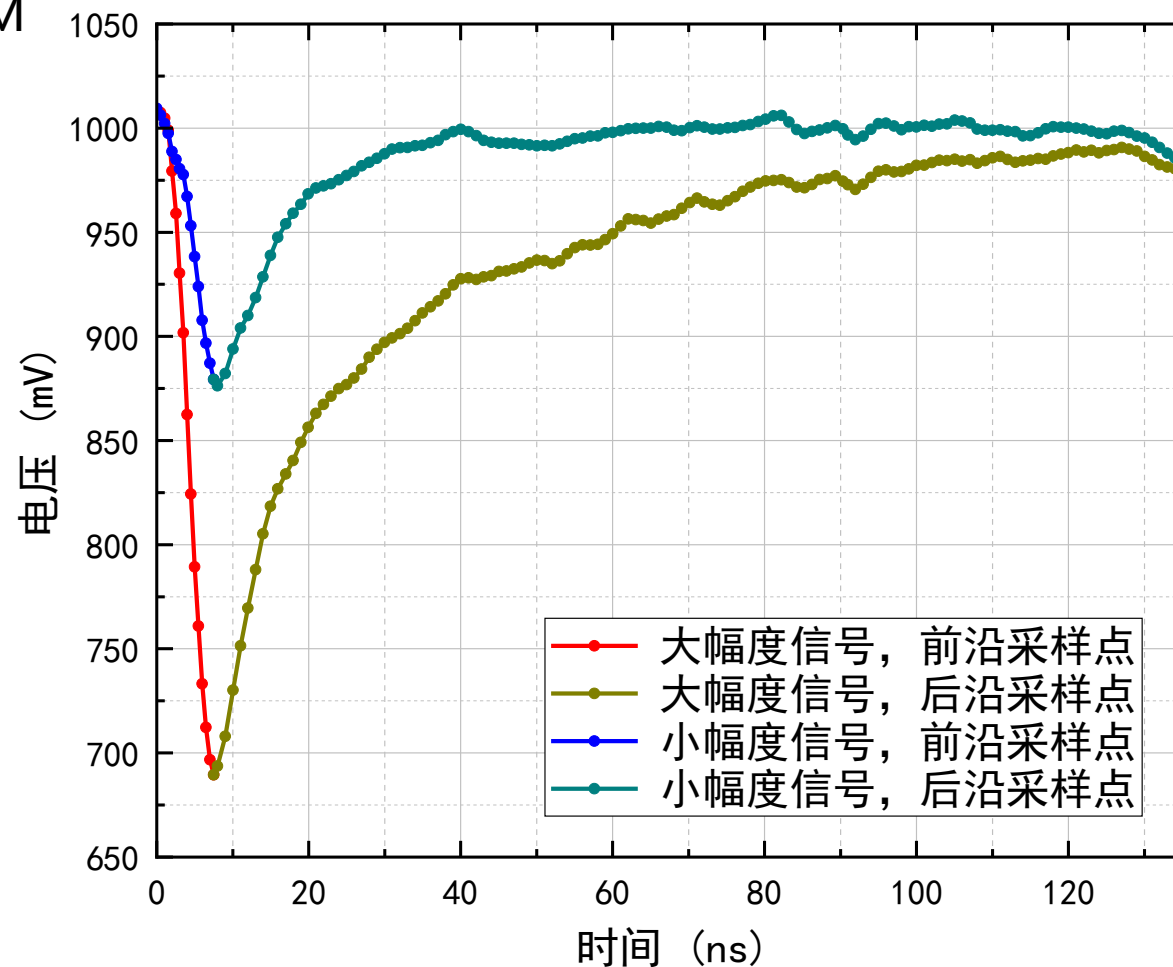


联合SiPM初步测试

❖ SiPM联合测试

- 使用信号源控制LED照射SiPM

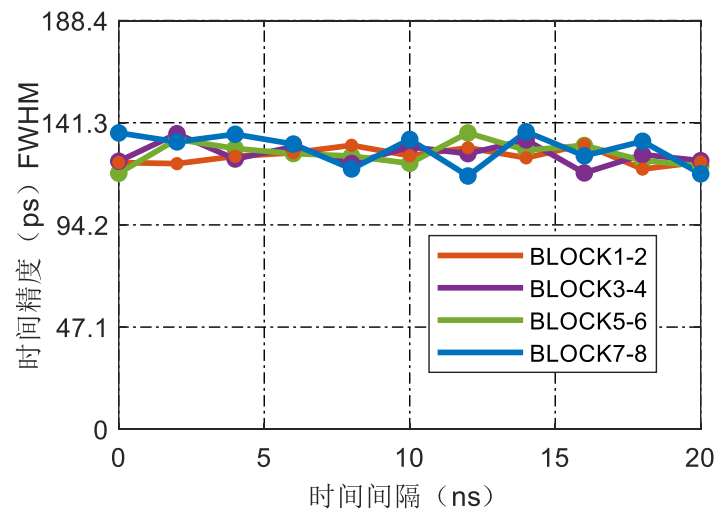
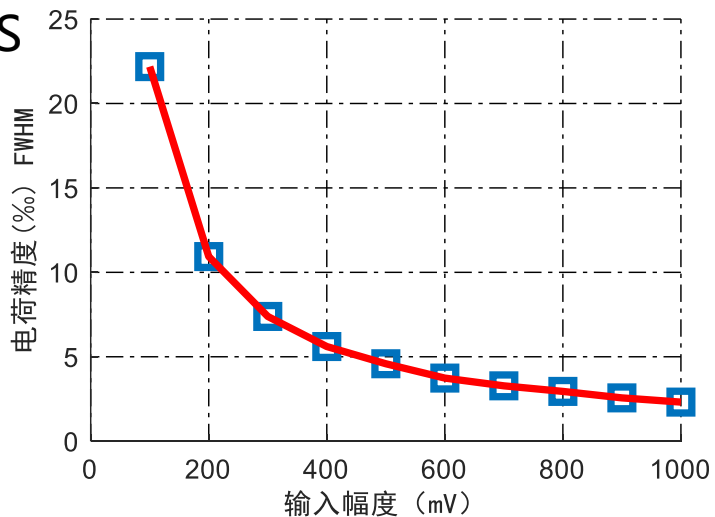
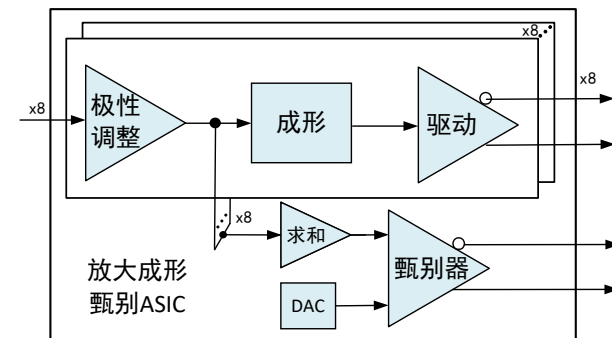
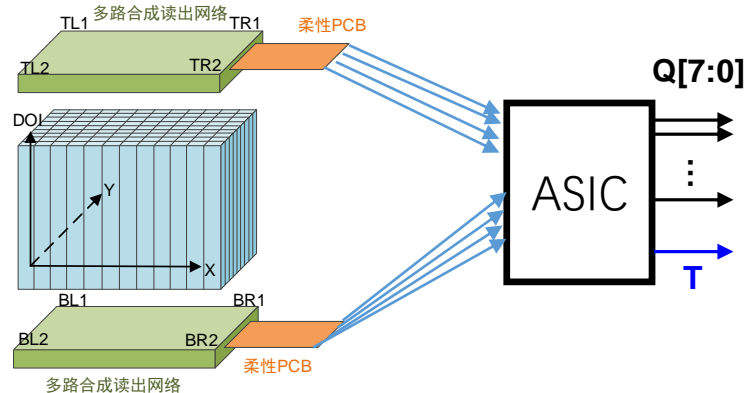
- 改变光强



小动物PET读出放大形成甄别ASIC

❖ 针对小动物/脑PET读出：多路复用型读出

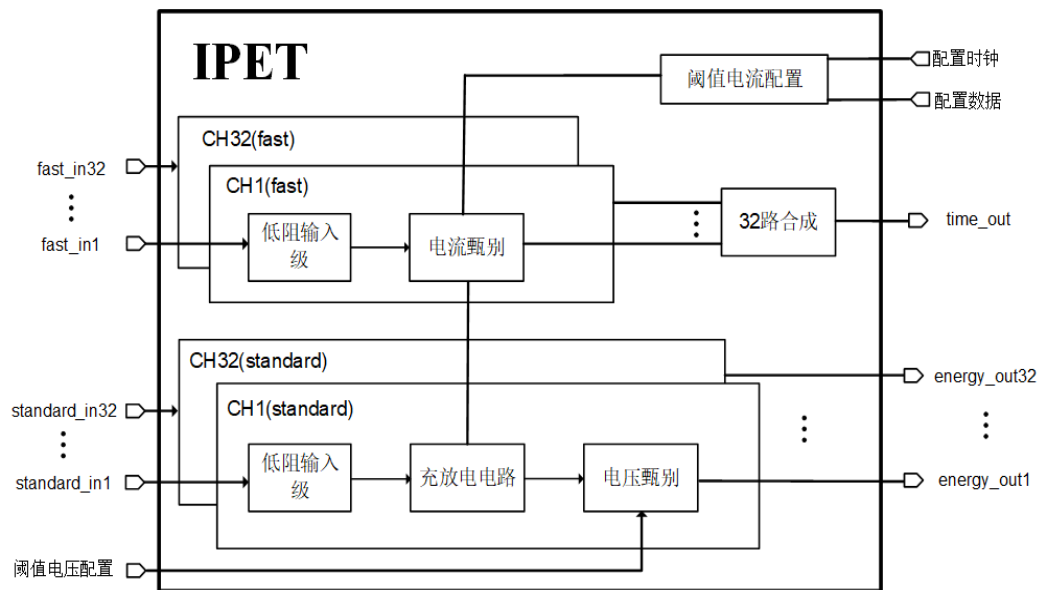
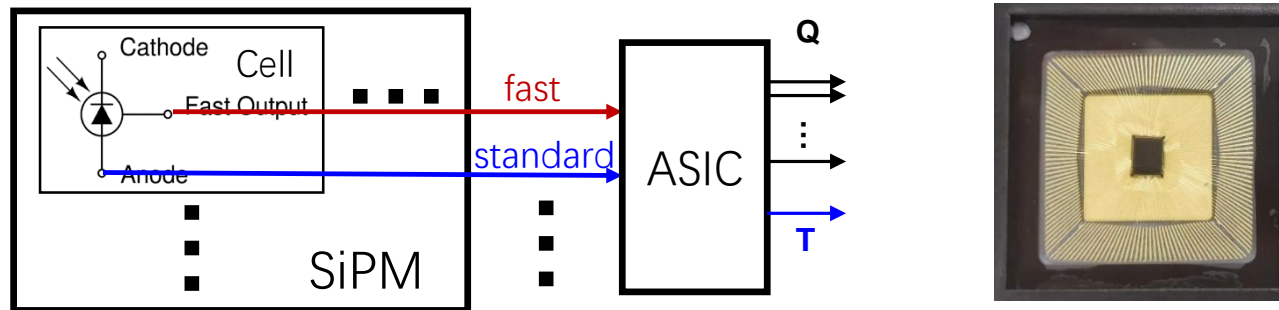
- 集成通道数：8
- 成形时间：50ns、100ns、150ns、200ns
- 甄别阈值：0 - 200 mV (片内DAC配置)
- 时间精度@1 V：82 ps FWHM
- 电路噪声：350 μ V RMS
- 功耗：小于0.5 W



TOF PET读出ASIC

❖ 针对TOF-PET的读出需求

- 具有快引出的SiPM通道一对一读出
- 通道数: 32
- 时间测量: 电流甄别, 通道合成
- 能量测量: 电容充放电, 电压甄别



性能参数	参数值
通道数	32
时间通道最大输入	1 mA
时间通道测量精度	好于90 ps FWHM @ 阈值电流20 μ A, 输入信号幅度0.7 mA, 输入信号前沿1.7 ns, 输入电容70 ps
时间通道测量 阈值设置步长	1 μ A
能量通道测量范围	1 nC ~ 6 nC
能量通道测量分辨率	测量范围内, 好于1% FWHM
能量通道测量死时间	测量范围内好于1 μ s
功耗	4.3 mW/CH

总结

- ❖ 针对SiPM波形数字化读出需求，完成原型ASIC设计
- ❖ 提出前沿双增益并行快采样、后沿单通道慢采样的电路结构
 - 同时实现前沿的高速获取与后沿的完整采集
 - 减小采样链路资源消耗
 - 利用单通道覆盖千倍大动态范围
- ❖ 前后沿采样阵列的采样率和采样深度
 - 采样率：前沿2 Gsps，后沿1 Gsps
 - 采样深度：前沿16，后沿128
- ❖ 电子学初步性能测试
 - 可覆盖2500倍动态范围
 - 获得SiPM联测波形
- ❖ 下一步联合SiPM进行详细测试

Thanks!

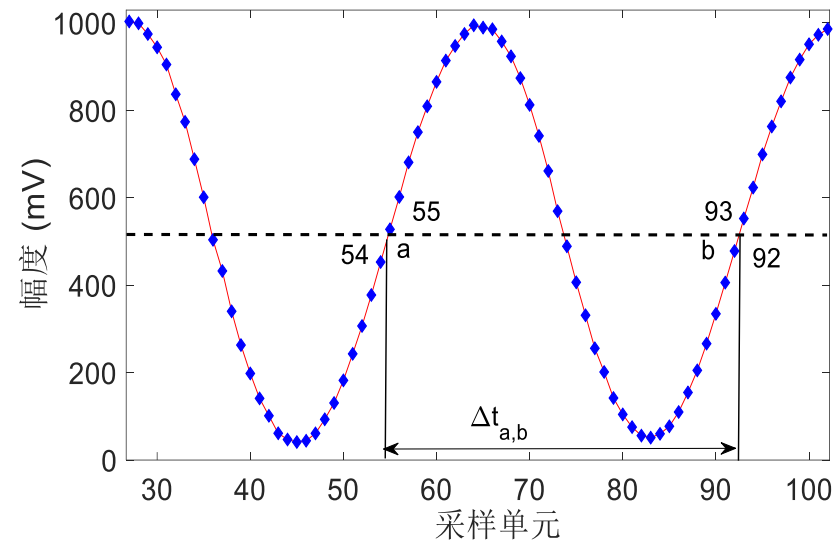
采样间隔刻度方法

- ◆ 基于超定线性方程组的时间修正

$$\alpha \Delta t_{n_1} + \sum_{i=n_1+1}^{n_2-1} \Delta t_i + \beta \Delta t_{n_2} = T_S$$

$$\alpha = \frac{V_{n_1+1} - V_{DC}}{\Delta V_{n_1}}, \beta = \frac{V_{DC} - V_{n_2}}{\Delta V_{n_2}}$$

T_S 为输入信号理想周期, α 和 β 为系数



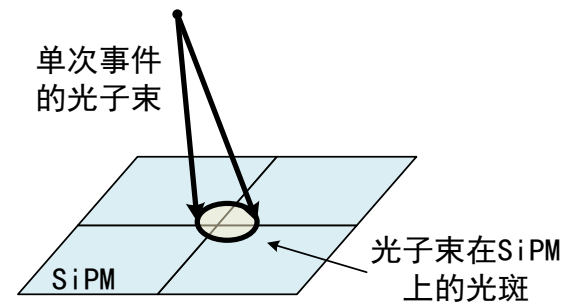
$$\begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & \underline{\alpha_1} & 1 & \cdots & 1 & \underline{\beta_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \underline{\alpha_2} & 1 & \cdots & 1 & \underline{\beta_2} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & 1 & \underline{\beta_3} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \underline{\alpha_3} & 1 & \cdots \\ & & & & \vdots & & & & & & \\ 1 & \cdots & 1 & \underline{\beta_M} & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \underline{\alpha_M} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ \Delta t_3 \\ \vdots \\ \Delta t_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_S \\ T_S \\ T_S \\ \vdots \\ T_S \end{pmatrix}$$

- ◆ **定理**: x^* 是 $Ax=b$ 的最小二乘解的充要条件为 x^* 是 $A^T Ax = A^T b$ 的解。

基于最小二乘法求方程组 (对噪声不敏感), 方程组的解即为采样间隔

多通道等效精度计算

- ❖ 未来的应用场景为将大面积SiPM分割为多通道，分别读出后求和
- ❖ 单次光事件最多能同时照射4个通道，因此考虑4通道，最小电荷量为5 P.E.情况下的综合精度
 - 多通道综合电荷精度好于15%
 - 多通道综合时间精度好于300 ps



组合序号	通道1 P. E. 数目	通道2 P. E. 数目	通道3 P. E. 数目	通道4 P. E. 数目	4通道的 整体电荷精度 (%)	4通道的 整体时间精度 (ps)
1	5	0	0	0	11.00	225.01
2	4	1	0	0	11.32	220.66
3	3	2	0	0	10.93	207.79
4	3	1	1	0	11.94	203.09
5	2	2	1	0	11.58	194.05
6	2	1	1	1	12.53	190.20