



第四届全国辐射探测微电子学术年会，西安临潼

# 用于 SiPM探测器的64路3600pC电流模式前端读出ASIC

**董红娇、喻春杨、任政宇、高武**

\*通讯作者: [gaowu@nwpu.edu.cn](mailto:gaowu@nwpu.edu.cn)

西北工业大学

2025年7月17日

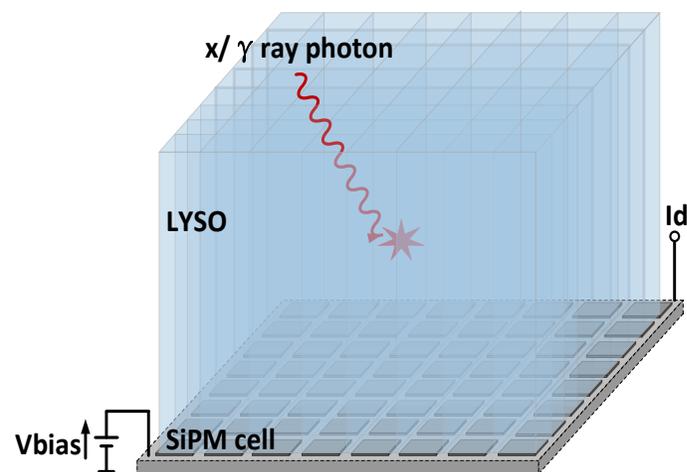
- 1 研究背景
- 2 电路架构与关键技术
- 3 实验结果与讨论
- 4 总结与展望

# 研究背景

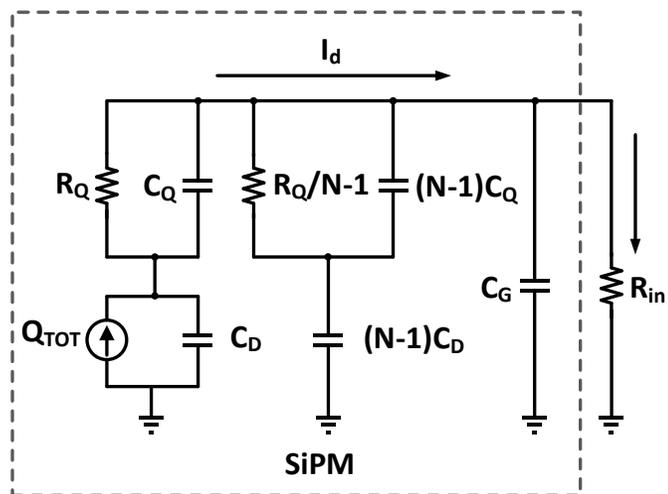
# 1 研究背景

## 闪烁体+SiPM概述

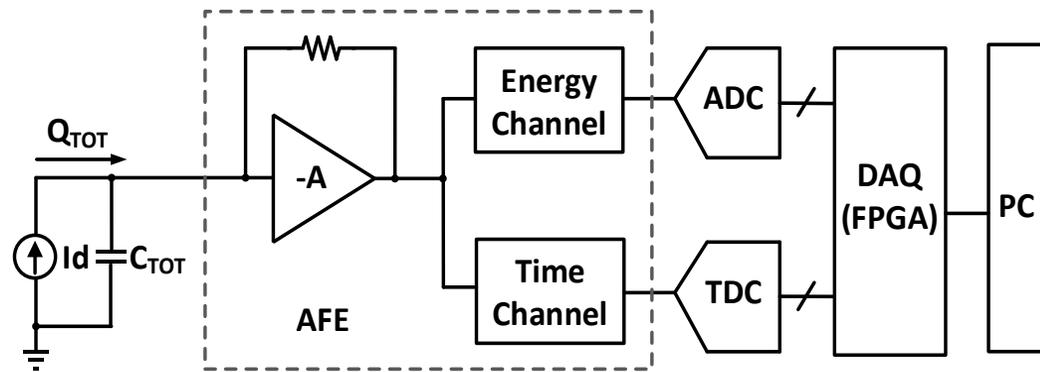
- 闪烁体作用：粒子入射  $\rightarrow$  沉积能量  $\rightarrow$  激发闪烁体原子  $\rightarrow$  发出荧光光子 (光子产额: 33ph/keV@LYSO)
- SiPM作用：光子撞击微单元  $\rightarrow$  触发雪崩倍增  $\rightarrow$  输出电信号 (Gain:  $10^5 \sim 10^7$ 、PDE: 40%~50%)
- 信号读出流程：闪烁体吸收光子——SiPM进行倍增(光电转换)——前端读出ASIC(数字化)——数据采集系统



LYSO与SiPM耦合而成的检测模块



SiPM等效电路



ASIC基本原理图

# 1 研究背景

## 闪烁体+SiPM探测器需求分析

- 应用：医学成像、辐射检测、空间探测、科学研究等
- 探测器特点：高增益、探测能量范围广、阵列要求高



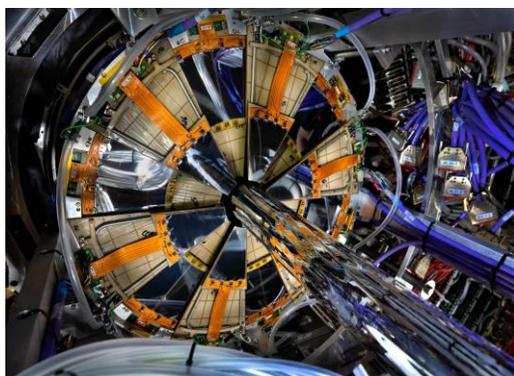
医学成像：70keV~1MeV



辐射射检：10keV~10MeV



核物理研究：0.1MeV~10MeV



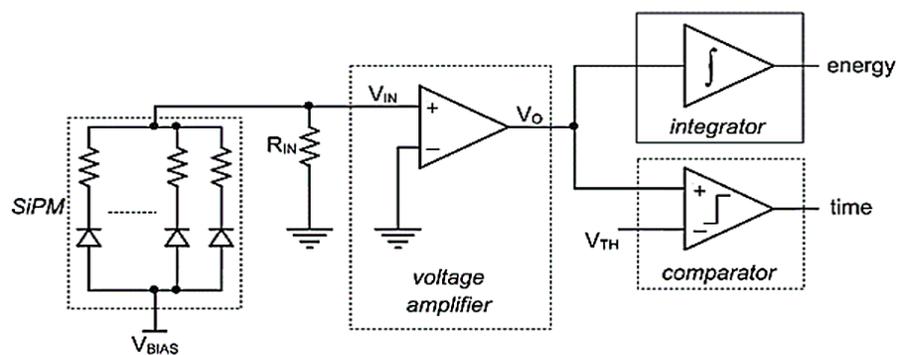
高能粒子探测：MeV~GeV

探测器特性	引发的ASIC需求与挑战
高增益输出	大动态范围(10pC~3nC)
多场景应用	可编程性
单光子灵敏度	低噪声优化
快时间响应	高带宽& 低时间抖动
多通道集成	高密度通道数

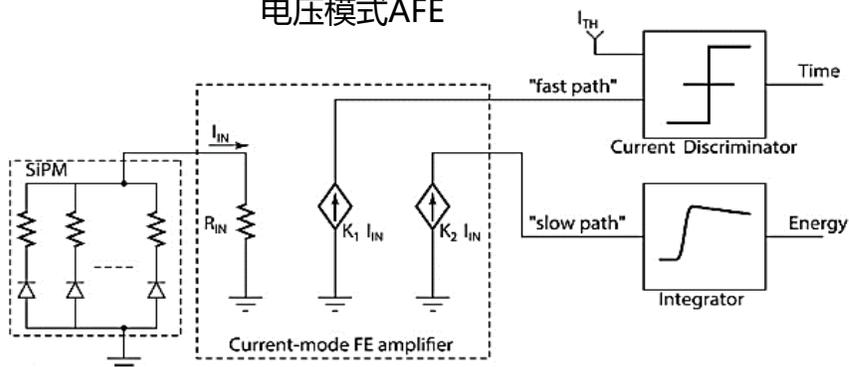
# 1 研究背景

## 闪烁体+SiPM探测器读出电路——电流模式前端ASIC

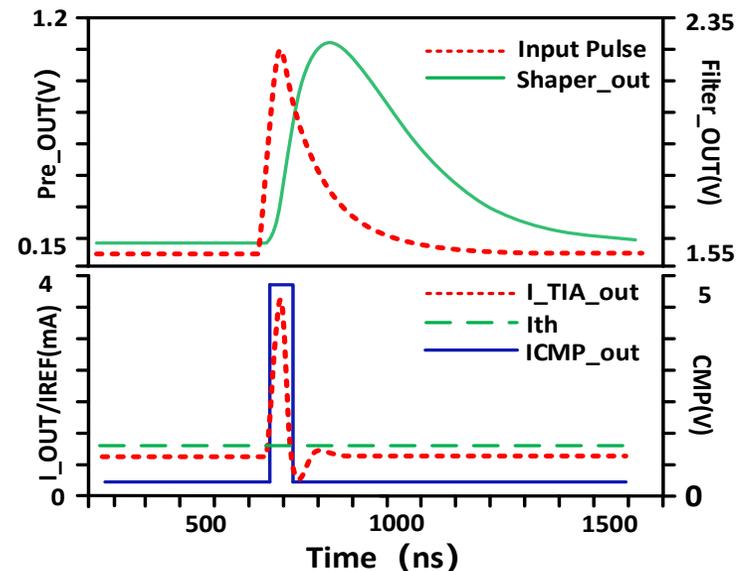
- 电荷积分式 (基于CSA) : 低噪声, 但易于饱和, 限制多通道集成;
- **电流模式 (基于TIA)** : 直接处理脉冲, 其低输入阻抗和高带宽特性, 为大动态范围提供了理论可行性。



电压模式AFE



电流模式AFE

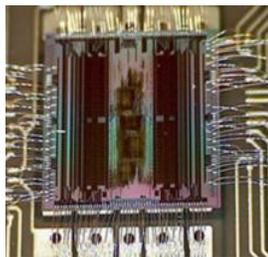


电流模式AFE波形示意图

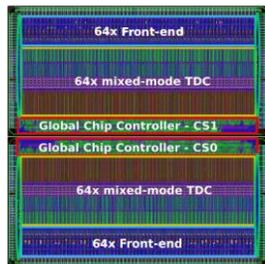
- ✓ 特点: **低输入阻抗、高带宽、高速**
- ✓ 电子学表现: **高计数率、大动态范围、高时间分辨率**

# 1 研究背景

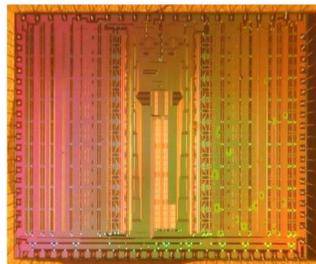
## SiPM探测器读出ASIC国内外现状



STiC3(2015-海德堡大学)  
: 400pC@25mW



TOFPET2(2016-PETsy电子公司)  
: 1500pC@8mW/600KHz



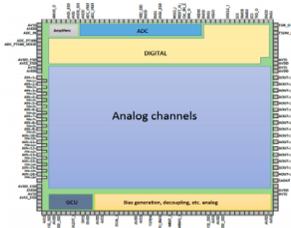
ANGUS(2018-米兰理工大学)  
: 400pC@8mW



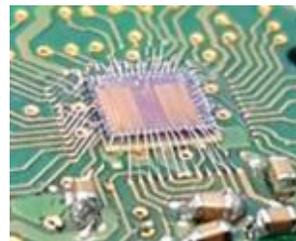
DIET(2022-中国清华大学)  
: 4.32nC@3mW/89KHz



SIPHRA(2016-美国IDEAS)  
: 16nC@30mW/50KHz



GAMMA(2021-米兰理工大学)  
: 3.3nC@14mW/100kHz



BETA(2024-巴塞罗那大学)  
: 4000pe.@1.4mW/10KHz



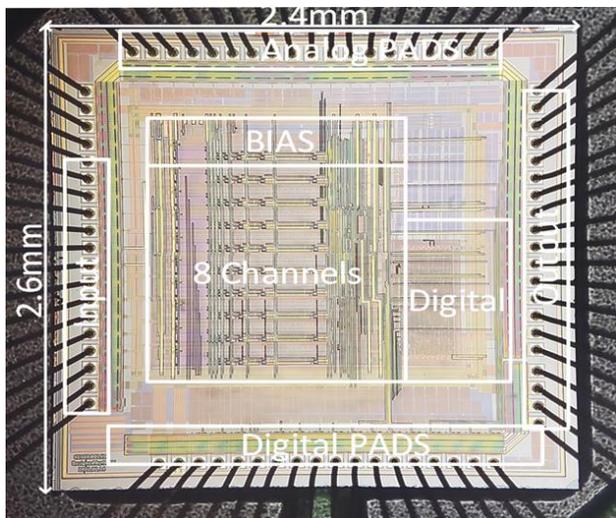
### 发展趋势:

工艺节点350nm → 40nm; 阵列规模: 1 → 256通道  
动态范围: 0.16pC~16nC; 单通道功耗: 1~20mW

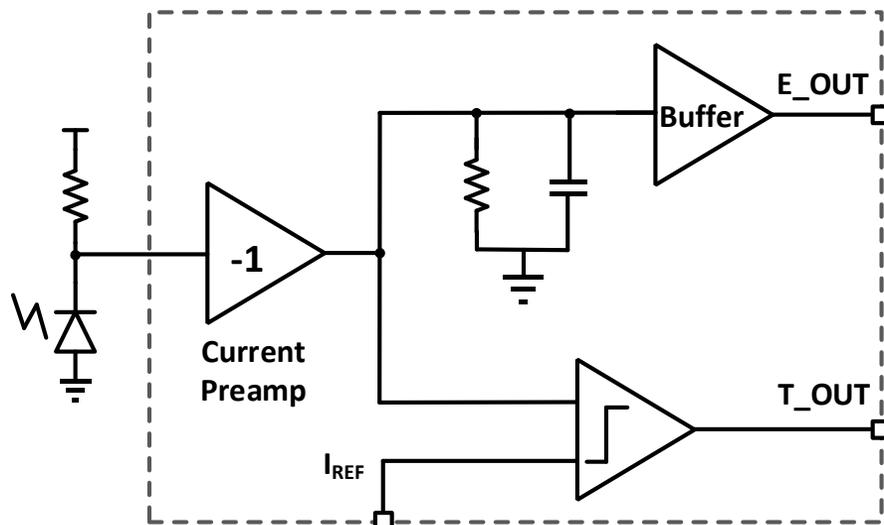
低功耗、大动态范围、高集成度

# 1 研究背景

## □ 现有研究基础



芯片显微照片



单通道架构图

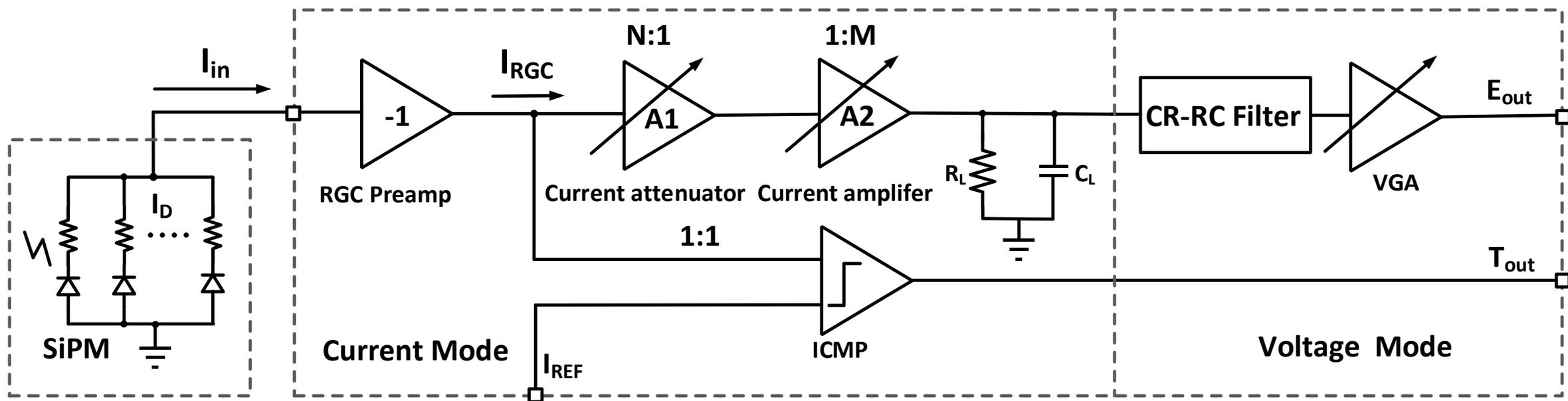
参数	Previous work
工艺	CMOS 350nm
供电电压	3.3V
动态范围	<100pC
AFE jitter	<1ns
功耗	<4mW
最大计数率	20MHz
应用	光子计数

# 电路架构与关键技术

## 2 电路架构与关键技术

### □ 大动态范围的电流模式前端架构

- 架构特点：时间和能量检测双路径、改进的前置放大器、增益控制；
- 高增益：解析低能应用；低增益：抑制高能量的非线性失真。

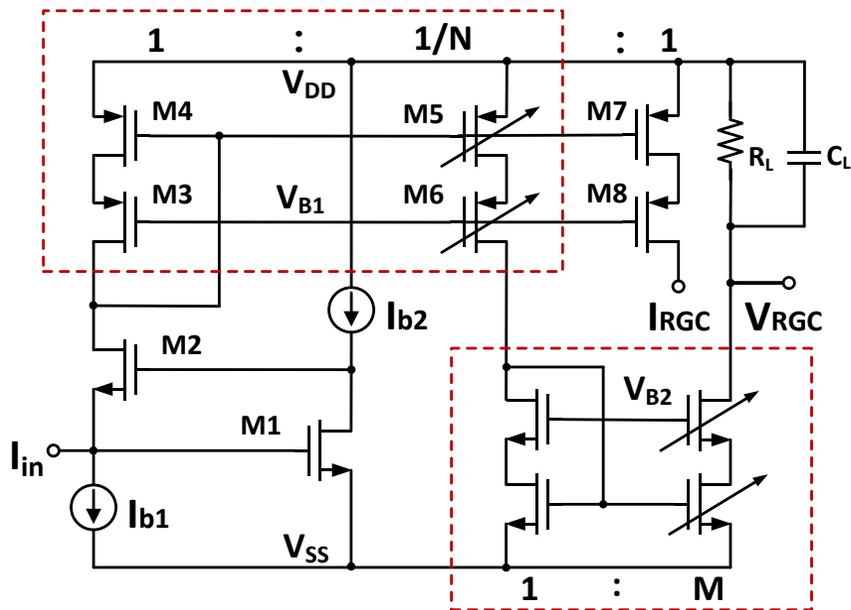


电流模式AFE架构图

# 2 电路架构与关键技术

## □ 关键电路结构

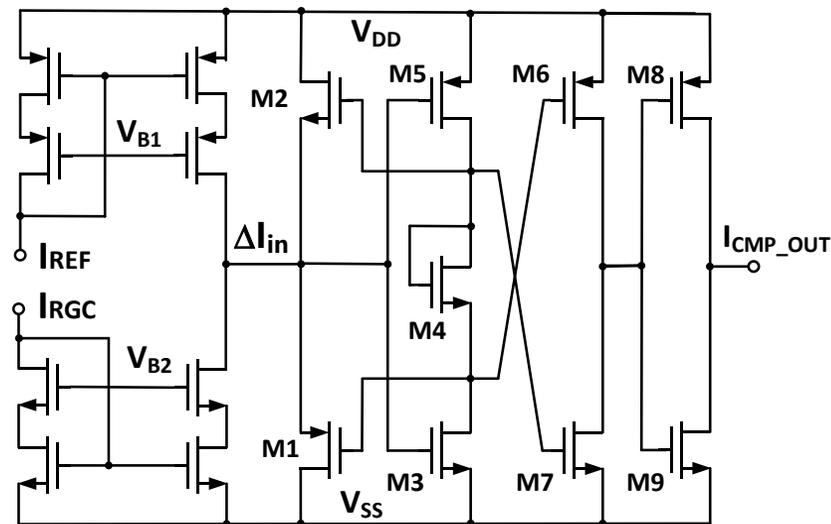
可编程增益TIA



$$\frac{V_{RG C}(s)}{I_{in}(s)} = \frac{1}{N} \frac{R_L}{(1 + R_L C_L s)}$$

$$I_{RG C} = \frac{M}{N} I_{in}$$

电流比较器



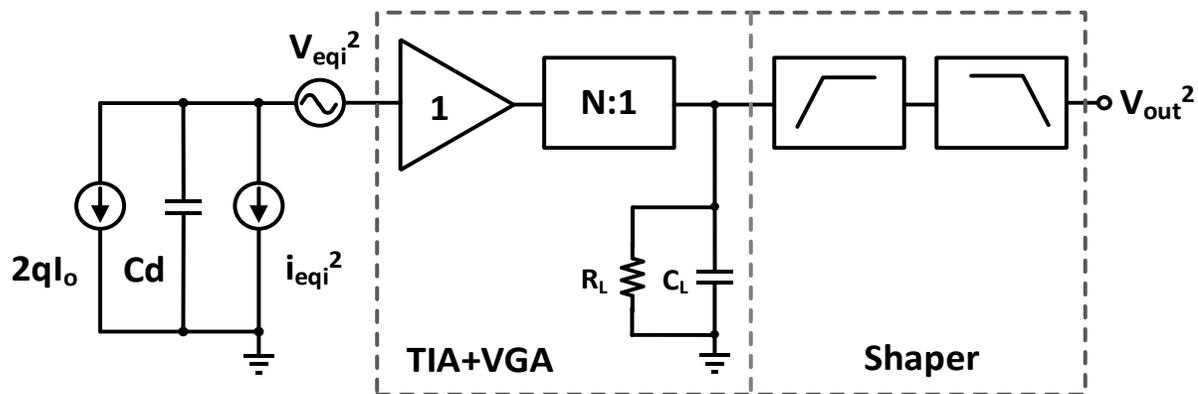
### 低输入阻、高增益的电流比较器

(基于Traff电流比较器的改进版本)

H. J. E. L. Traff, "Novel approach to high speed CMOS current comparators," vol. 28, no. 3, pp. 310-312, 1992.

# 2 电路架构与关键技术

## 噪声分析



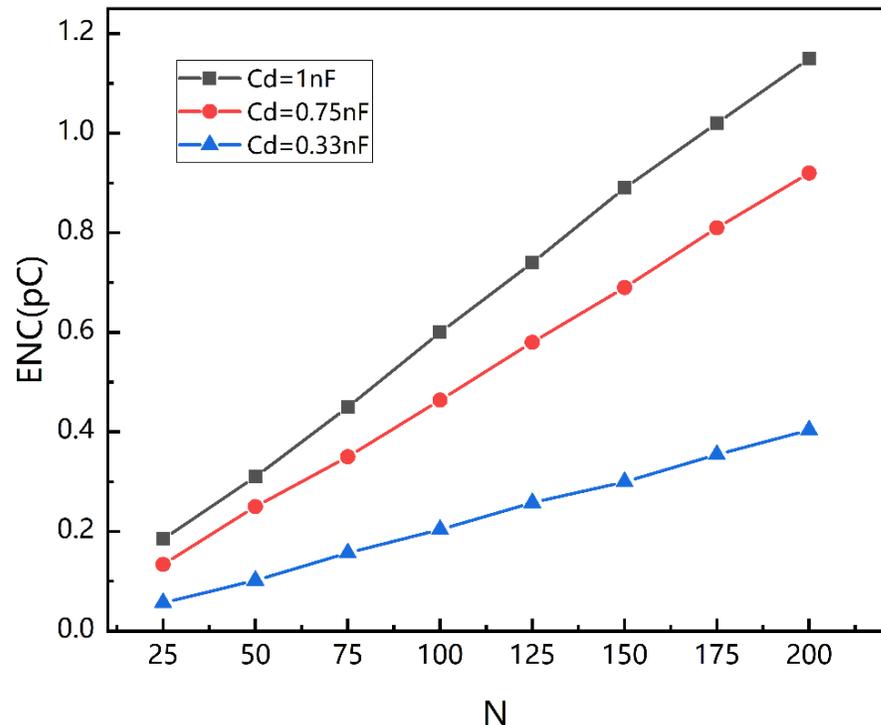
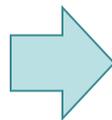
电流模式AFE的噪声模型图

$$ENC_{th}^2 = \left( \frac{8N^2KT}{3g_{m1}} + \frac{8NKT}{3g_{m5}} \right) \frac{11.6C_{tot}^2}{Qi^2 4\pi\tau_s}$$

$$ENC_f^2 = \left( \frac{K_f n}{C_{ox}WL_1} + \frac{NK_f p}{C_{ox}WL_4} \right) \frac{3.7C_{tot}^2}{Qi^2}$$

$$ENC_o^2 = 2Qi \cdot I_o \frac{11.6\tau_s}{Qi^2 4\pi}$$

$$ENC = Qi \cdot \sqrt{ENC_{th}^2 + ENC_f^2 + ENC_o^2}$$



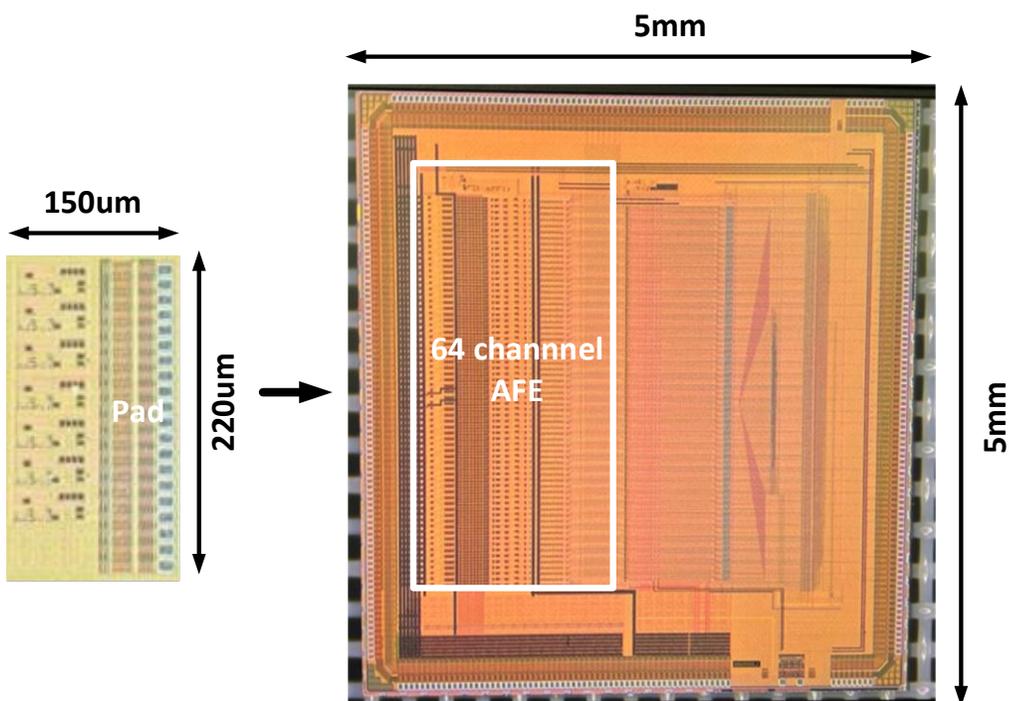
ENC与N、探测器电容之间的关系图

# 实验结果与讨论

# 3 实验结果与讨论

## □ 多通路电流模式前端ASIC——SPMROCV1

- 工艺: CMOS130nm (3.3V/1.2V)
- 创新点:
  - 改进版本的TIA实现大动态范围 (3600pC)
  - 同时实现时间测量与能量测量



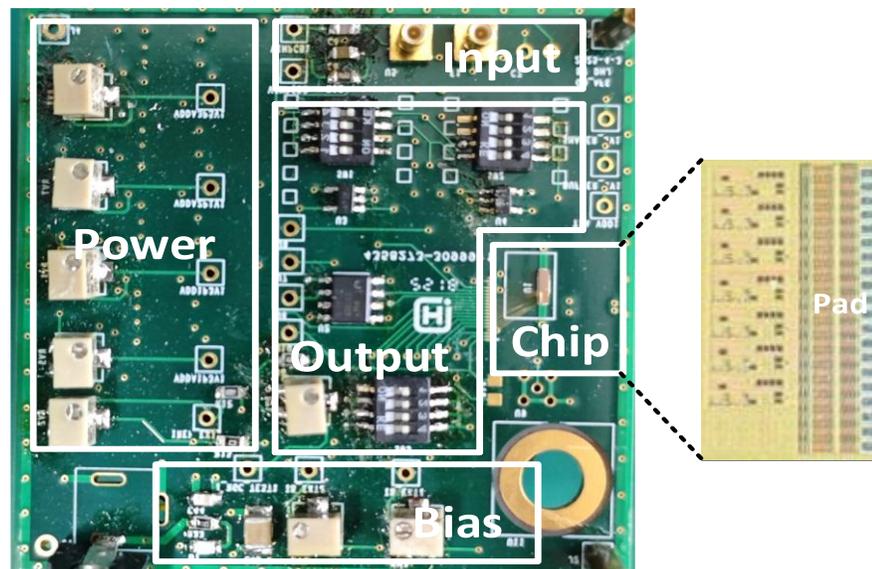
名称	指标
工艺	130nm
通道数	1/64
事件率	1MHz
动态范围	3600pC
增益可调	实现多档可调
噪声	<0.36pC
能量非线性度	<3.2%
AFE Jitter	<120ps
功耗	14mW

# 3 实验结果与讨论

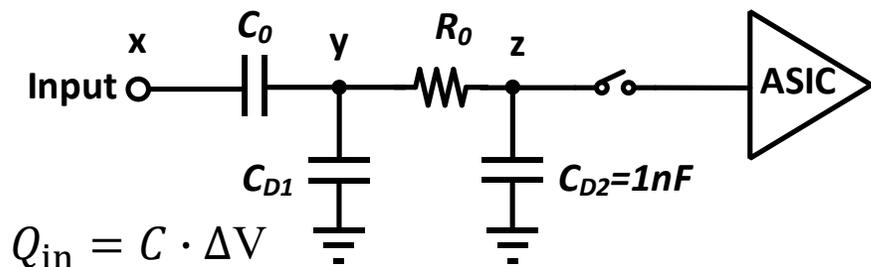
## □ 芯片实物图与测试PCB



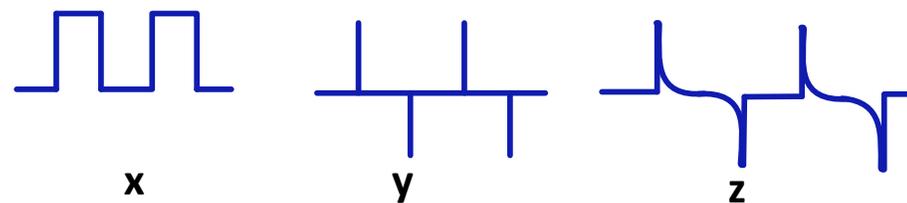
测试装置图



PCB照片图及原理样片显微照片



测试模拟输入原理图

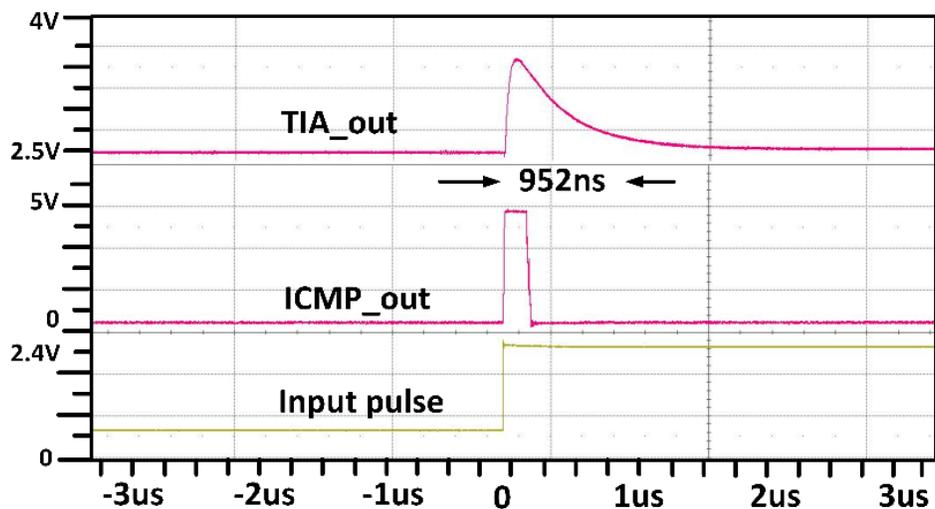


测试输入网络各节点波形示意图

# 3 实验结果与讨论

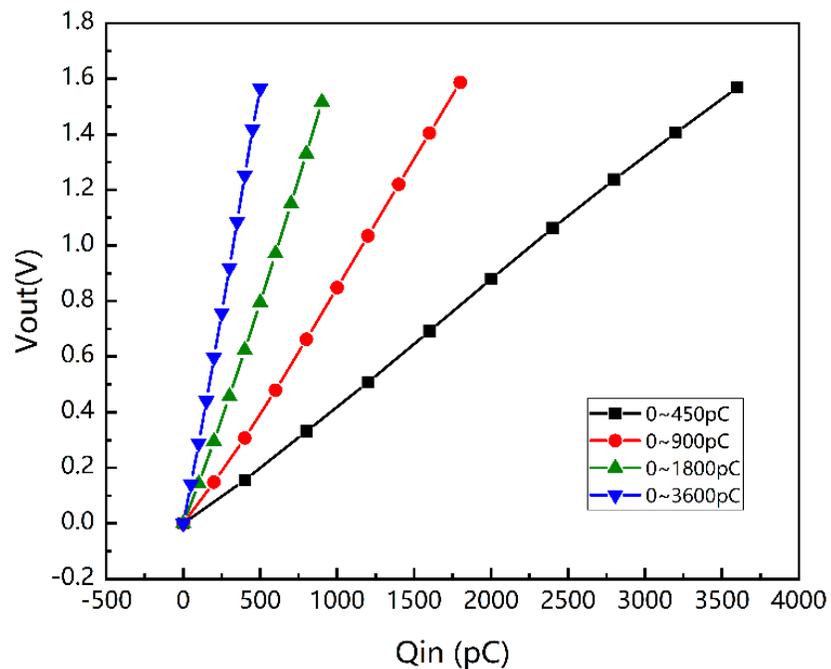
## □ 能量测量结果

### ✓ 基本功能验证



测试输出波形图

### ✓ AFE能够实现多档动态范围可调

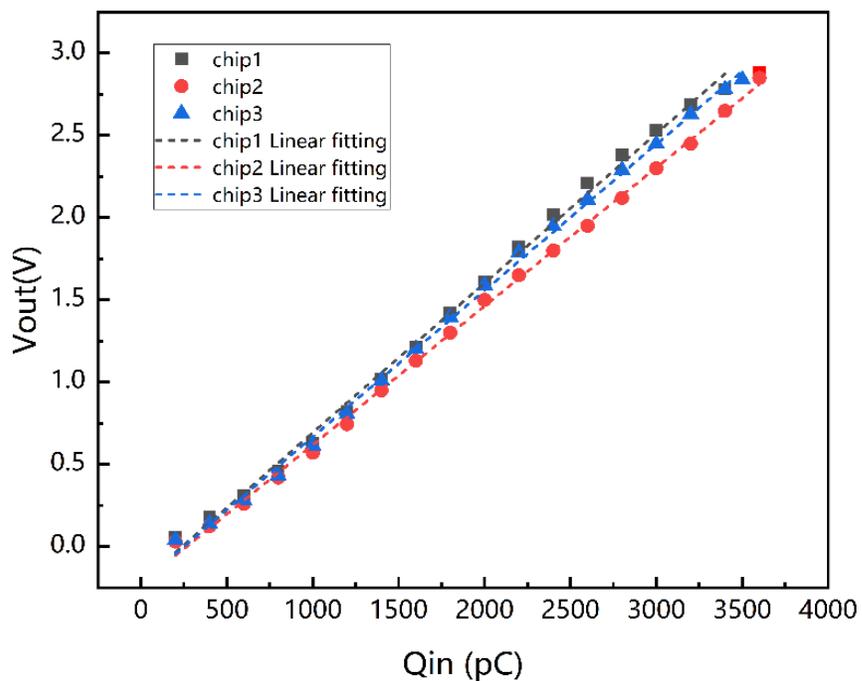


不同输入范围与输出电压关系测试结果图

# 3 实验结果与讨论

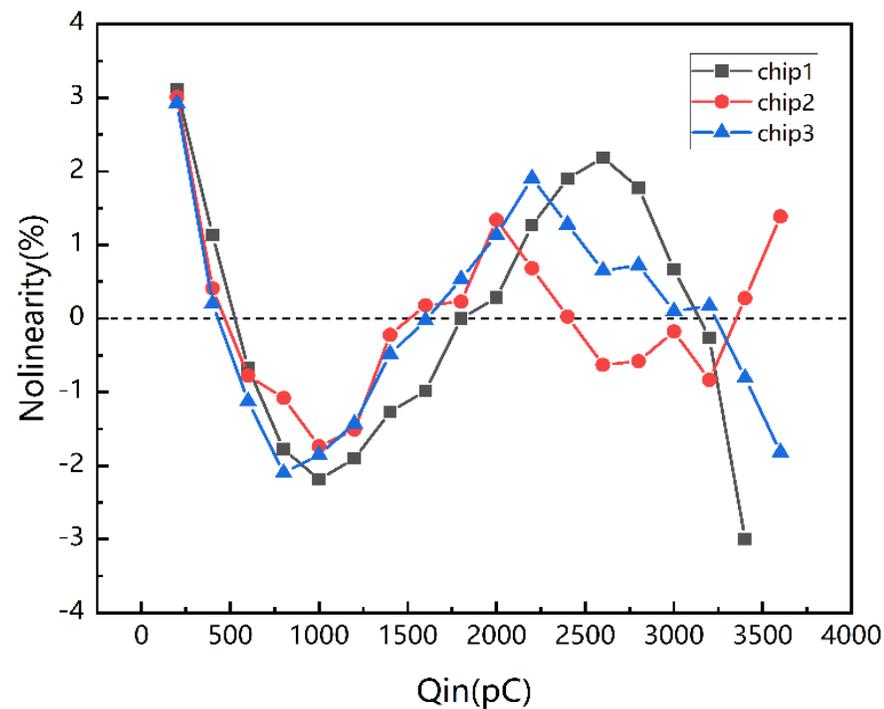
## □ 能量测量结果

✓ 能量测量的输入范围最大可达到3600pC



输出电压与输入电荷关系测试结果图

✓ 能量测量的非线性好于3.2%

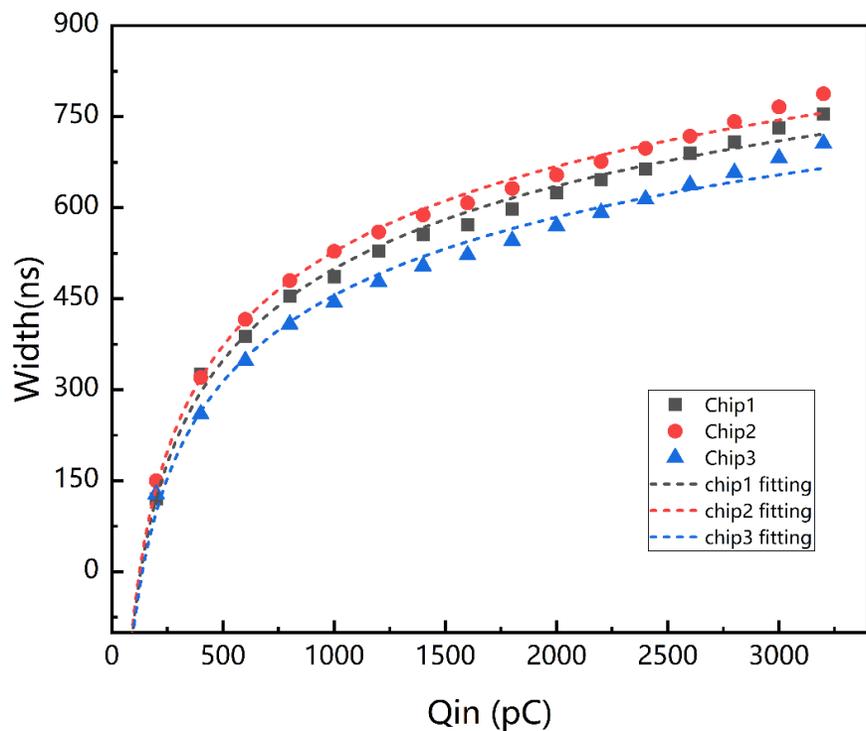


能量测量非线性统计结果图

# 3 实验结果与讨论

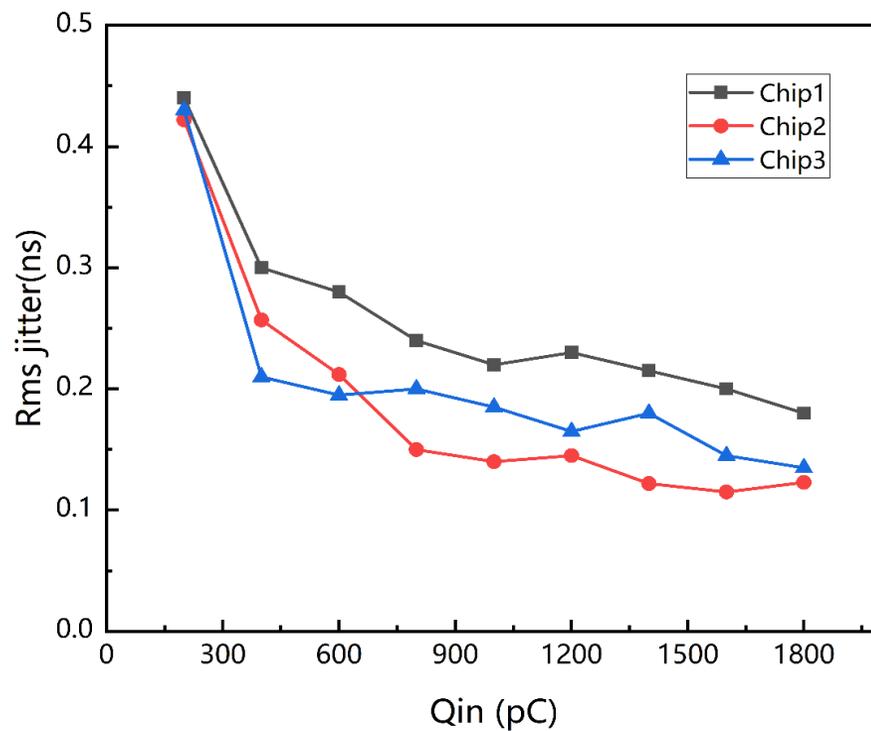
## □ 时间测量结果

✓ 比较器输出脉宽与输入电荷呈一定的函数关系



比较器输出脉宽与输入电荷关系测试结果图

✓ AFE输出jitter在110~420ps之间



比较器输出Jitter与输入电荷关系测试结果图

# 3 实验结果与讨论

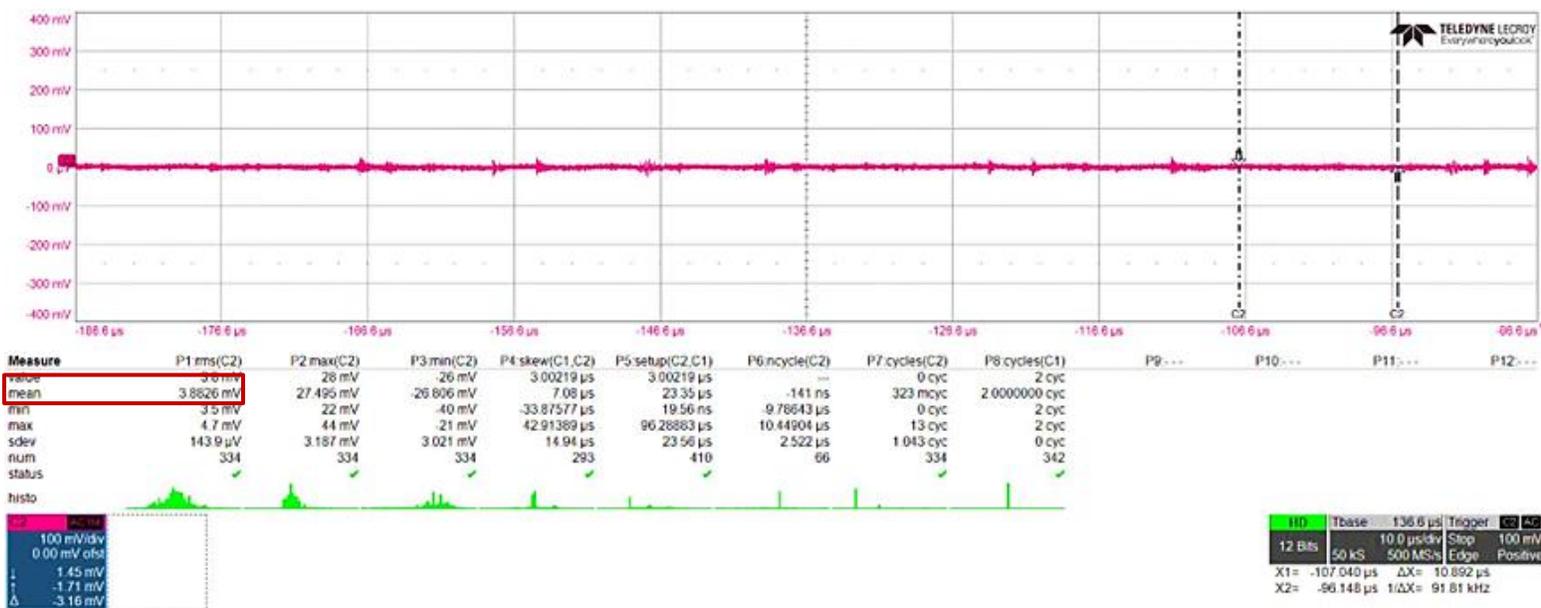
## □ 噪声结果

- 3600pC输入条件下，基线上的积分噪声为3.88mV；
- 表笔上空载时的积分噪声为2.38mV；
- 计算可得噪声为3.06mV，等效输入噪声为3.6pC，SNR为60dB。

$$ENC = \frac{\delta_{rms}}{V_0} \times Q_0$$

$$\delta_{rms} = \sqrt{\delta_{tot}^2 - \delta_{scope}^2}$$

$$SNR = 20 \lg \frac{\delta_{rms}}{V_0}$$



积分噪声mean=3.88mV

# 3 实验结果与讨论

## □ 实验结果比较

Parameter	FlexToT	STiC	TOFPET2	LAILA	GAMMA	BETA	This work
Year	2013	2015	2016	2018	2021	2024	2025
Process(nm)	350	180	110	350	350	130	130
Dual function	Yes	Yes	Yes	No	No	No	Yes
DR(pC)	400	160	1500	2500	3000	640	<b>3600</b>
Linearity(%)	5	NA	5	NA	1	2	3.2
Event rate(MHz)	NA	0.156	0.5	0.666	0.1	0.01	<b>1.05</b>
AFE jitter(ps)	30	190	75	NA	NA	NA	110
Power(mW)	11	25	8	18.75	17.5	1.4	14

# 总结与展望

# 4 总结与展望

## □ 总结

- ✓ 完成了具有可变增益的大动态范围单通道原理样片的设计与测试;
- ✓ 测试结果
  - 最大动态范围为3600pC
  - 等效输入噪声为0.36pC
  - 消耗电流4.2mA
  - 事件率为1.05MHz
  - 比较器输出jitter为110~440ps
- ✓ 成果: “Design Techniques of a 130-nm Current-mode Analog Front-end Readout Integrated Circuit with Large Dynamic Range for SiPM Detectors” **“在投”**

## □ 下一步计划

- ✓ 开展64路芯片测试验证;
- ✓ 完成探测器模组开发和应用验证。



**请各位老师同学批评指正！**

**谢谢大家！**