



西北工业大学

NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

公诚勇毅

2021年全国辐射探测微电子学术交流会

半导体辐射探测器用超低噪声前端读出 ASIC研制及应用

高 武

西北工业大学

嵌入式系统集成教育部工程研究中心
辐射探测材料与器件工信部重点实验室

2021年11月26日



内容安排

1

研究背景及意义

2

国内外现状及动态

3

西工大超低噪声前端读出ASIC研制进展

4

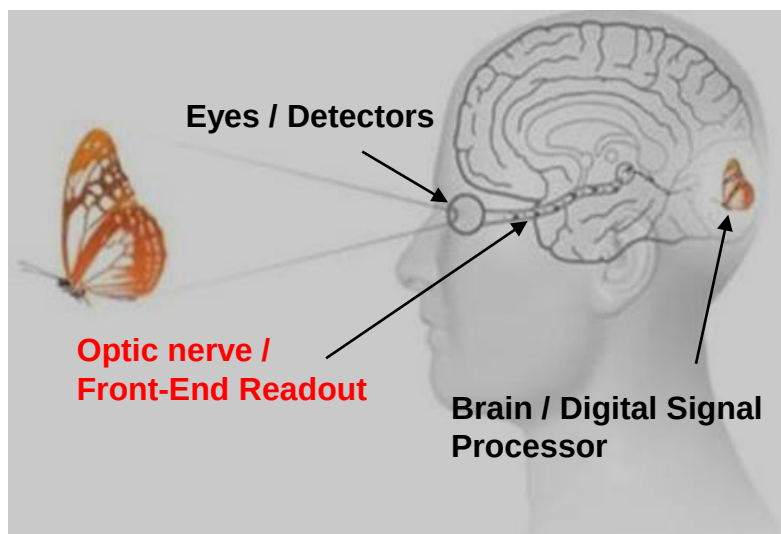
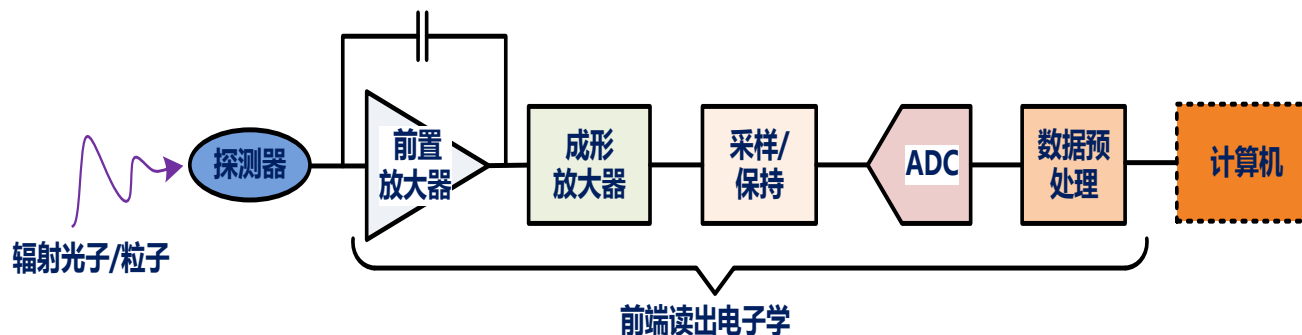
总结与展望



研究背景及意义

半导体辐射探测器读出电子学

类似的读出电子学结构



看得清

反应快

测得准

□ 解决方案

- ASIC + 嵌入式

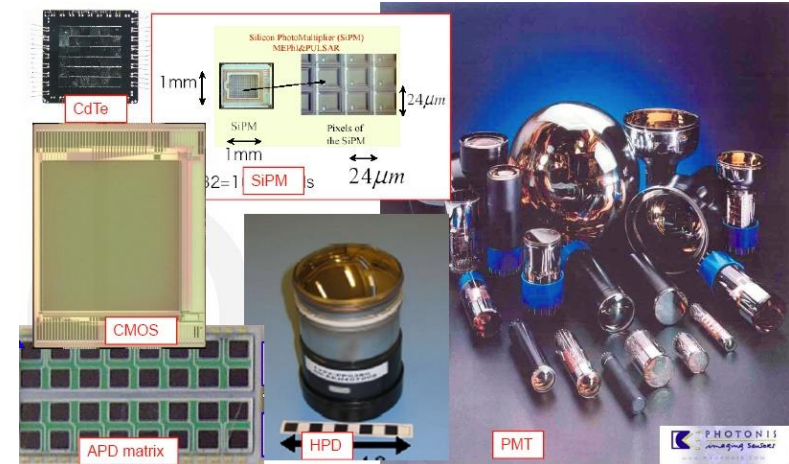
半导体辐射探测器

□ 探测器：光子和粒子能量沉积

→微弱电信号

- 硅：Si-PIN、Si-Strip、Si-Pix、APD、SDD
- 化合物：CdTe、CZT

需要超低噪声读出电子学

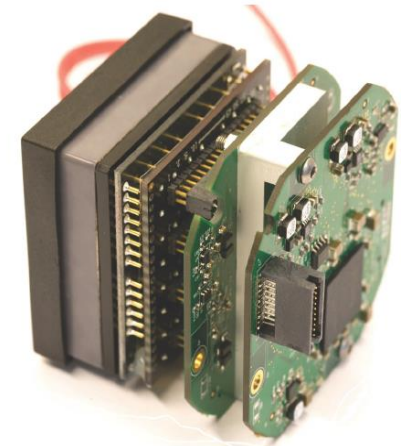
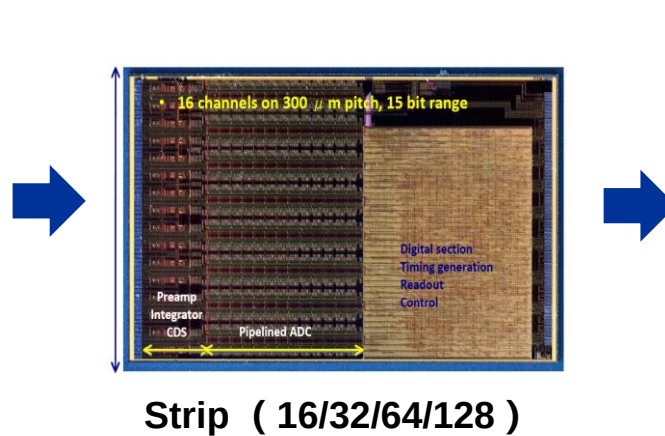
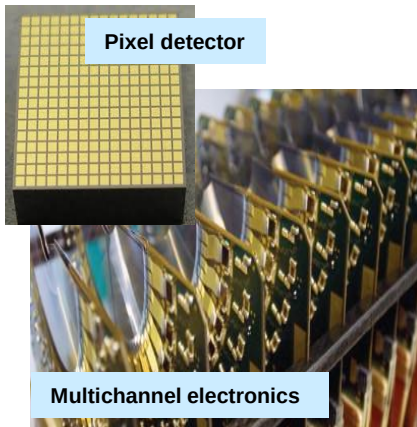


Parameter	PMT	APD	Si-PIN , Si-pix	CZT, CdTe
Size	Bulky	Compact, thin	Compact, thin	Compact, thin
Gain	$10^6 \sim 10^7$	$10^2 \sim 10^3$	$10^2 \sim 10^3$	$10^2 \sim 10^3$
Noise	Low	moderate	Low	Low
Threshold Sensitivity	1 ph.e	10 ph.e	1 ph.e	--
Timing Resolution	~0.5 ns	~ 1ns	~ 1ns	~ 7 ns
Energy Resolution	~10 %	~13 %	~3 %	~4 %
Bias Voltage	800 ~1500 V	100~2000V	25 ~50 V	800~ 1500 V
Cost	\$	\$\$	\$	\$\$\$

从分立电子学到集成ASIC

□ 条状多通路读出ASIC

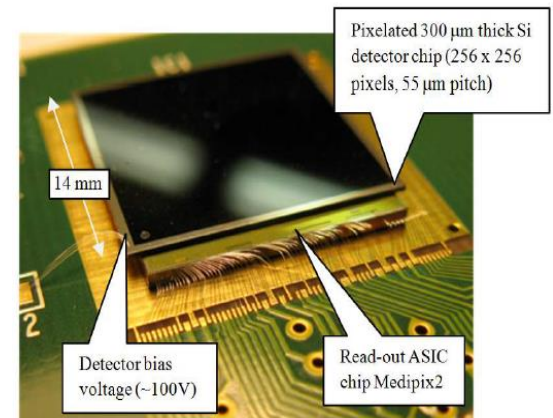
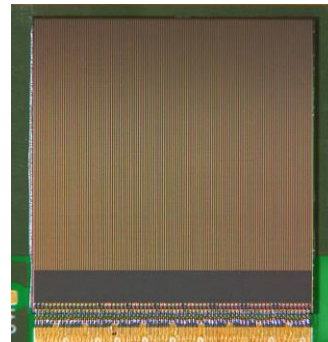
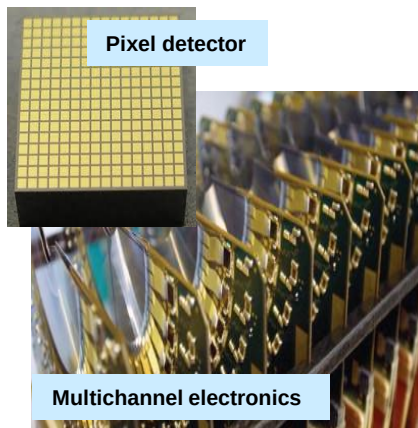
- 电荷灵敏前放、高阶成形主放、峰值采样保持、数据转换器、数据预处理
- 特点：“Big Analog , Small Digital” (大A小D)



从分立电子学到集成ASIC

➤ 像素型二维读出ASIC

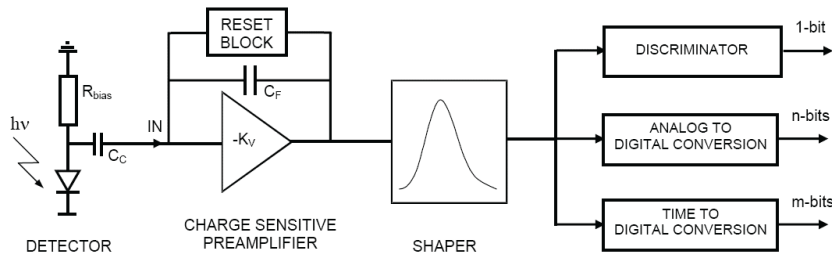
- 电荷灵敏前放、过域时间甄别器、像素级ADC/计数器、并入串出、高速串行接口
- 特点：“Analog Islands in Digital Sea”（数字海、模拟岛）



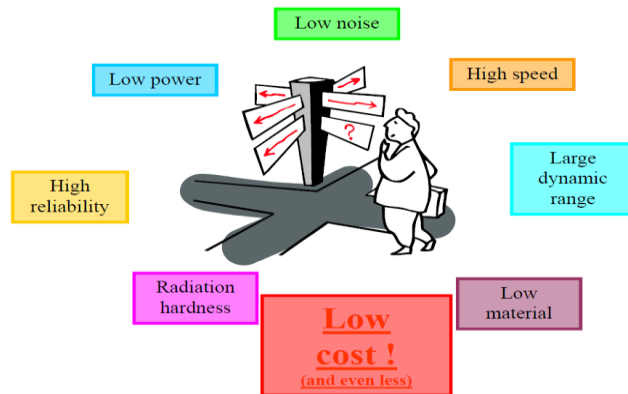
Pixel (256 $\times$ 256)

ASIC性能及特点

单路拓扑结构



性能设计

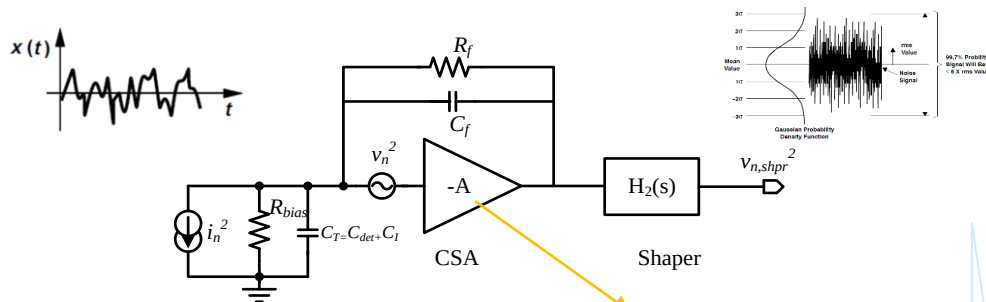


主要特点

- **混合信号ASIC**
 - ✓ 射频/模拟 + 数字 + 抗辐射 → 现代集成电路最尖端技术综合
- **多种性能需求**
 - ✓ 低噪声：~100 e⁻
 - ✓ 高速并行/串行处理 → 全局/卷帘快门、感兴趣区域、事件驱动
 - ✓ 大动态范围：~100dB
 - ✓ 极低功耗：~ μW/channel
 - ✓ 抗辐射：
 - TID > 10 Mrad(Si);
 - NIEL > 10¹¹ Neq/cm²
 - LET_{th} > 100 MeVcm²/mg

亟待解决的关键技术问题

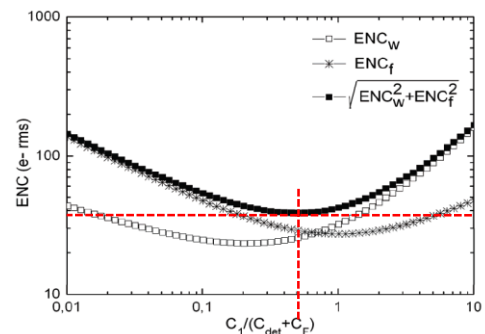
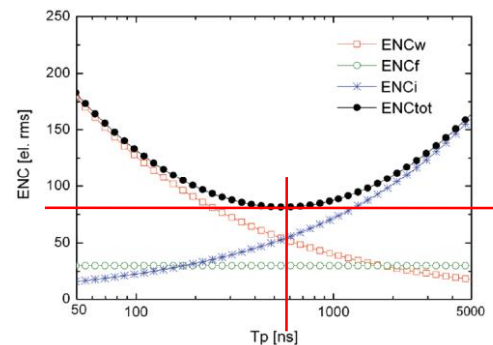
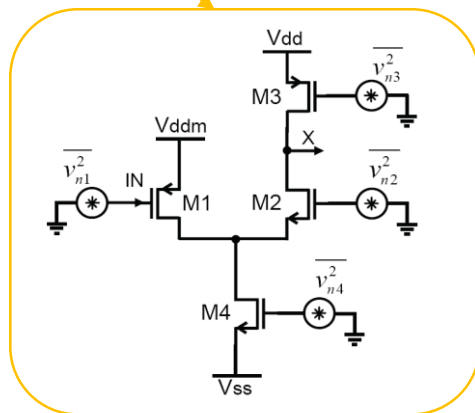
□ 关键问题一：光子和粒子探测器微弱电信号读出与滤波



- 探测器信号微弱
- 电子学内生噪声
- 环境噪声干扰
- 滤波不完全

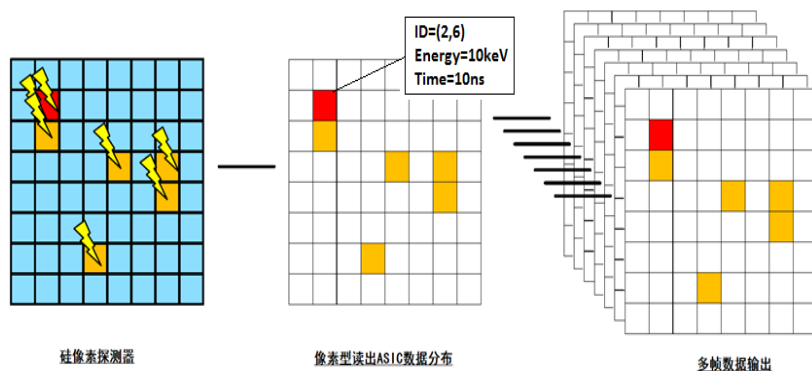
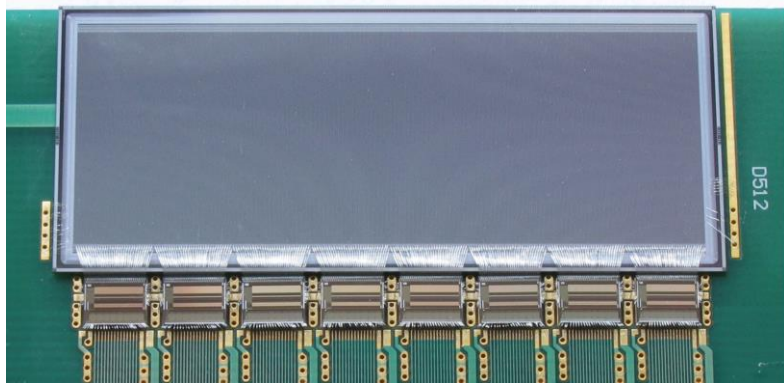
精确的等效噪声模型

低噪声读出电路



亟待解决的关键技术问题

□ 关键问题二：并行多路海量数据片上存储与处理



微弱信号
放大

能量/时间
数字化

片上数据
存储

无用数据
自动滤除

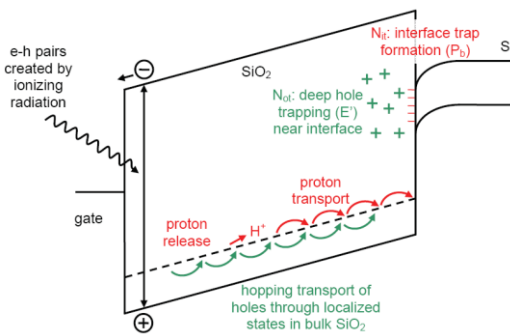
并入串出/
事件驱动

高能效的片上数据处理算法

低功耗高可靠片上存储器和数据预处理电路

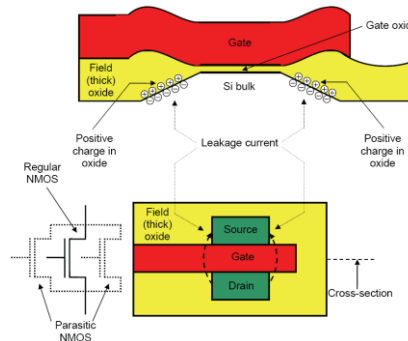
亟待解决的关键技术问题

□ 关键问题三：核辐射环境下模拟和数字电路辐射效应建模及抗辐射加固策略



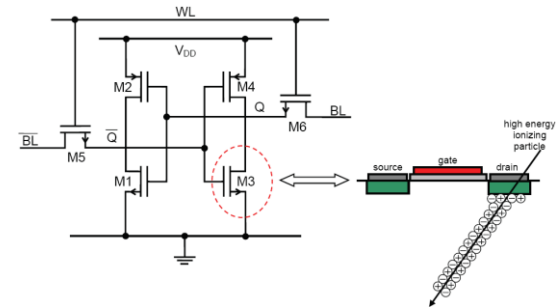
总剂量效应

- 阈值电压负向漂移
- 漏电流增加



单粒子效应

- 单粒子门锁
- 单粒子翻转
- 单粒子瞬态



位移损伤效应

- 漏电流幅值分布不一致
- 随机电报噪声



国内外现状及动态



国内外主要研究单位





国内外主要研究单位

研发现状

● 国外

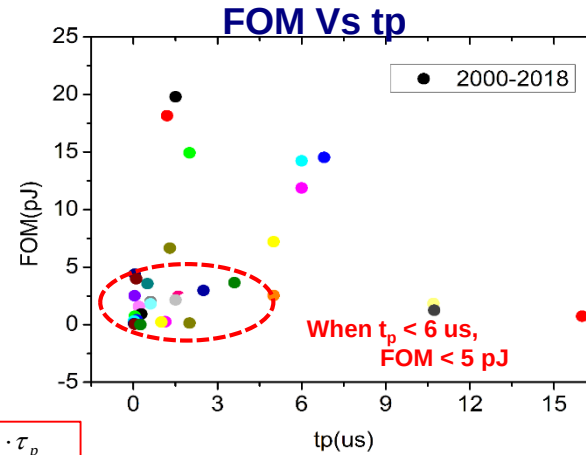
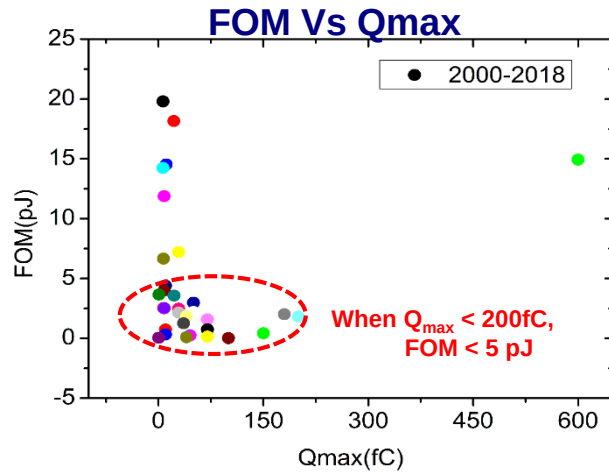
- ✓ 开发始于1980s，芯片设计理论和技术成熟，产品性能高，大规模应用；
- ✓ 相对于消费类电子芯片，读出ASIC**用量少**，技术**门槛高**，开发**周期长**，研发**成本高**，一般不在工业界研发，主要集中在欧美国家实验室和相关高校。
- ✓ 国外提供芯片的公司：IDEAS和NOVA等；

● 国内

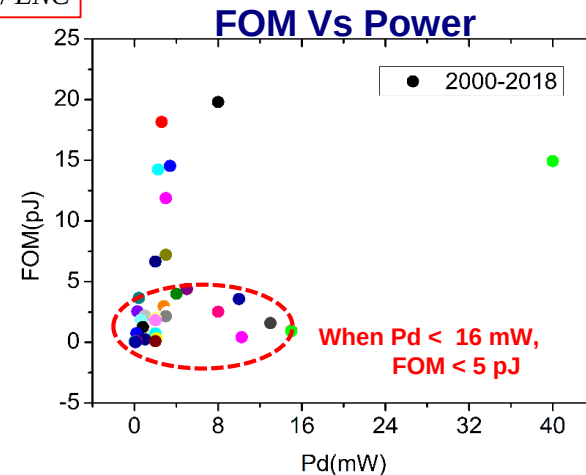
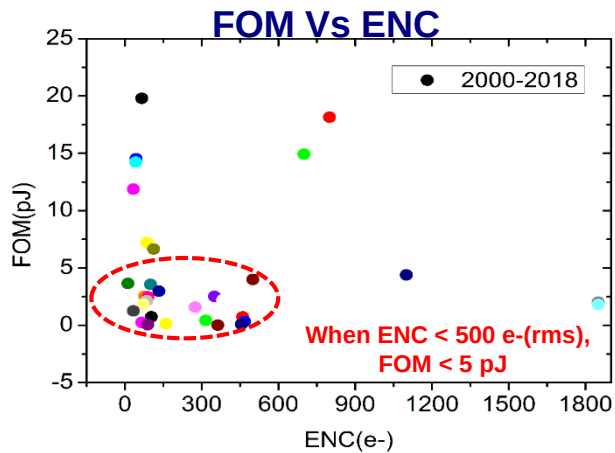
- ✓ 开发起步于2006年，传统核电子学优势单位开展了ASIC研发，已有**少量应用**；
- ✓ 高性能的大通路(>128)、抗辐射ROIC、大阵列像素型ASIC和MAPS等基本上**依赖进口**。

数据来源：2000-2021年期间公开发布的辐射探测器前端读出ASIC

前端读出ASIC性能综述

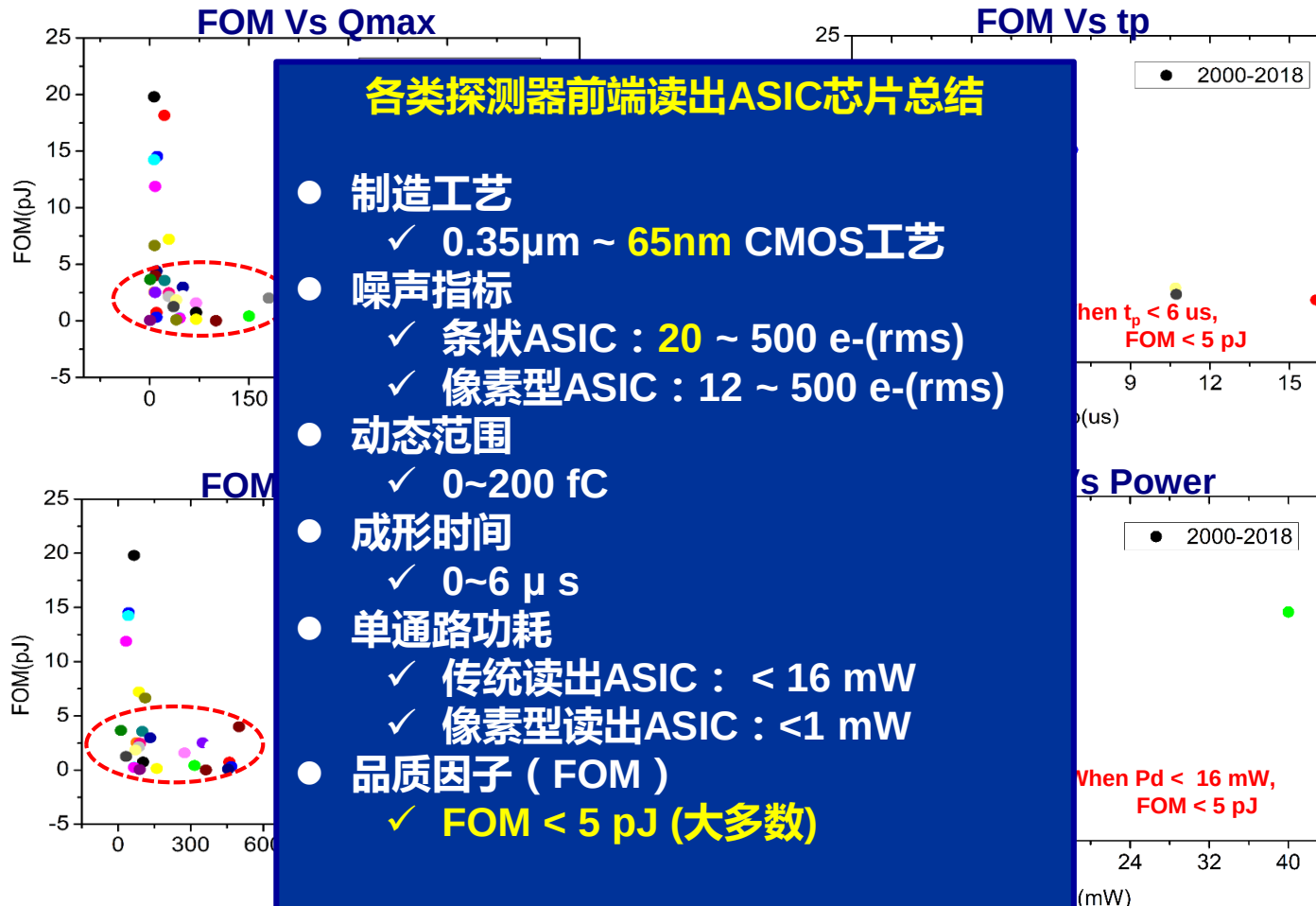


$$FOM_{roc} = \frac{P_d \cdot \tau_p}{Q_{\max} / ENC}$$



数据来源：2000-2018年期间公开发布的辐射探测器前端读出ASIC

前端读出ASIC性能综述

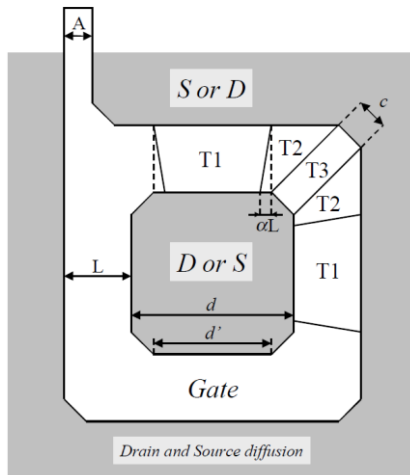


前端读出ASIC抗辐射加固技术

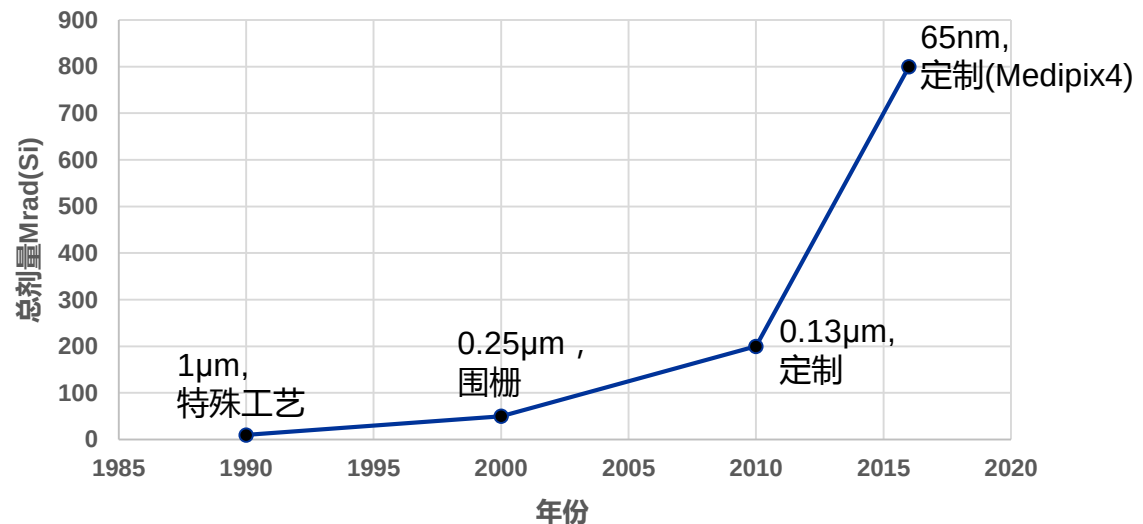
□ 抗总剂量加固方法

- 方法1：采用抗辐射工艺
- 方法2：采用标准工艺加固设计
- 方法3：采用定制器件和模型

年份	工艺/nm	TID/Mrad(Si)	加固
1990	1000	10	方法1
2000	250	50	方法2
2010	130	200	方法3
2016	65	800	方法3



ASIC抗总剂量性能指标



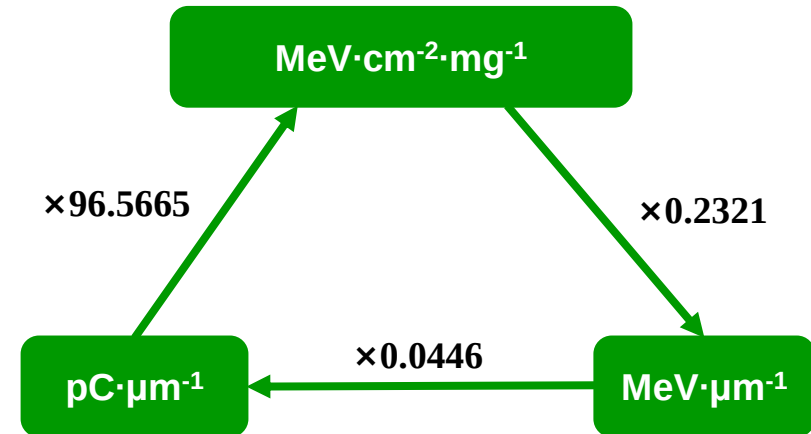
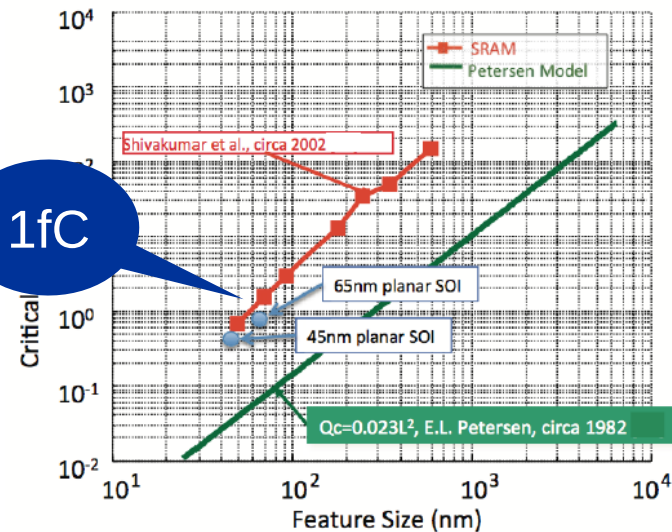
(IC for HEP white paper 2013)

前端读出ASIC抗辐射加固技术

□ 抗单粒子翻转加固方法

- 方法1：多模冗余
- 方法2：特殊电路结构
- 方法3：版图加固

抗辐射加固关注的重点



$$1 \text{ pC} \cdot \mu\text{m}^{-1} \approx 100 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{mg}^{-1}$$

□ 节点尺寸缩小

□ LET阈值降低

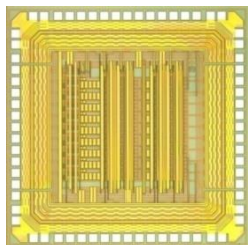
□ 多位翻转、多单元翻转



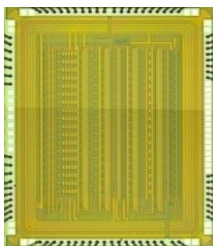
西工大低噪声前端读出ASIC

研发历程

- 国内平台、国内人员、国内工艺、全正向设计
- 工艺：TSMC 0.35 μ m, CSMC 0.35 μ m, TSMC 180nm, SMIC 180nm
- 探测器：CZT、APD、Si-PIN、SDD等
- 关键技术：低噪声、抗辐射



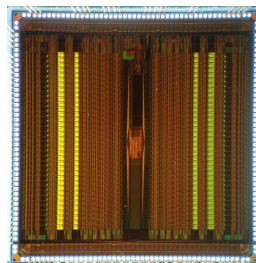
单路前端读出原理样片 (2012)



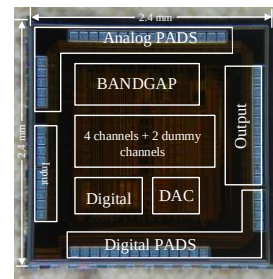
16路模拟读出原理样片 (2013)



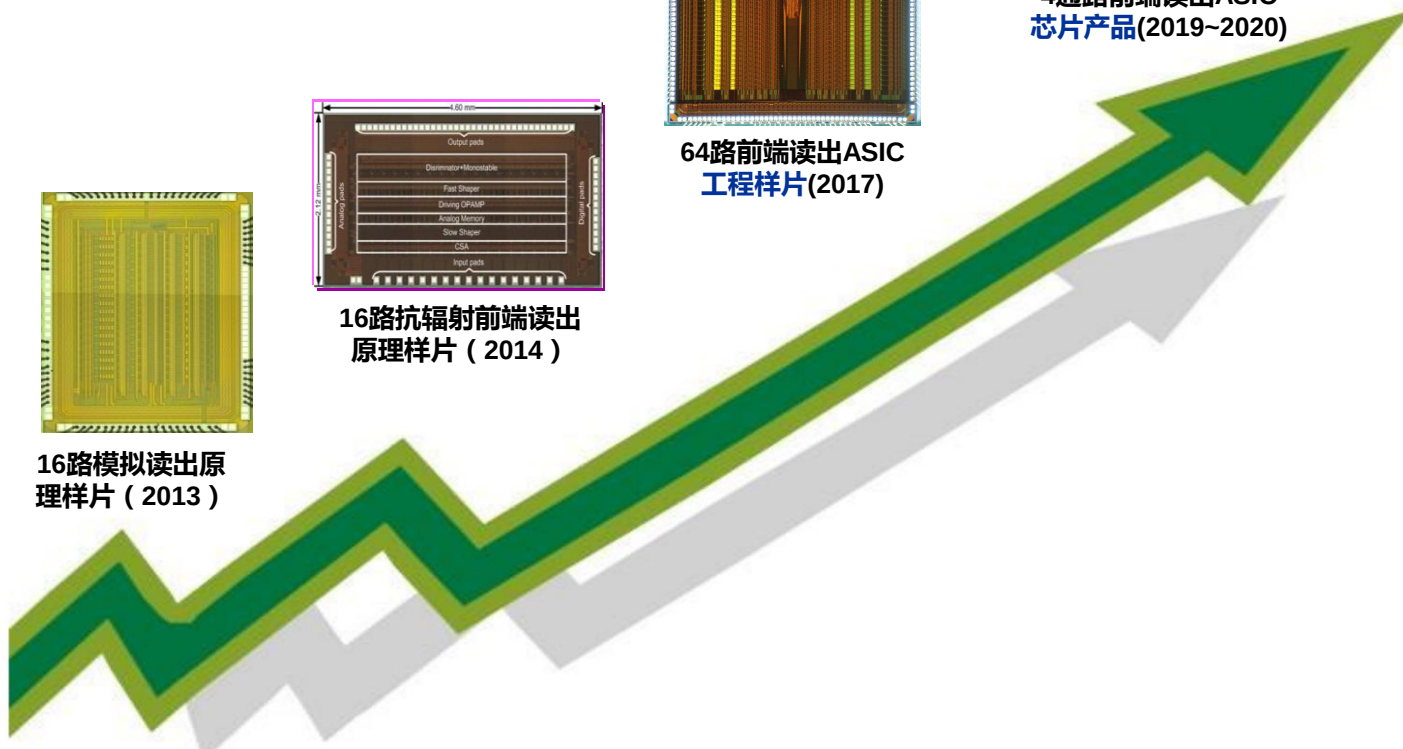
16路抗辐射前端读出原理样片 (2014)



64路前端读出ASIC工程样片(2017)



4通路前端读出ASIC芯片产品(2019~2020)

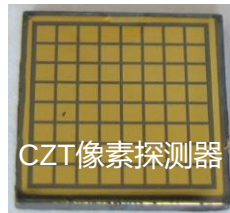
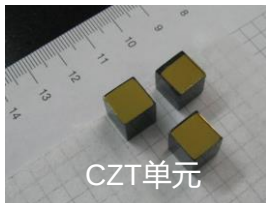




第一阶段：艰难探索

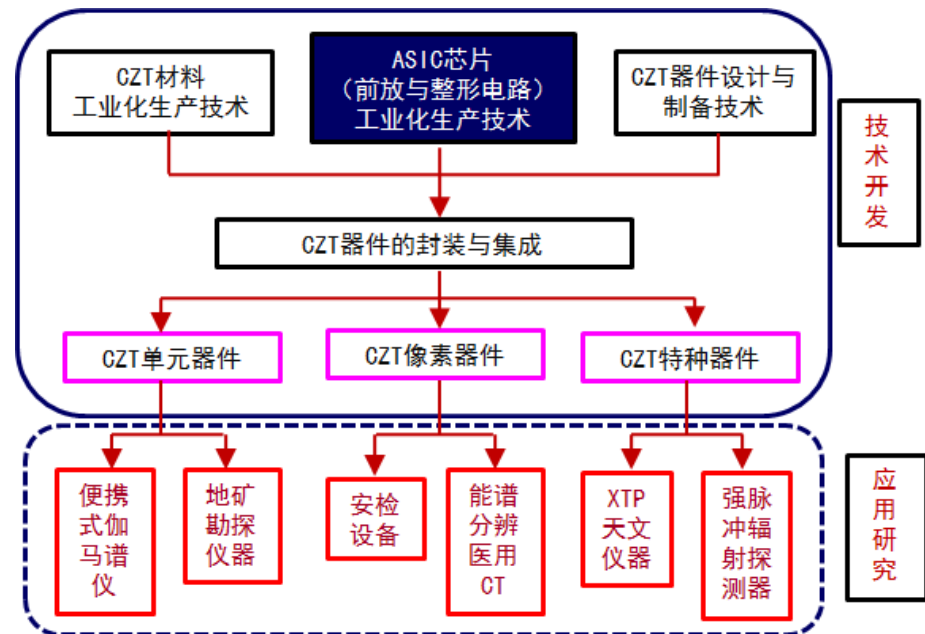
碲锌镉探测器前端读出ASIC

□ 国家重大科学仪器设备开发专项→任务二：CZT探测器前端读出大规模集成电路研究(2011-2016)



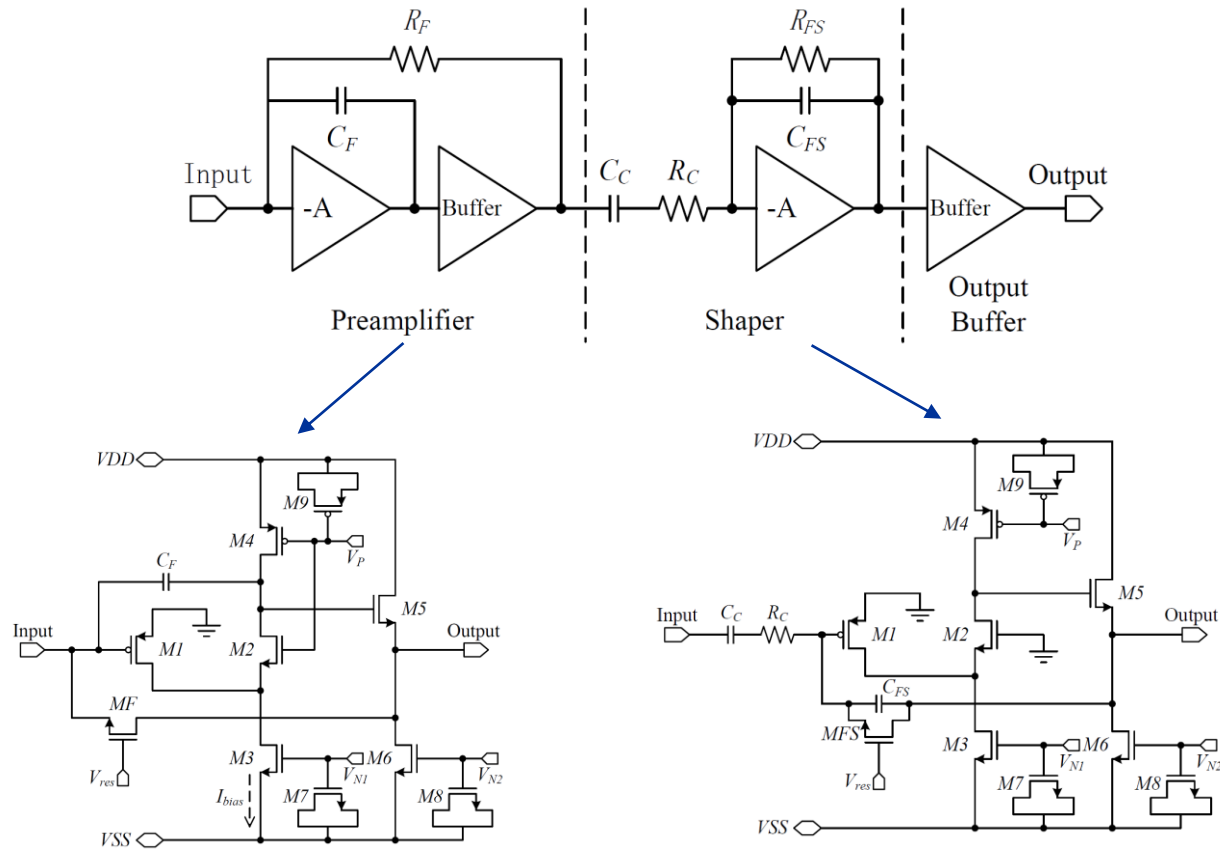
CZT features

- Bias voltage → several hundred Volts (~500V)
- Leakage current → 5 nA @ 100V for single device; ~100 pA @100 V for pixilated devices.
- Detector capacitance → 5pF for single devices; ~1 pF /pixel for pixel devices.
- The average signal charge → $Q_s = (E/E_i)e$, where $E_i = 4.65 \text{ eV/ehp}$



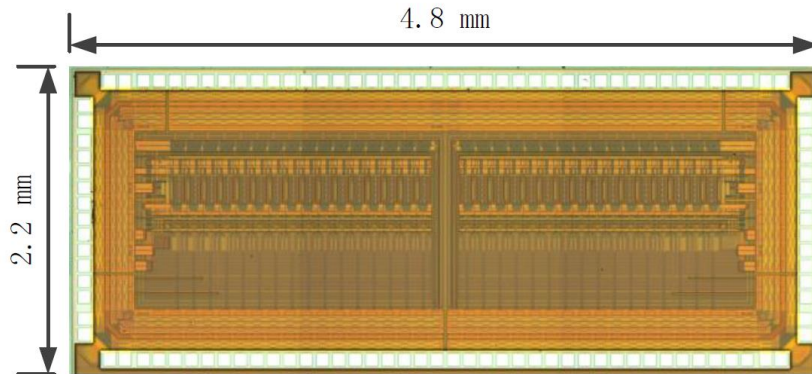
碲锌镉探测器前端读出ASIC

□ 方案一：单端共源共栅+单端共源共栅 (2012)



碲锌镉探测器前端读出ASIC

□ 32通路CSA-Shaper ASIC实验结果

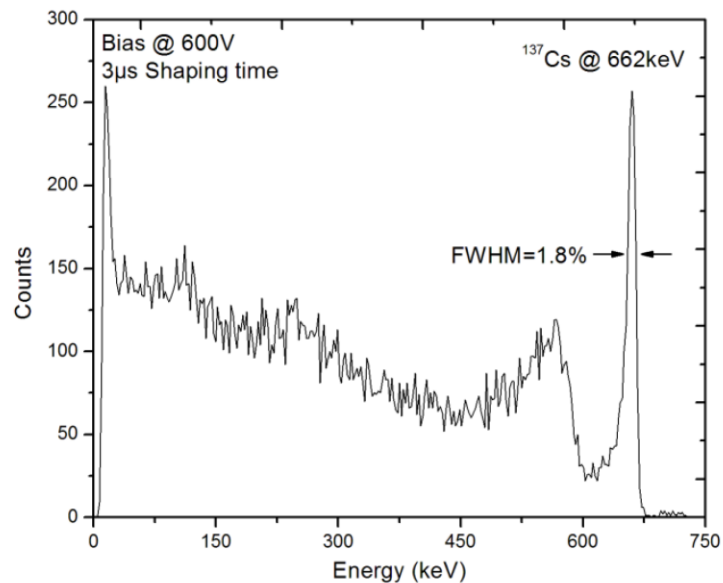
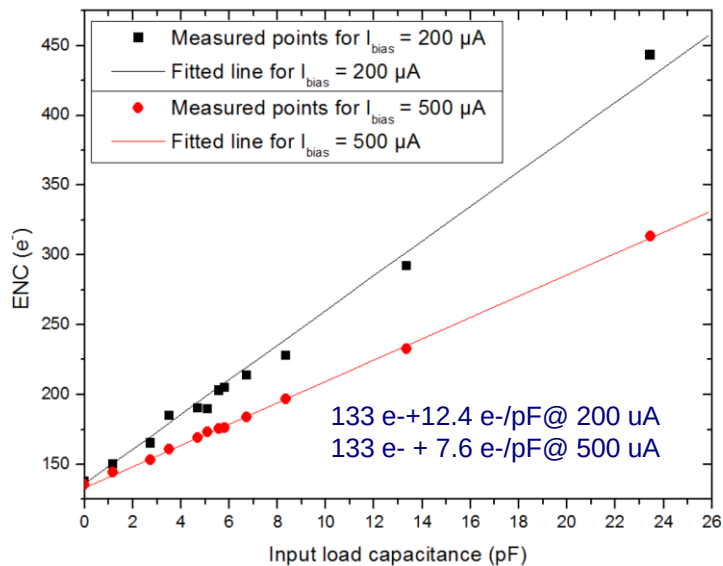


(2012)

Parameter	SENSROC1
Process(μm)	CMOS 0.35 μm 3.3V
Die size	2.0 mm $\times$ 2.0mm
Power Supply (V)	± 1.65 V
Channel. No.	32
Input range(fC)	-50 ~ 50 fC
ENC (rms)	133 e-+12.4 e-/pF@ 200 μA 133 e- + 7.6 e-/pF@ 500 μA
Application	CZT Detector

碲锌镉探测器前端读出ASIC

□ 32通路CSA-Shaper ASIC实验结果



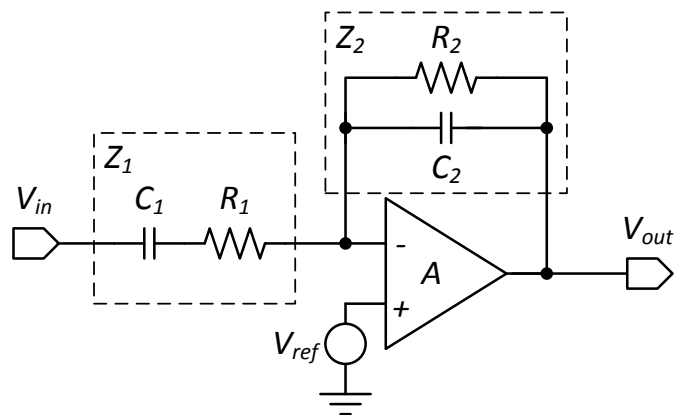
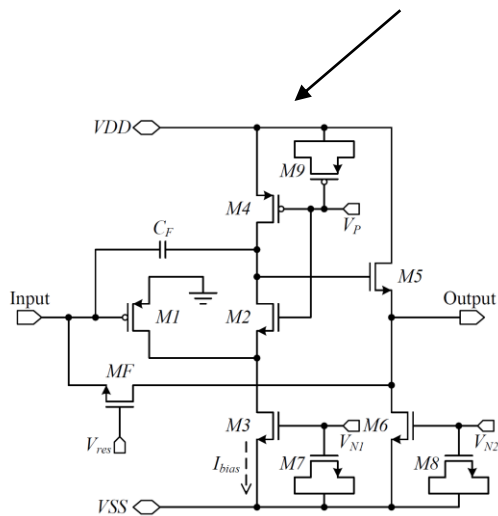
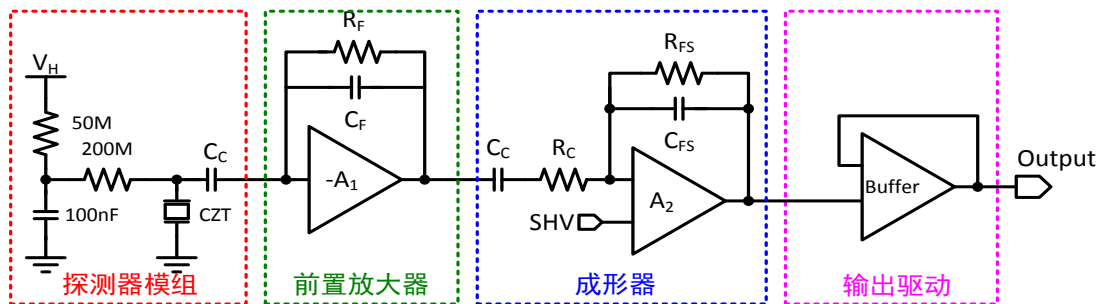
□ 基线不稳定

□ 电源噪声干扰大

□ 噪声测试无经验

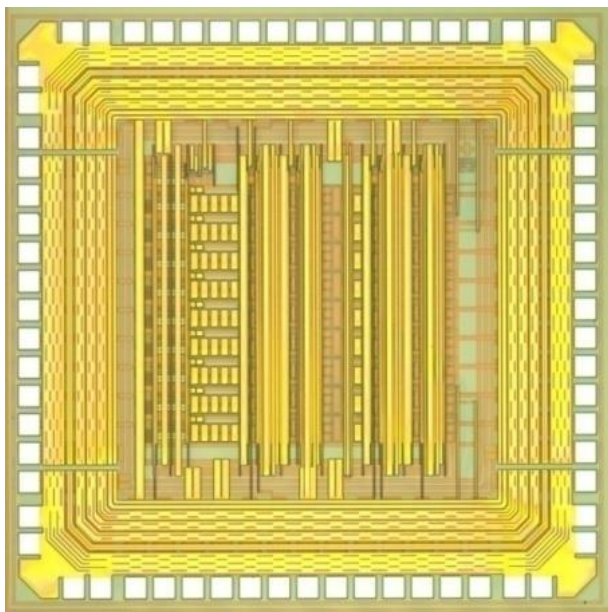
碲锌镉探测器前端读出ASIC

□ 方案二：单端共源共栅+差分运放 (SENSROC2, 2013)



碲锌镉探测器前端读出ASIC

□ 8通路前端读出ASIC实验结果

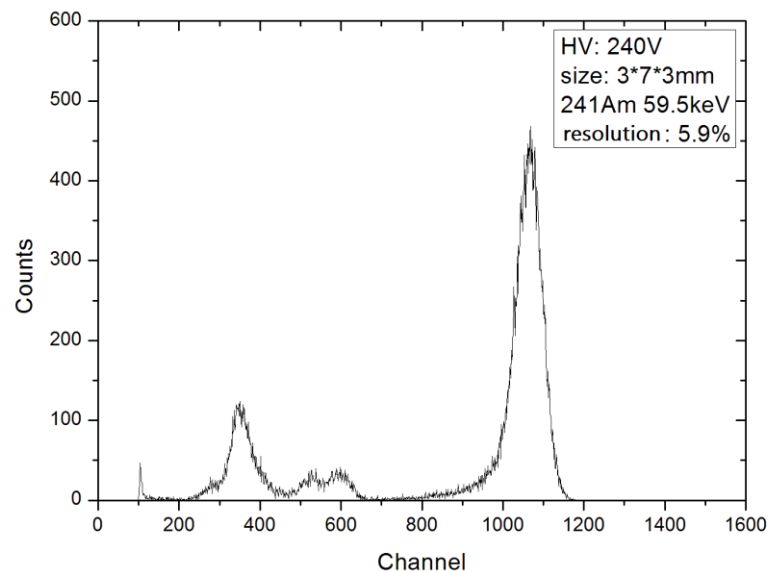
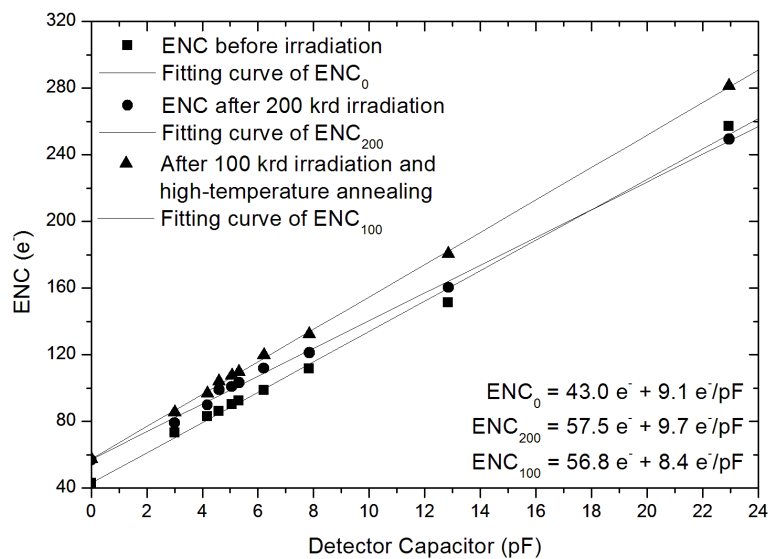


(2013)

参数	性能指标(SENSROC2)
Detector Module	CZT晶体 (3mm × 7mm× 3mm) CZT晶体 (5mm × 5mm× 2mm)
Process	CMOS 0.35um 3.3V MS
Die size	2.0 mm × 2.0 mm
Power Supply (V)	±1.65 V
Input range(e-)	2k~60k
ENC (rms)	57.5 e-+9.7e-/pF (after 200krad(Si) TID)
Radiation Hardness	TID: 200k rad (Si)
Application	CZT/Si-PIN Detector

碲锌镉探测器前端读出ASIC

□ 8通路前端读出ASIC实验结果



□ ENC受辐射TID影响小

□ 能谱未达到5%

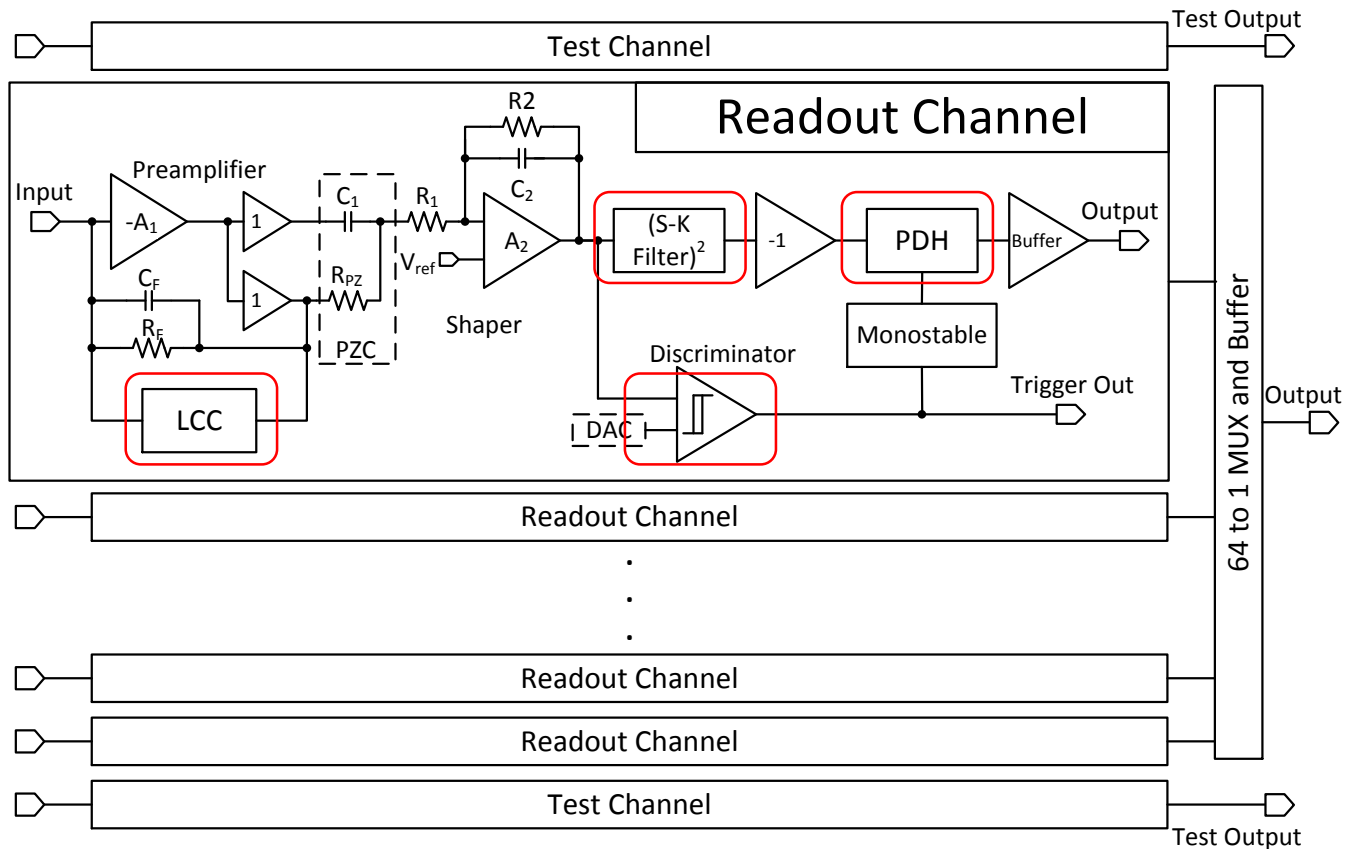
□ 滤波不完全、堆叠严重



第二阶段：初获成功

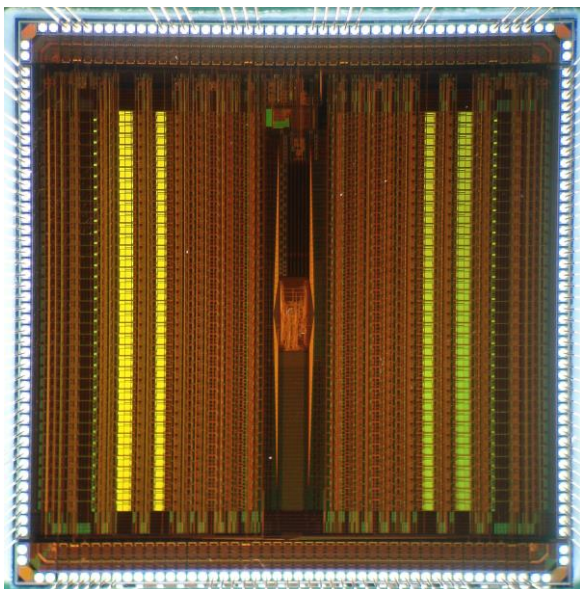
低噪声多通路前端读出ASIC

□ 方案三：能谱型多通路读出ASIC（兼容VA64TA2、RENA3）



低噪声多通路前端读出ASIC

□ 64路前端读出ASIC实验结果



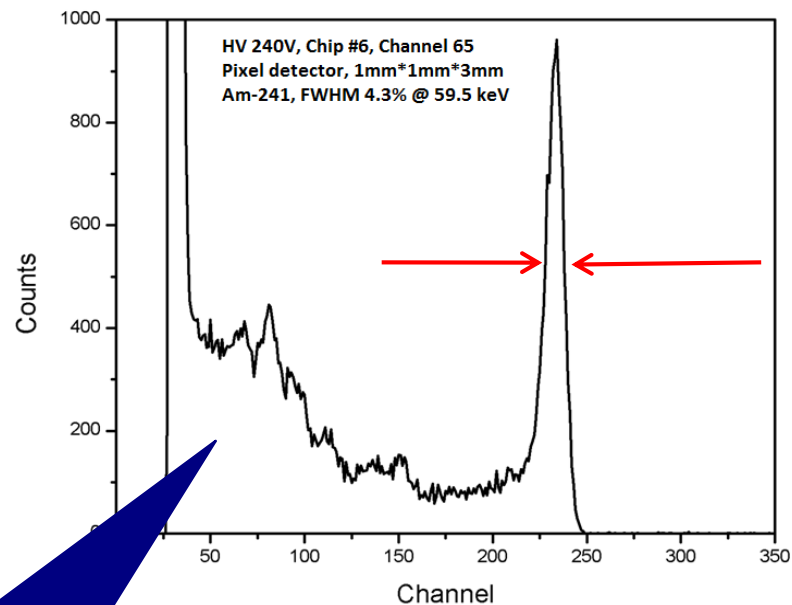
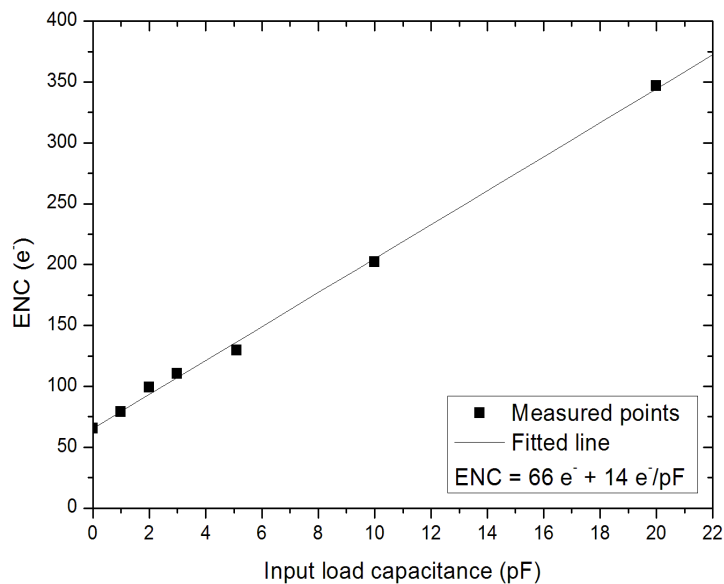
(2016)

参数	性能指标(SENSROC10)
Detector	8×8阵列CZT晶体 (1mm × 1mm× 3mm)
Process(μm)	CMOS 0.35um 3.3V MS
Channel No.	64
Input range(e-)	2k~247k
ENC (rms)	66 e-+14e-/pF (tested)
Consistency	< 3 %
功耗	9 mW/channel

功耗大

低噪声多通路前端读出ASIC

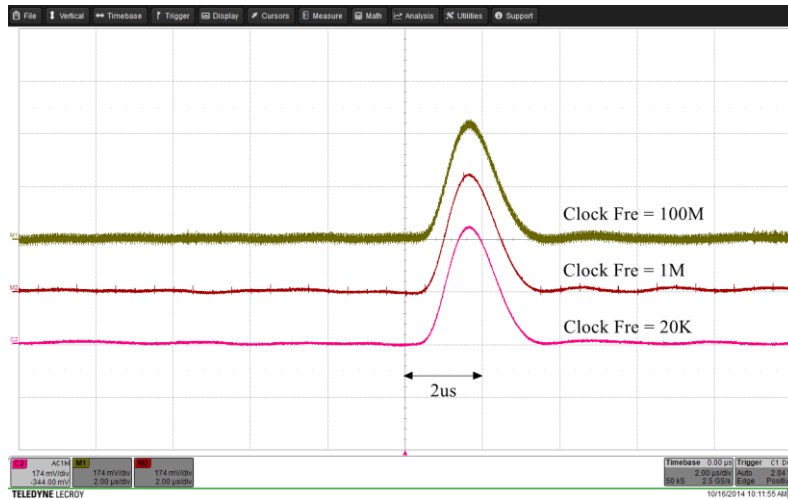
□ 64路前端读出ASIC实验结果



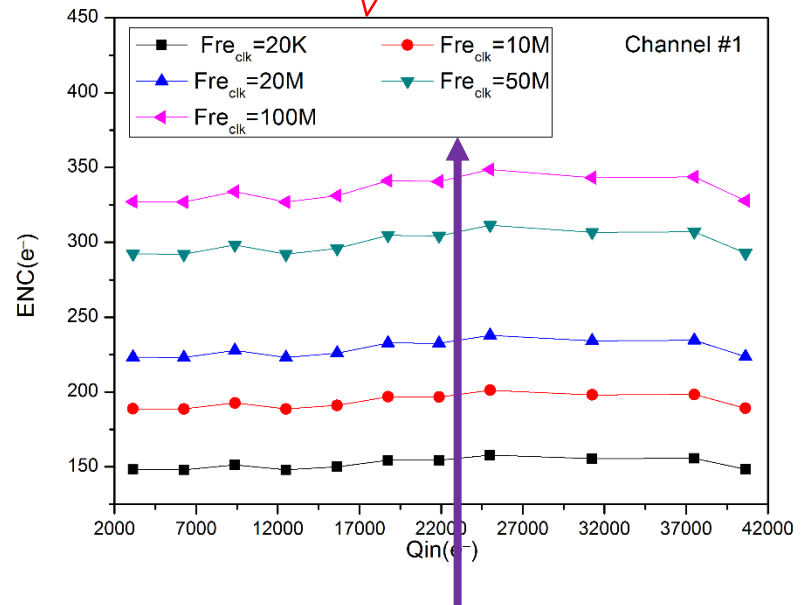
4.3% , 工程化应用

低噪声多通路前端读出ASIC

□ 数字电路时钟频率对ENC影响



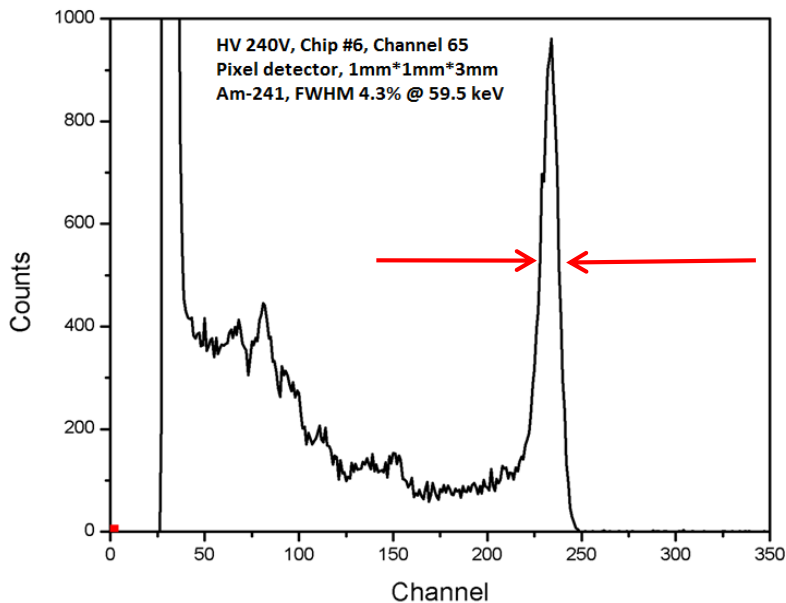
新问题



低噪声多通路前端读出ASIC

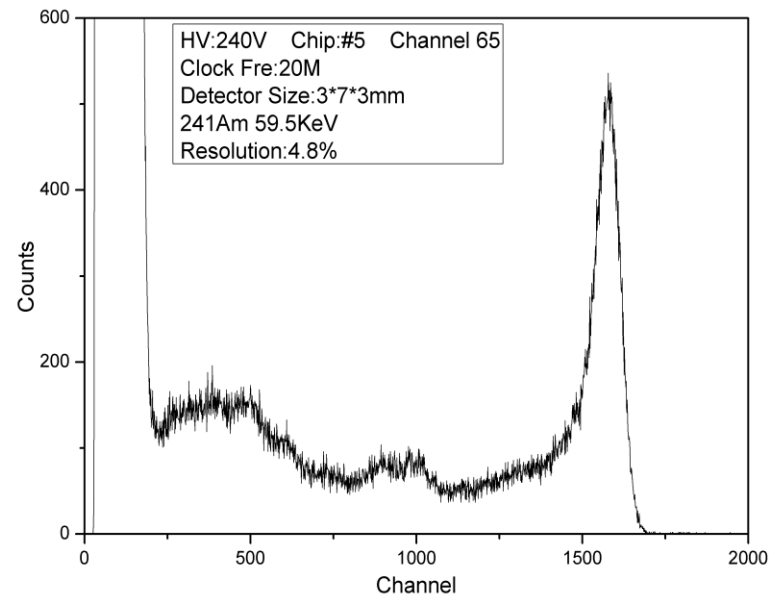
□ 数字电路时钟频率对能量分辨率影响

Without Clock



增加模拟电路PSRR

With 20MHz Clock

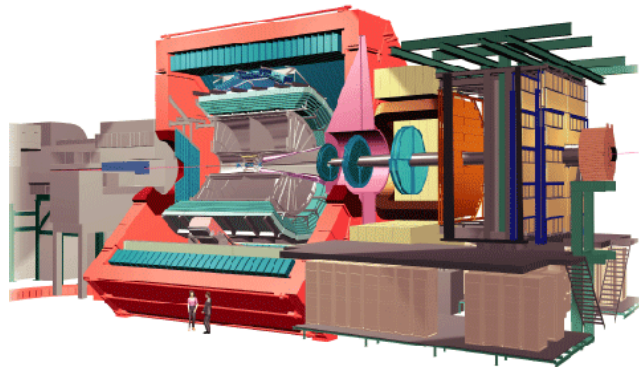


模拟和数字电路隔离



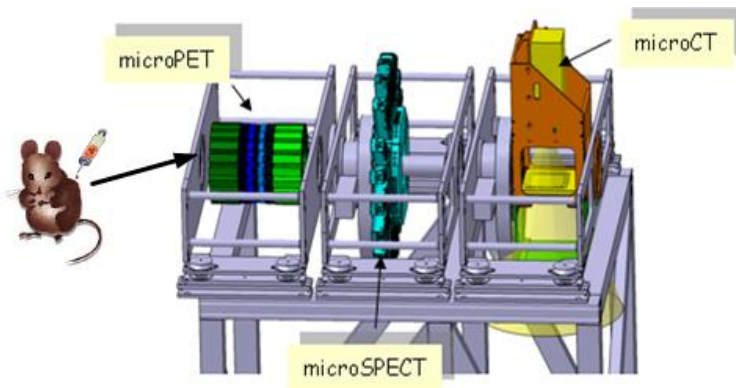
第三阶段：走向应用

关于ASIC应用的思考？



- 高能物理对撞机 → LHC, CERN
- Inner track → 266 SDD detectors
→ 266×512 channels

□ 2080颗 64-channel ASICs



- 医学成像扫描仪
- PET Detector module → 32×32
PMT detectors → $8 \times 32 \times 32$
channels

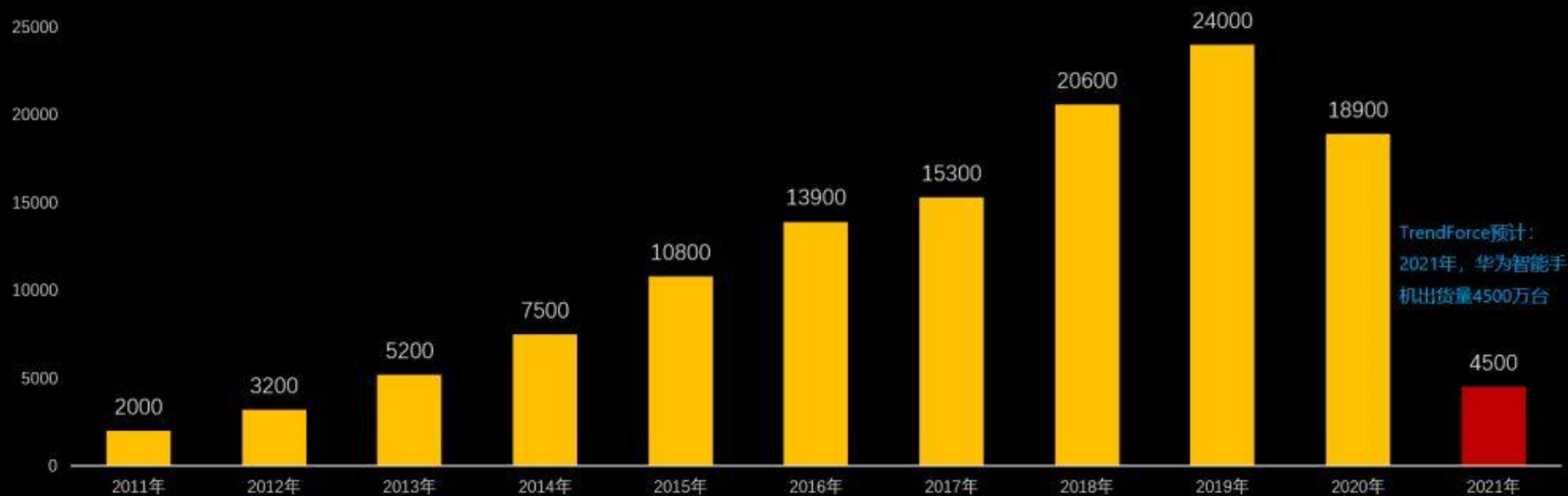
□ 256颗 64-channel ASICs



关于ASIC应用的思考？

从2011至2021年，华为智能手机全球出货量

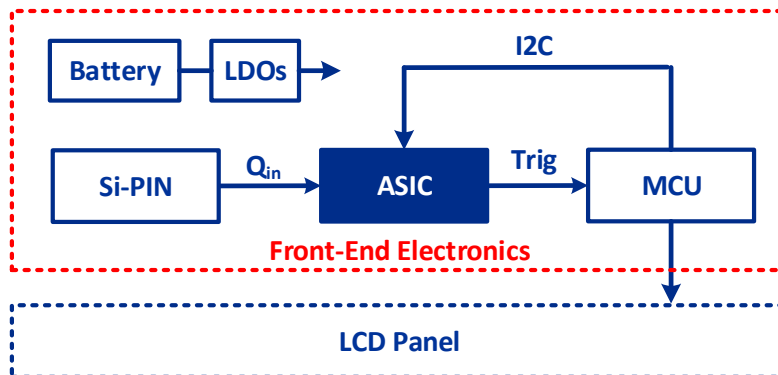
单位：万台



电子个人剂量仪前端读出ASIC

□ 电子个人剂量仪

- ✓ 医院和实验室电离辐射监测
- ✓ 核电站辐射泄漏监测
- ✓ 放射材料找寻
- ✓ 战士核安全防护
- ✓ 其他应用.....

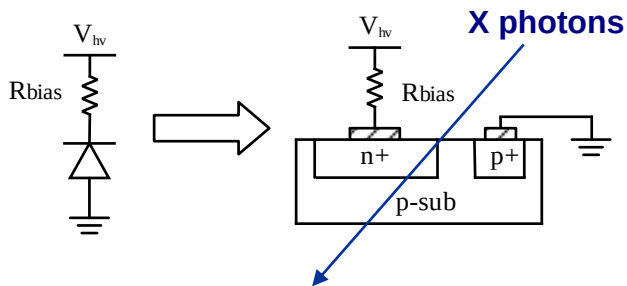


Main requirements

- Energy spectrum ($\pm 30\%$, ^{137}Cs)
- Energy range (48 keV ~ 7 MeV)
- Dose (1 μSv ~ 1 Sv) / Dose rate range (1 $\mu\text{Sv/h}$ ~ 1 Sv/h)
- Temperature (-40-85 °C)
- Low power dissipation

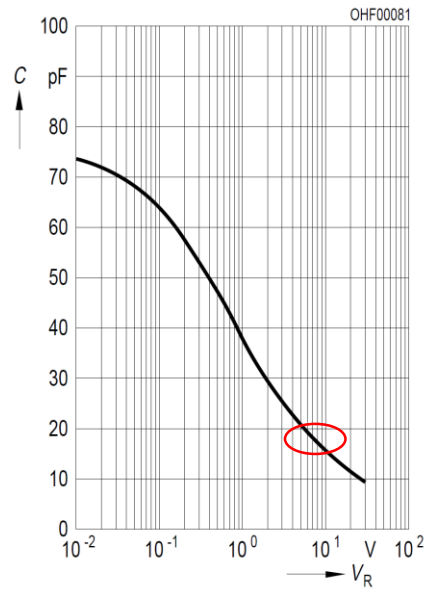
电子个人剂量仪前端读出ASIC

□ 商用Si-PIN探测器



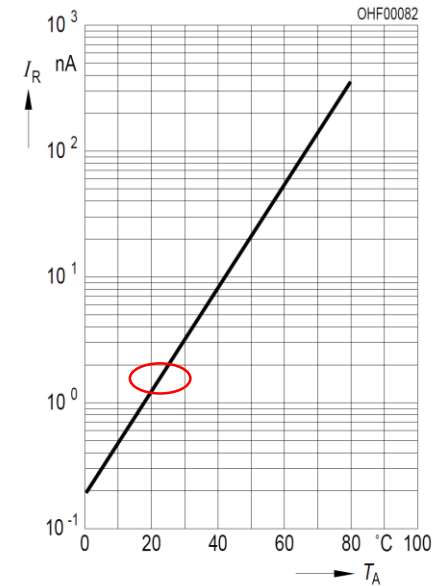
Capacitance

$$C = f(V_R), f = 1 \text{ MHz}, E = 0$$



Dark current

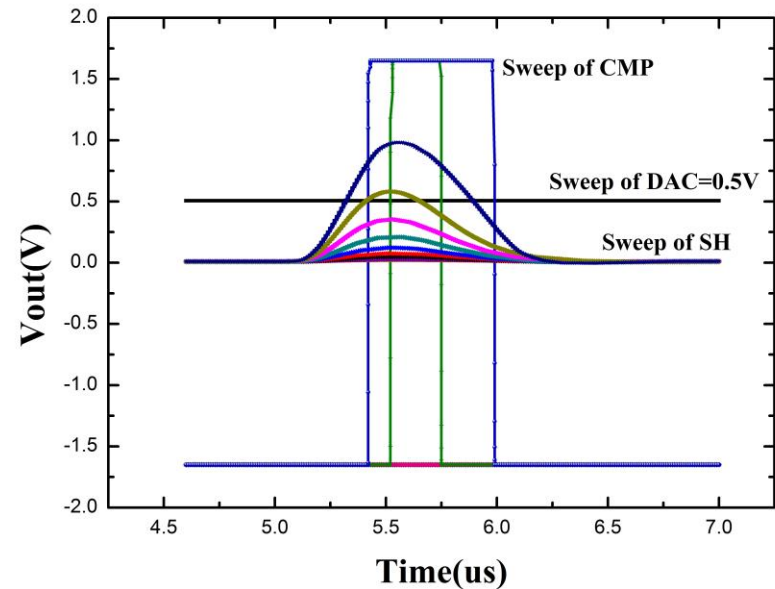
$$I_R = f(T_A), V_R = 10 \text{ V}, E = 0$$



电子个人剂量仪前端读出ASIC

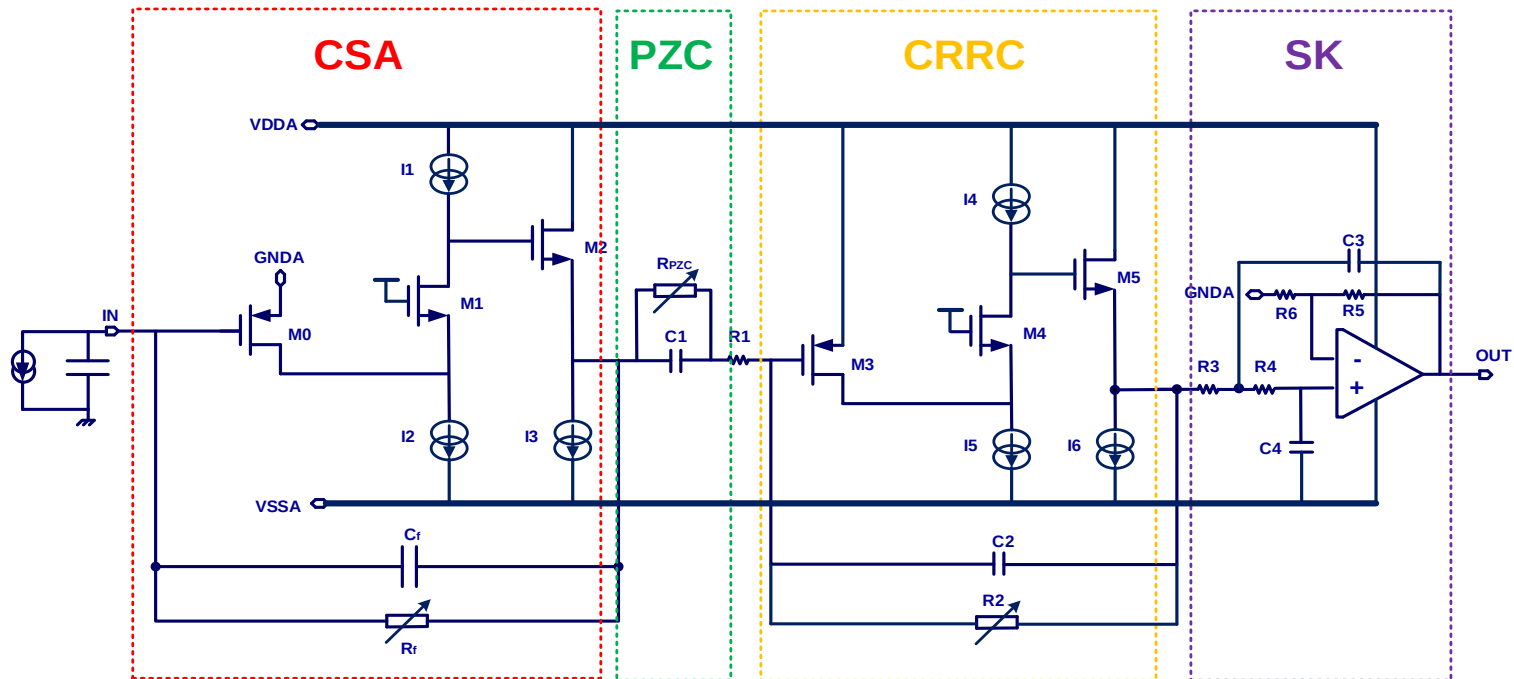
ASIC性能需求

Parameters	Performance
Power Voltage	3.3 V
Channel No.	4 channel
Detector Cap.	20 pF
Input Charge Range	0.2 fC ~ 15 fC
Shaping Time	< 1 μ s
Gain	> 60 mV/fC
ENC	< 100 e ⁻ @0 pF
Counting Rate	> 150 kHz
Power Dissipation	1 mW/channel



电子个人剂量仪前端读出ASIC

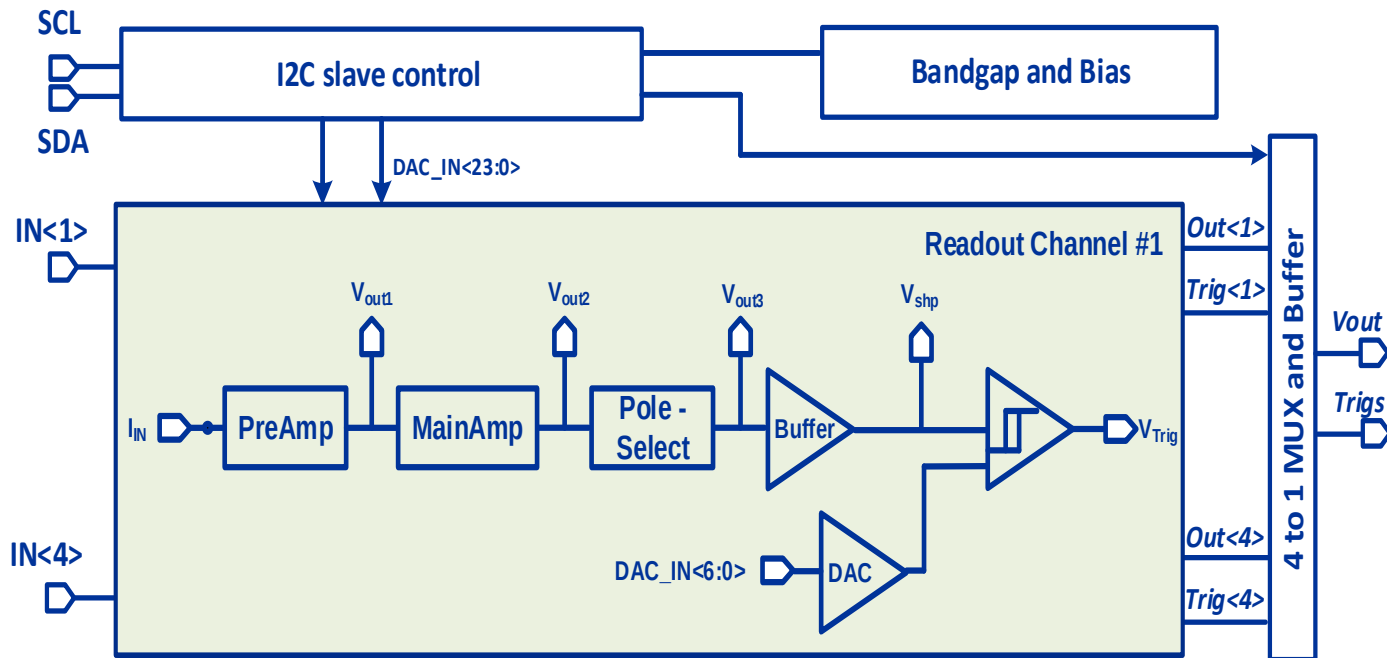
□ 解决方案：CSA+CR-(RC)³



$$H(s) = -\frac{R_f}{1+sC_fR_f} \cdot \frac{1+sC_1R_{pzc}}{R_{pzc}} \cdot \frac{sA_{v0}}{(1+s\tau)^4}$$

电子个人剂量仪前端读出ASIC

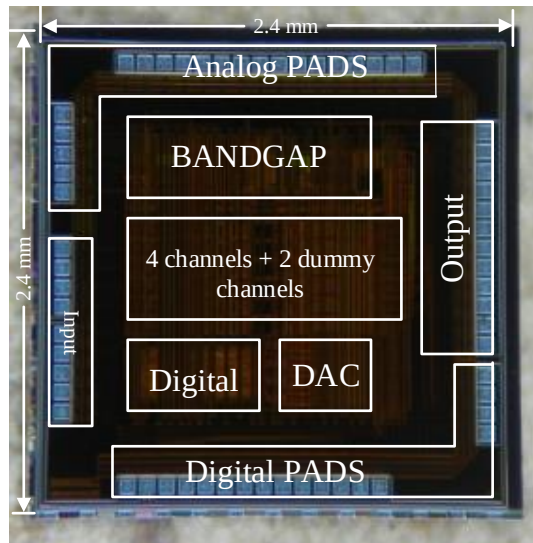
ASIC电路架构



(TNS, 2019)

电子个人剂量仪前端读出ASIC

□ 4通路低功耗低噪声前端读出ASIC实验成果



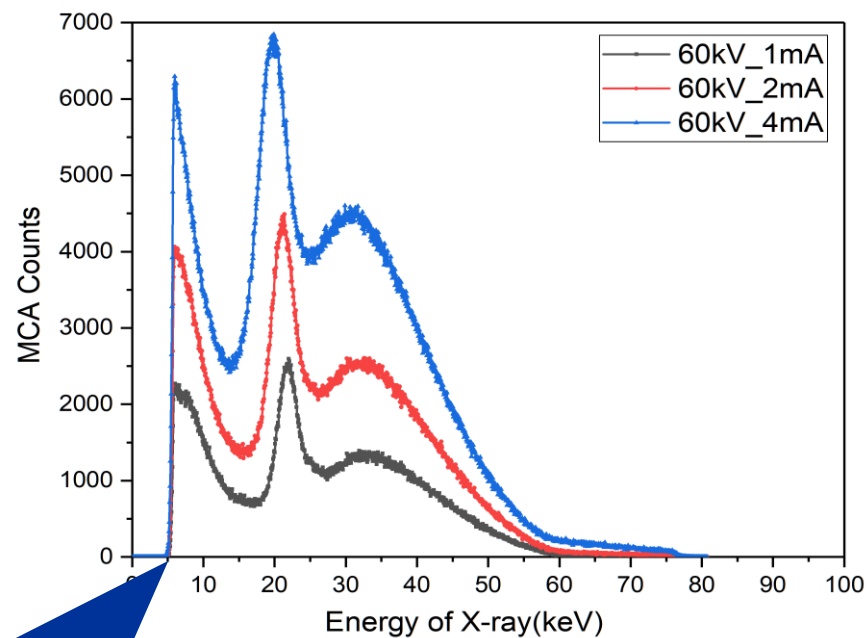
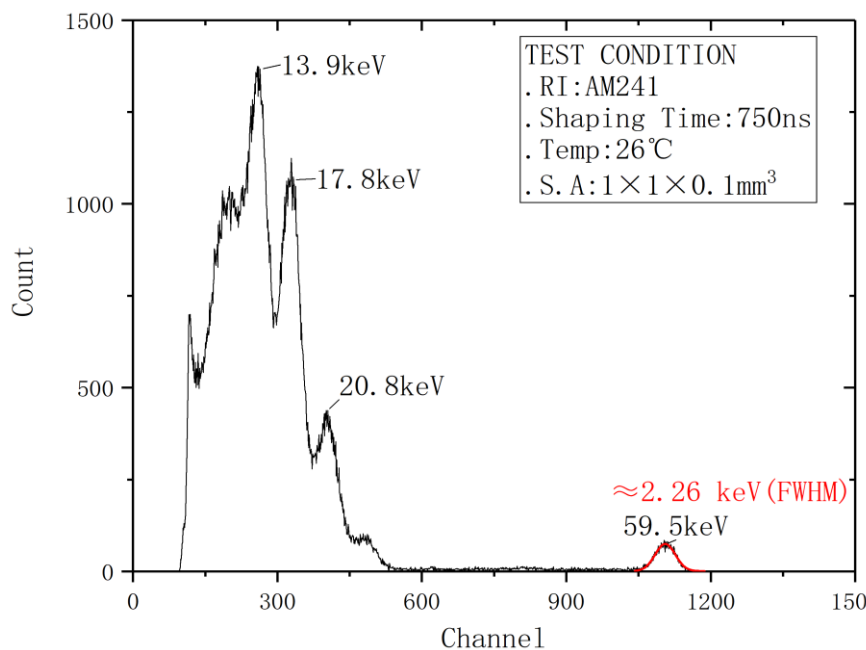
FOM=0.59 pJ

参数	性能指标
探测器	Si-PIN探测器 (2.7mm×2.7mm×3mm)
Process	CMOS 0.35μm 3.3V MS
die size	2.4 mm× 2.4 mm
Input Range	0.2 fC -15 fC
Linearity	< 3%
Gain	>60 mV/fC
ENC	119 e ⁻ + 5 e ⁻ /pF
Count rate	150 kCPS
Power Diss.	1.25 mW/channel
Application	Electronic Personal Dosimeter

(TNS, 2019)

电子个人剂量仪前端读出ASIC

□ 4通路低功耗低噪声前端读出ASIC实验成果

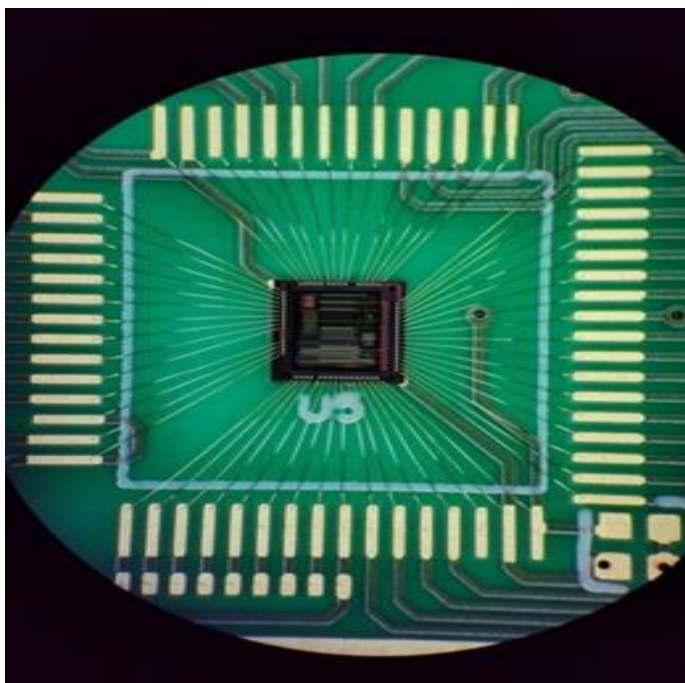


室温下，探测下限小于5keV

(NSS/MIC, 2020)

电子个人剂量仪前端读出ASIC

□ 4通路低功耗低噪声前端读出ASIC应用



芯片封装



芯片应用

5000颗/年

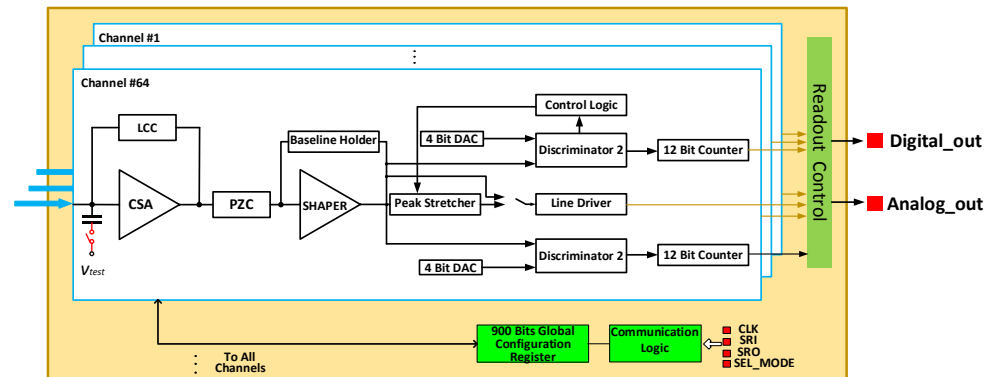
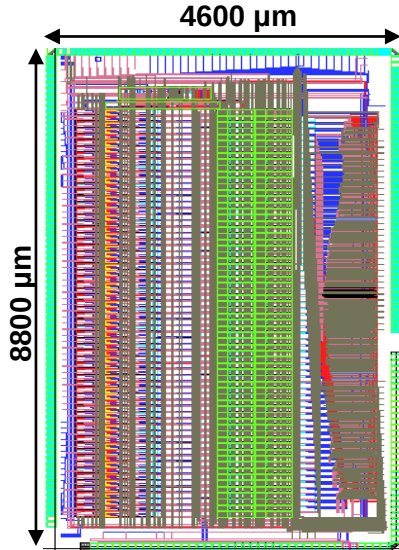
下一步工作1：超低噪声计数型多路读出ASIC

□ 电路结构

- ✓ 电荷积分式模拟前端
- ✓ 高分辨计数器

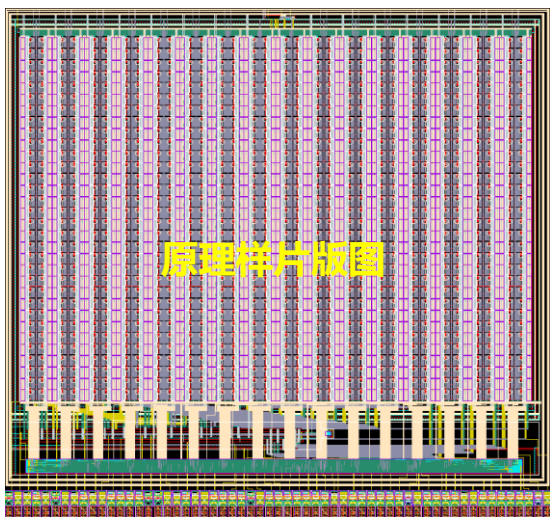
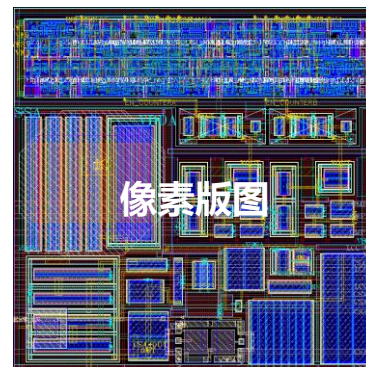
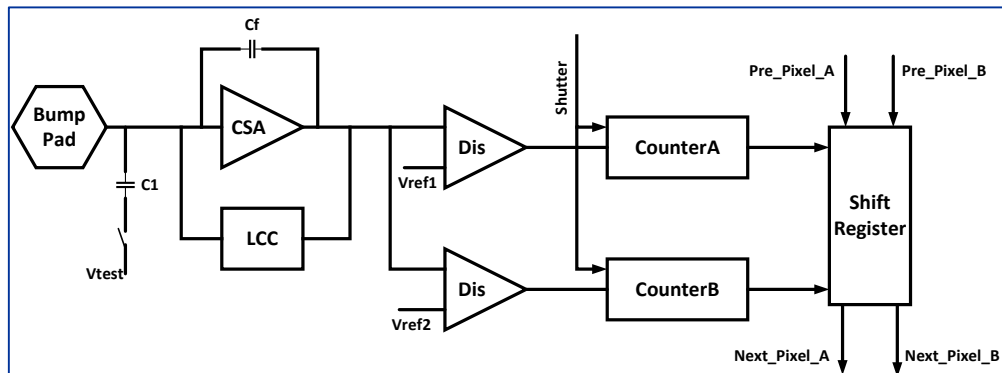
□ 主要特点

- ✓ 超低噪声： $29\text{ e}^- + 5\text{ e}^-/\text{pF}$
- ✓ 双计数器：12 位
- ✓ 事件驱动读出



参数	仿真结果
Process	CMOS 0.35 μm
Detectors	Si-PIN Detector
Power supply	3.3 V
Die size	4.6 mm $\times$ 8.8 mm
Energy range	0.08~1 fC
Shaping time	0.1, 0.2, 0.4, 0.7 μs
Linearity	<2.5%
Count rate	>1 Mcps
ENC	$29\text{ e}^- + 5\text{ e}^-/\text{pF}$
Power dissipation	<4.5 mW/channel
Application	X-Ray Diffractometer

下一步工作2：高能量分辨X射线成像用二维读出ASIC



参数指标	仿真结果
像素尺寸	75 μm $\times$ 75 μm
阵列大小	32 $\times$ 32
输入范围	0 ~ 10 fC
增益	60 mV/fC
等效输入噪声电荷	113 e ⁻
计数范围	2 $\times$ 6 bits
功耗	42 $\mu\text{W}/\text{pixel}$
计数率	> 500 k/pixel
应用	彩色CT成像、天文望远镜

总结与展望

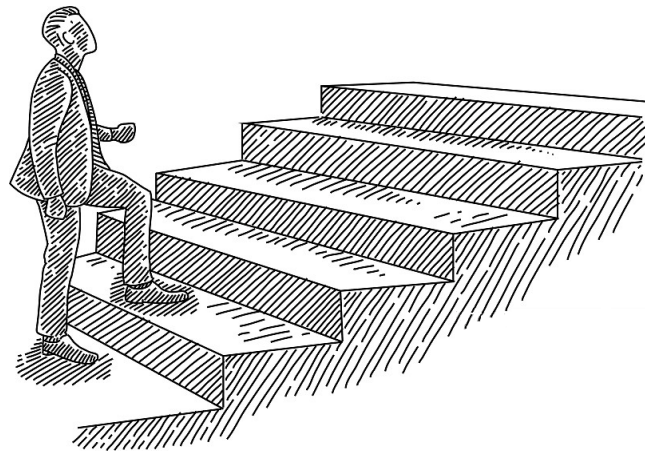
□ 总结

- ✓ 探测器前端读出ASIC的国内外现状与技术动态：**65nm**，**100e⁻**，**1mW/ch**，**800Mrad**
- ✓ 西工大超低噪声前端读出电路十年工作总结：**艰难探索、初步成功、走向应用**
- ✓ ASIC应用的感悟：**瞄准量大市场，不断更新迭代，从简单功能ASIC突破**

□ 展望

- ✓ X射线衍射成像用超低噪声读出ASIC
- ✓ 三维彩色CT和空间X射线成像用像素型读出ASIC

路虽远，行将必至
事虽难，做则必成





请各位专家批评指正

谢谢！