



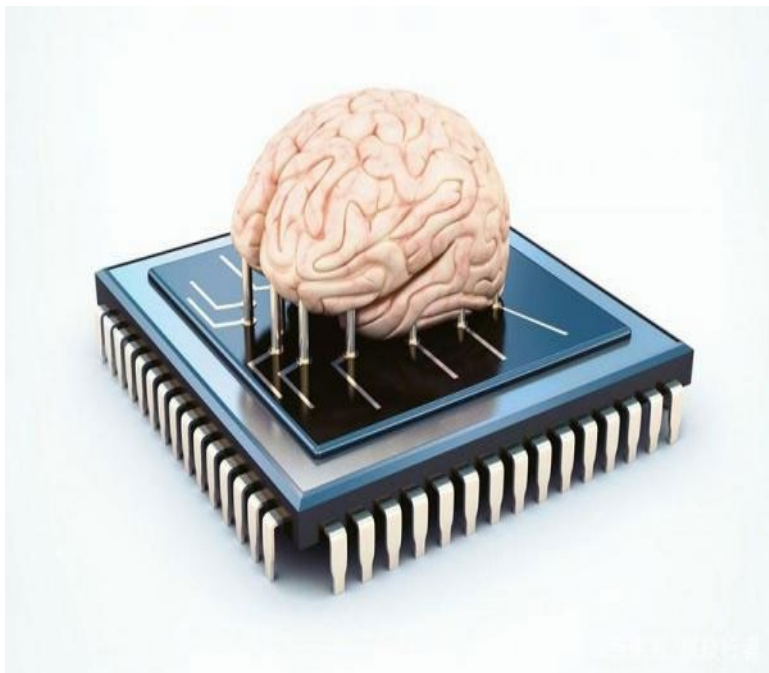
第四届全国辐射探测微电子学术交流会 (NME'2025)

高速率能量分辨多通路光子计数前端读出 ASIC 设计进展

高天龙、张允德、郑关红、窦尧星、高武*

通讯作者: gaowu@nwpu.edu.cn

西北工业大学
2025年7月17日



1

研究背景及需求

2

国内外研究现状

3

近期研究进展

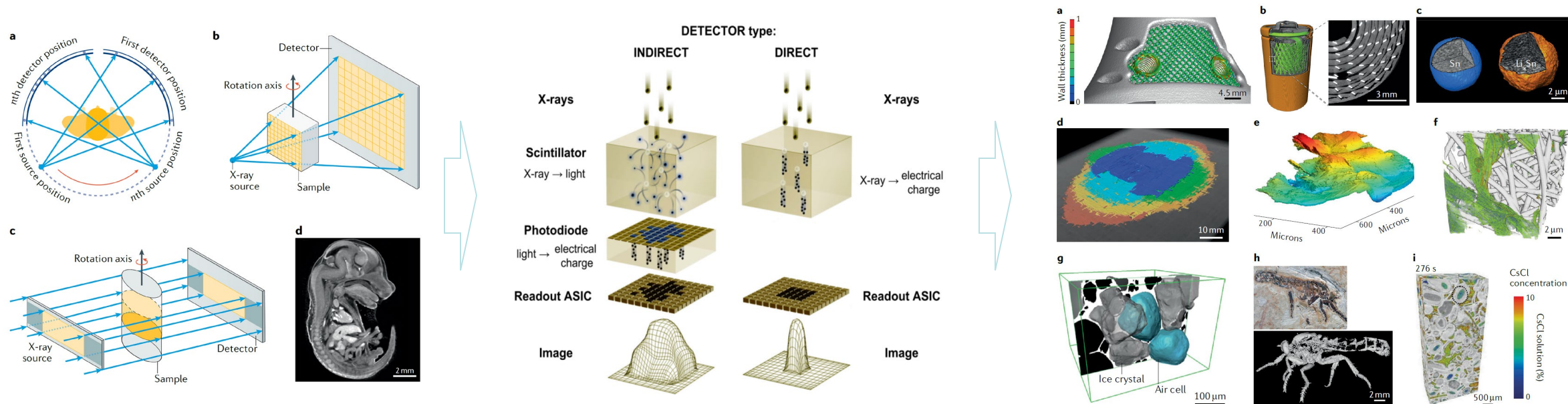
4

总计和展望

研究背景及需求

1 研究背景及需求

□ **计算机断层(CT)成像**: 提供三维分子级成像, 广泛用于医疗、安检、工业无损检测等领域; 光子计数医疗CT→空间分辨率~0.25 mm³, 时间分辨率~100 ms



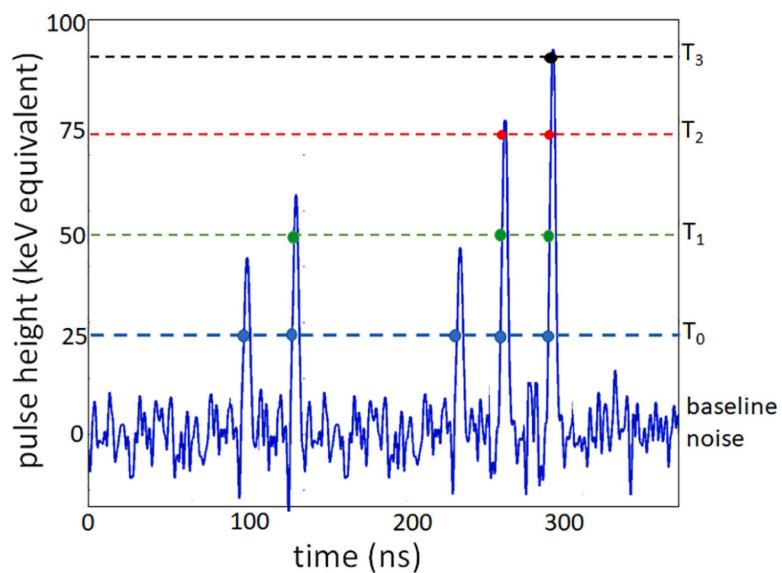
(H. Royce, Nat. Rev, 2022)

技术瓶颈: 探测器像素尺寸物理极限、不同扫描参数(kV等)对定量一致性影响、低剂量检查时图像噪声大、能谱成像仍无法常规应用

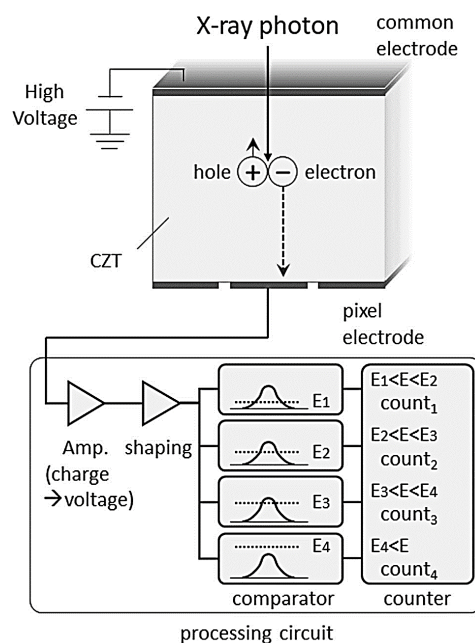
1 研究背景及需求

□ 多能光子计数探测器：由半导体辐射传感器和读出电子学组成，采用邦定或倒装焊连接 → 多能计数型前端处理芯片是实现能谱CT的关键部件

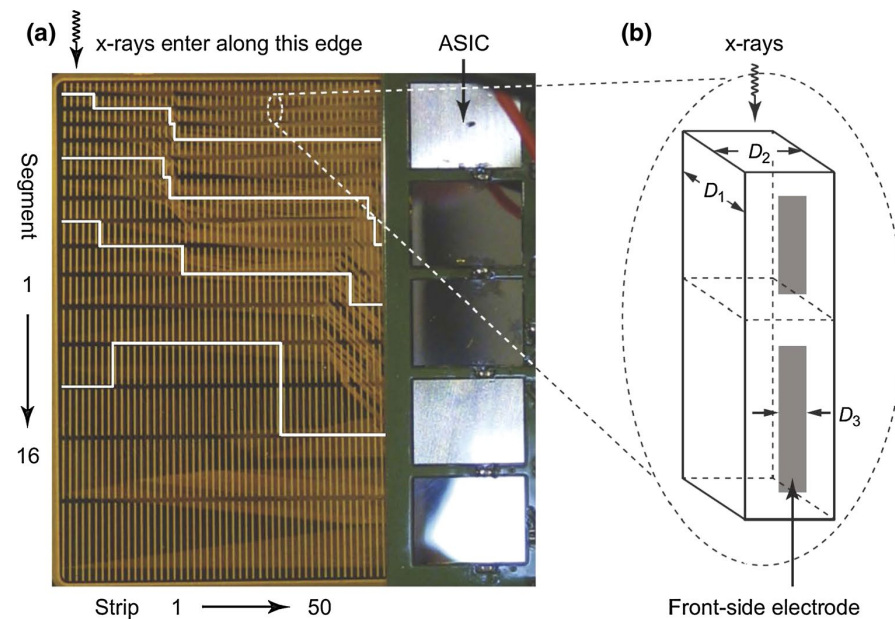
探测原理



CZT探测器



深硅探测器



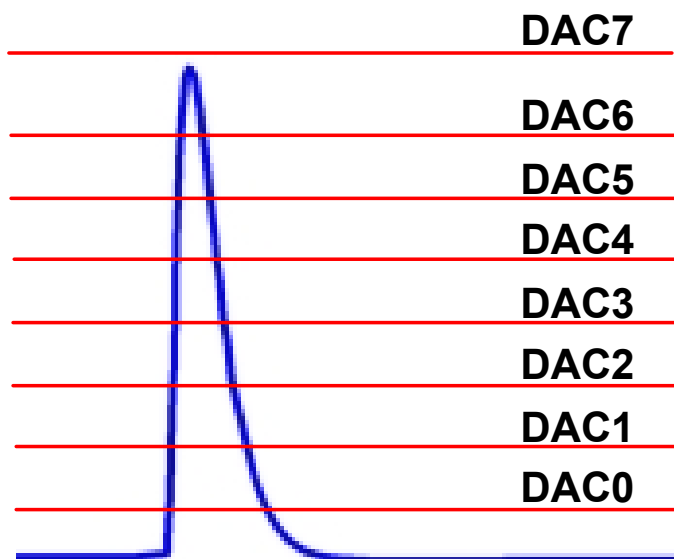
(K.Taguchi, Radiol Phys Technol, Johns Hopkins University,2017)

(Y. Nakamura, Jap. Jour. of Rad., 2023)

1 研究背景及需求

□ 多能光子计数读出电路需求

- 入射X射线计数率 $100\text{Mcps/mm}^2 \rightarrow 10\text{Mcps}$ ASIC计数率
- 多物质分辨需求 $\rightarrow$ 8阈值甄别
- 大像素阵列探测器(384像素) $\rightarrow$ 192通路ASIC



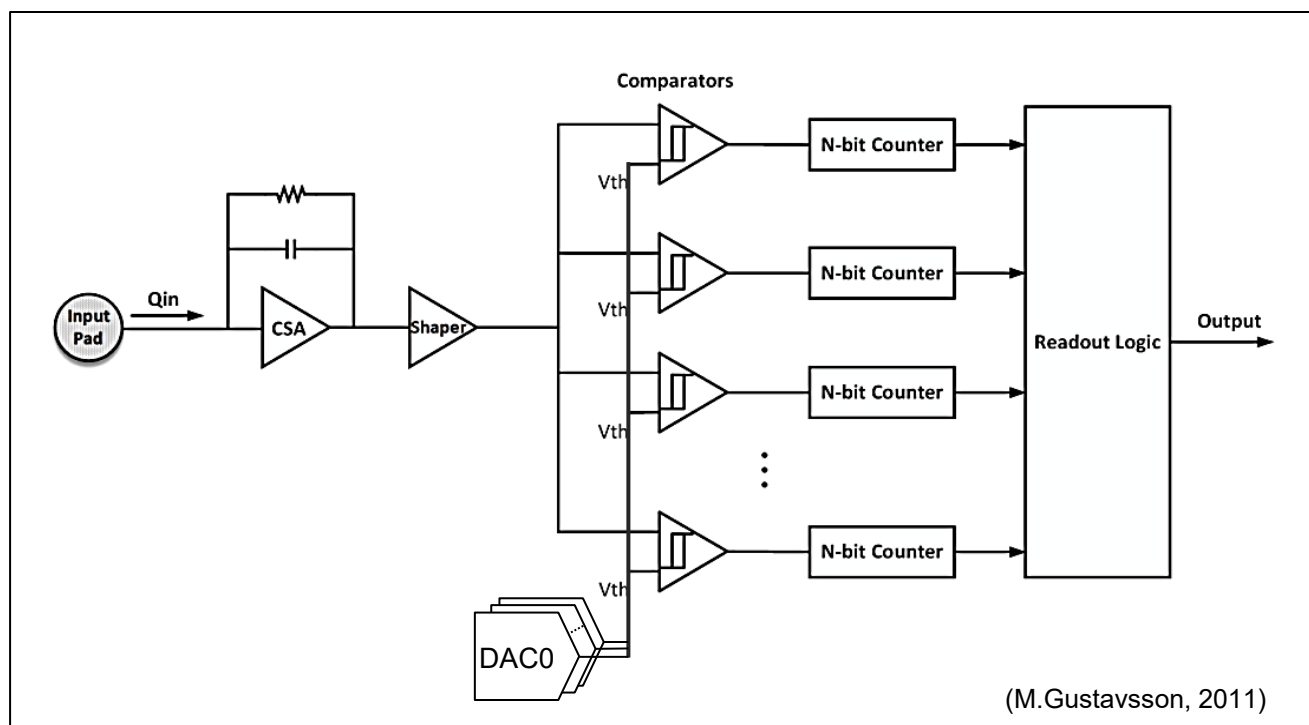
阈值 编号	能量 keV	功能
DAC0	20	噪声过滤
DAC1 DAC2	40~60	软组织/碘分界
DAC3 DAC4	60~90	碘/钙分界
DAC5 DAC6	90~120	高能组织
DAC7	140	能谱上限矫正

(Muhammad, NIM-A, 2019)

1 研究背景及需求

□ 多能光子计数读出电路：探测器模拟前端、多能甄别器、多计数器和读出逻辑

➤ 主要挑战：探测器下限2keV，计数率10Mcps以上，多能甄别



主要参数	指标
电源电压 (V)	1.2
输入电荷范围 (fC)	0.088 ~ 6.2
最大计数率(MCPS/ch)	10
通道数	192
每通道甄别器个数	8
计数率线性度	> 90%
等效噪声电荷	100+10e-/pF
通道一致性	> 90%
功耗 (mW/ch)	< 3
抗总剂量性能 (krad)	200
工作温度范围 (°C)	0 - 75
数据率(Mbps)	200
误码率	0‰
基线保持	< 2 mV

国内外研究现状

2 国内外研究现状

□ 多通道光子计数型前端读出ASIC研究现状

– MAX: Channel.No:512; Count rate: 17Mcps; ENC: 10 e⁻; Power: 0.8 mW/ch

设计者	瑞典 KTH	意大利 XGLab srl	美国 BNL	意大利 INFN	瑞典 林雪平大学	美国 Gamma Medica	中国 清华大学	中国 西工大
年份	2019	2018	2020	2023	2012	2011	2015	2022
制造工艺 (CMOS)	55 nm	0.35 μm	0.25 μm	0.35 μm	0.18μm	NA	0.18μm	0.35μm
通道数	160	128	32	256	160	512	32	32
甄别器个数	8	3	2	5	8	6	5	2
计数器深度	NA	NA	24	NA	17	16	16	12
计数率/Mcps	10	NA	0.04	2.2	17	2	1	0.83
ENC	215 e ⁻	358 e ⁻	10 e ⁻	259 e ⁻	505 e ⁻	126 e ⁻	<400 e ⁻ RMS	25 e ⁻ + 4.4 e ⁻ / pF

□ 国外现状

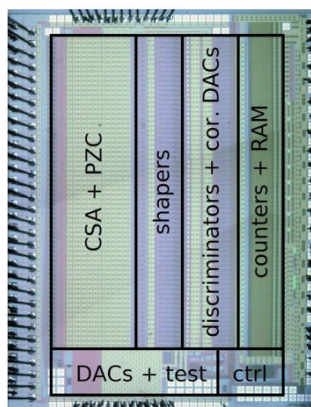
- 技术趋势: 65纳米CMOS工艺, 512通路, 17 Mcps, 10 e⁻(rms), 0.6 mW/ch, 8比较器个数, 24位计数深度
- 发展方向: 与人工智能相结合, 解决脉冲堆积和电荷共享效应

□ 国内现状

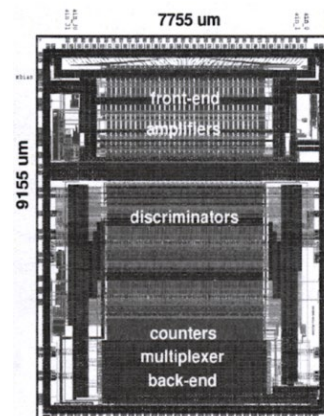
- 高性能的大通路(>128) 读出芯片尚不成熟
- 存在的问题: 计数率低、规模小、抗辐射差

2 国内外研究现状

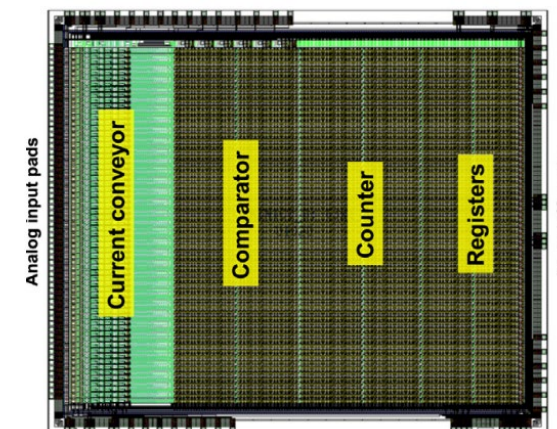
□ 多通道光子计数前端读出ASIC代表性芯片



波兰AGH大学, 64路, 2比较器, 20计数深度



美国伽马医疗, 64路, 6比较器, 16计数深度



日本金泽大学, 64路, 6比较器, 16计数深度

2007

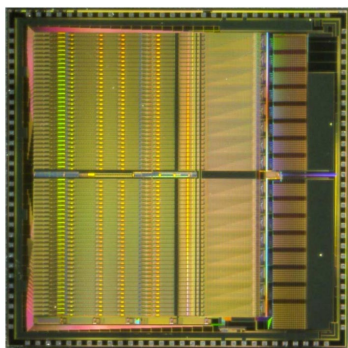
2009

2011

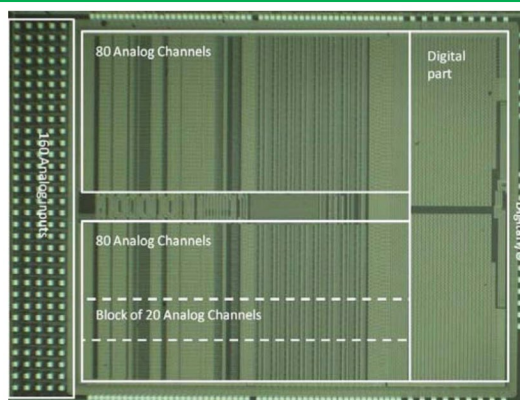
2013

2017

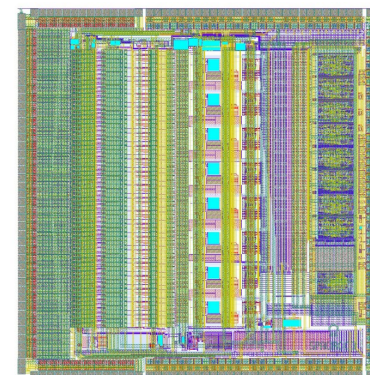
2023



美国BNL, 64路, 2比较器, 16计数深度



瑞典林雪平大学, 160路, 8比较器, 8计数深度

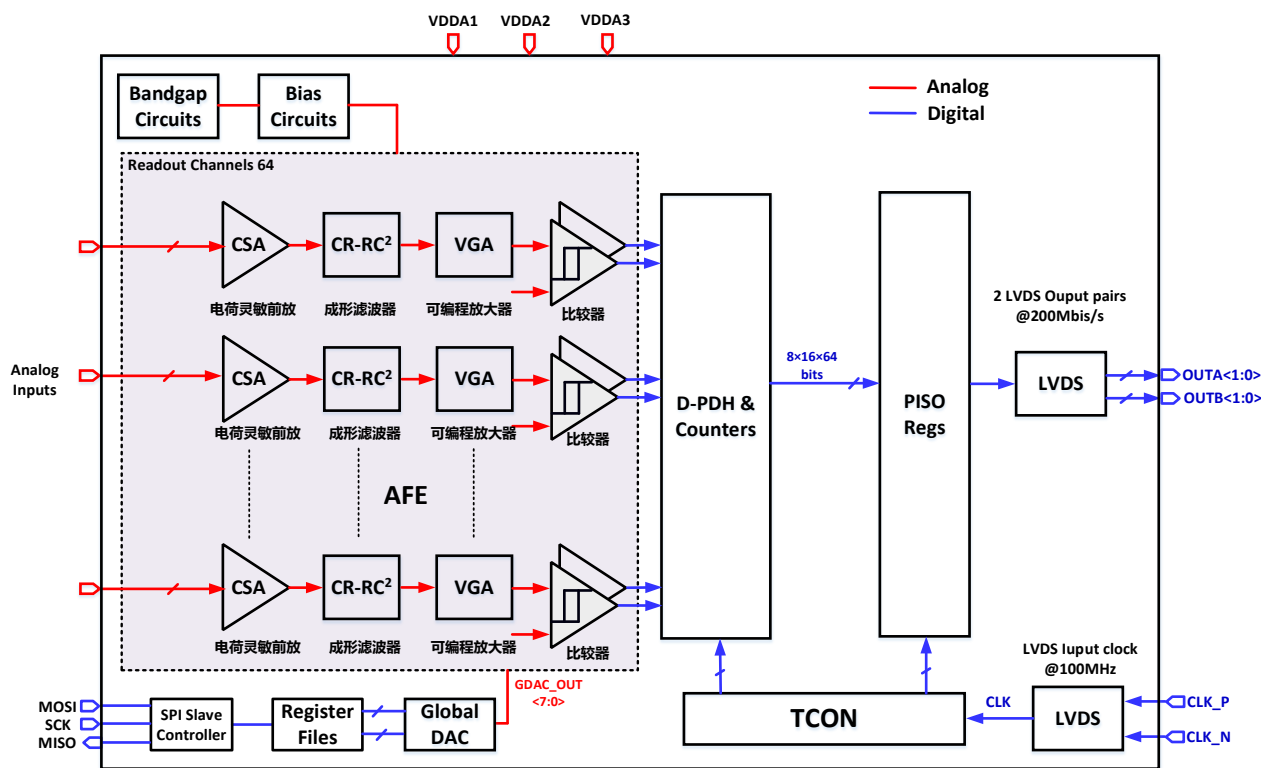
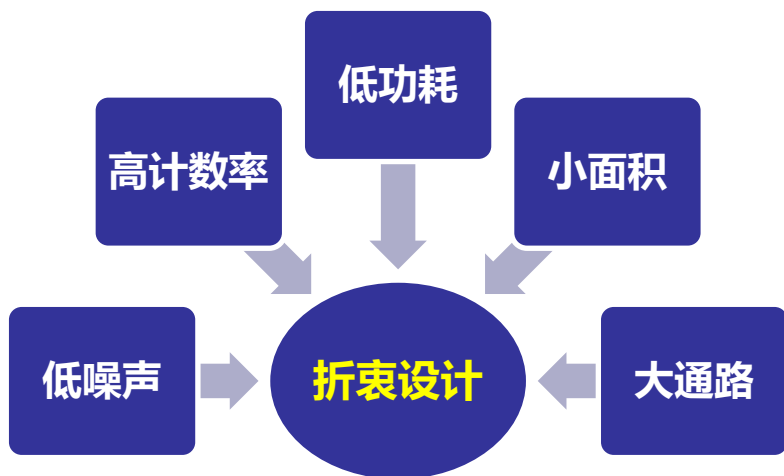


法国CNRS, 64路, 2比较器, 8计数深度

2 国内外研究现状

□ 研究目标：64/192通路8能光子计数型前端读出ASIC

- 高计数率模拟前端
- 8甄别器+16位计数器
- 公共带隙基准和偏置
- SPI接口+寄存器
- 时序控制器
- 2路LVDS接口

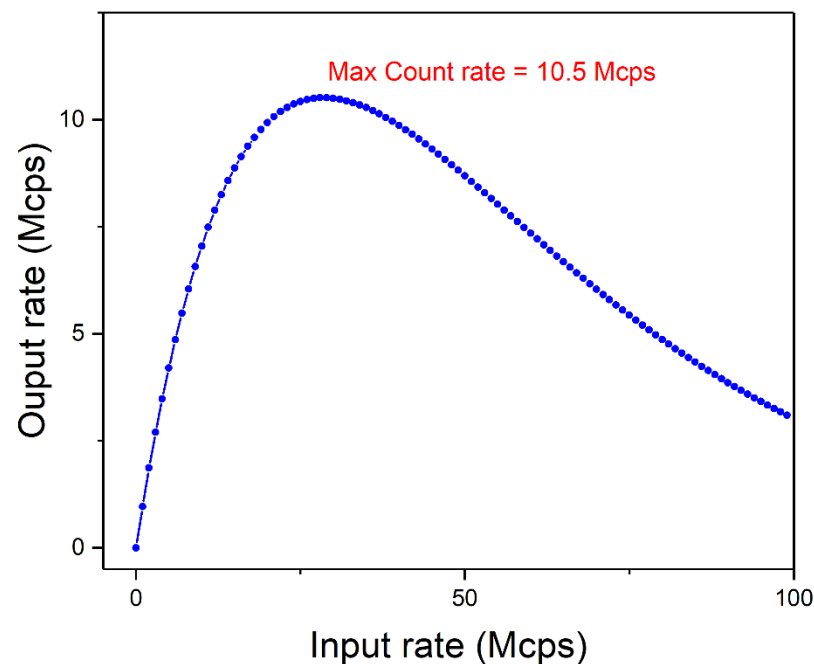
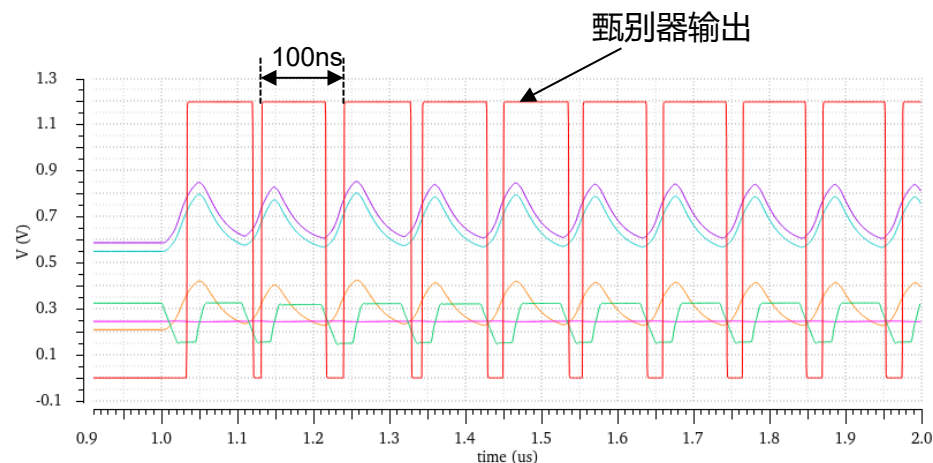
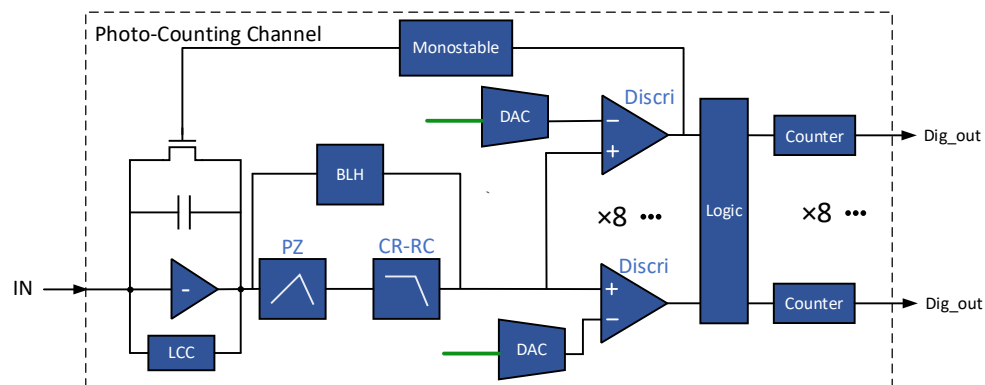


近期研究进展

3 近期研究进展

□ > 10 Mcps计数率实现方案

- 研究思路：模拟前端低成形时间；低放电时间
- 实现方案：CSA & CR-RC² & 高速比较器 & 自动反馈复位

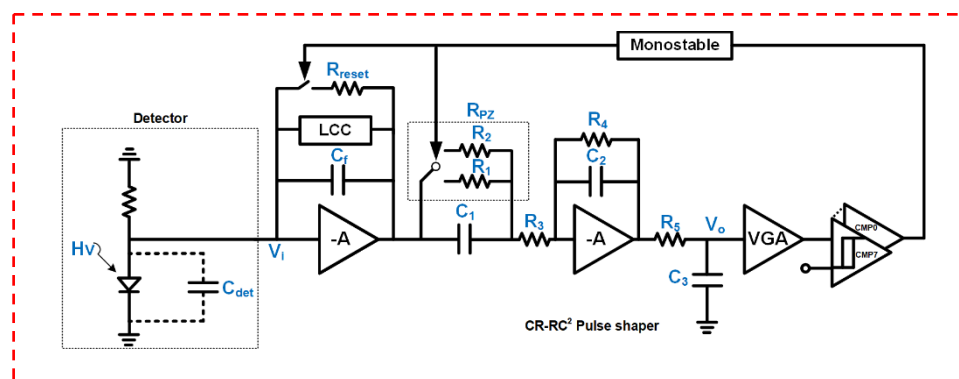


(IEEE NSS/MIC 2024, poster)

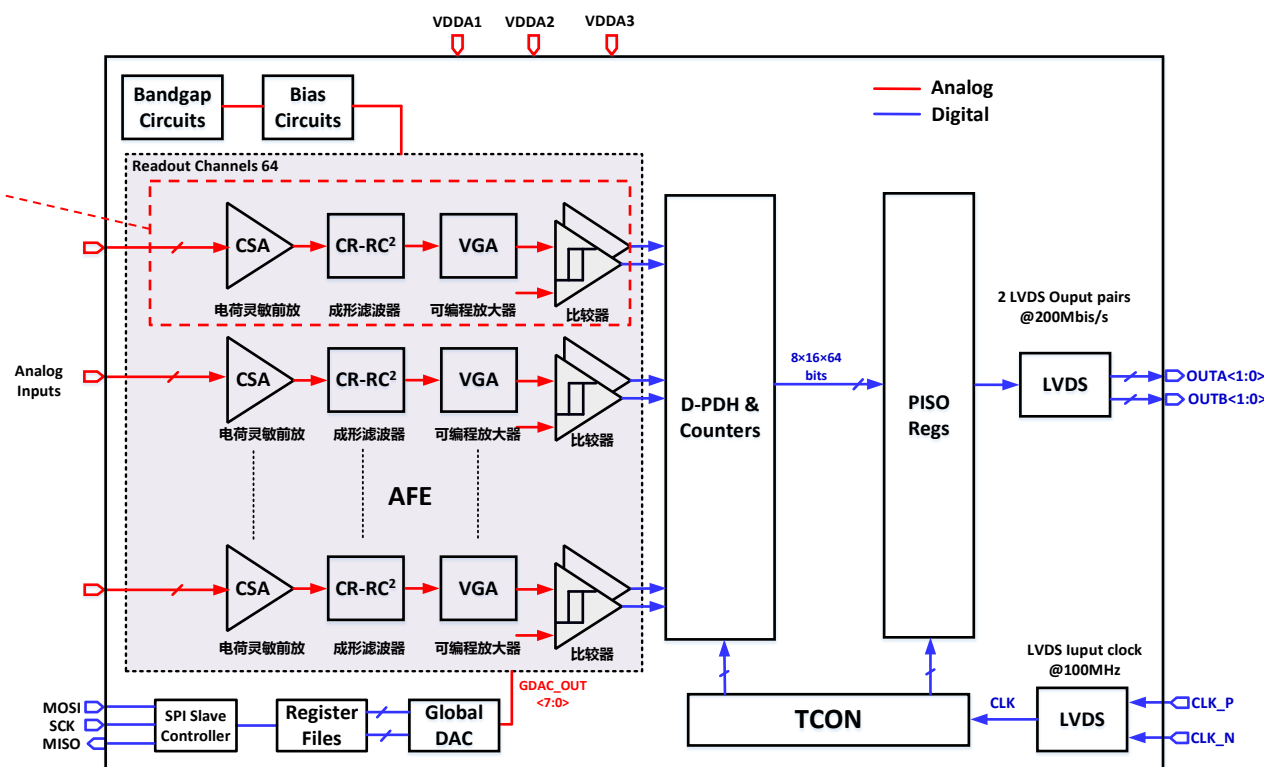
3 近期研究进展

芯片实现

- 64通道8能光子计数前端读出ASIC：SENSROC16V1
- 双模式选择



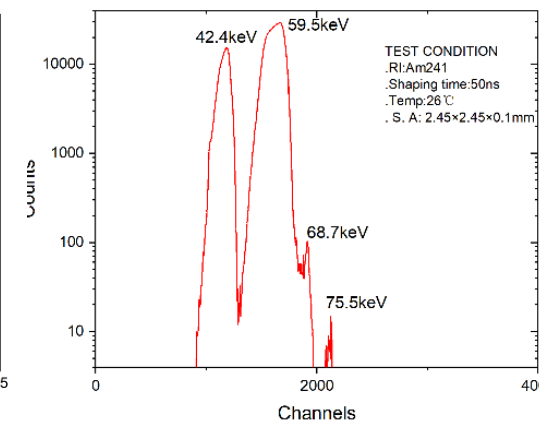
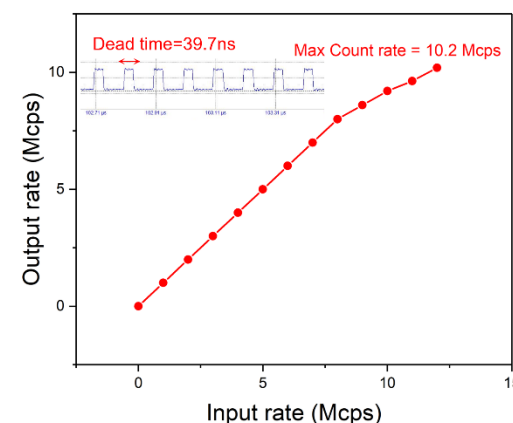
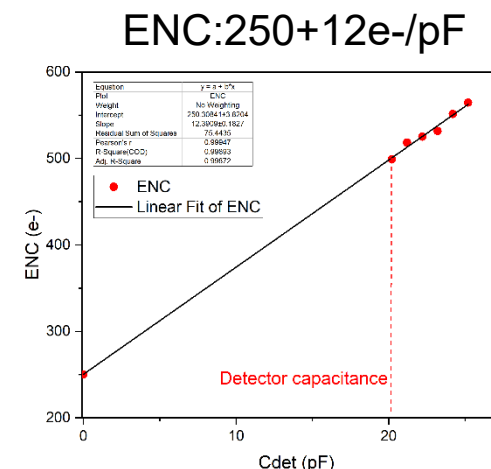
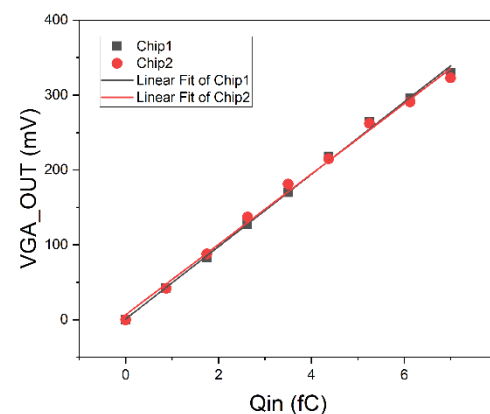
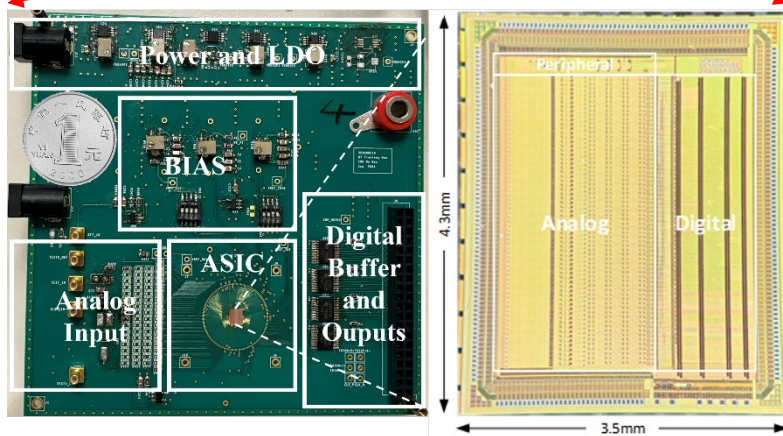
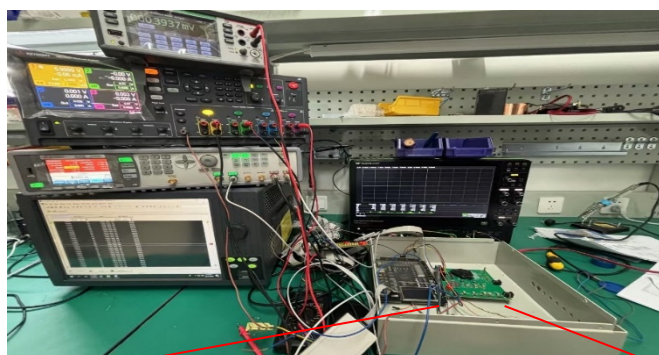
工作模式	高计数率模式	低噪声模式
计数率/Mcps	10 Mcps	5 Mcps
ENC	100+12e ⁻ /pF	80+12e ⁻ /pF
功耗/mW	3	3



3 近期研究进展

□ 流片验证

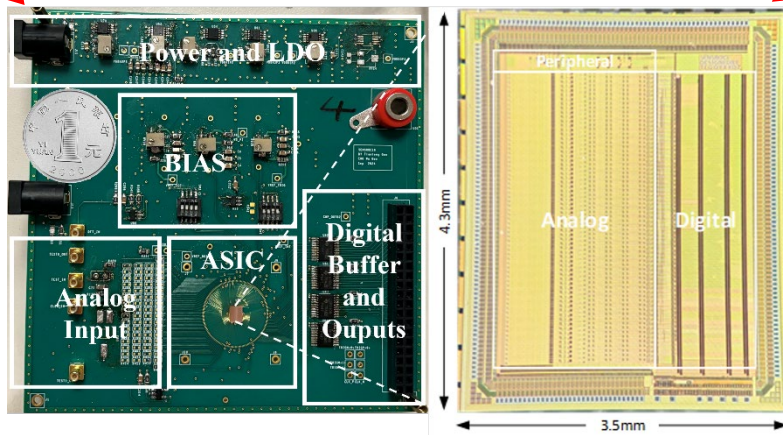
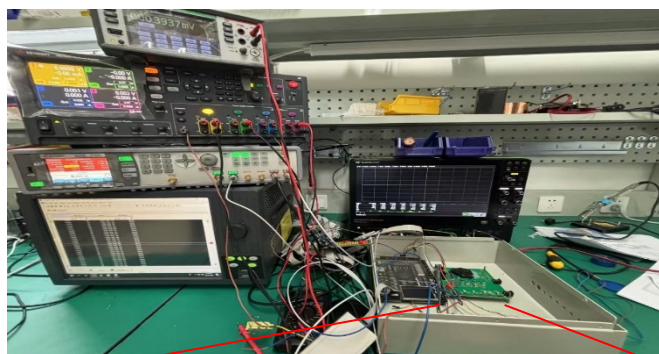
- 0.13 μm CMOS 1.2/3.3 V, 4.3 mm $\times$ 3.0 mm
- 计数率 $\rightarrow$ **10.2 Mcps**; 能量分辨率5.9% $\rightarrow$ 硅微条探测器



3 近期研究进展

□ 流片验证

- 0.13 μm CMOS 1.2/3.3 V, 4.3 mm $\times$ 3.0 mm
- 存在的问题: **噪声较大**

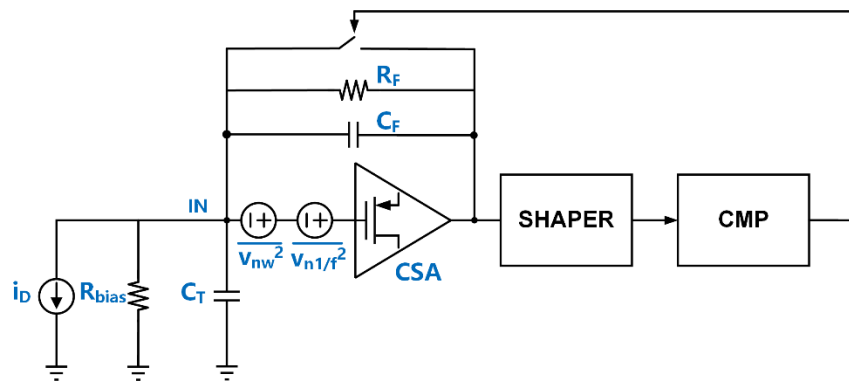


指标	性能
计数率/Mcps	10.2 Mcps
ENC	250+10e⁻/pF
功耗/mW	4
通道一致性	96%
计数线性度	95%
动态范围/fC	0-7
误码率	0‰

3 近期研究进展

ENC优化方案

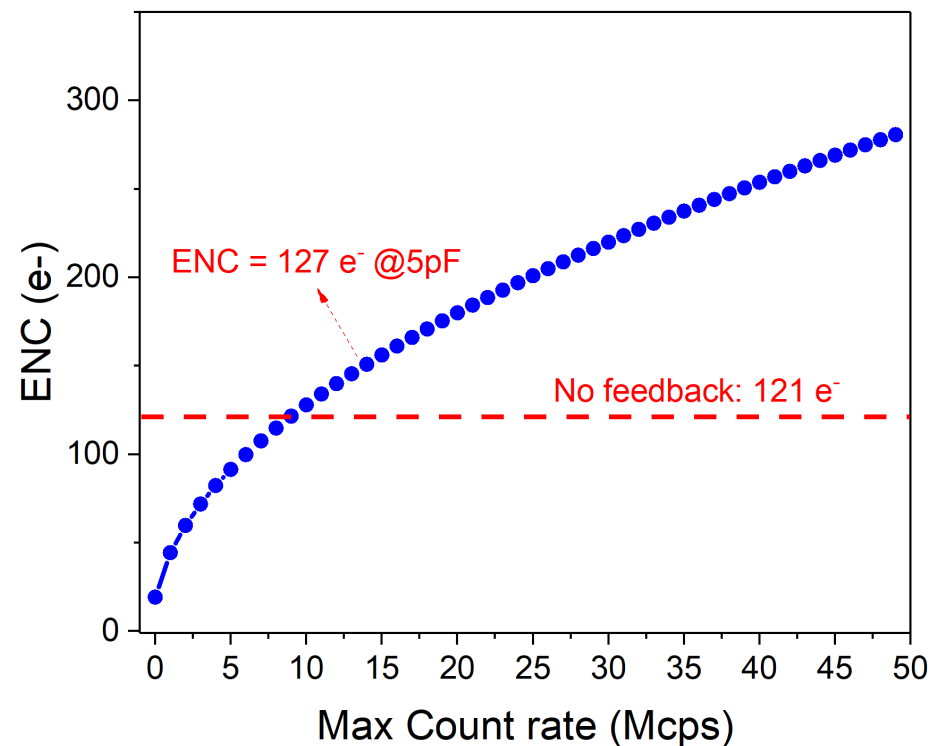
- 研究思路：自动反馈复位架构ENC建模优化
- 实验效果：ENC: 127 e⁻ @5pF (优化10%)



$$ENC_{tot}^2 = ENC_i^2 + ENC_w^2 + ENC_f^2 + ENC_{CMP}^2$$

$$ENC_{1/f}^{shaped} = \frac{1}{q} \sqrt{\int_0^\infty S_{shaped}(f) df} = \frac{1}{q} \sqrt{\frac{K_f}{2\pi^2 C_{ox} W L f_{min}^2}}$$

$$ENC_{CMP}^2 = \frac{S_{cmp}}{(g_m R_f)^2} \cdot f_{count}$$

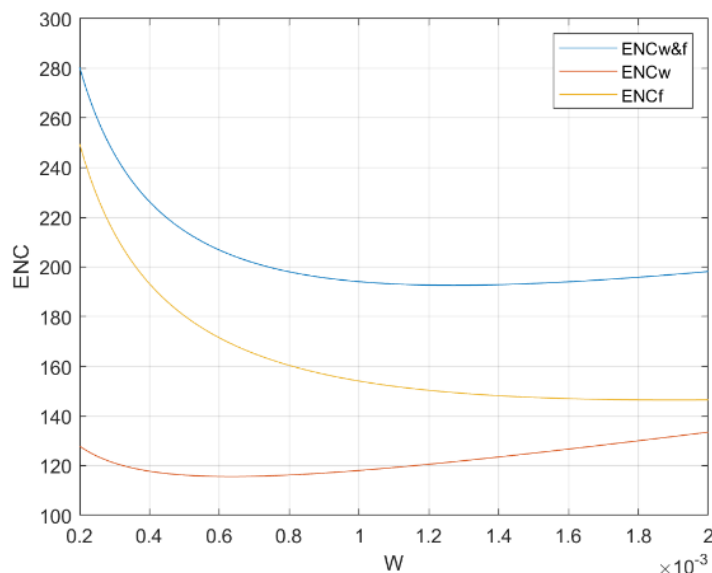


3 近期研究进展

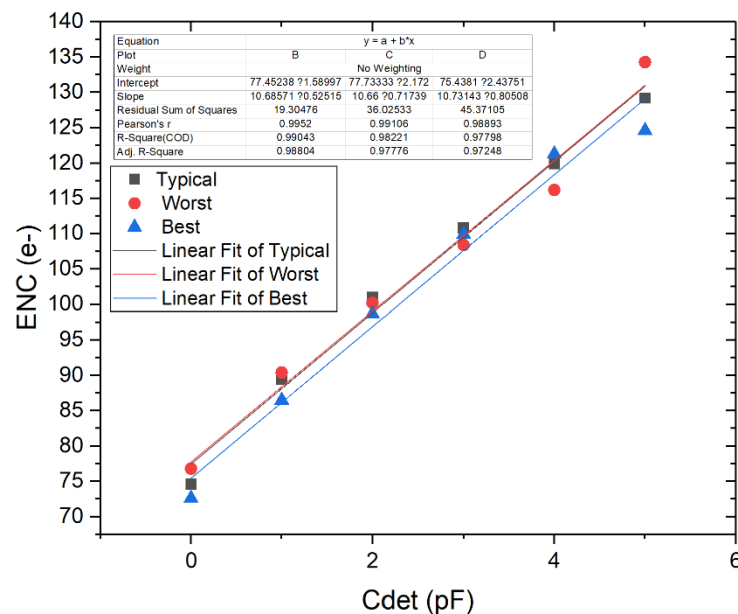
□ 高计数率下低噪声建模优化方案

– 仿真结果: $ENC < 75.8 + 11.3e-/pF$, 满足指标

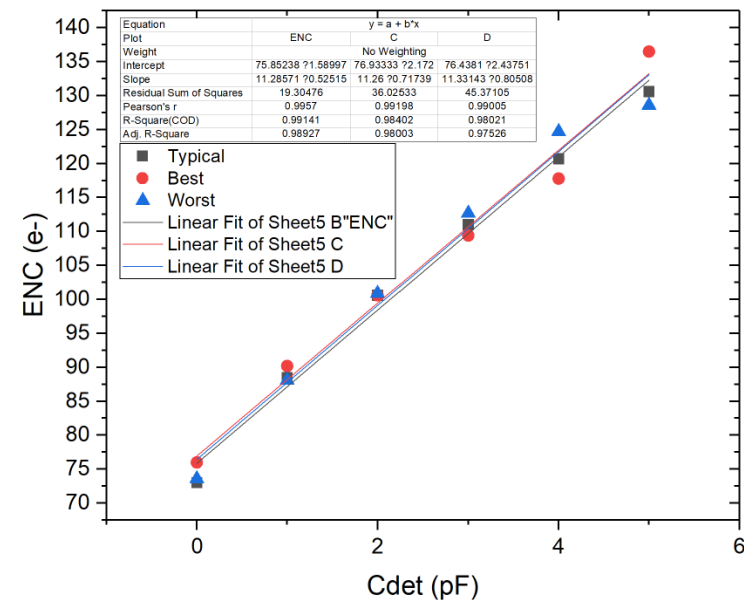
系统级



电路级



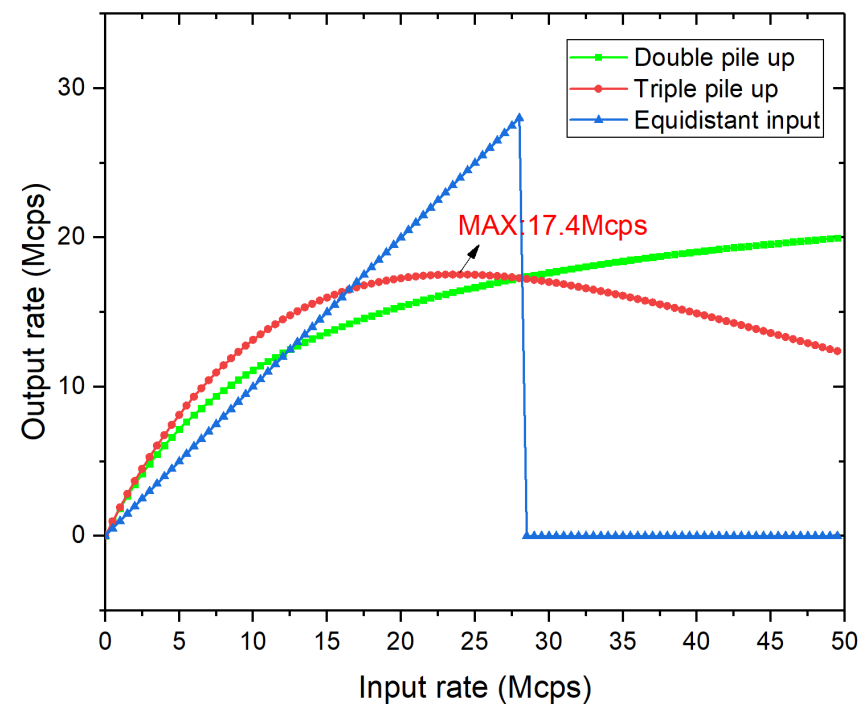
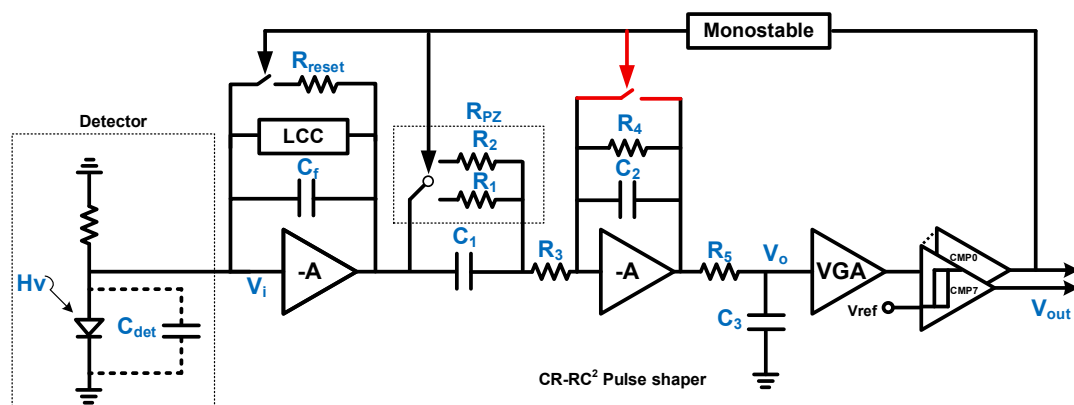
版图级



3 近期研究进展

□ 计数率提升方案

- CSA和Shaper双复位架构
- 死时间 < 50 ns



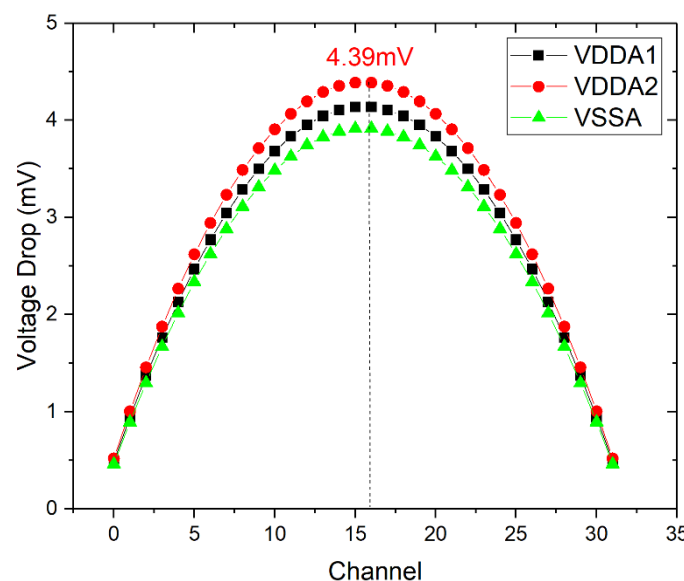
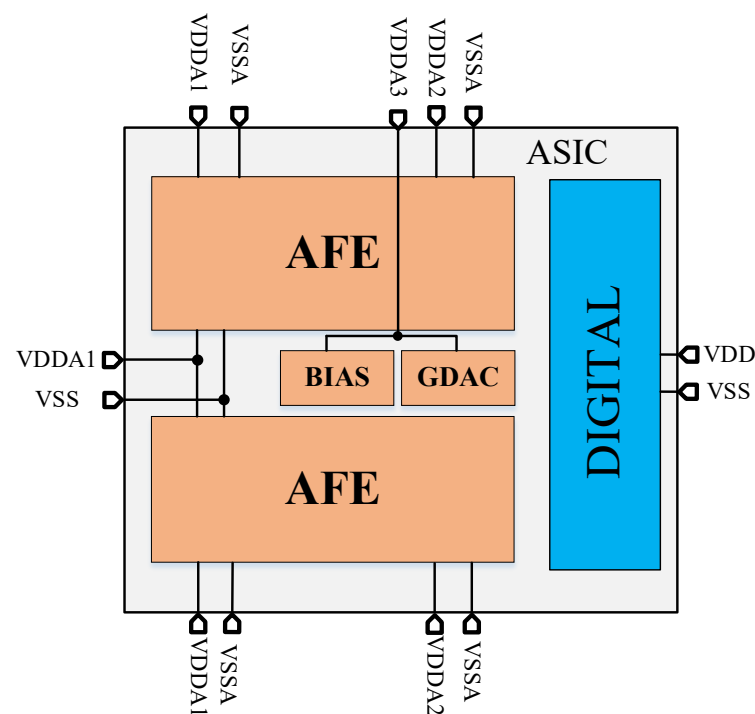
3 近期研究进展

□ 大通道一致性建模优化

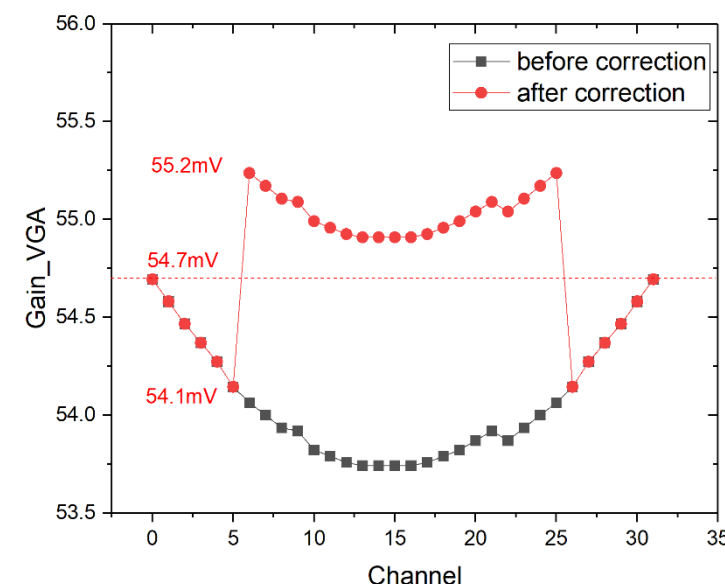
- 研究思路：建模通道间压降对一致性的影响
- 实现方案：优化供电方案以减小压降；通道内置VGA

$$VDD_{chi} = VDD - R_{line} \cdot \sum_i^N (i - \frac{N}{2} + 1) \cdot I_{chi} \quad (i \geq \frac{N}{2})$$

$$= VDD - R_{line} \cdot I_{ch} \cdot \frac{(i - \frac{N}{2} + 2)(i - \frac{N}{2} + 1)}{2} \quad (I_{chi} = I_{chi+1} = \dots = I_{chN})$$



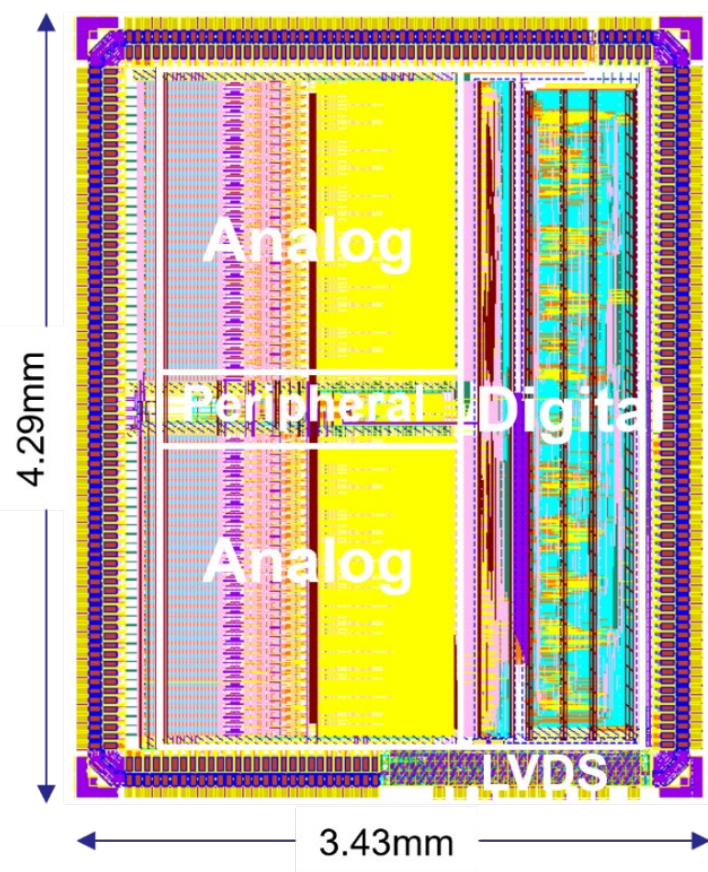
一致性：98.3% → 99.02%



3 近期研究进展

□ 第二版芯片实现：SENSROC16V2

- 将公共模块放在中间，优化通道一致性与非理想效应
- 已于2025年7月15日流片



主要参数	V1结果	V2结果
电源电压 (V)	1.2	1.2
输入电荷范围 (fC)	0.088 ~ 7	0.088 – 7
最大计数率 (MCPS/ch)	10.2	17.4(提升70%)
通道数	64	64
计数率线性度	95%	95%
等效噪声电荷	250+10e-/pF	75+11 e-/pF (降低3倍)
通道一致性	96%	98%(优化2%)
功耗 (mW/ch)	4	2.9(降低至70%)
误码率	0‰	0‰

3 近期研究进展

□ 工作对比

– 计数率/噪声/功耗的综合性能位于世界前列

文献	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	SENSROC 16V1	SENSROC 16V2
工艺 (nm)	250	180	350	250	180	180	180	130	130
探测器	CZT	Si	CdTe	Si	Si	Si	Si	Si	Si
通道数	64	160	32	32	160	32	32	64	64
动态范围 (fC)	10	5.3	3.3	3.3	5.3	8	1.3	7	7
ENC (e ⁻)	140	214	259	21	298	112	25	250	77
能量分辨率 (bits)	5	8	8	1	8	5	2	8	8
计数率(Mcps)	2	17	2.2	0.04	2.5	1.05	1	10.2	17.4
计数位宽	16	8	8	NA	8	16	6	16	16
功耗 (mW/channel)	4.9	5	18.7	5.2	5	4	5	2.5	2.5
FoM (Mcps/el/mW)	0.0029	0.0158	0.0005	0.0004	0.0017	0.0023	0.0080	0.0163	0.09

总结和展望

4 总结和展望

□ 总结

- ✓ 下一代光子计数CT成像需求
- ✓ 实现一款64通路8能光子计数型前端读出ASIC, 计数率 > 10Mcps
- ✓ 针对第一版芯片噪声较大问题, 进行高计数率ENC建模优化
- ✓ 完成第二版光子计数ASIC改版并流片

□ 展望

- 192通路8能光子计数型前端读出ASIC
- 结合深硅探测器搭建光子计数CT原型系统

- [1] R. Kleczek, “Analog front-end design of the sts/muchxyter2—full size prototype asic for the cbm experiment,” *Journal of Instrumentation*, vol. 12, no. 01, p. C01053, 2017.
- [2] K. Kasinski and R. Kleczek, “Dual-stage, time-overthreshold based prototype readout asic for silicon microstrip sensors,” *Microelectronics Journal*, vol. 46, no. 12, pp. 1248–1257, 2015.
- [3] J. Quercia, F. Mele, D. Macera, B. Arcaini, B. Garavelli, and G. Bertuccio, “Experimental characterization of a fast x-ray spectroscopic imager module using the altair p3 asic for real-time contaminants detection,” *Journal of Instrumentation*, vol. 18, no. 01, p. C01064, 2023.
- [4] E. Vernon, G. De Geronimo, J. Baldwin, W. Chen, J. Fried, G. Giacomini, A. Kuczewski, J. Kuczewski, J. Mead, A. Miceli et al., “Development of a highrate front-end asic for x-ray spectroscopy and diffraction applications,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 67, no. 4, pp. 752–759, 2020.
- [5] C. Xu, M. Persson, H. Chen, S. Karlsson, M. Danielsson, C. Svensson, and H. Bornefalk, “Evaluation of a secondgeneration ultra-fast energy-resolved asic for photoncounting spectral ct,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 60, no. 1, pp. 437–445, 2013.
- [6] Z. Deng, X. Zhu, Y. Chen, Y. Liu, Y. Xing, C. Feng, G. Wang, H. Liu, and S. Wu, “Development of a multienergy photon-counting readout asic for cztdetectors,” in *2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, 2015, pp. 1–4.
- [7] R. Szczygiel, P. Grybos, P. Maj, A. Tsukiyama, K. Matsushita, and T. Taguchi, “Rg64—high count rate low noise multichannel asic with energy window selection and continuous readout mode,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 56, no. 2, pp. 487–495, 2009.

汇报结束，谢谢大家！

