



第三届全国辐射探测微电子学术交流会
(NME' 2023)

基于内嵌LDO超像素电路的X射线成像探测器像素型
读出ASIC

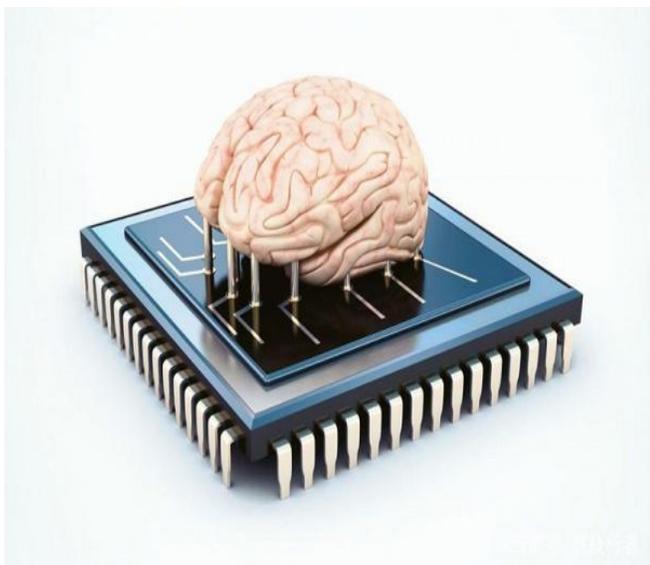
汇报人：程静思

共同作者：喻春杨、白名扬、武晓余、高武*

*通信作者： gaowu@nwpu.edu.cn

西北工业大学

2023年10月22日

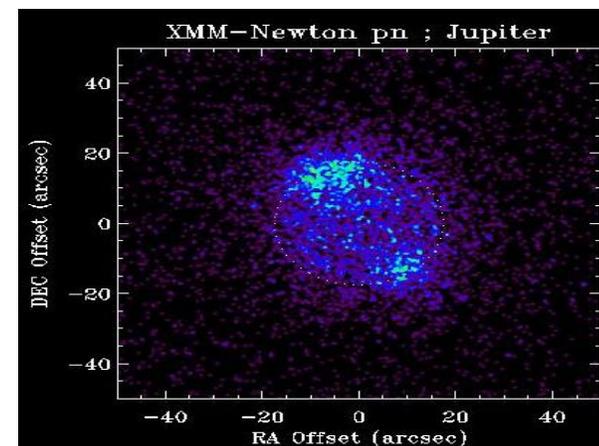
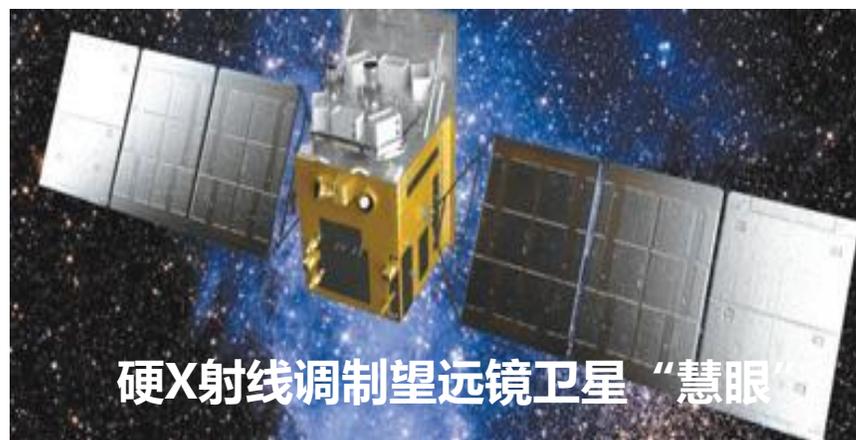
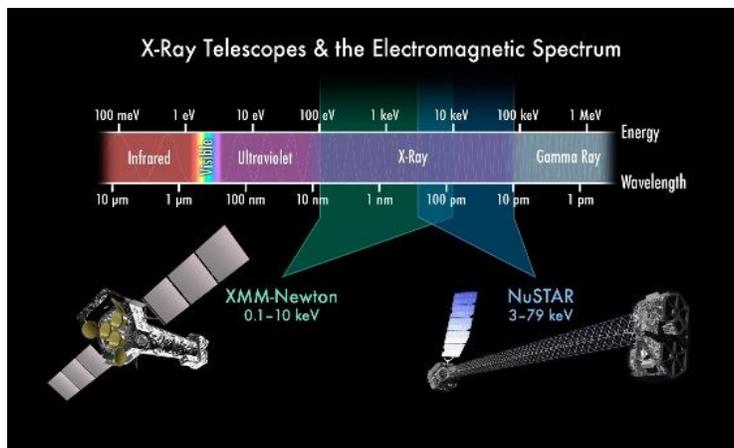


- 1 研究背景及需求分析
- 2 国内外研究现状
- 3 芯片架构及关键电路
- 4 实验结果及讨论
- 5 总结与展望

研究背景及需求分析

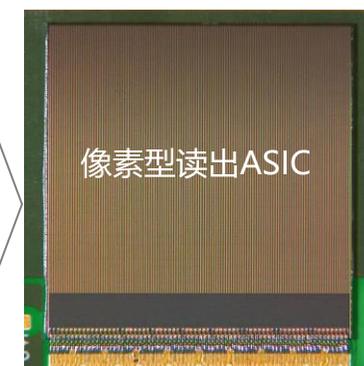
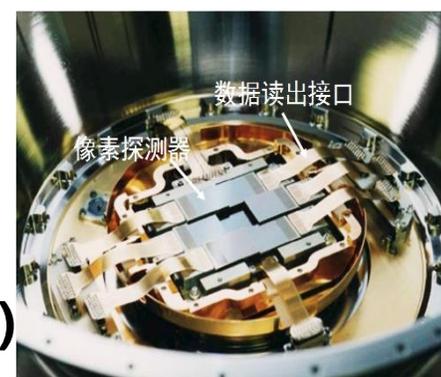
1 研究背景及需求分析

重大需求背景：星载天文望远镜X射线成像探测器



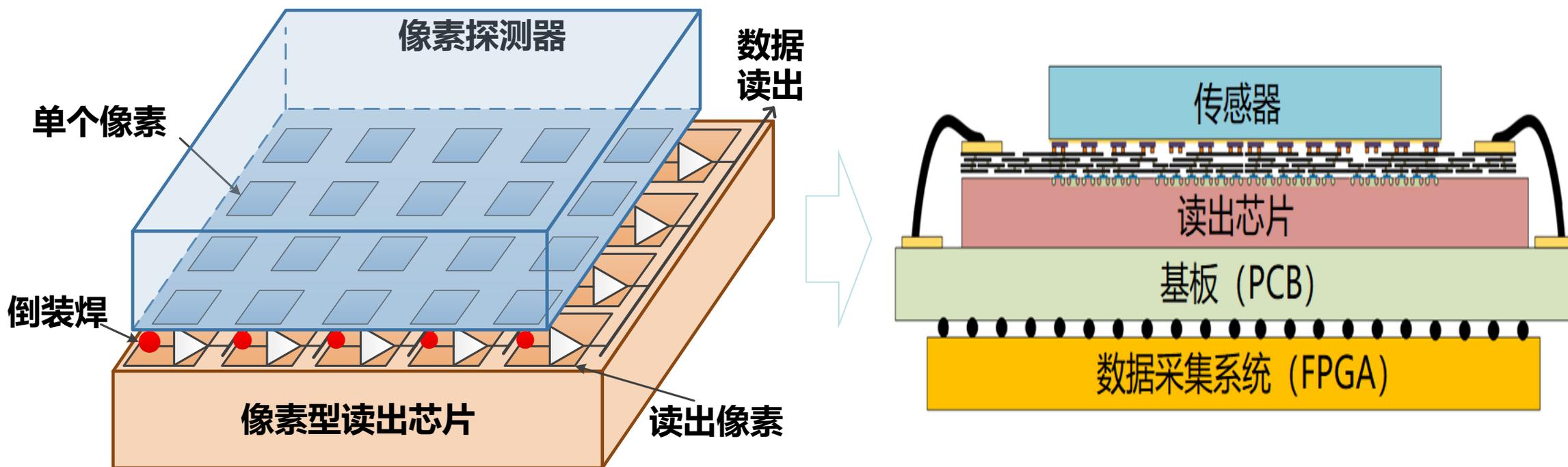
● 下一代空间X射线成像探测器

- 探测器类型：**混合像素探测器**
- 探测器口径：1 m (面积约0.8m²)
- 集成芯片数量： 2×10^3 颗
- 读出芯片指标：75 $\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$, 256 \times 256(NuSTAR)
- 读出芯片特点：匹配Si/CZT, 同时测量能量和计数



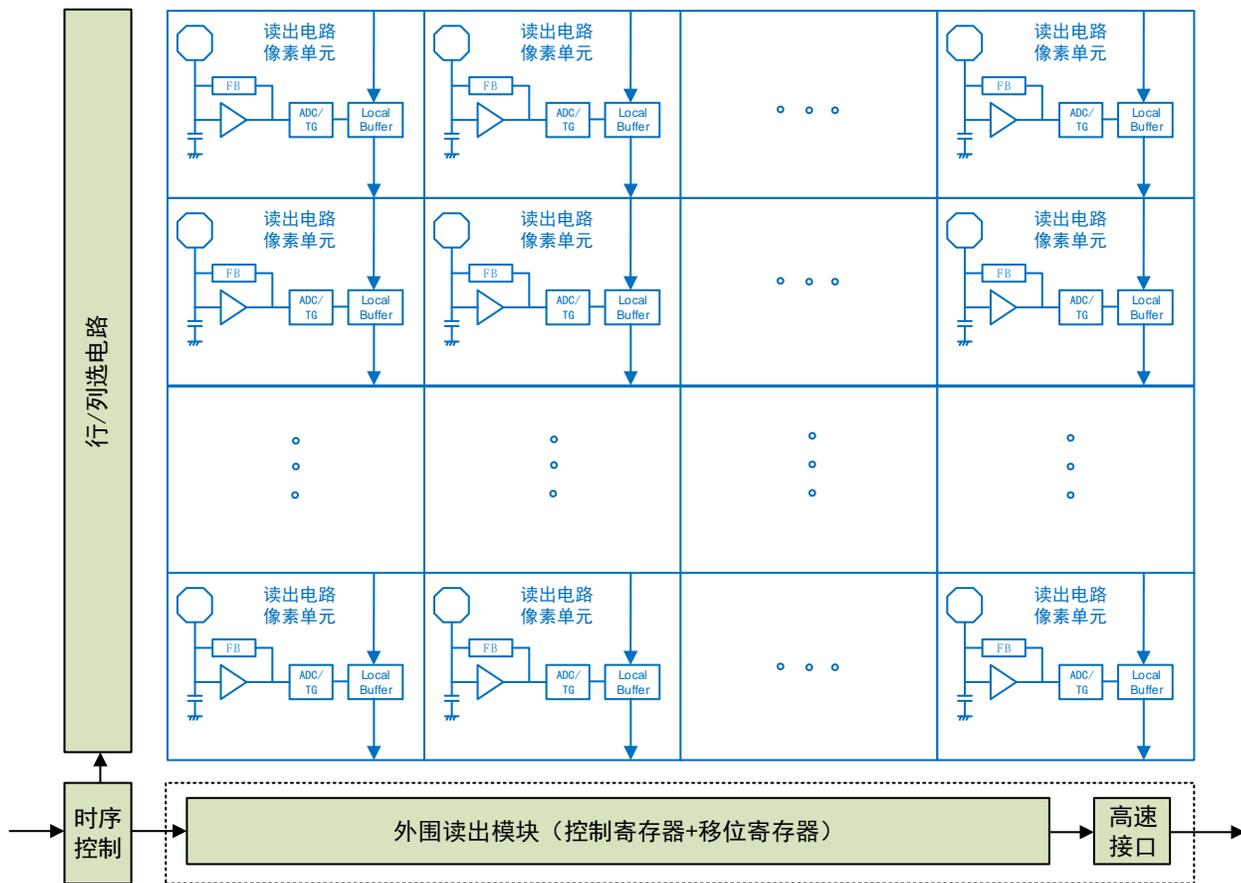
1 研究背景及需求分析

□ 混合型像探测器的像素型读出电路架构



1 研究背景及需求分析

像素型读出电路架构及供电方式

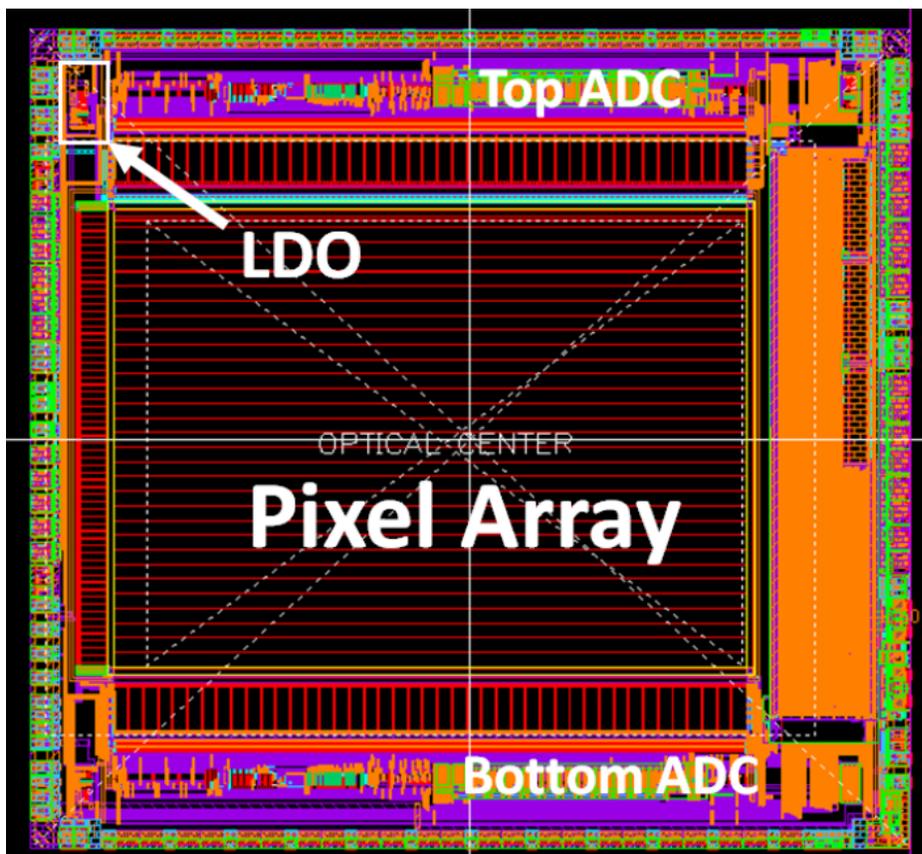


国内外研究现状

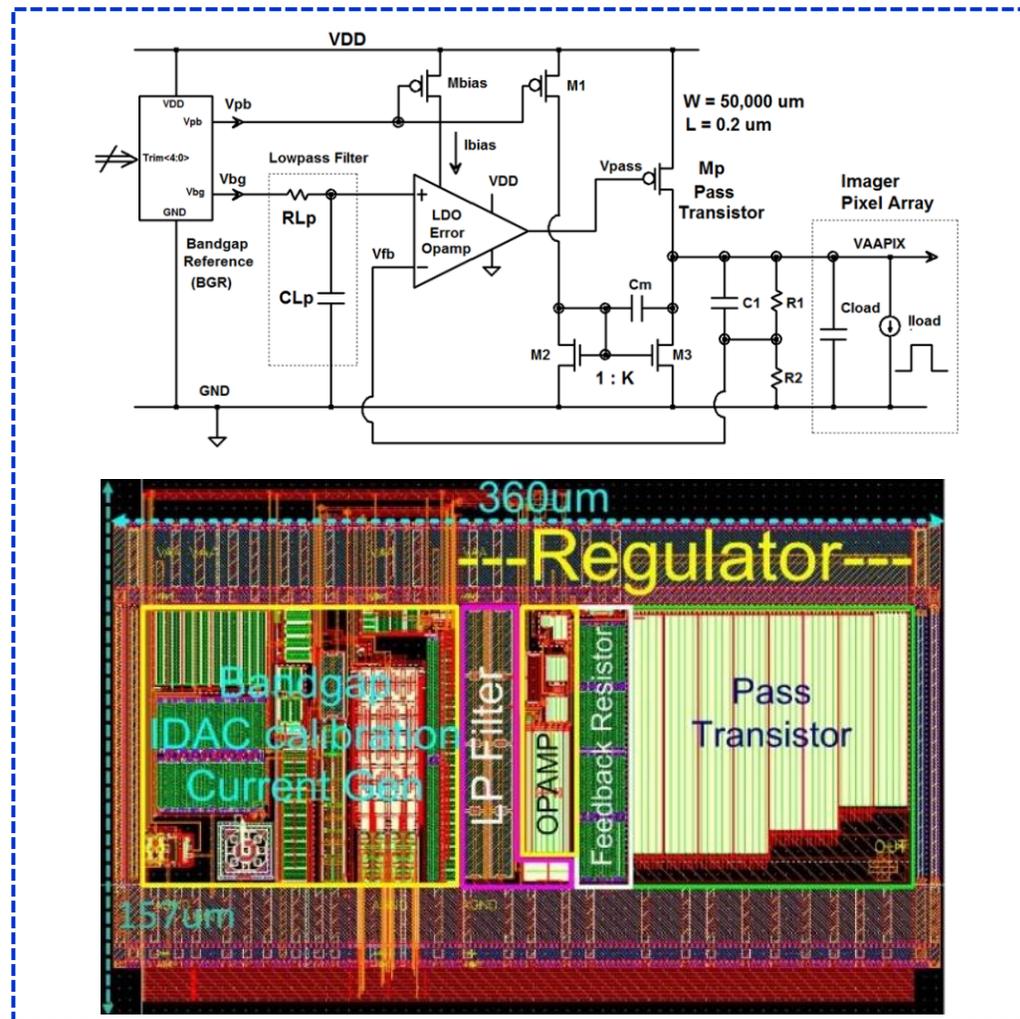
2 国内外研究现状

• 全局供电

- 一个LDO单元为整个像素阵列供电



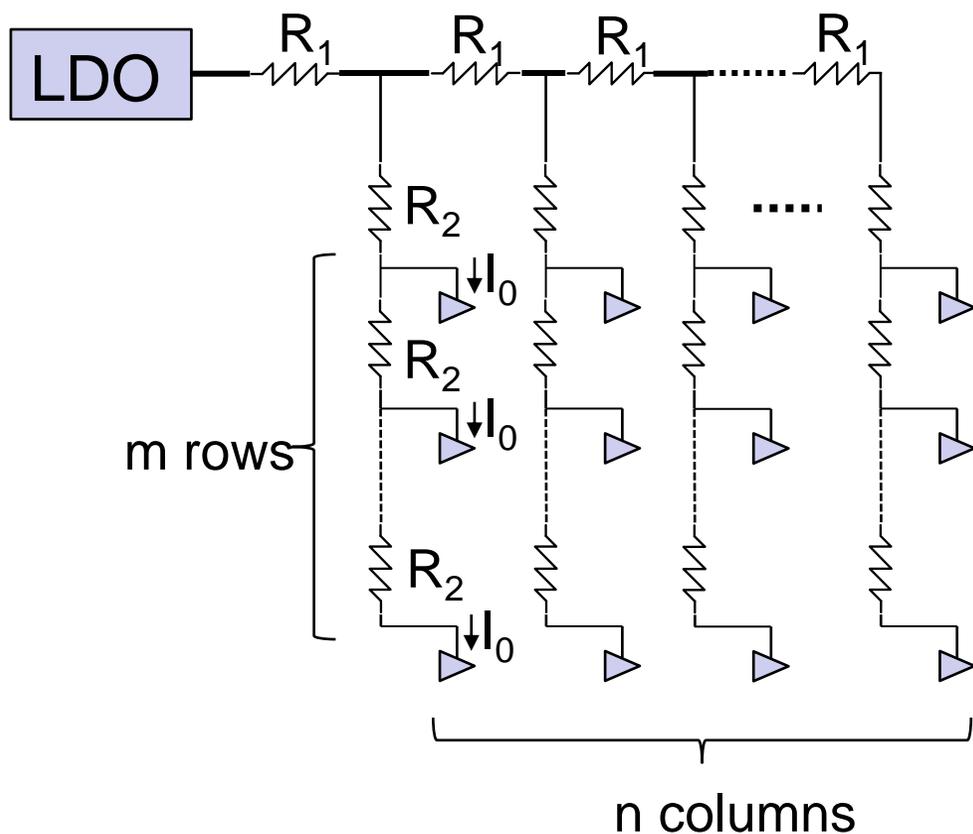
全局供电方式



片内无电容LDO的原理图和版图

2 国内外研究现状

□ 全局供电方式 → IR drop引起的供电不一致性 + 随机噪点



$$\Delta V_{ij} = \left[\frac{m \times [n + (n - j + 1)] \times j}{2} R_1 + \frac{[m + (m - i + 1)] \times i}{2} R_2 \right] \cdot I_0$$

$$m = n = 256, I_0 = 10 \mu A$$

CMOS 180nm M3:

$$R_{\square} = 0.03 \Omega / \square$$

$$W_1 = 50 \mu m, L_1 = 50 \mu m, R_1 = 0.03 \Omega$$

$$W_2 = 5 \mu m, L_2 = 50 \mu m, R_2 = 0.3 \Omega$$

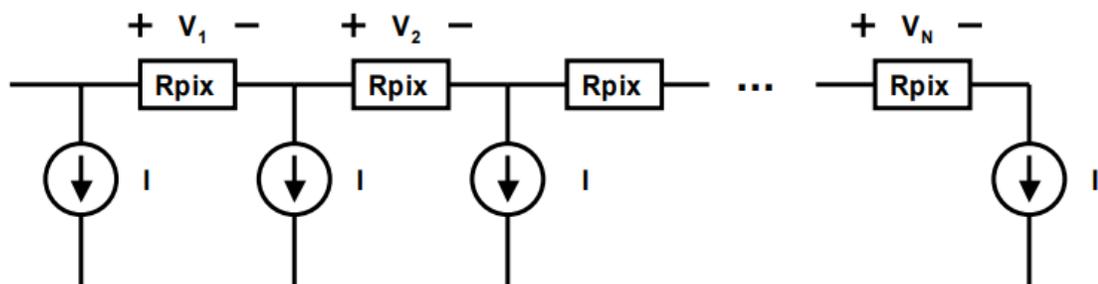
$$\Delta V_{1,1} \approx 20.4 mV$$

$$\Delta V_{256,256} \approx 2.6 V$$

2 国内外研究现状

□ 全列供电

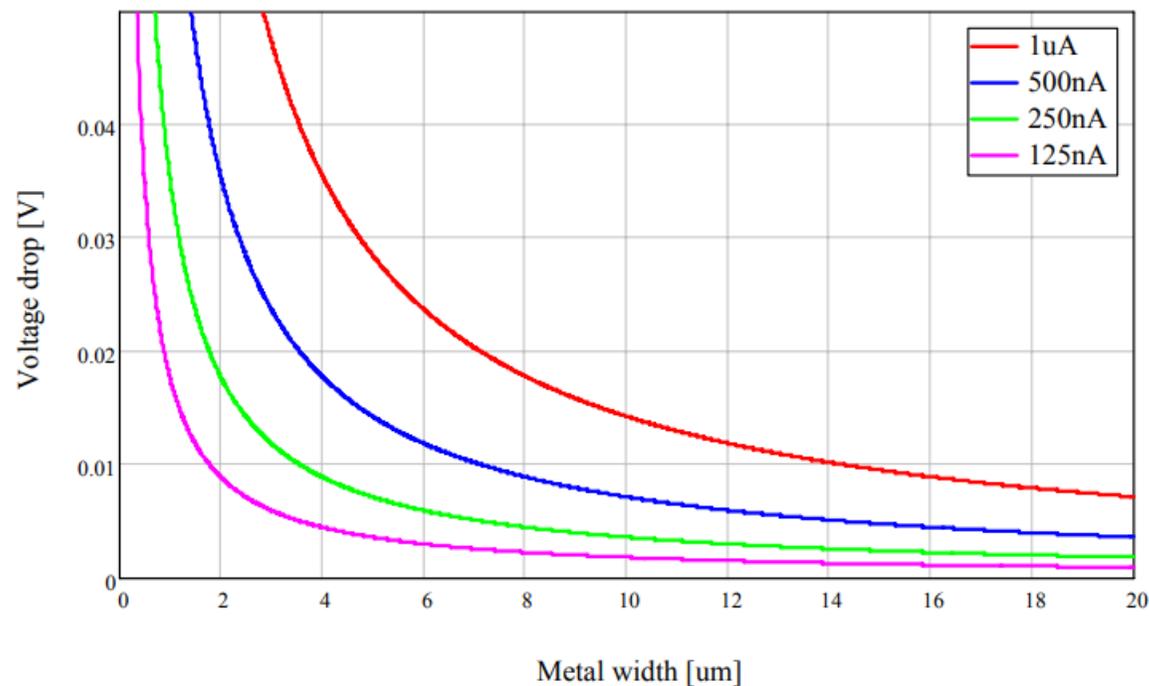
- 不同线宽在一列像素上引起的压降不同



$$R_{pix} = \frac{55 \mu m}{MetalWidth} \cdot R_{square}$$

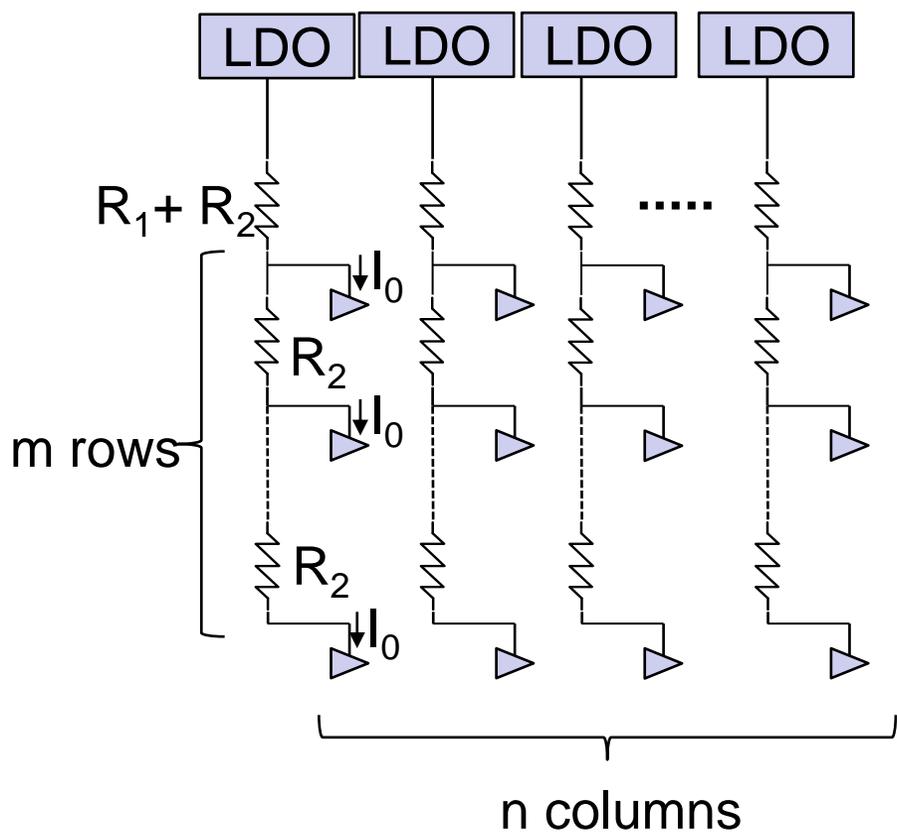
$$V_{drop} = V_1 + V_2 + \dots + V_N = R_{pix} \cdot I \cdot (N + (N-1) + (N-2) + \dots + 1) =$$

$$R_{pix} \cdot I \cdot \frac{N}{2} \cdot (N+1) = R_{pix} \cdot I \cdot \frac{N^2}{2}$$



2 国内外研究现状

□ 全列供电方式 → IR-drop引起的供电不一致性 + 固定模式噪声



$$\Delta V_{i,*} = \left[mR_1 + \frac{[m + (m - i + 1)] \times i}{2} R_2 \right] \cdot I_0$$

$m=n=256, I_0=10\mu A$

CMOS 180nm M3:

$R_{\square} = 0.03\Omega/\square$

$W_1=50\mu m, L_1=50\mu m, R_1=0.03\Omega$

$W_2=5\mu m, L_2=50\mu m, R_2=0.3\Omega$

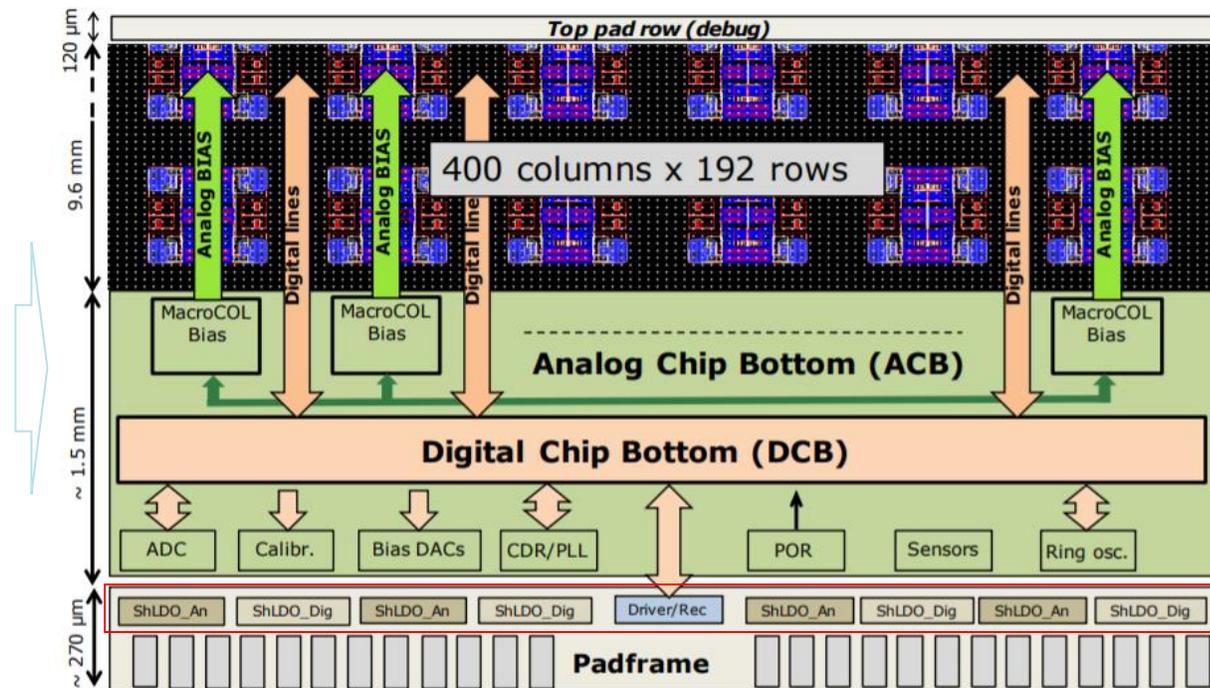
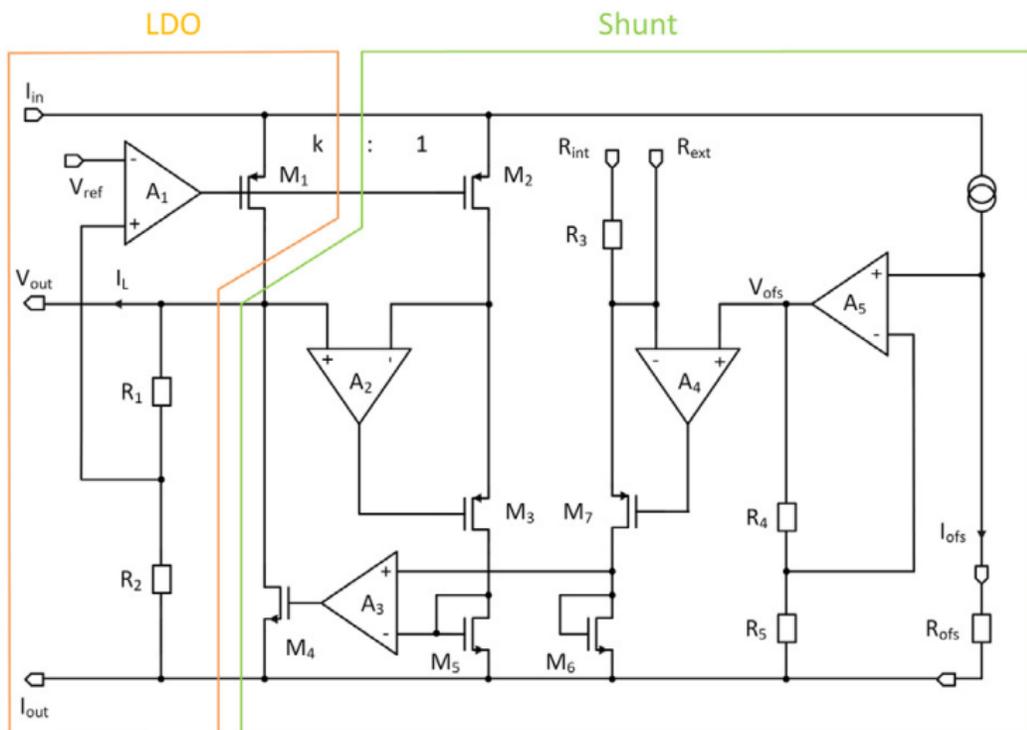
$$\Delta V_{1,1} \approx 0.84mV \quad \Delta V_{256,*} \approx 98.8mV$$

减小由电源线压降带来的阵列不一致性?

2 国内外研究现状

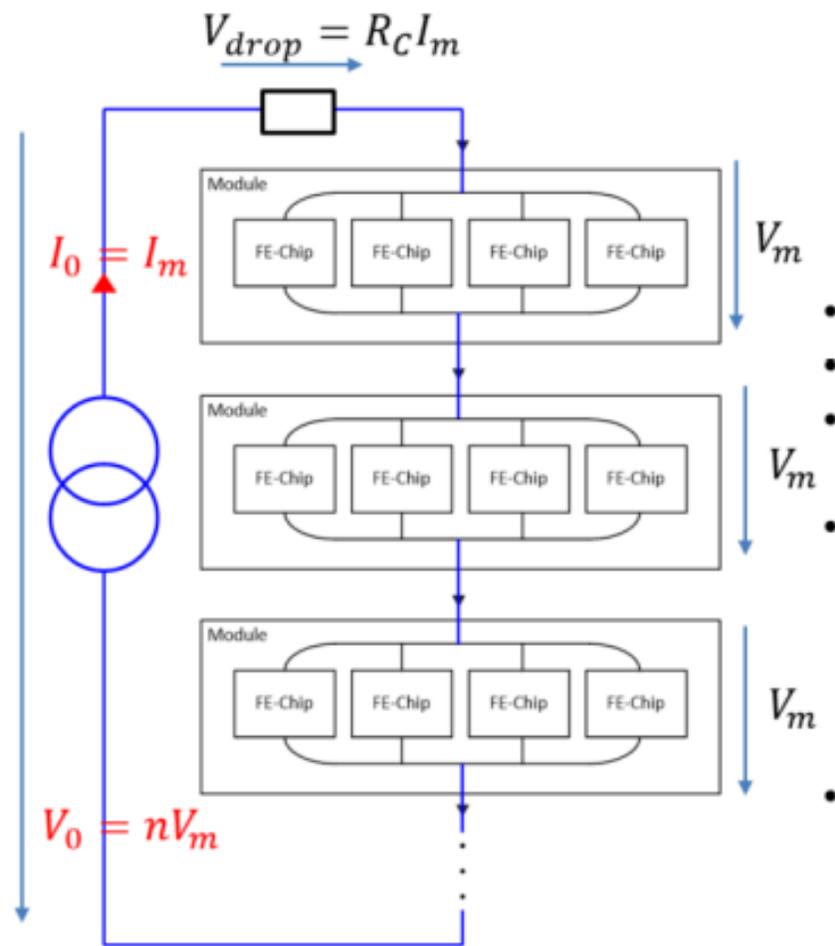
□ 电流模式供电

- Shunt-LDO提供稳定电流, 芯片按列串型连接, 输出电压不同



2 国内外研究现状

□ 电流模式供电 → 固定模式噪声



模块串联，恒流源供电

总电流由单模块的最大负载电流定义

总电源电压随供电模块的数量而变化

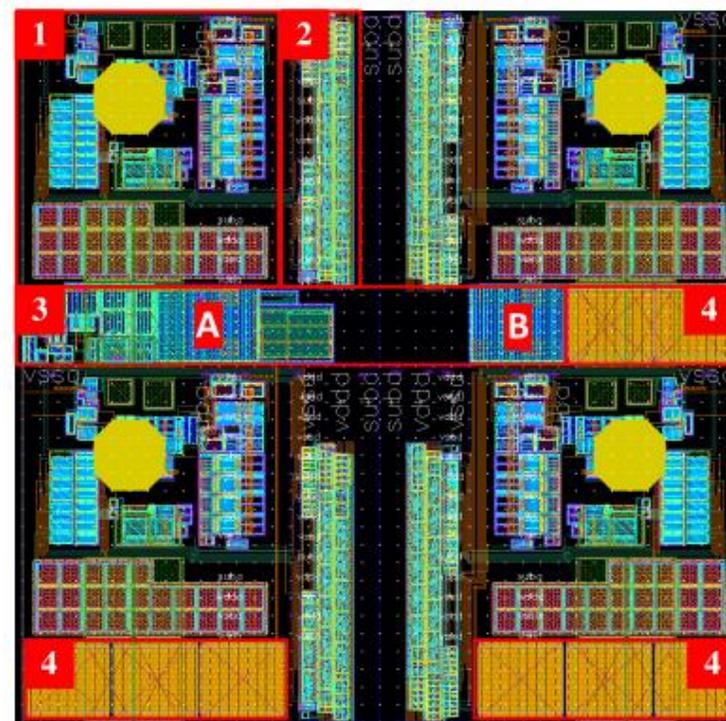
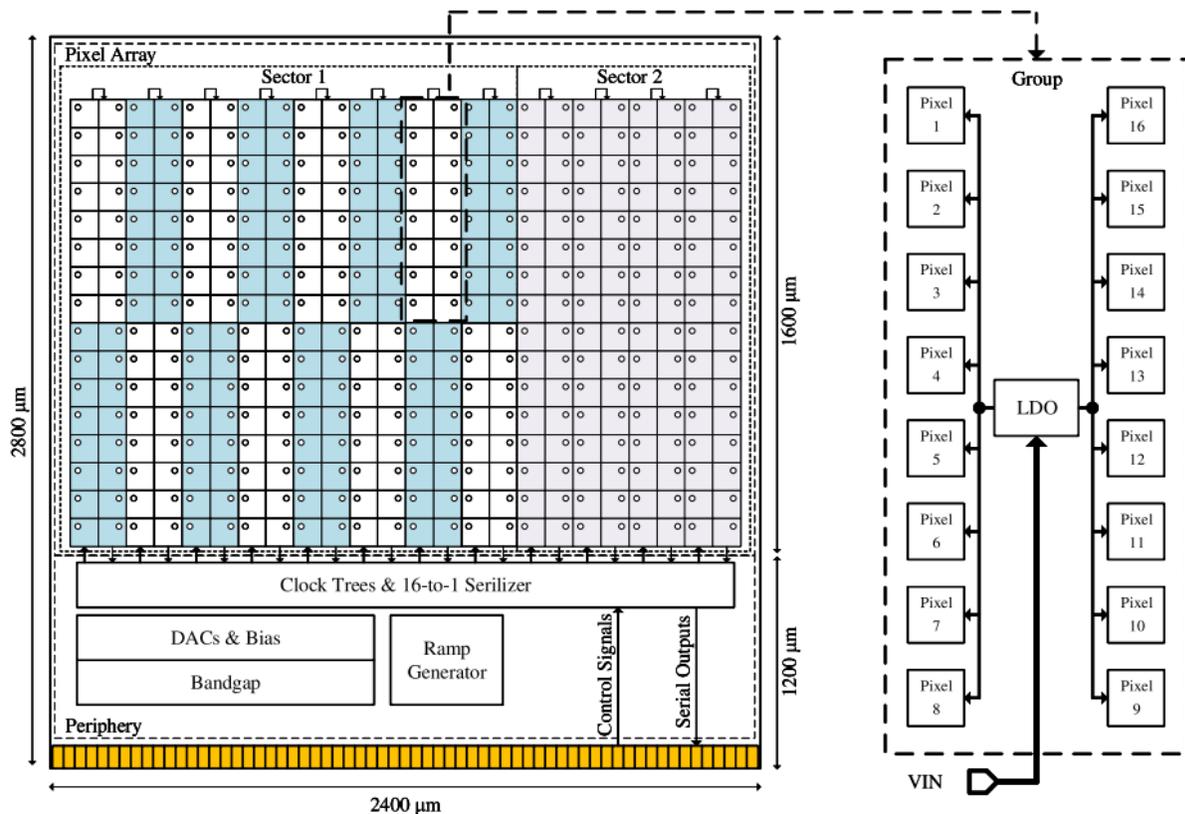
$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_C I_m}{n V_m}}$$

Shunt-LDO产生恒定电流

2 国内外研究现状

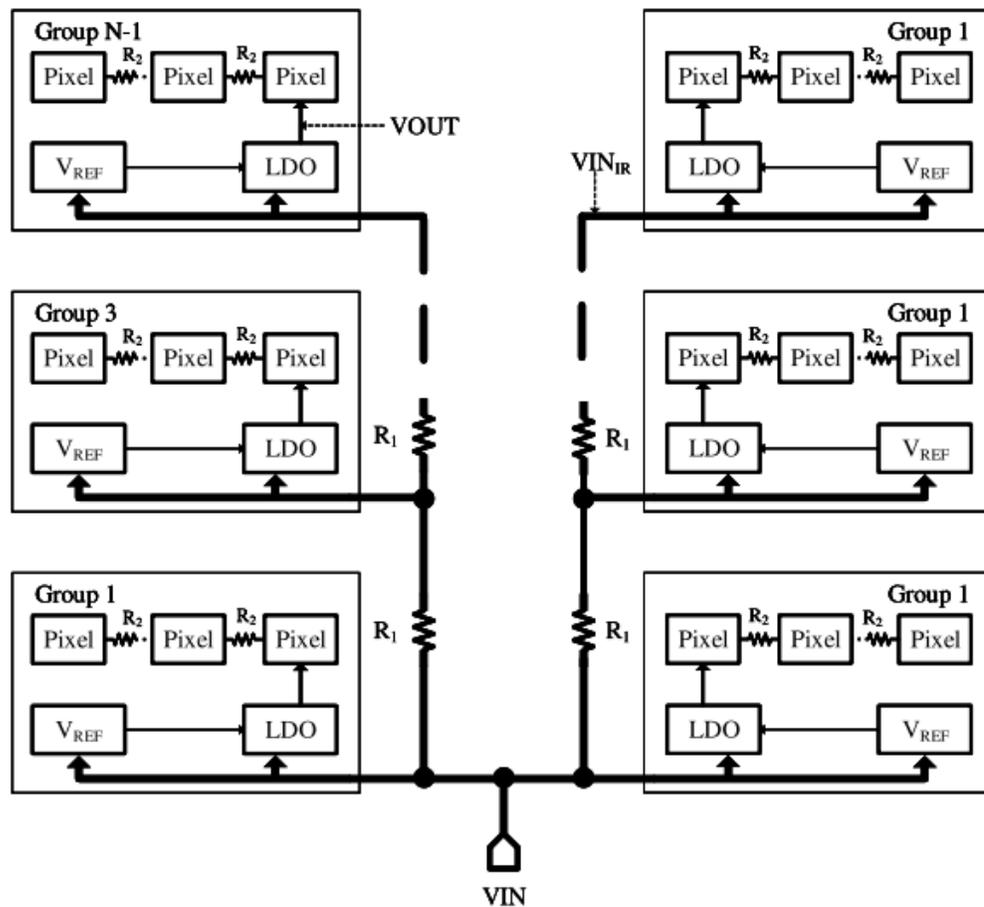
□ 分布式LDO

- 对像素阵列分组，LDO和局部参考电压生成器为每个组内像素的模拟电路提供电压



2 国内外研究现状

□ 分布式LDO供电方式 → LDO引起随机噪声



LDO电源网络上的压降

$$\Delta V_{LDO} = I_{LDO} \times R_1$$

每个像素电源网络上的压降

$$\Delta V = I_{pix} \times R_2 \text{ (可忽略)}$$

分布式LDO产生恒定电源电压

2 国内外研究现状

□ 四种供电方案对比

供电方式	优点	缺点
全局供电	布线容易	IR drop引起的一致性差，随机噪点
全列供电	只在一列像素之间存在压降	IR drop引起的一致性差，列与列之间LDO输出电压存在固定模式噪声
电流模式	一列像素间一致性改善	功耗开销大，列与列之间LDO输出电压存在固定模式噪声
分布式LDO	像素阵列一致性改善	没有形成数字海，模拟岛

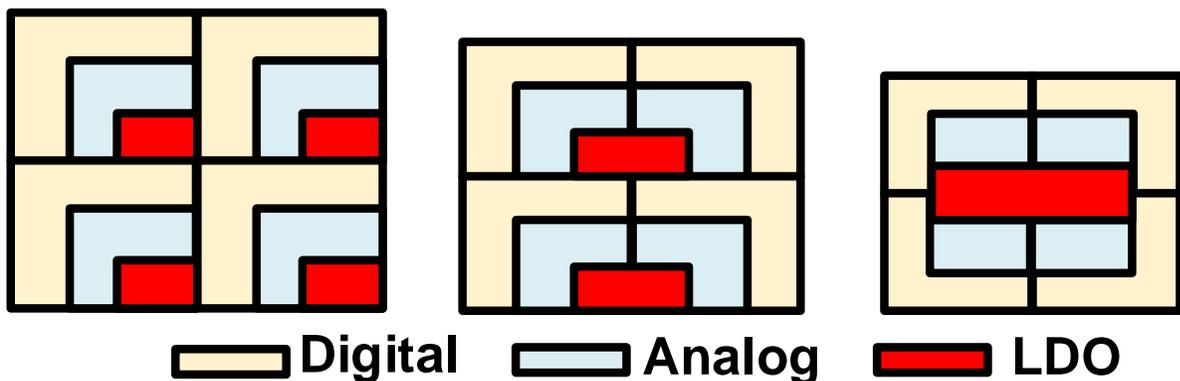
拟采用一种新的内嵌像素级LDO的超像素结构供电方式

芯片架构及关键电路

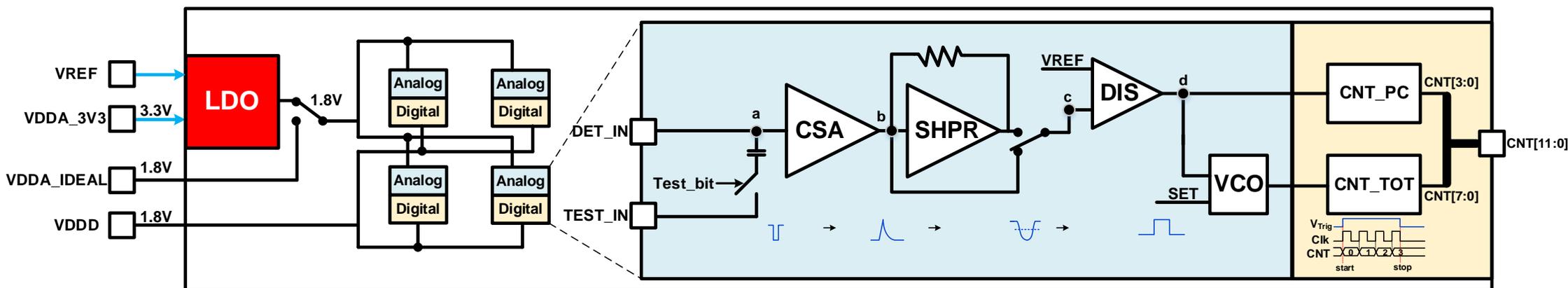
3 电路架构

□ 内嵌LDO的超像素结构

– LDO的特点：面积小，带负载能力小，功耗小 → 如何融入到数字海，模拟岛中

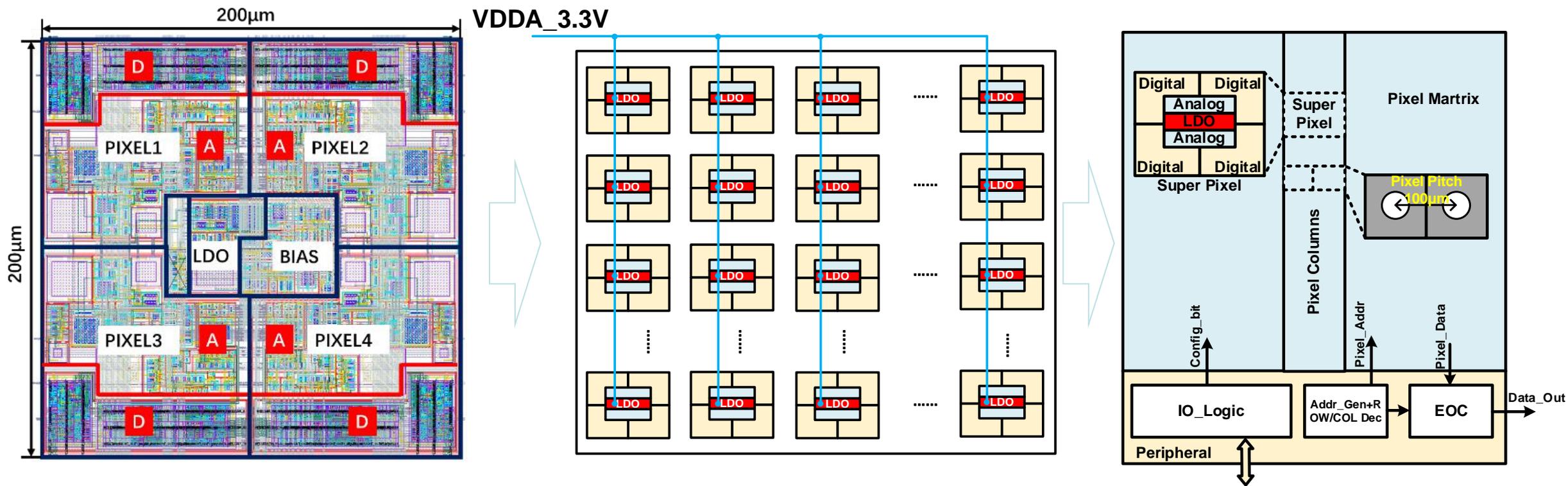


内嵌方案	LDO面积 μm^2	像素面积 ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	LDO功耗 (μW)
1LDO-1Pixel	1272	120 \times 120	105
1LDO-2Pixel	1464	110 \times 110	60
1LDO-4Pixel	1848	100 \times 100	25



3 电路架构

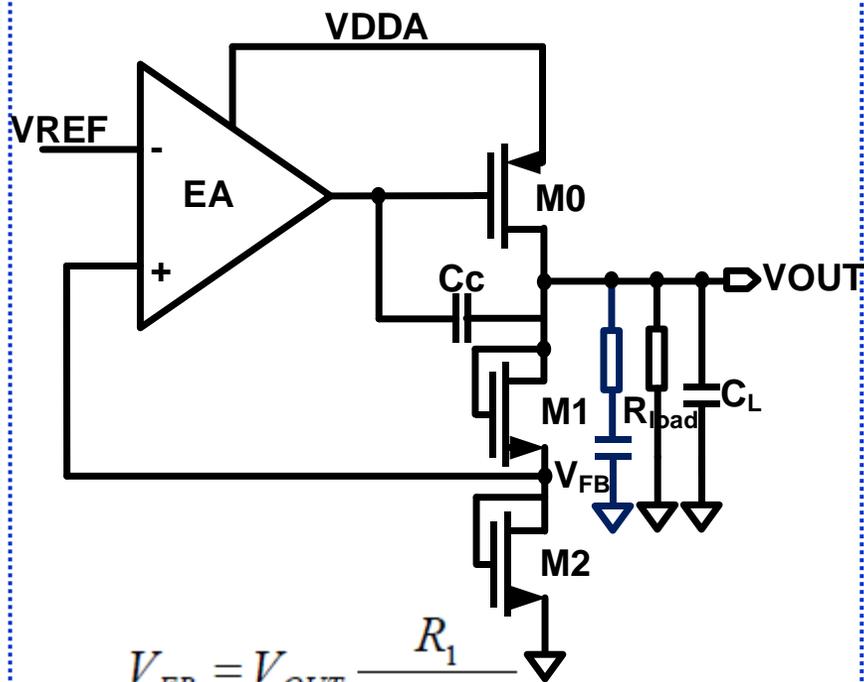
□ 内嵌LDO的超级像素单元组成的像素阵列 (数字海, 模拟岛)



3 关键电路

超像素单元的关键电路结构

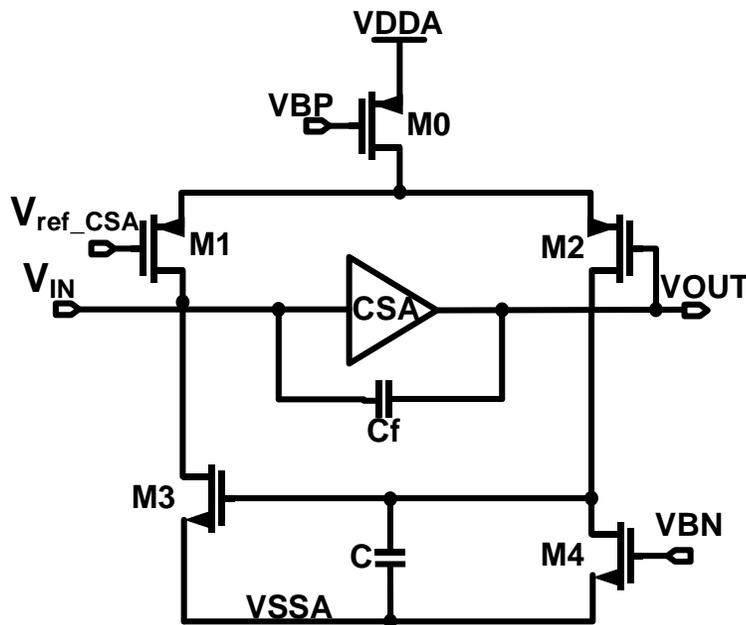
LDO的基本结构



$$V_{FB} = V_{OUT} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

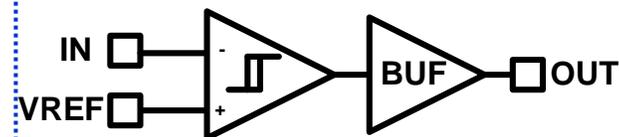
$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

电荷灵敏放大器CSA



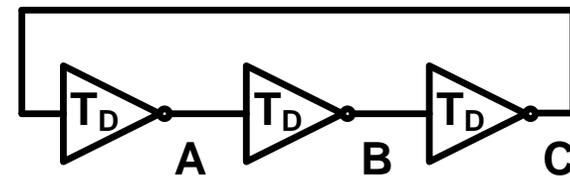
克鲁梅纳彻漏电流补偿电路
 M1, M2: $R_f = 2/g_m$ 对反馈电容Cf放电
 M3: 漏电流补偿

比较器



加缓冲级减小比较器输出的上升和下降时间

压控振荡器

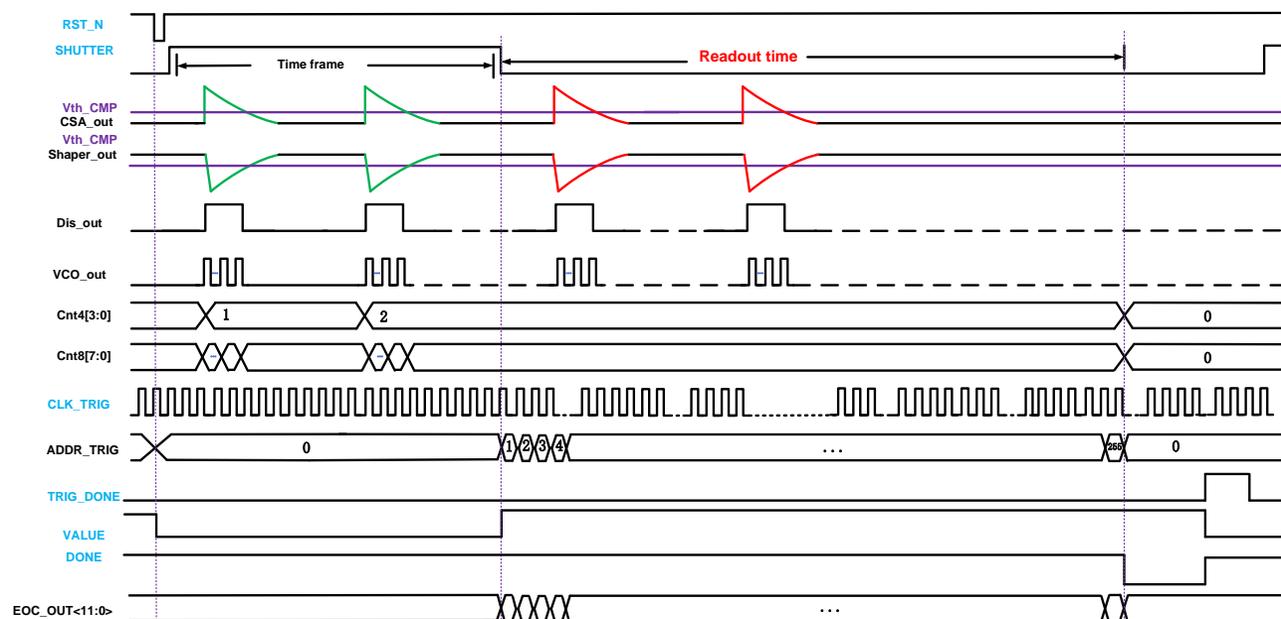
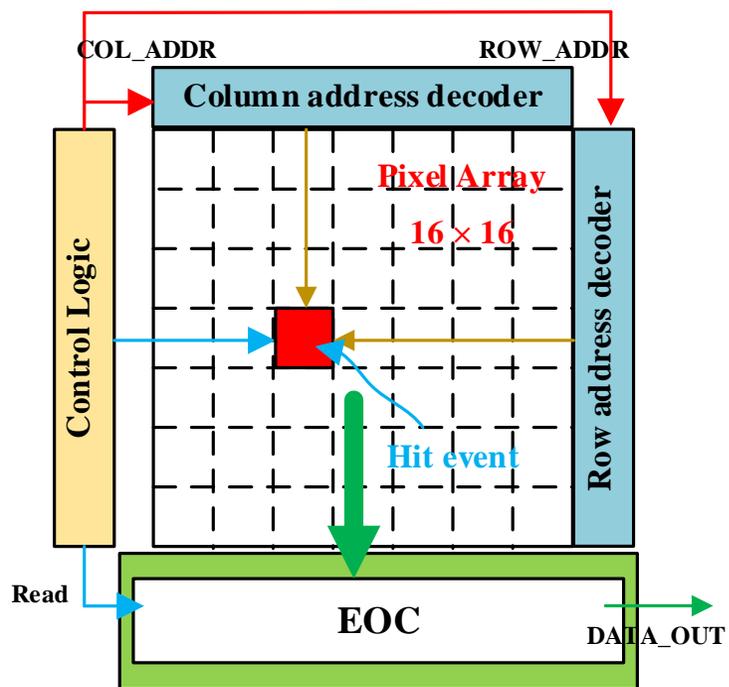


$$f = \frac{1}{2 \times 3T_D}$$

3 关键电路

□ 全帧读出方案

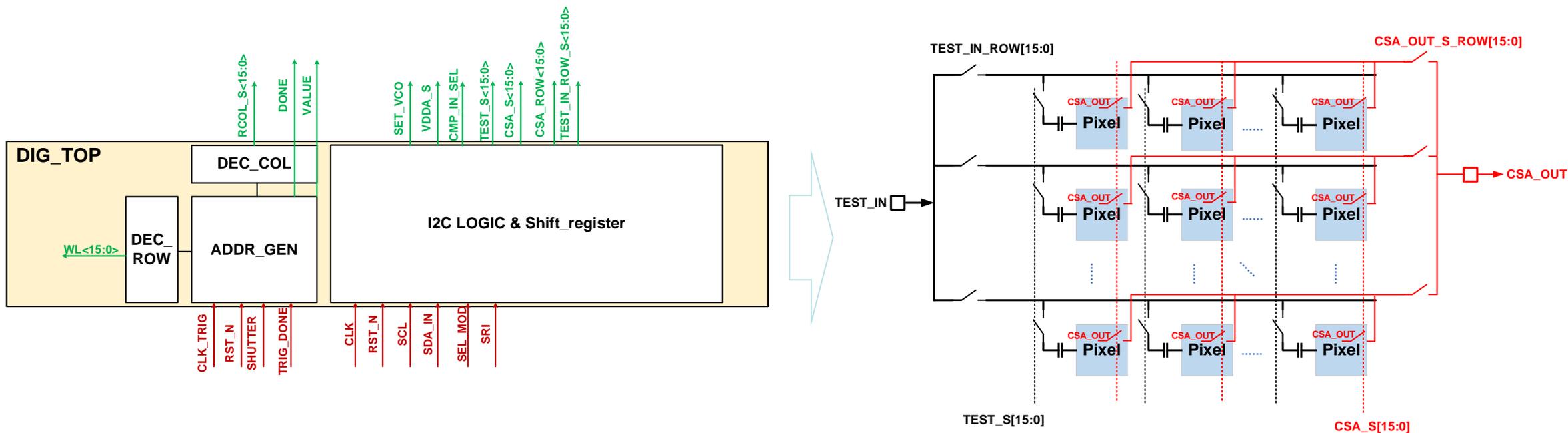
- 按照先行后列的顺序依次生成每个像素的地址，同时读出数据



3 关键电路

□ 可测性设计

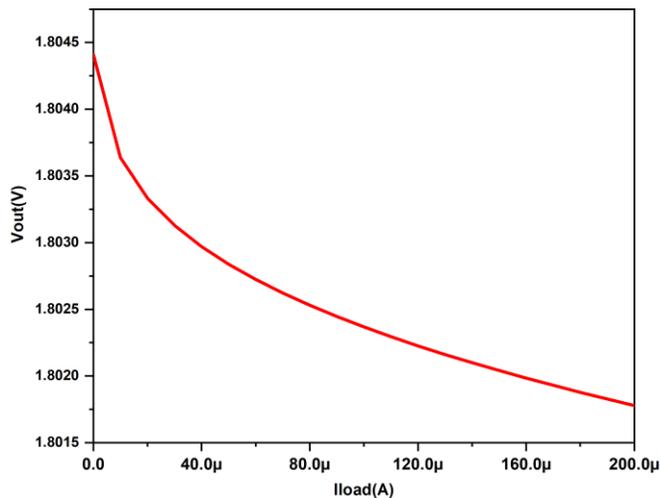
- 一次选中一个像素，测试所有像素的CSA输出
- 内嵌LDO超像素供电和全局供电可选



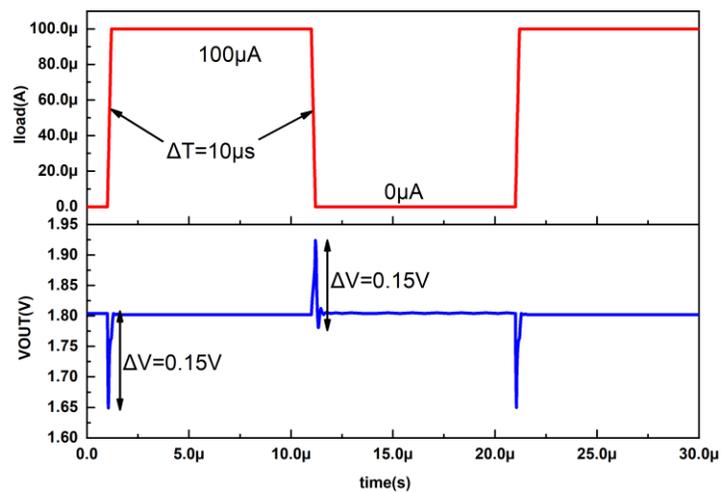
实验结果及讨论

4 仿真结果

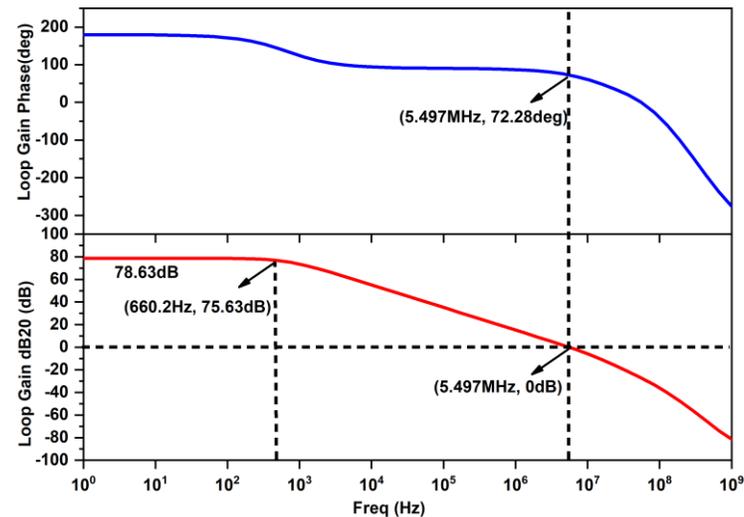
□ 内嵌LDO的仿真结果



✓ 负载调整率~ 1.35 mV/100μA



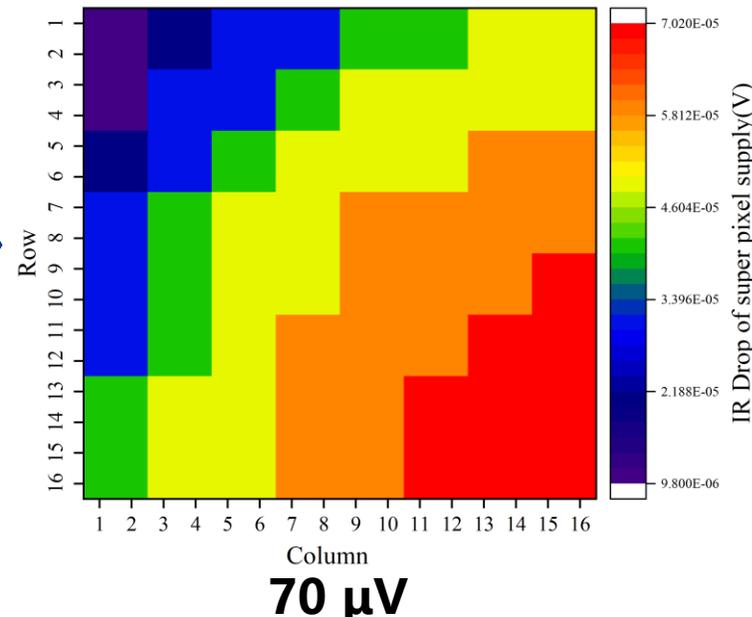
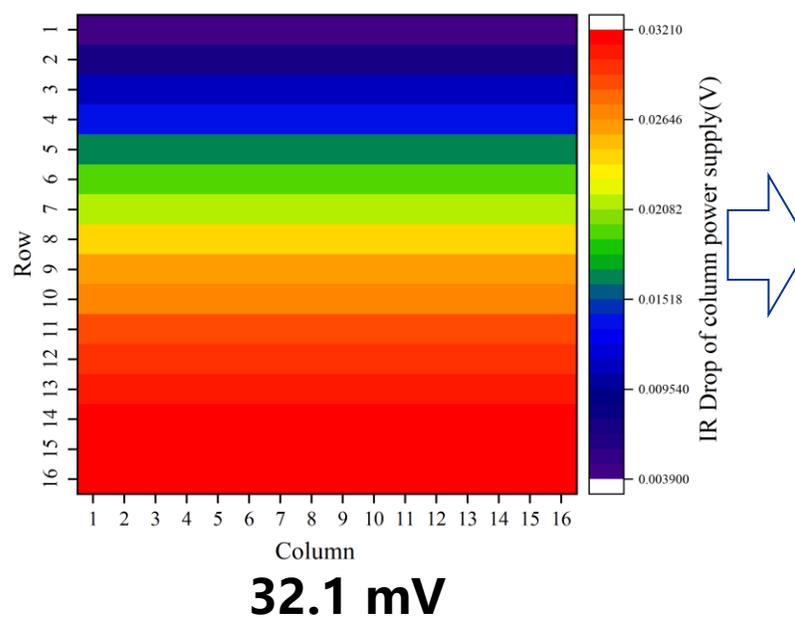
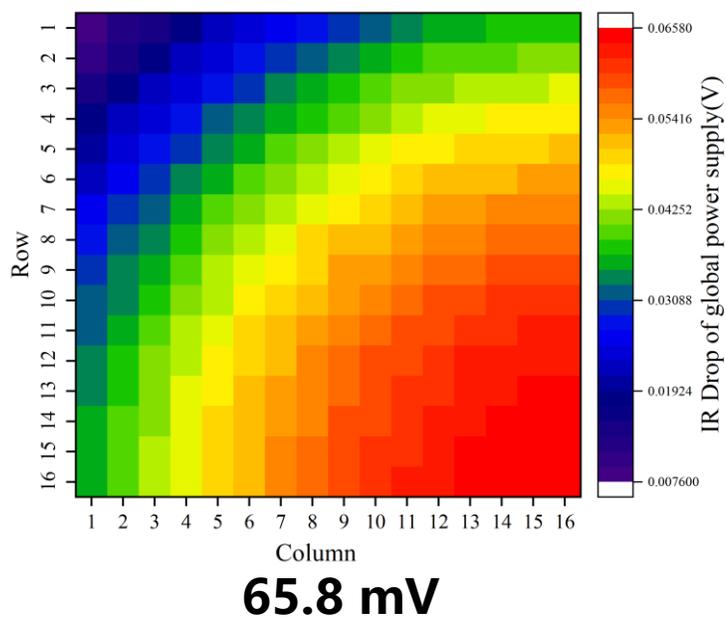
✓ 负载0-100 μA跳变,
过冲电压150mV



✓ 满载相位裕度72°

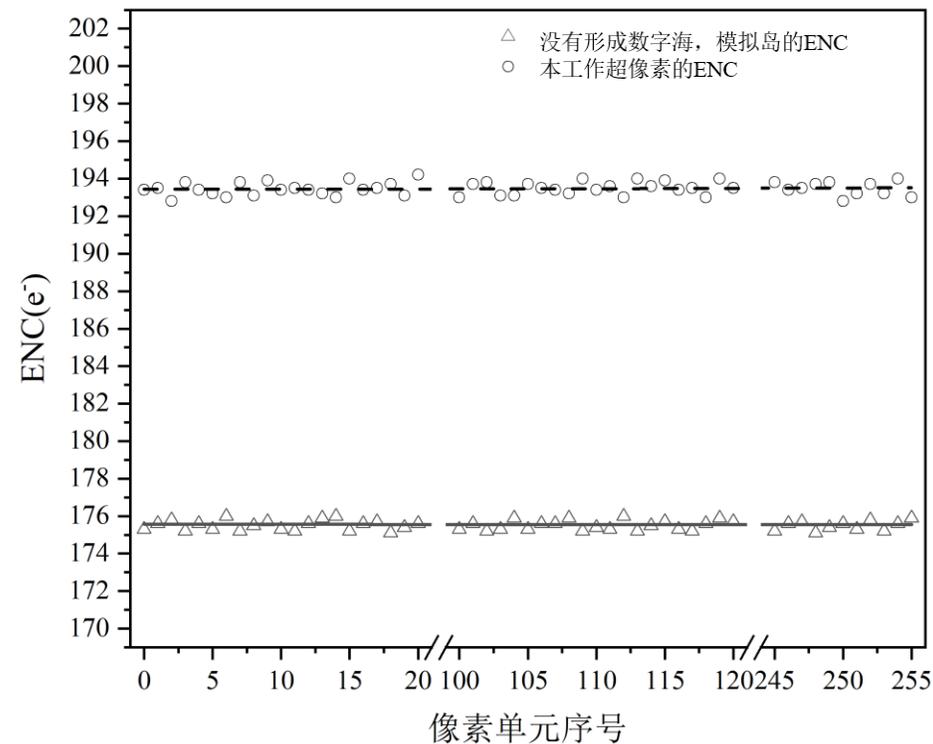
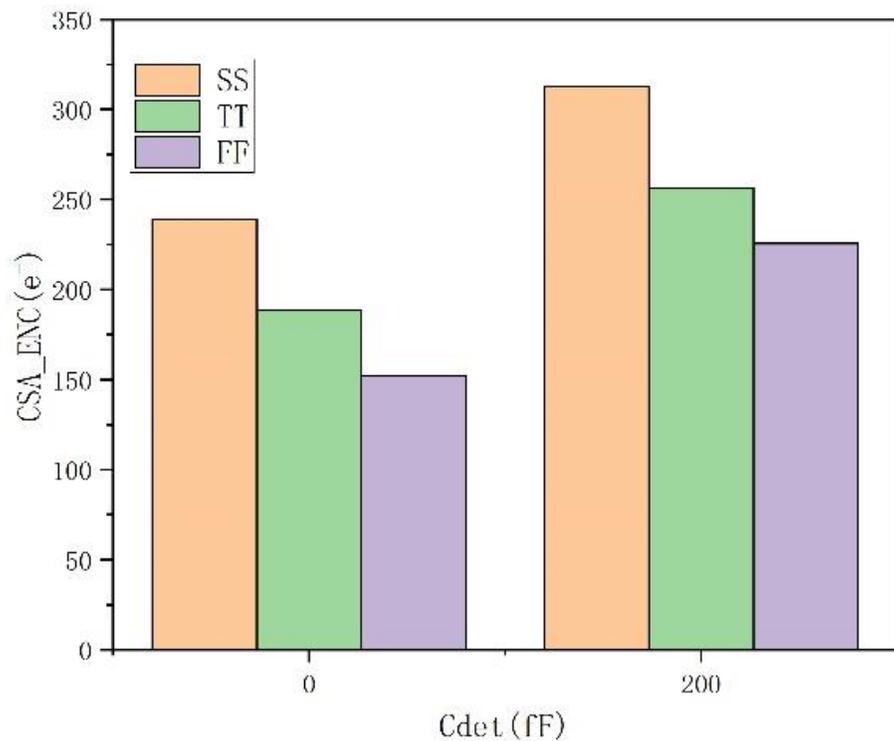
4 仿真结果

像素阵列压降的仿真结果



4 仿真结果

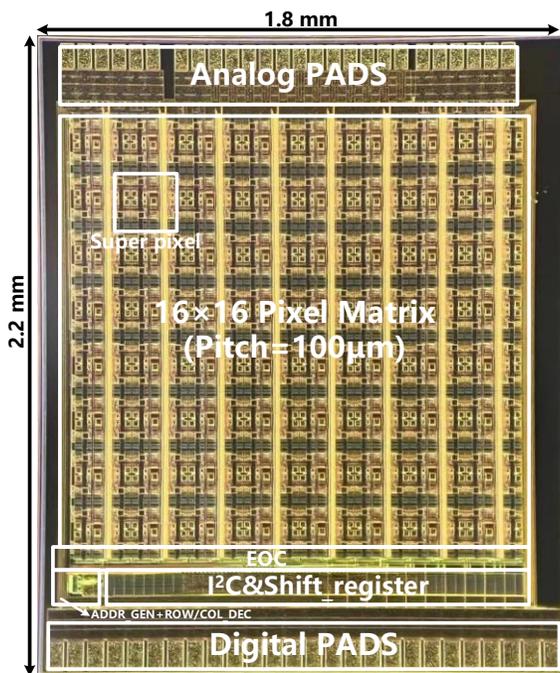
ENC的不一致性



4 芯片实现

□ 内嵌LDO的像素型读出ASIC原理样片 (SENSPIX2_B)

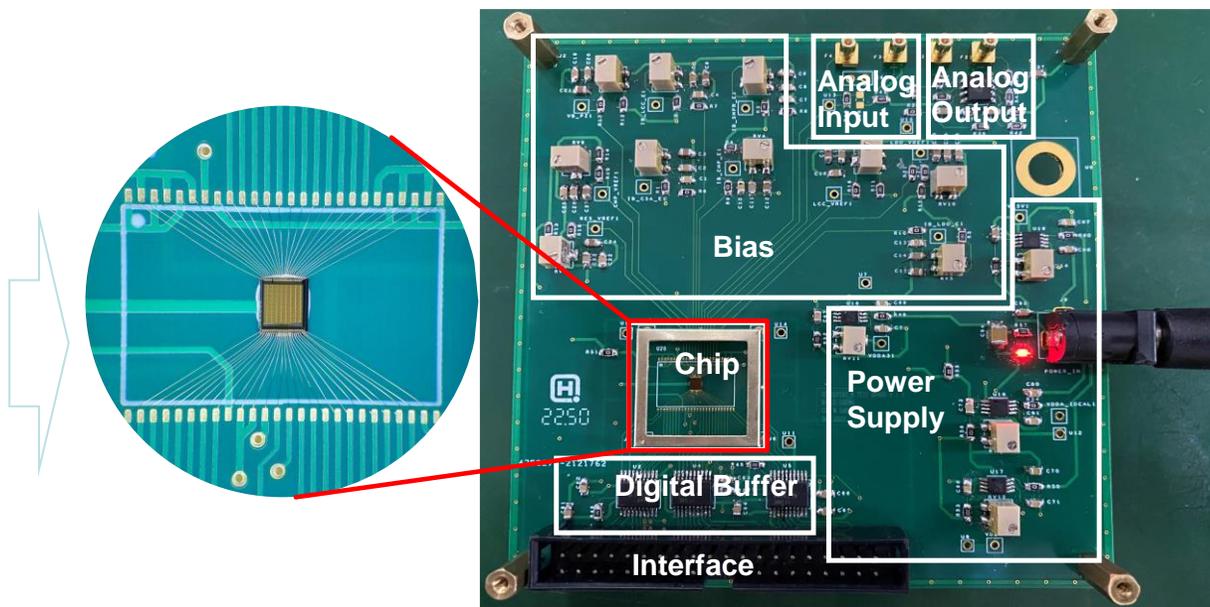
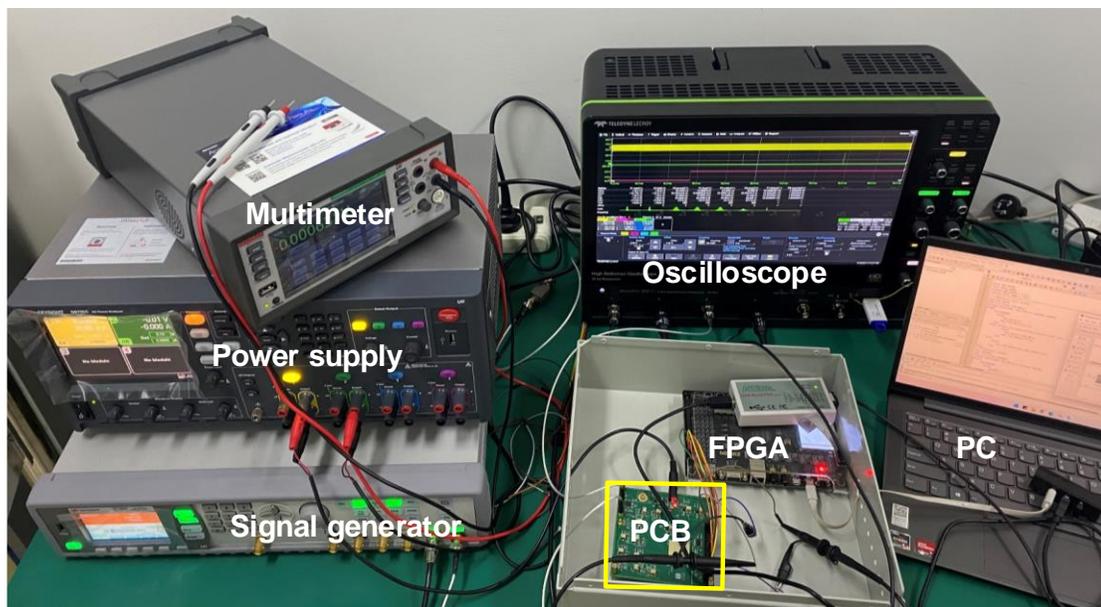
- ◆ 工艺: CMOS 0.18 μ m 3.3/1.8 V MS
- ◆ 流片: MPW \rightarrow 2022年8月
- ◆ 创新点
 - 采用内嵌LDO的超级像素电路结构
 - 内置模拟滤波成形
 - 同时能量测量和计数测量



参数	指标
探测器类型	硅像素探测器
制造工艺	TSMC CMOS 180nm 1.8V/3.3V
像素尺寸	100 μ m \times 100 μ m
阵列规模	16 \times 16
等效噪声电荷	< 200 e-(rms)@ 0 fF
数据位宽	4+8 bits
工作时钟	50 MHz
触发计数率	1 MHz
数据吞吐率	560 Mbps
静态功耗	< 50 μ W/Pixel

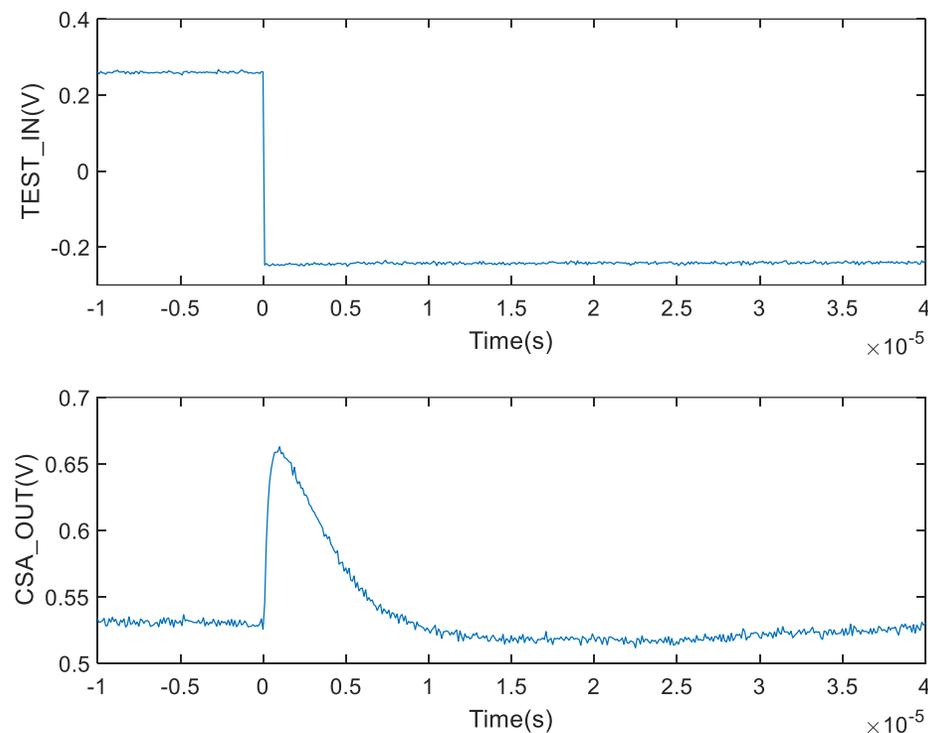
4 测试结果

□ SENSPIX2_B电气测试平台

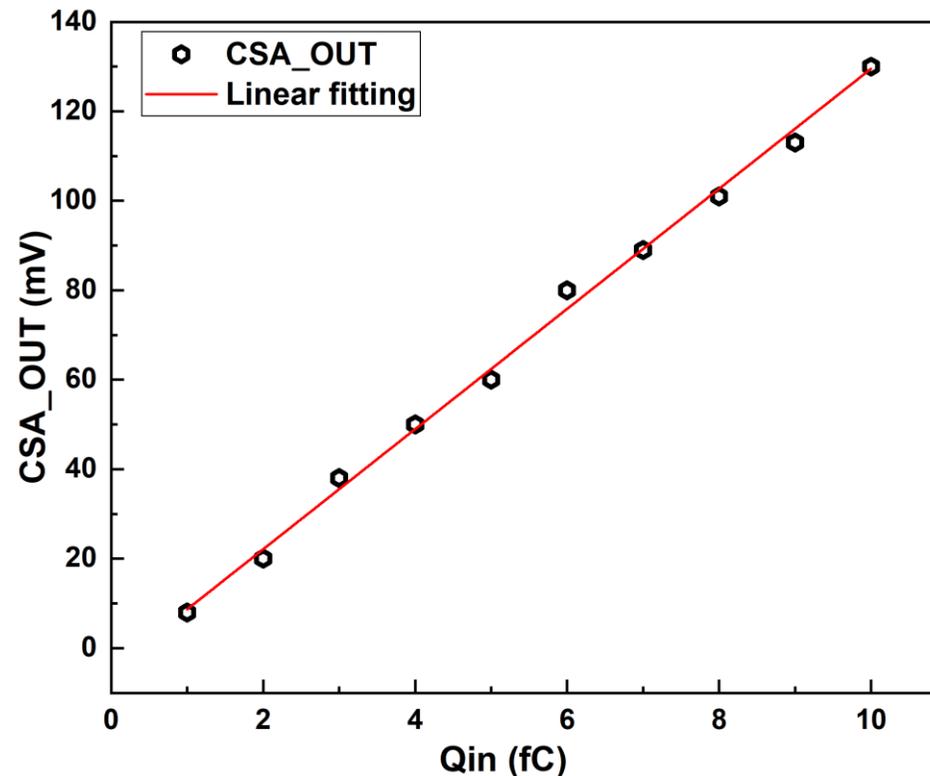


4 测试结果

□ SENSPIX2_B电气测试结果 → 模拟前端输出



- ✓ CSA增益为13mV/fC
- ✓ CSA输出端ENC为200e-

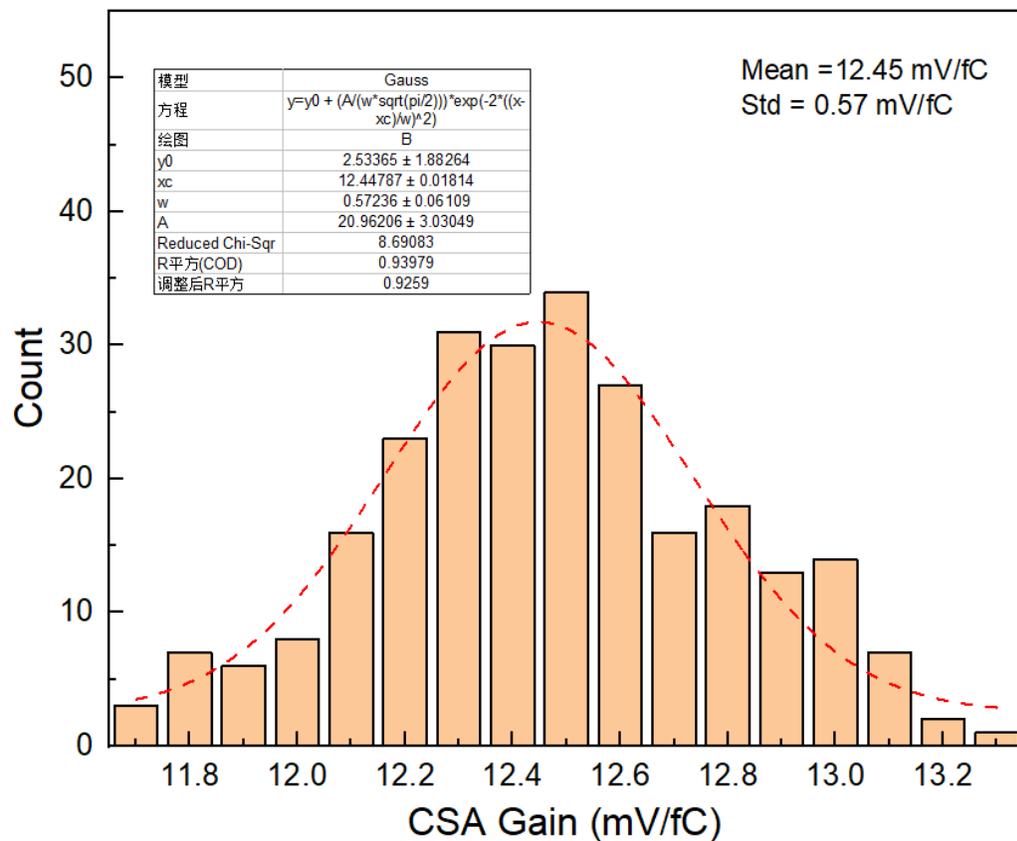


- ✓ CSA输出非线性度为1.2%

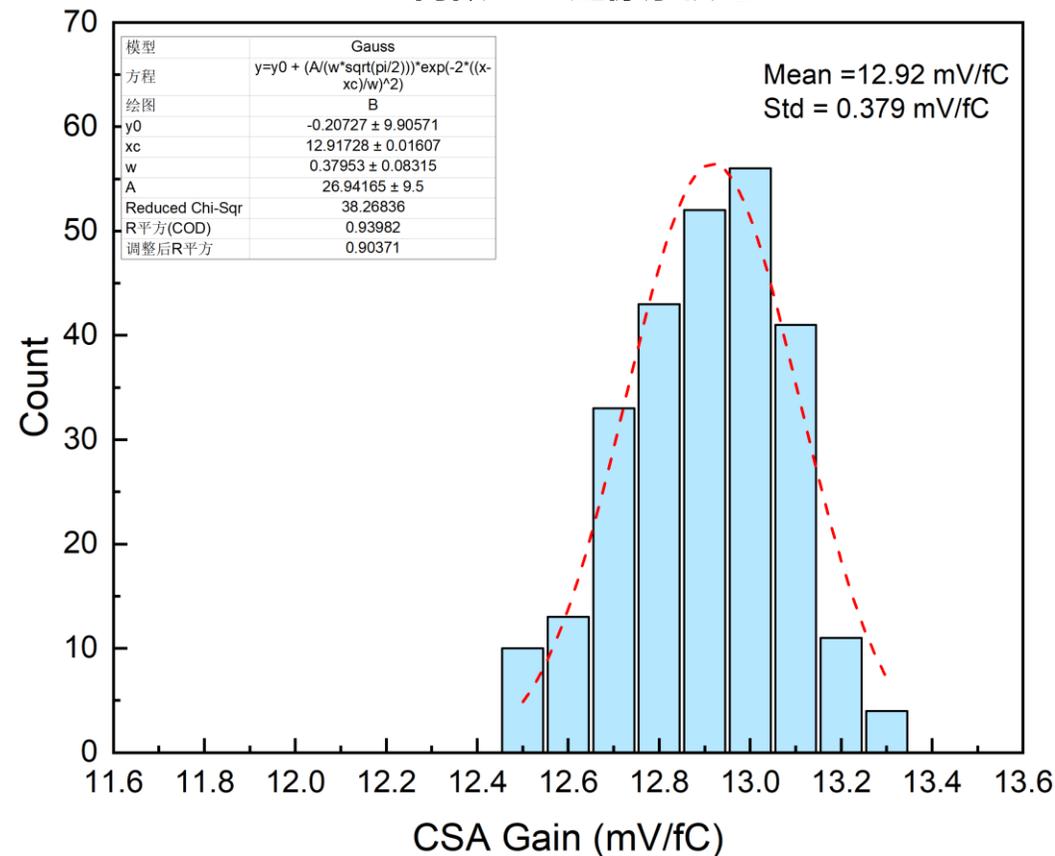
4 测试结果

□ SENSPIX2_B电气测试结果 → 阵列一致性

全列供电



内嵌LDO超像素供电



✓ 内嵌LDO超像素供电均值大、方差小

4 实验结果比较

□ 像素型探测器ROIC的主要性能对比

参数	FE-I3 (2006)	RD53A (2018)	Medipix2 (2010)	HYLITE0.2 (2022)	SENSPIX2_B(2022)
CMOS 工艺	250nm	65nm	130nm	130nm	180nm
阵列规模	18×160	400×192	256×256	16×24	16×16
像素尺寸(μm)	50μm×400μm	50μm	55μm	100μm	100μm
像素电路结构	TOT	TOT	Photon Counting(PC)	Charge integration	PC+TOT
动态范围	5 bit	16 bit	13 bit	10 bit	4 bit+8 bit
噪声/等效噪声电荷(ENC)	5000-20000 e ⁻	140e ⁻ (rms)	140e ⁻ (rms)	0.35~12.6/Photons	200e ⁻ (rms)
功耗	40 μW/pixel	NA	8 μW/pixel	19 μW/pixel	40 μW/pixel
供电方案	Serial powering	Serial powering	Column powering	Distributed LDO	Super pixel with LDO
应用	HL-LHC 实验	HL-LHC 实验	X射线成像 高能物理	SHINE	星载X射线成像

总结与展望

5 总结与展望

● 总结

- ✓ 完成了一款内嵌LDO超像素结构的X射线成像探测器像素型前端读出ASIC的设计和芯片测试;
- ✓ 测试结果测得到CSA增益为13 mV/fC, ENC为200 e-@0 fF, 静态功耗约40 μ W, 像素间CSA增益的偏差 σ_{gain} 仅为0.3 mV/fC, 可以很大程度上提高读出数据的一致性。

● 下一步计划

- ✓ 完成ENC的低噪声优化;
- ✓ 设计256 \times 256阵列的像素型读出ASIC。



请各位老师和同学批评指正

谢谢大家！