



清华大学

Tsinghua University

EMPIX2: 一款用于电镜成像的100 kfps大动态范围像素探测器读出芯片

魏桐^{1,2}, 杨昊彦^{1,2}, 邓智^{1,2}, 薛涛^{1,2}

¹清华大学工程物理系

²粒子技术与辐射成像教育部重点实验室

2023年10月22日

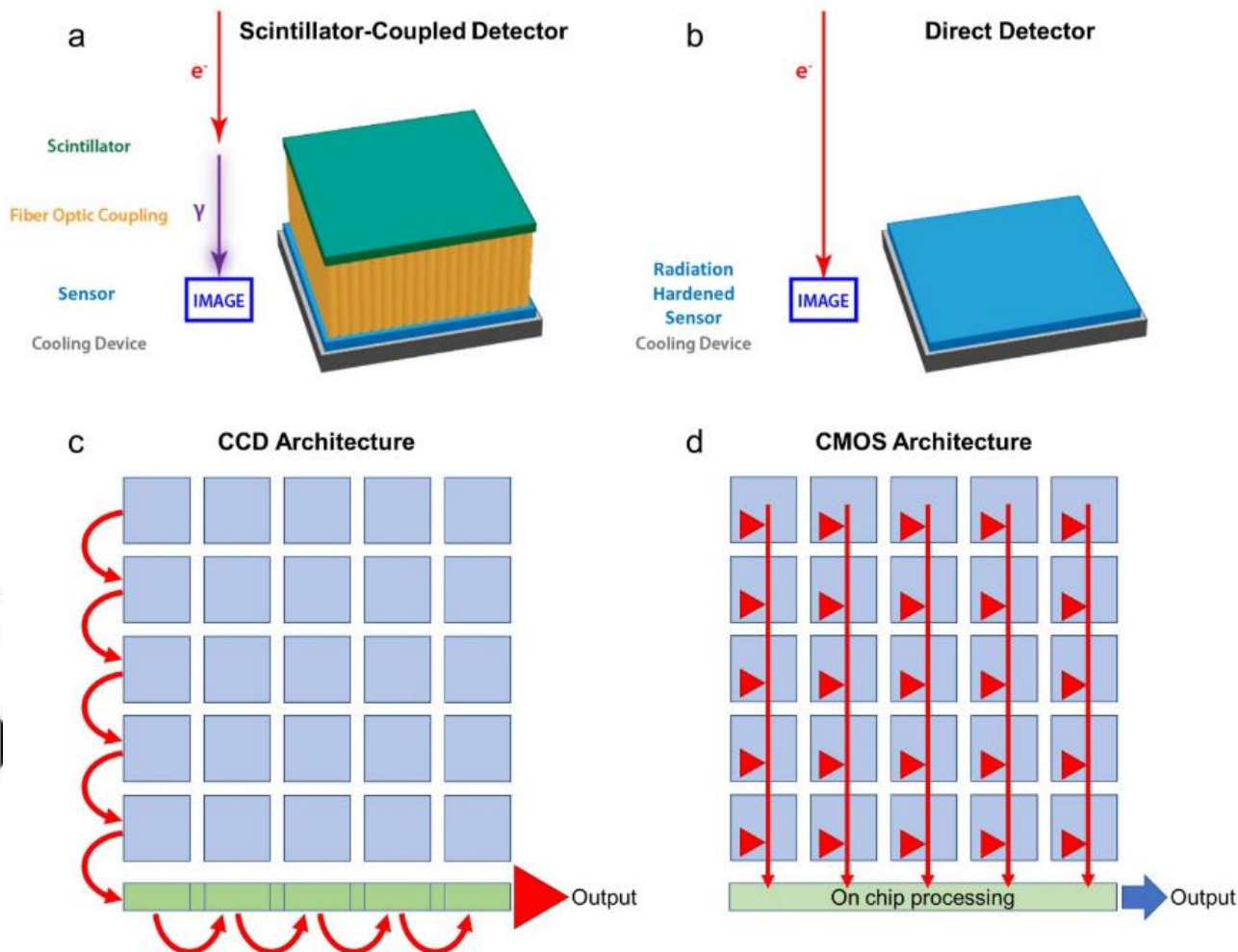
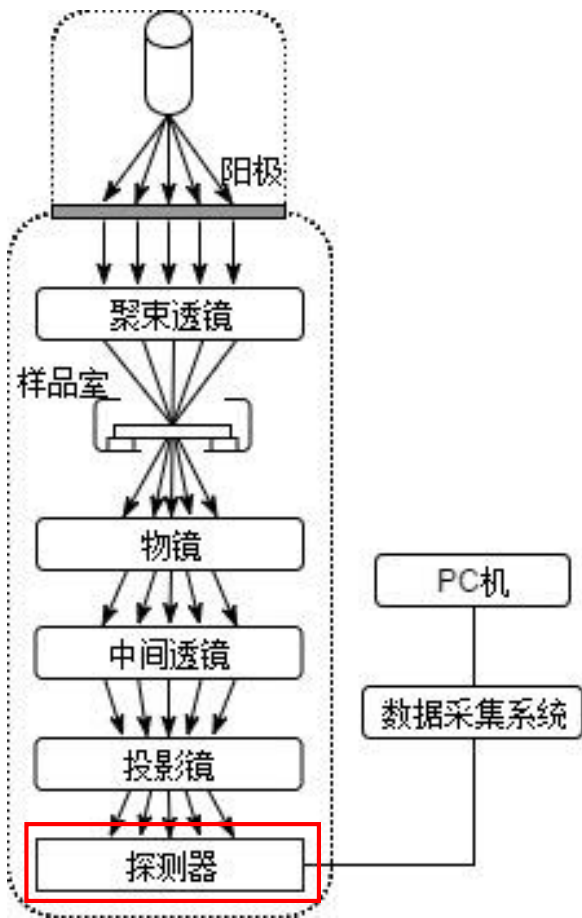


目录

1/ 背景介绍
3/ 电子学测试

2/ ASIC设计
4/ 总结展望

直接电子探测器用于电镜成像

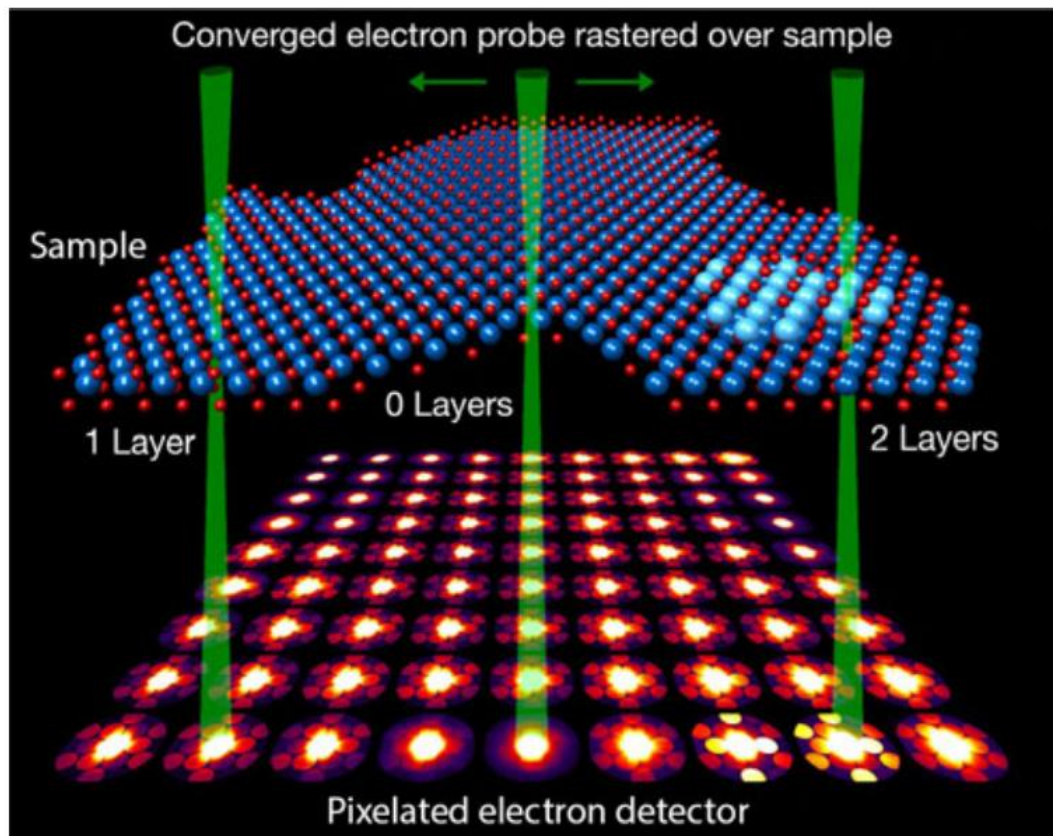


更好的探测器->更好的分辨率

Levin, Barnaby DA. *J. Phys. Mater.* 4.4 (2021): 042005.

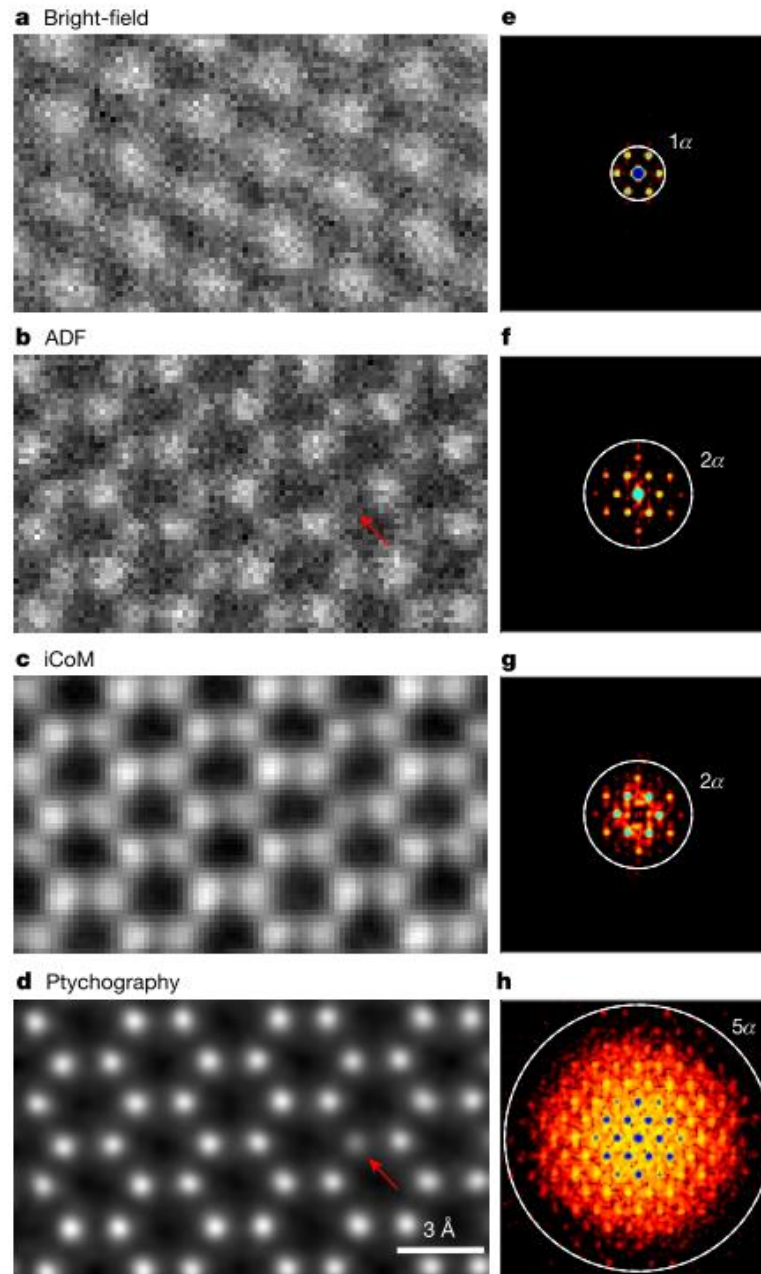


4维STEM



扫描点的二维位置
像平面二维衍射数据

Ophus, Colin. *Microscopy and Microanalysis* 25.3 (2019): 563-582.



Jiang, Yi, et al. *Nature* 559.7714 (2018): 343-349. 4

STEM对帧率和动态范围的要求

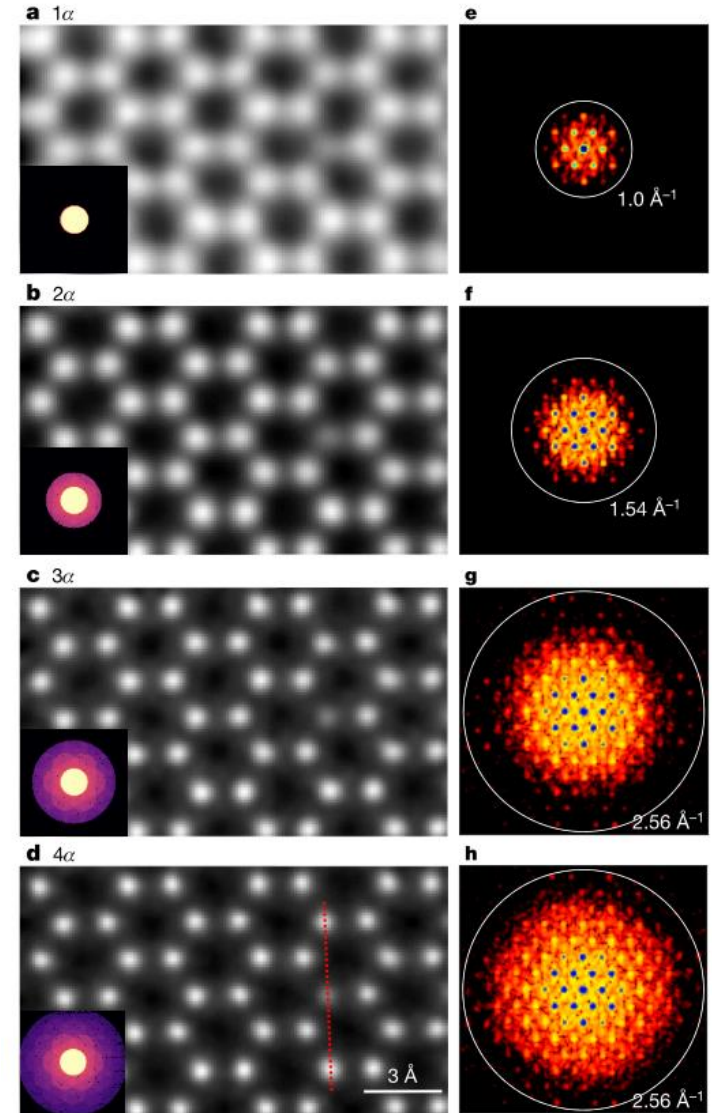
➤ 超快帧率

- 10~100 kfps (目前商用~1 kfps)
- 减小样品漂移带来的图像失真
- 降低辐照损伤带来的样品退化

➤ 大动态范围

- 使用大衍射角(5α)信息提高分辨率
- 提高图像的对比度

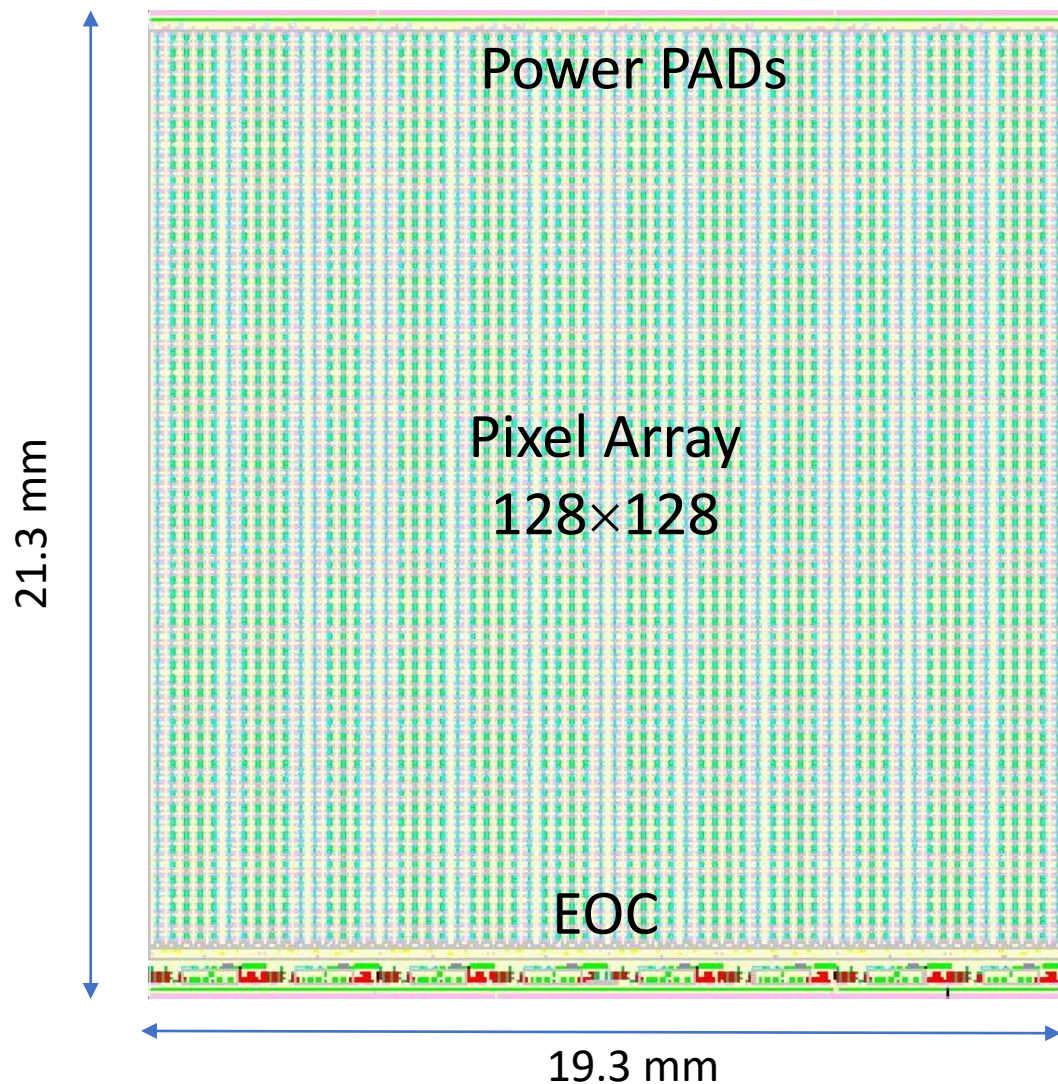
Jiang, Yi, et al. *Nature* 559.7714 (2018): 343-349.



Ptychography重建图像



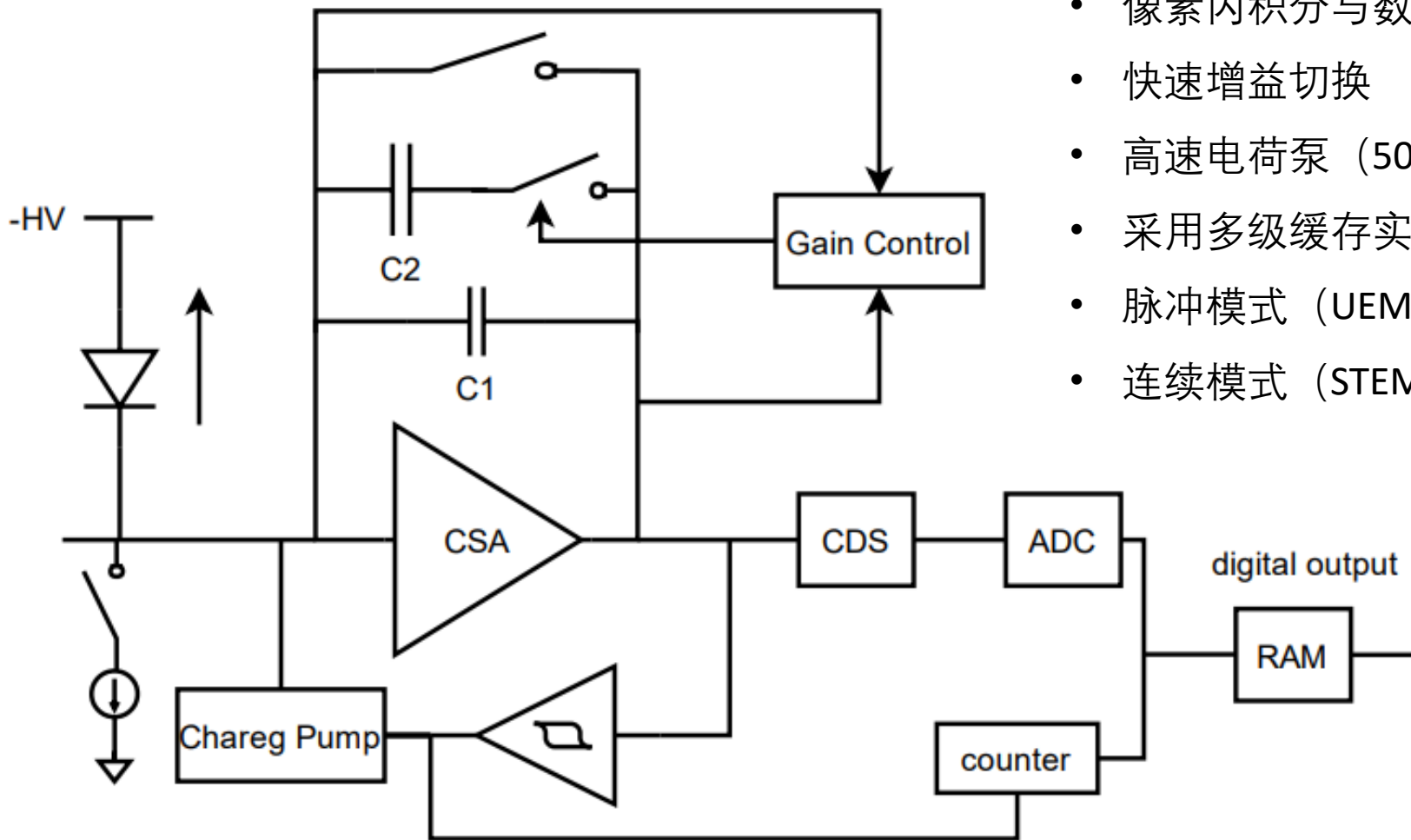
EMPIX2性能指标



条目	参数
像素尺寸	150×150 μm ²
像素阵列	128×128
工艺	GF 180 nm
帧率	最大100 kfps
有效积分时间	帧周期-1.6 μs
输入范围	55 pC/帧/像素(硅探测器中 1.25×10 ⁶ keV, 100 kfps)
增益调节	自适应调节+电荷泵
分辨率	11+1+12 bits
噪声	ENC ~ 600 e (硅中2.2 keV)
探测器	200 μm p型金刚石 500 μm 硅
功耗	10 W(脉冲模式) 6.5 W(连续模式)



像素前端电路

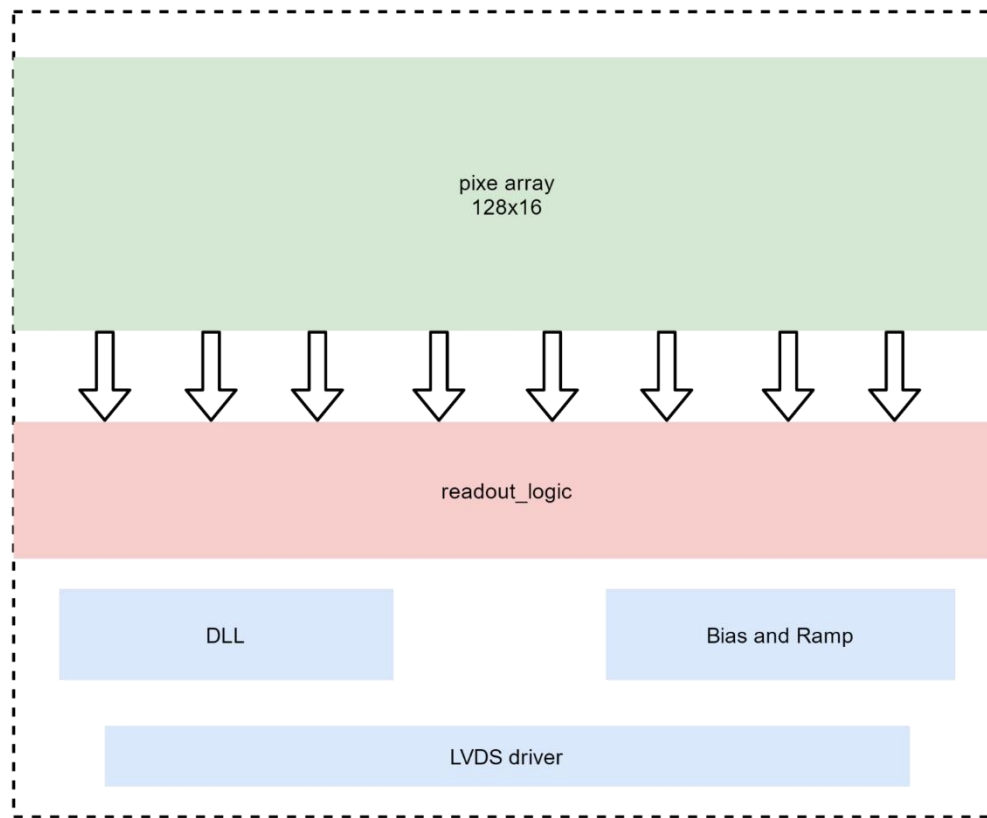
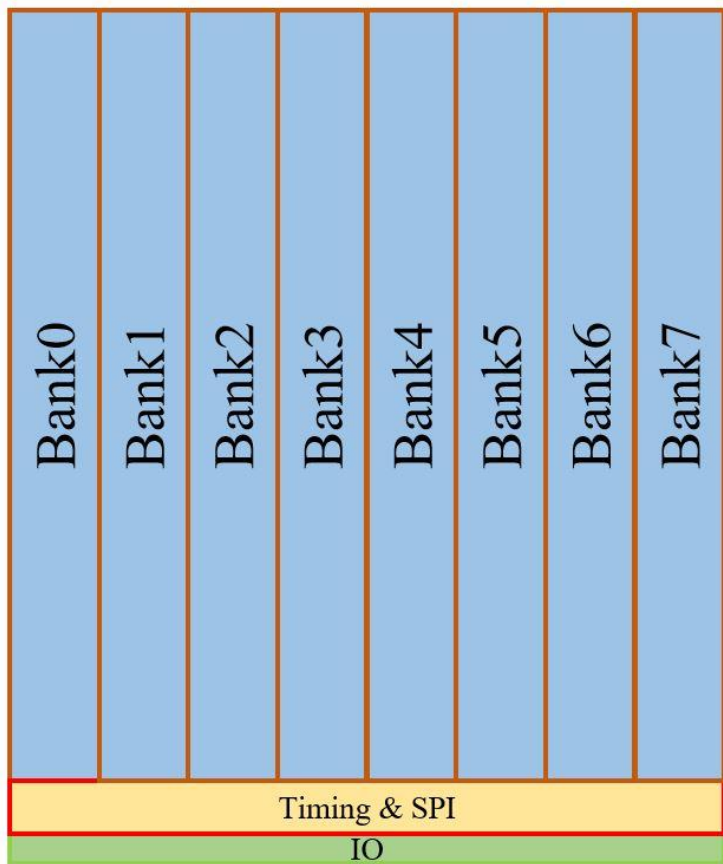


- 像素内积分与数字化
- 快速增益切换
- 高速电荷泵 (50 MHz)
- 采用多级缓存实现流水线工作
- 脉冲模式 (UEM) : 速度和动态范围
- 连续模式 (STEM) : 功耗



顶层读出电路

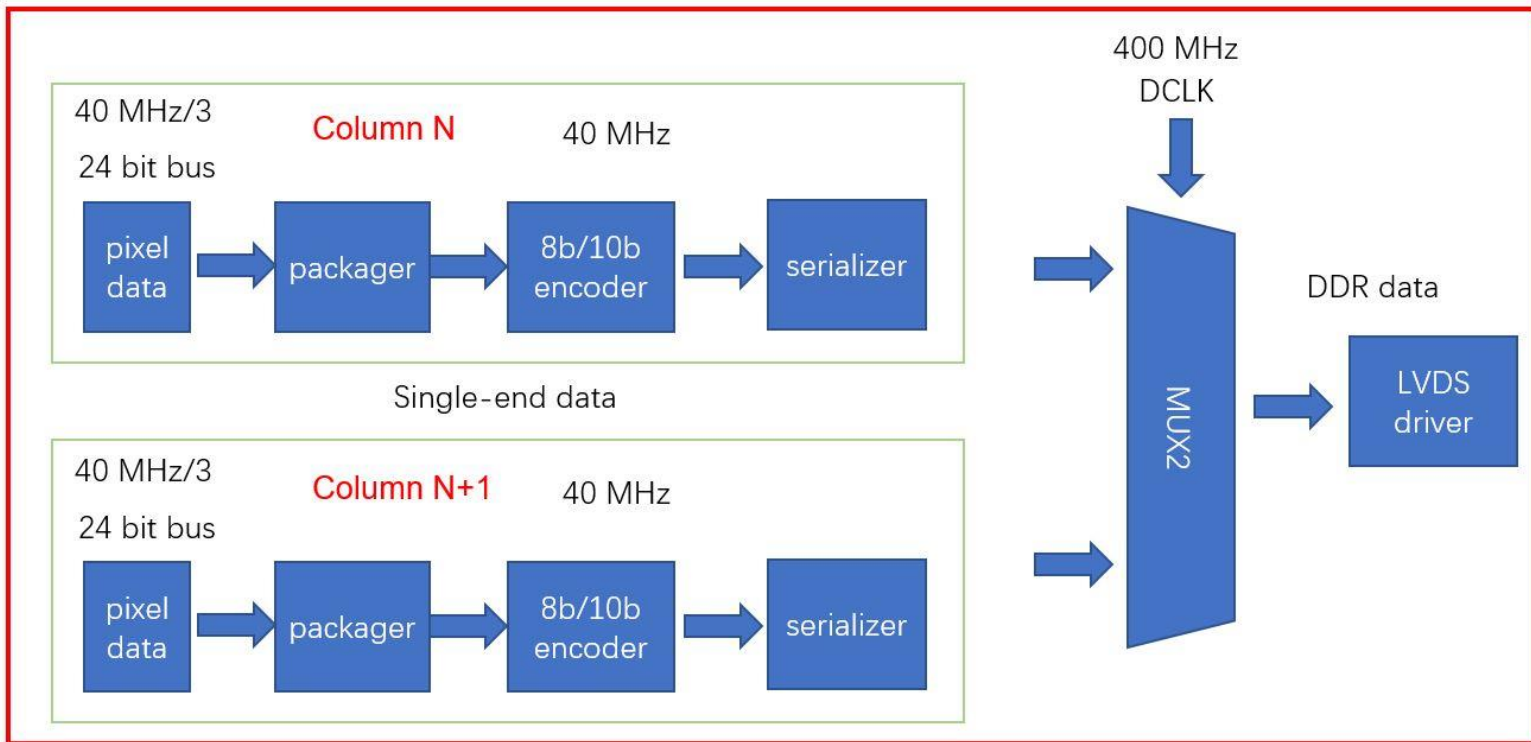
数据带宽需求~39.3 Gbps



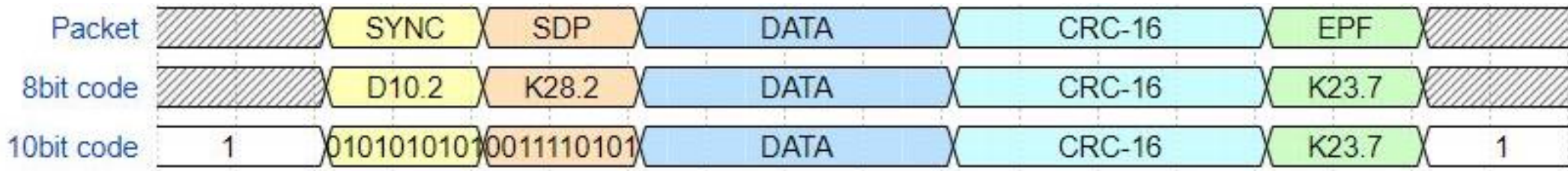
- 整个芯片被均分为8个bank，每个bank包含16列像素的偏置和顶层读出电路
- 每个bank通过8对LVDS接口将数据发送到芯片外



数据接口

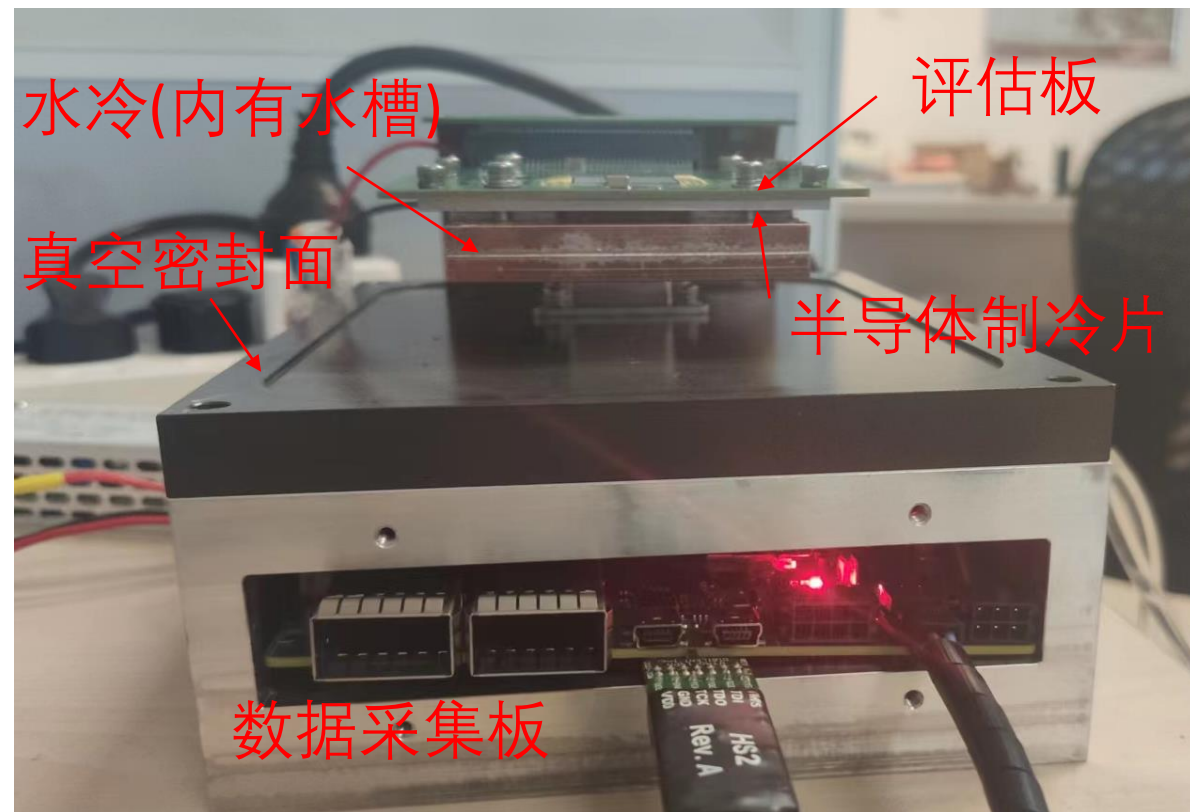
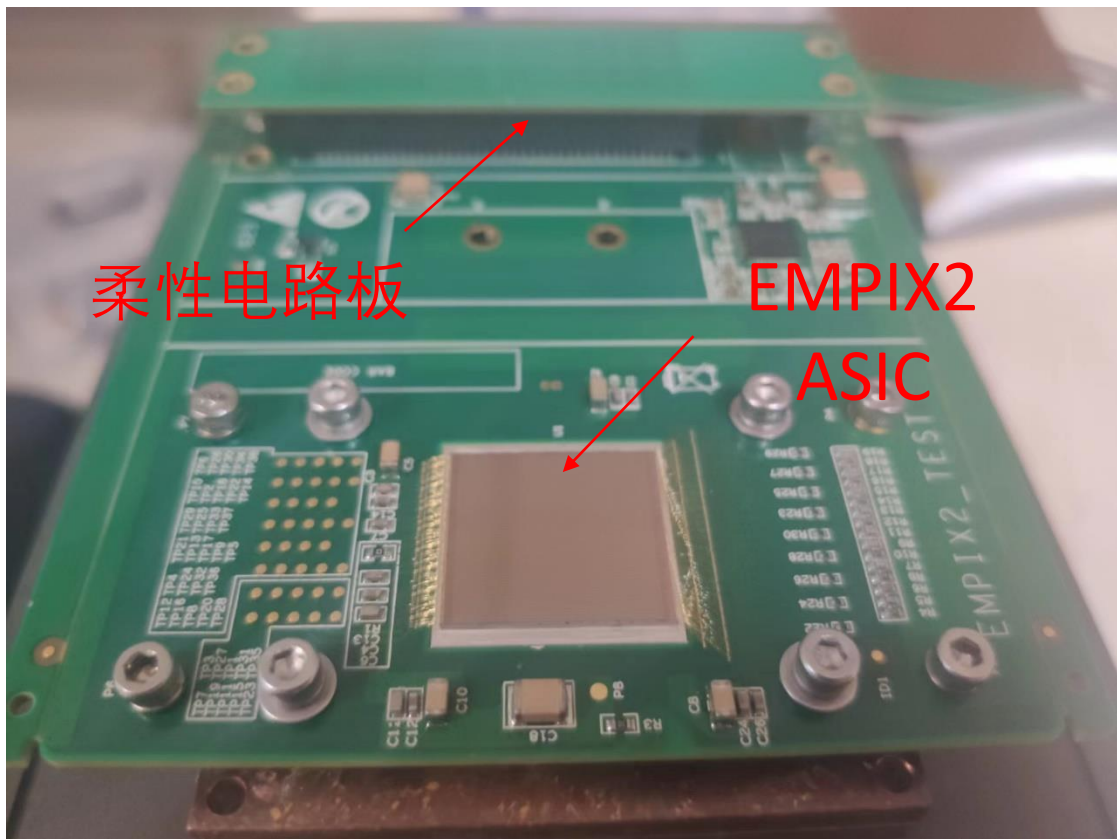


- 类似USB3.0的数据包和编码
- 全芯片64对LVDS串行总线
- 每对数据线读出相邻2列像素
- 每对数据线串行发送数据包



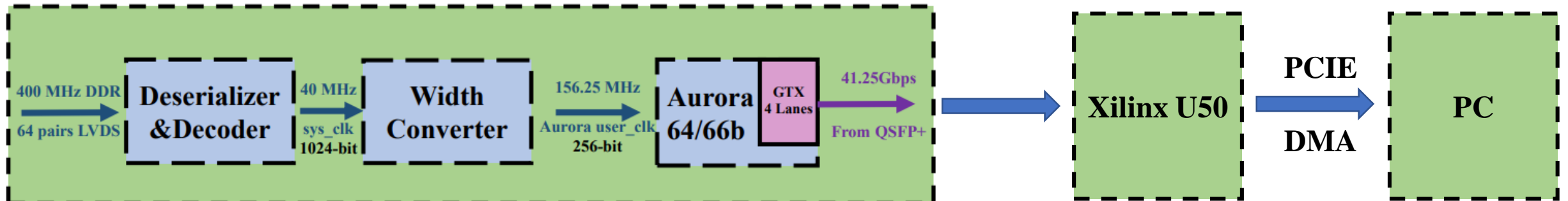


测试系统



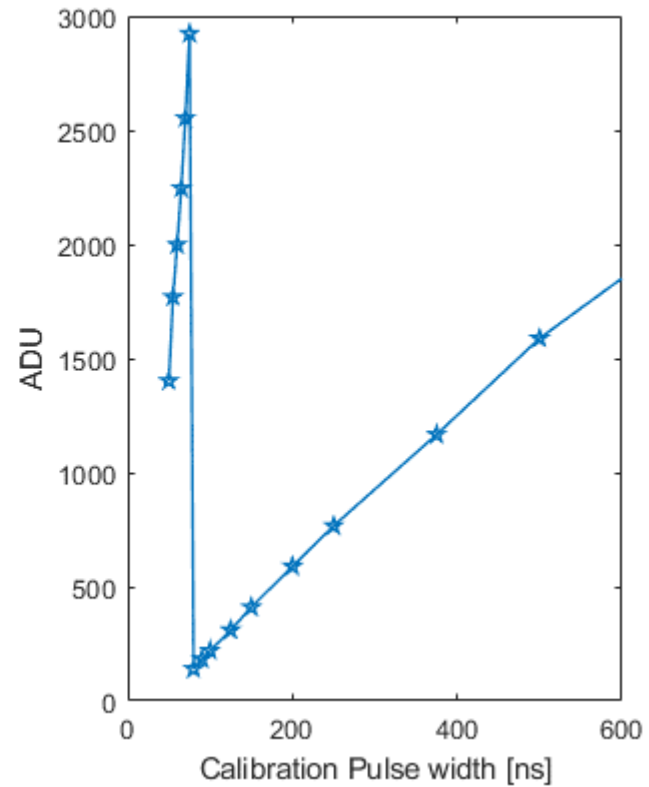
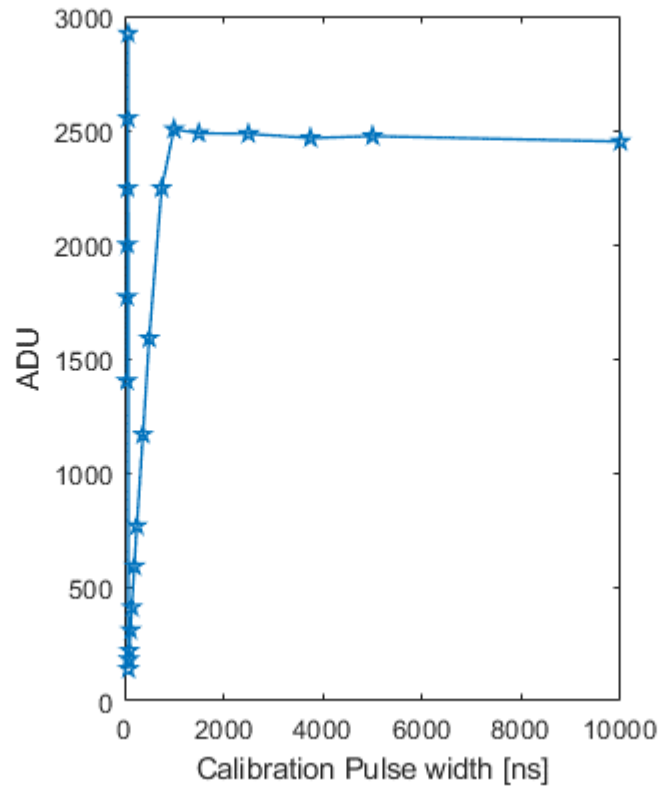
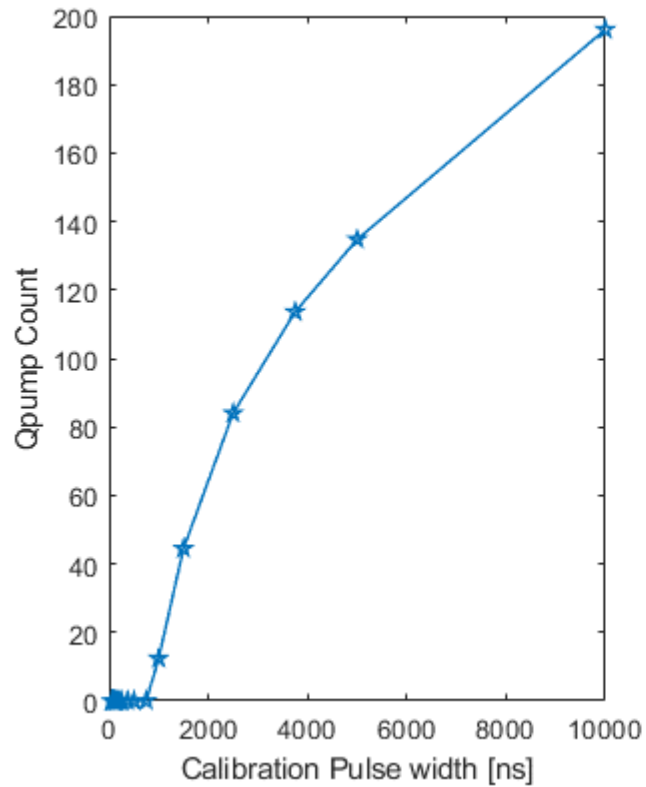
数据采集系统

- 基于Xilinx Kintex-7 系列FPGA
- 在FPGA内完成数据的解串和解码并重排
- 通过QSFP光模块远距离传输
- Xilinx U50数据加速卡将光纤传输的数据直接写入到电脑硬盘中





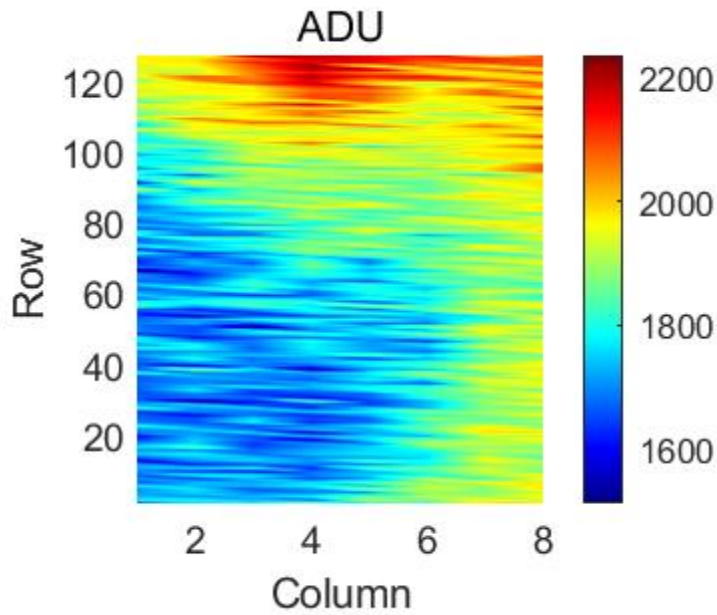
电子学测试



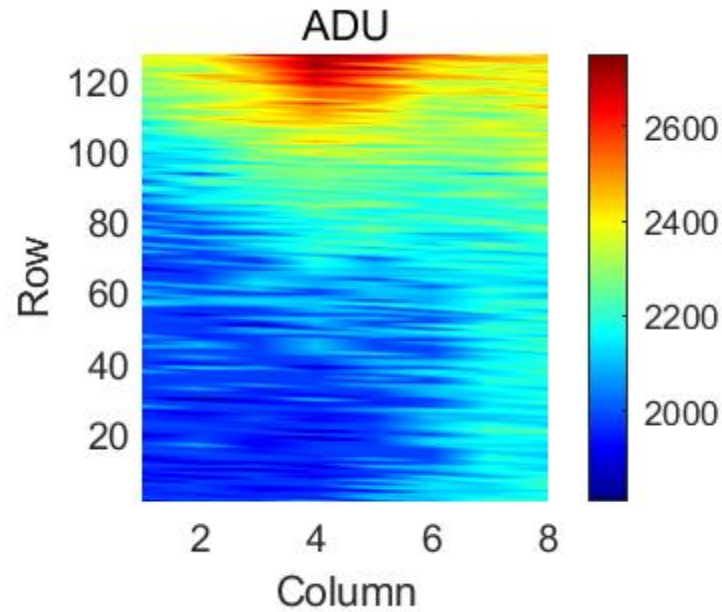
- 通过扫描校准电流的脉冲宽度注入不同电荷(脉冲模式@50 kfps)
- 所有像素的校准源同时开启和关断，贡献了相当大的串扰和非线性



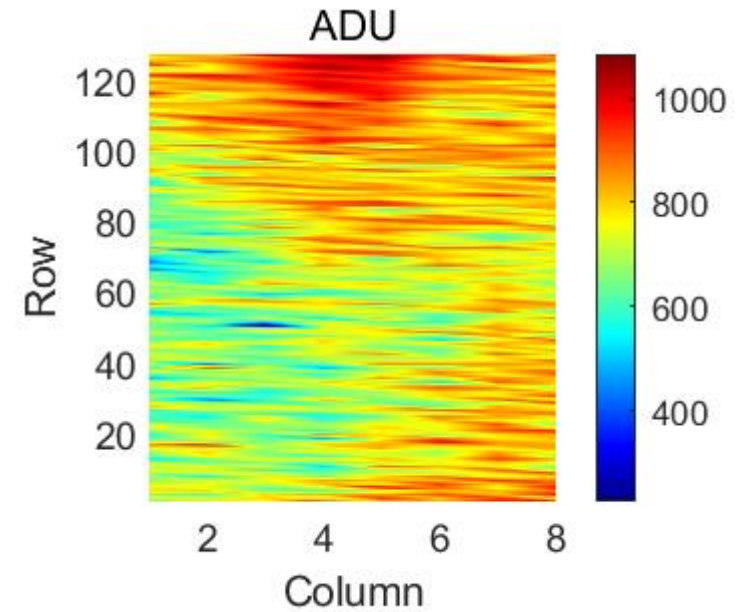
电子学测试



$T_{cal} = 55 \text{ ns (HG)}$

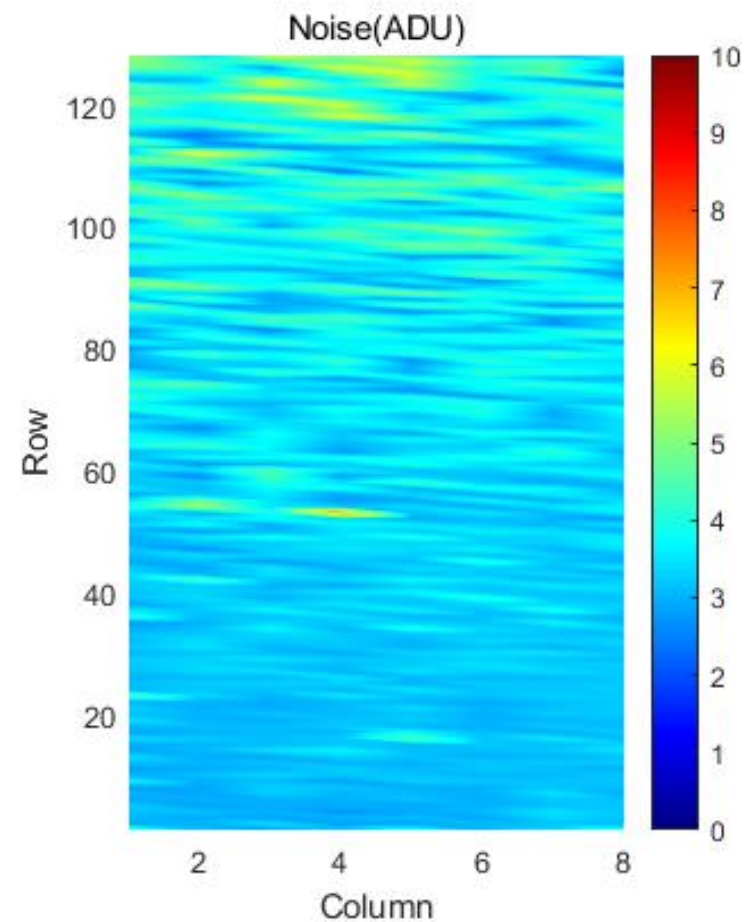
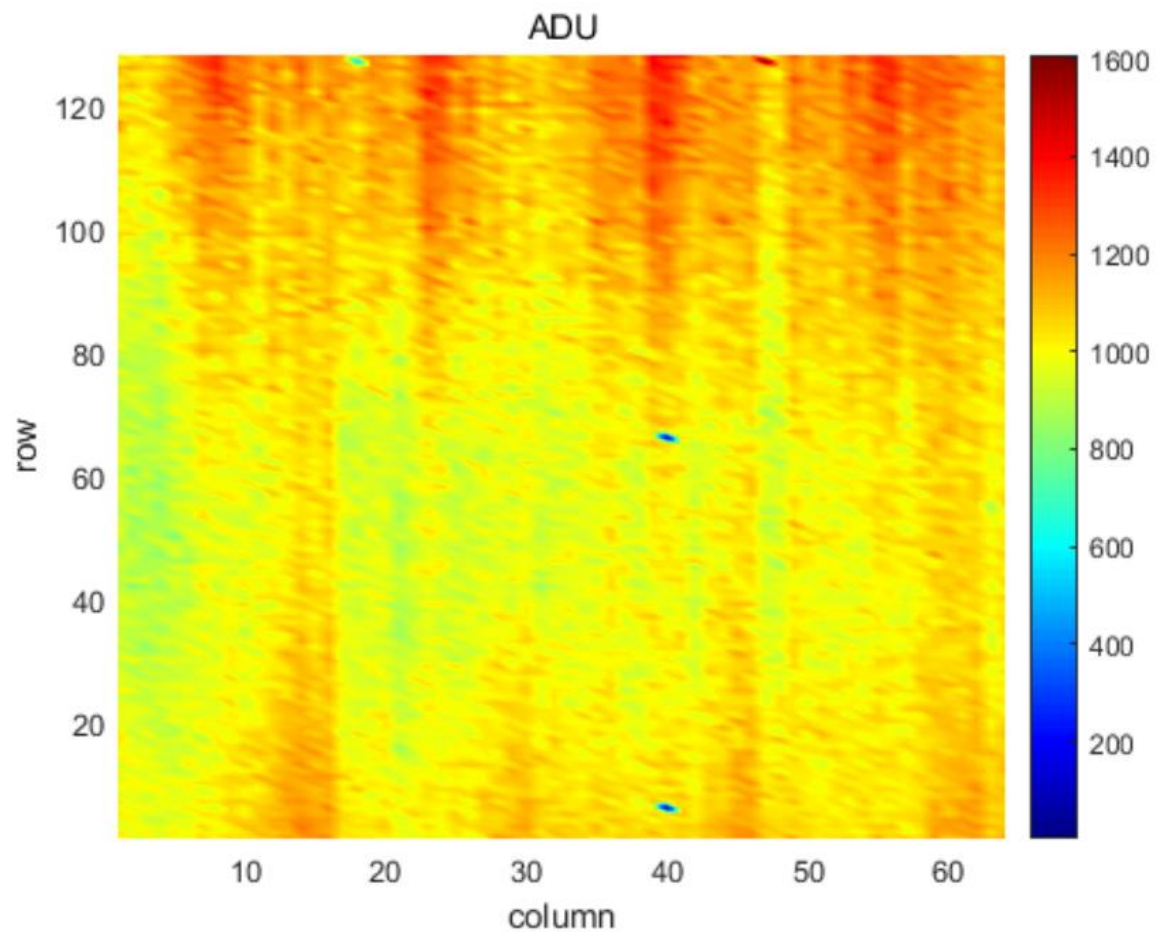


$T_{cal} = 60 \text{ ns (HG)}$



$T_{cal} = 500 \text{ ns (LG)}$

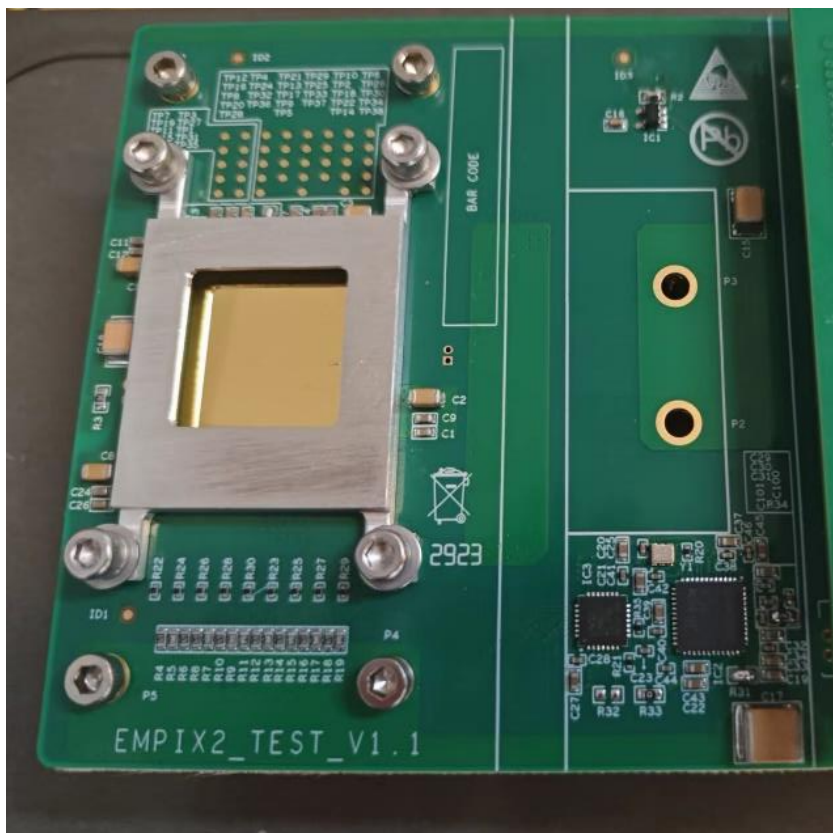
IR-drop引起校准电流源的不一致性



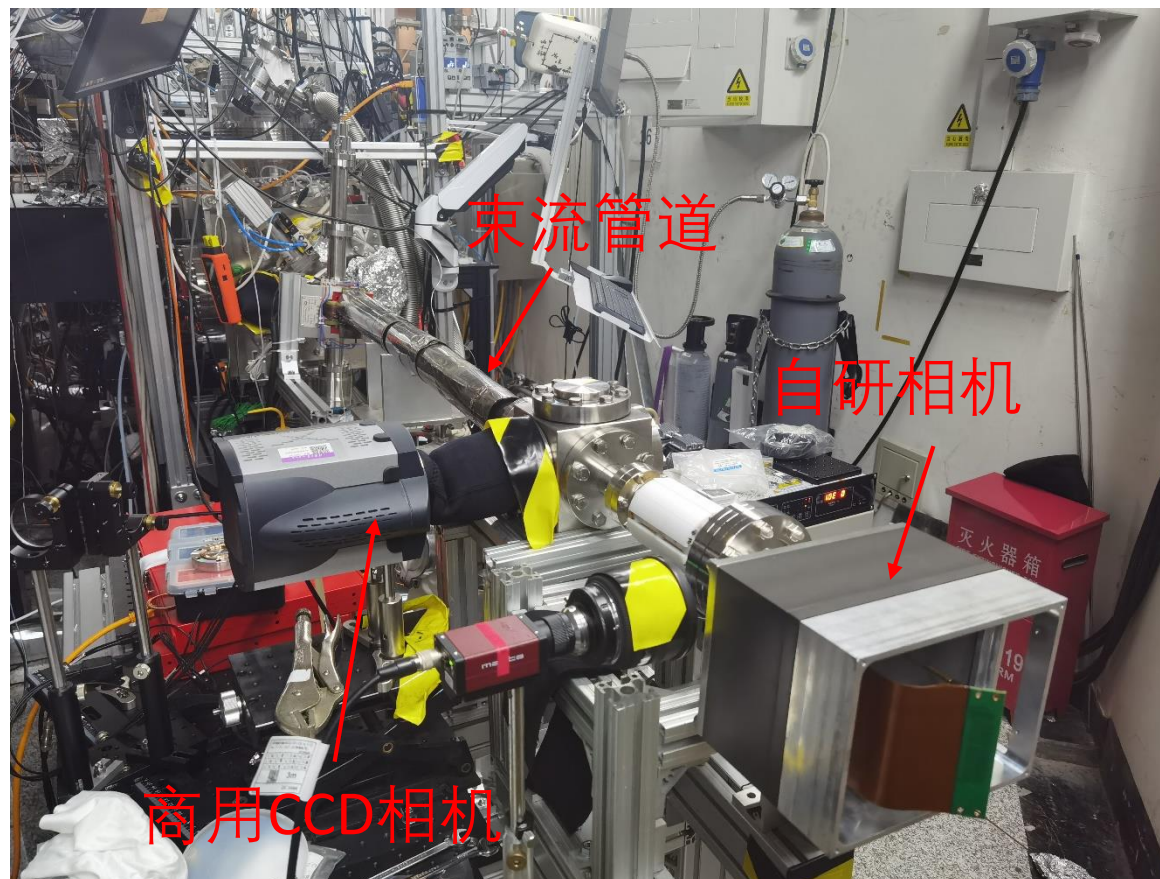
因为IR drop的问题, 校准电源不一致性较大



探测器束流测试



倒装焊接完成的金刚石探测器模块



脉冲电子束测试平台 (2.6MeV@50Hz重频)
清华大学工程物理系加速器实验室

结论

- 设计了一款用于电镜的直接电子探测器读出芯片。
- 该芯片可以在不降低动态范围和有效检测面积的情况下以高达100kfps的读出速率工作，有效动态范围可达 $5 \times 10^5:1$ 。
- 两种操作模式使其非常适合不同的场景（UEM和STEM）。
- 该芯片采用64对高速LVDS接口，集成8b/10b编码，循环冗余校验等功能，可读出高达39.3Gbps带宽的像素数据。
- 根据使用片上校准源的初步实验结果，芯片的功能与预期一致。



正在进行的工作

- 研究和开发合适的标定方法以更准确地评估芯片性能。
- 芯片已经与两种像素探测器（金刚石，硅）进行倒装，正在电子束流上进行初步成像实验。
- 未来将完善系统设计以便将其移植到商用电镜系统中



清华大学
Tsinghua University

感谢聆听

联系方式:

weit20@mails.tsinghua.edu.cn

dengz@tsinghua.edu.cn