



清华大学

Tsinghua University

一种用于电镜的高帧率大动态范围 像素探测器系统

魏桐^{1,2}, 邓智^{1,2}, 李雪明³, 薛涛^{1,2}, 刘峻江^{1,2}, 杨昊彦^{1,2}, 李首卿³, 沈铂³, 闫昭屹³

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

³清华大学生命科学学院

2025年7月17日



目录

1/ 背景介绍

3/ 性能测试

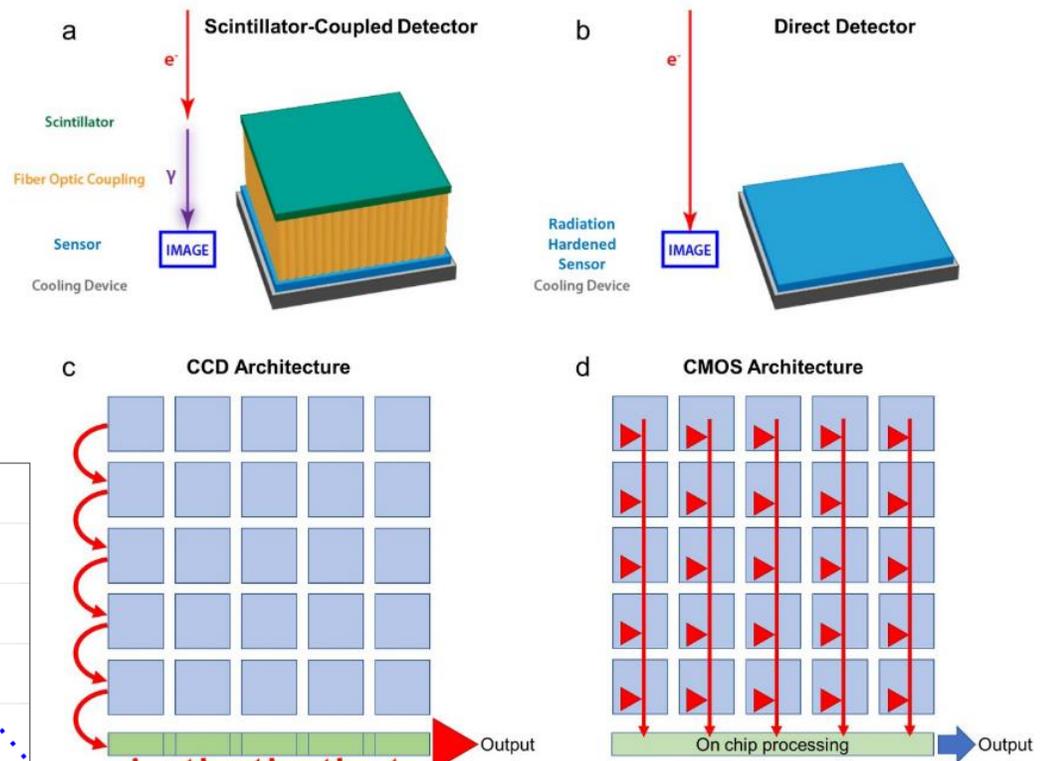
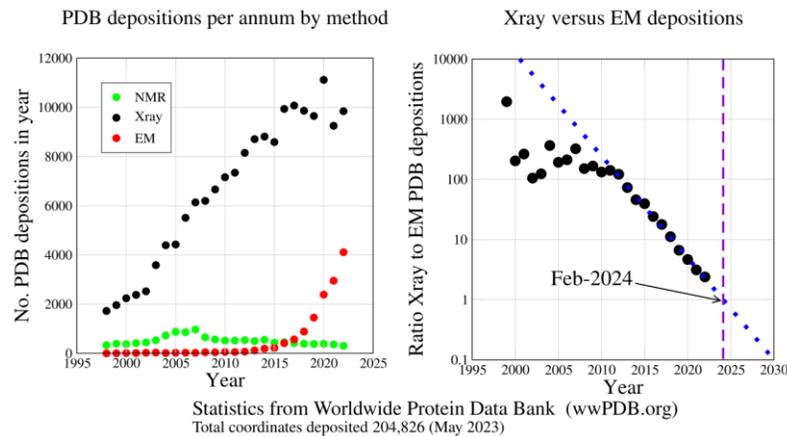
2/ 系统设计

4/ 总结展望

直接电子探测器用于电镜成像

- 电子显微镜使用高能电子作为探针来观测微观结构，广泛应用于生命科学和材料领域。
- 近二十年来，电子显微成像迎来了突破性的进展，分辨率可达**深亚埃**量级，得益于以下方法和技术的进步：

- 像差校准方法
- 新型的成像算法
- 直接电子探测技术



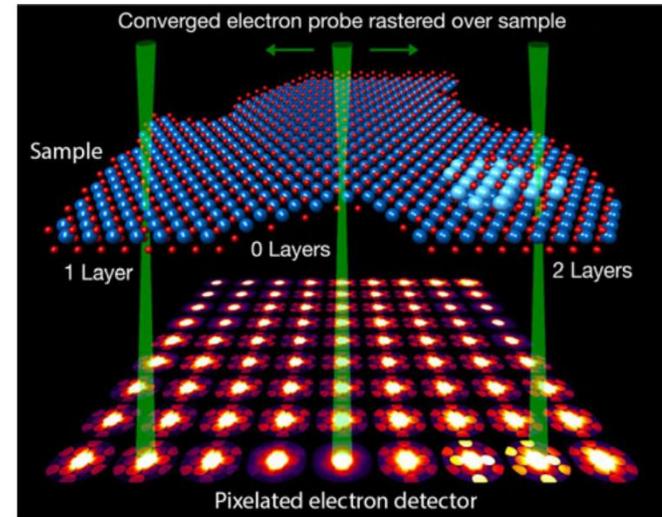
Levin B D A. Journal of Physics: Materials, 2021

直接电子探测器的优势

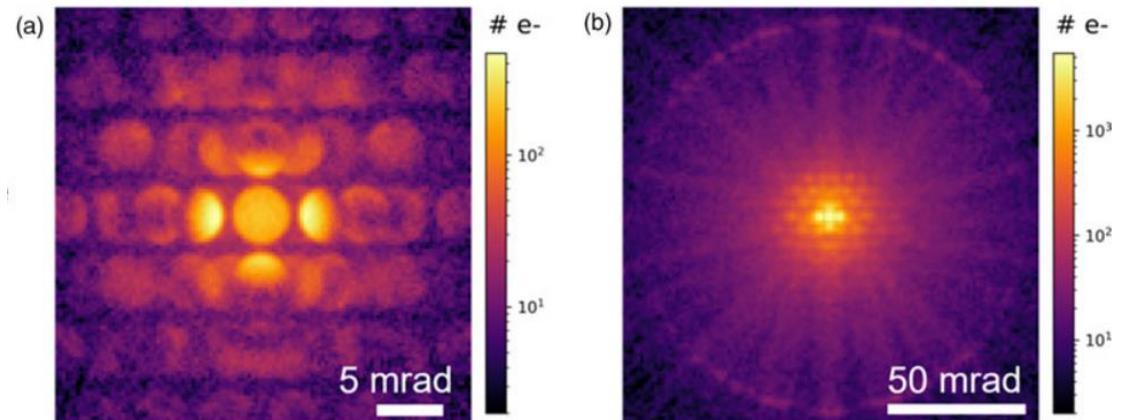
- 位置分辨率高，良好的抗辐照能力，高动态范围，读出速度快

4维扫描透射电镜 (4D-STEM)

- 电子以会聚束在样品上进行二维扫描，同时在像平面使用二维探测器记录图像
- 电子束半会聚角 α 决定了理想情况下的成像分辨率
- 相比于传统TEM/STEM的优势：
 - 灵活多样的后处理和图像重建方式
 - 空间分辨率的提升（深亚埃量级）
- 对相机的挑战：
 - 大动态范围：衍射强度分布
 - 高帧率（10~100 kfps）：
 - 数据获取效率
 - 样品漂移
- 典型电子能量：**80~300 keV**



Ophus C, et al. Microscopy and Microanalysis, 2022

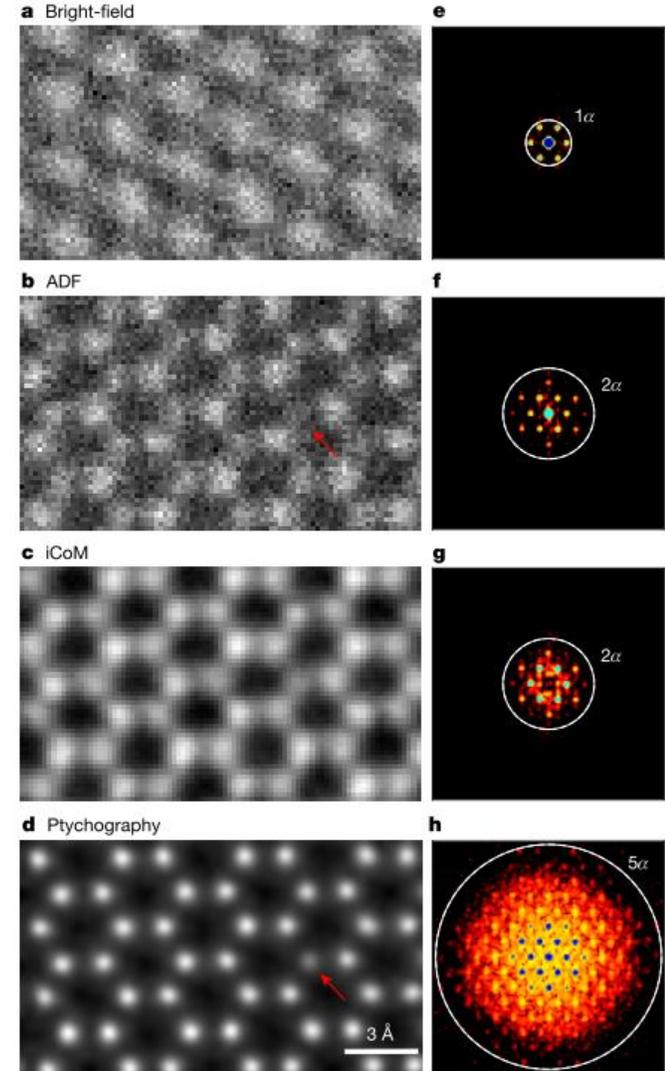
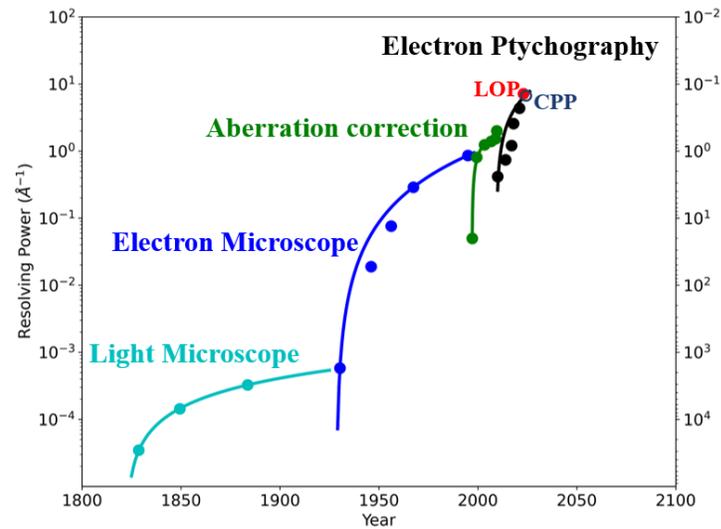
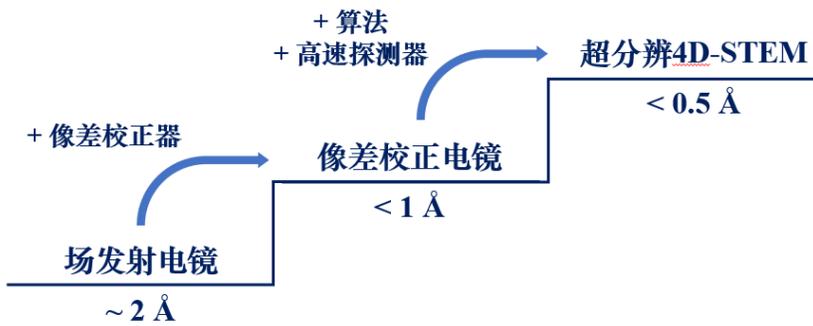


TbScO₃的CBED衍射模式（300keV, 1nA）

Philipp H T, et al. Microscopy and Microanalysis, 2022

层叠成像技术/算法 (Ptychography)

- 在4D-STEM扫描模式中，保证相邻扫描点之间存在部分空间重叠，使用迭代算法同时重建样品和探针（电子束）的信息
- 理论上可以实现无透镜成像，避免电磁透镜球差对分辨率的影响
- 可使用大散射角的信息来有效提高分辨率，但是衍射强度随着角度增大而迅速下降：探测器必须具有**大动态范围**



Jiang Y, et al. Nature, 2018

用于电镜的混合式像素探测器发展现状

- 基于X射线探测器改进或专门设计的探测器，国外已经推出了多款商业化产品并逐步推广
- 自主研发混合型电子探测器，是推动电镜仪器中核心部件国产化的重要突破口

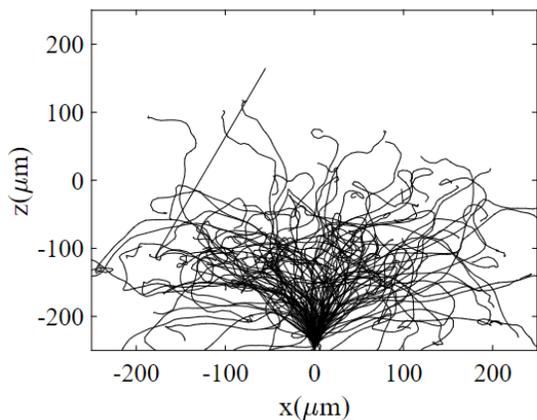
性能指标	Medipix3 Quad-Merlin (瑞士Quantum Detectors)	ELA (瑞士DECTRICS)	ARINA (瑞士DECTRICS)	EMPAD-G2 (美国赛默飞)
像素大小	55 μm \times 55 μm	55 μm \times 55 μm	100 μm \times 100 μm	150 μm \times 150 μm
像素阵列	512 \times 512 (2 \times 2拼接)	514 \times 1030 (2 \times 4拼接)	192 \times 192	128 \times 128
电子能量	30-200 keV	30-300 keV	30-300 keV	60-300 keV
单像素位宽	12 bit	8或16 bit	12 bit	30 bit
工作模式	电子计数	电子计数	电子计数	能量积分
最高帧率	2 kfps	20 kfps	120 kfps@96 \times 96阵列	10 kfps
探测器晶体	300 μm 厚硅	450 μm 厚硅	1500 μm 厚CdZnTe	500 μm 厚硅
计数率	8 Mcps每像素	5 Mcps每像素	64 Mcps每像素	1.1 Gcps每像素 (300 keV)
量子探测效率 DQE	0.8@80 keV	0.81@80 keV 0.81@200 keV	0.71@200 keV 0.76@300 keV	0.9@80 keV 0.94@300 keV

高帧率大动态范围像素探测器系统开发历程

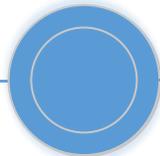
2019



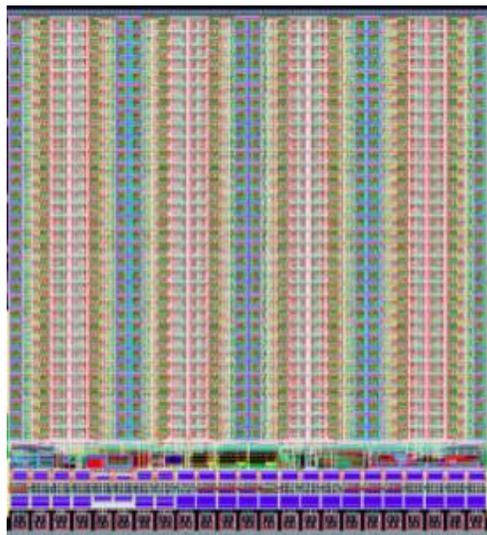
探测器响应仿真



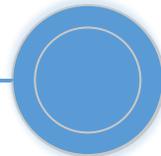
2020



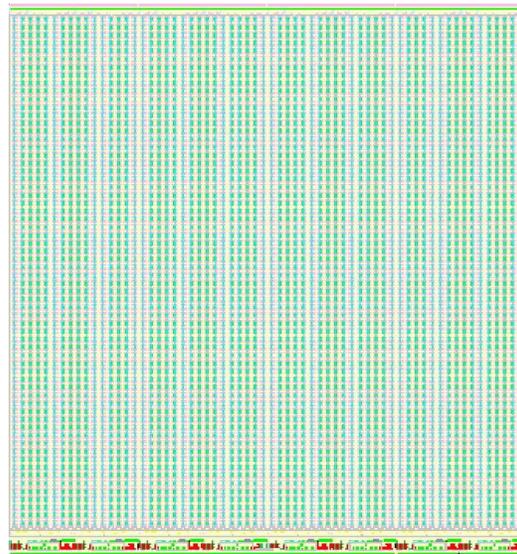
32x8阵列读出芯片



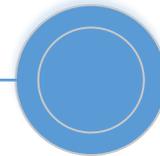
2022



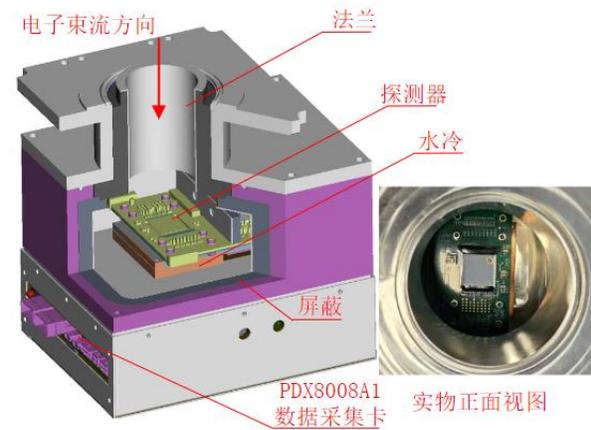
128x128阵列读出芯片



2024

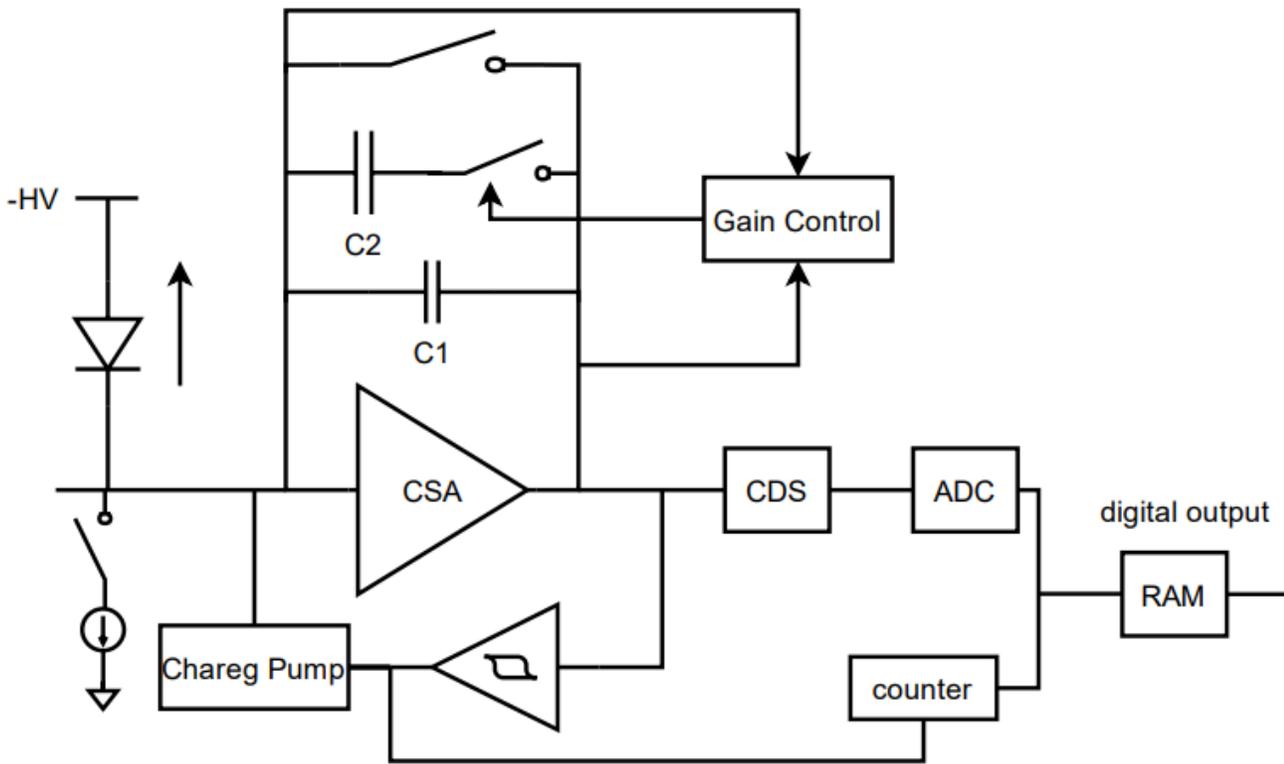


探测器系统

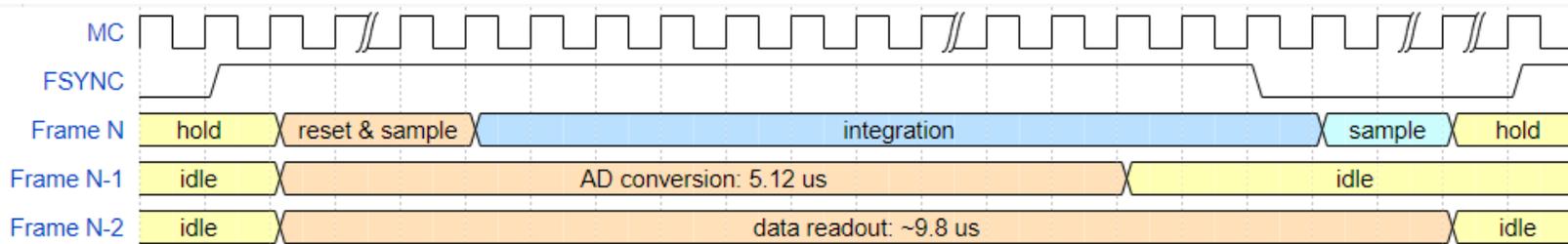




empix2像素前端电路

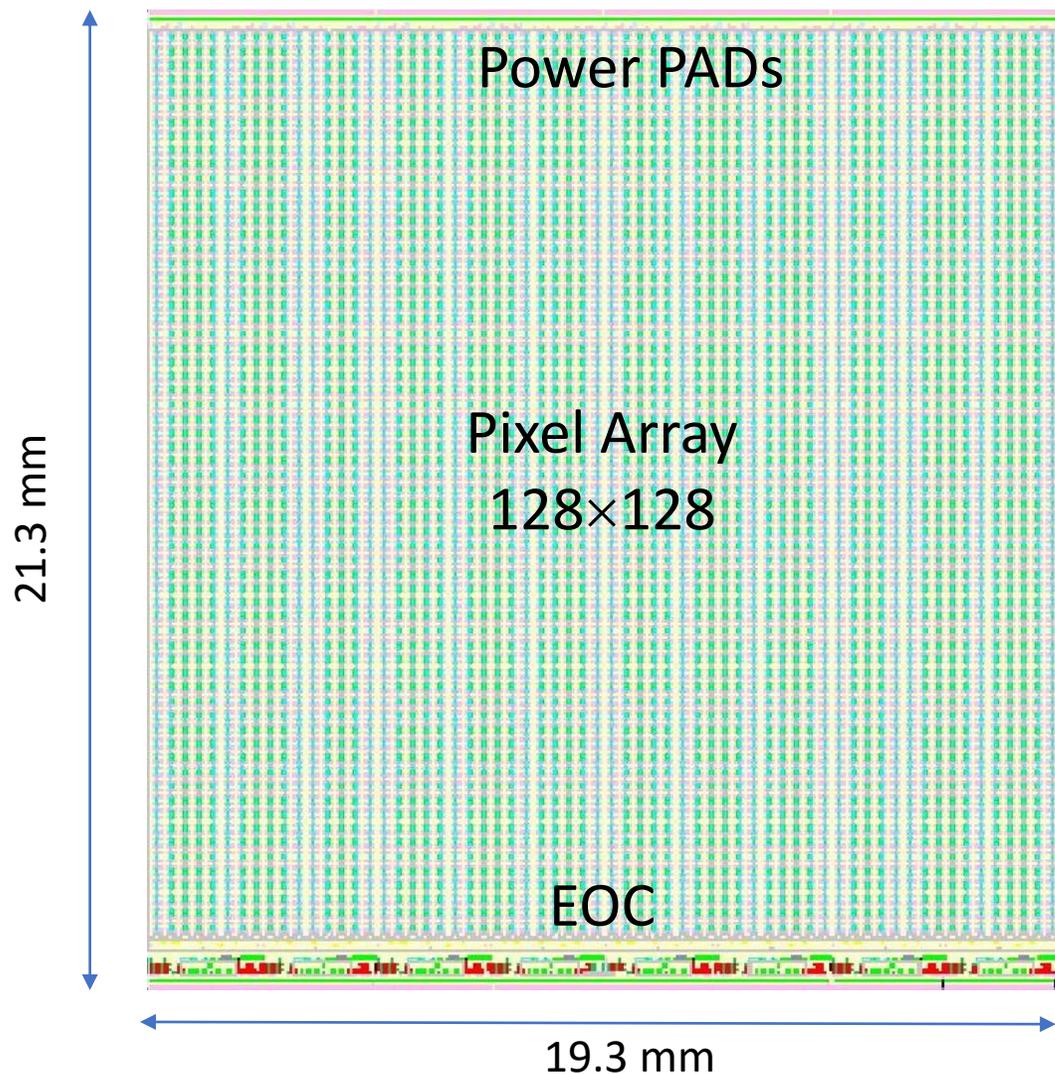


- 像素内积分与数字化
- 快速增益切换
- 高速电荷泵 (50 MHz)
- 采用多级缓存实现流水线工作
- 脉冲模式 (UED) : 速度和动态范围
- 连续模式 (STEM) : 功耗
- 单像素数据:
 - 11 bit Qpump
 - 1 bit gain
 - 12 bit ADC





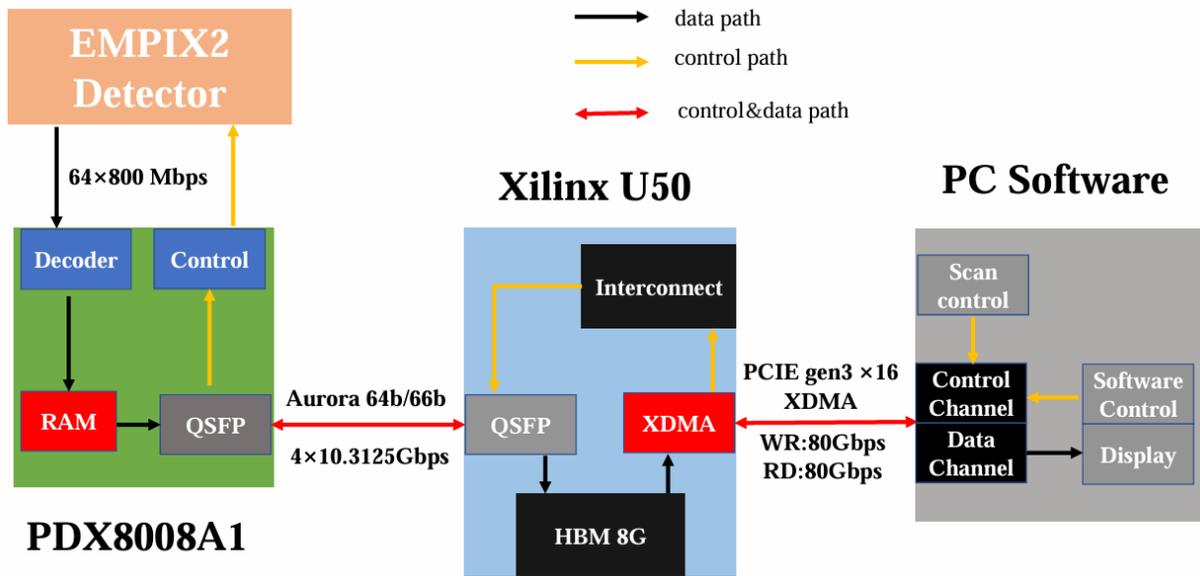
empix2性能指标



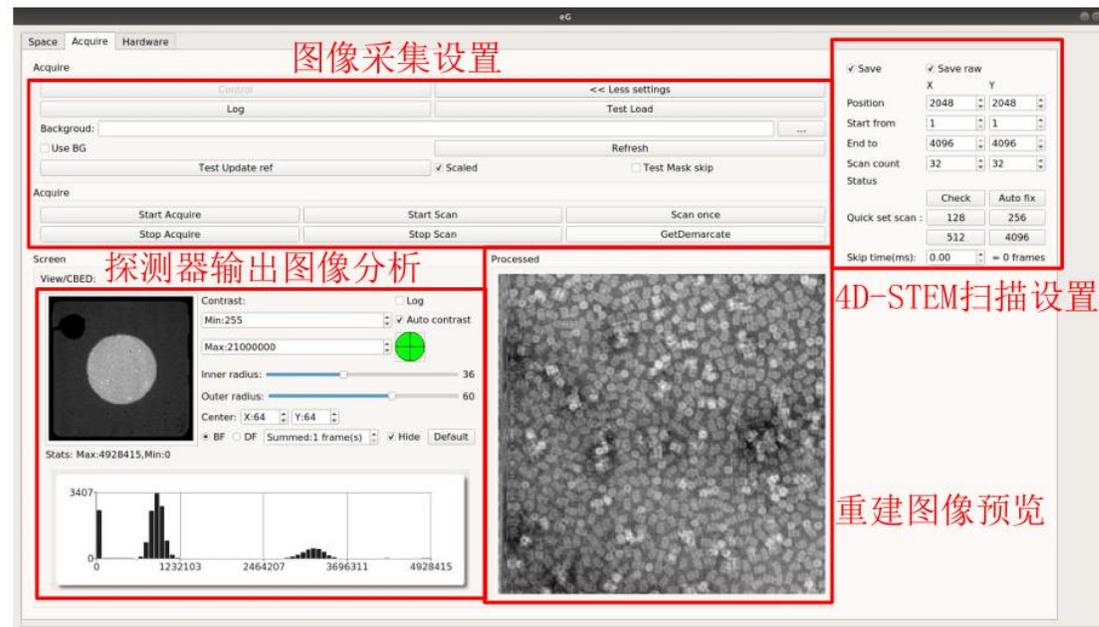
条目	参数
像素尺寸	150×150 μm ²
像素阵列	128×128
工艺	GF 180 nm
帧率	最大100 kfps (目前50 kfps)
有效积分时间	帧周期-1.6 μs
输入范围	55 pC/帧/像素(硅探测器中 1.25×10 ⁶ keV, 100 kfps)
增益调节	自适应调节+电荷泵
分辨率	11+1+12 bits
噪声 (仿真值)	ENC~625 e ⁻ (硅中2.3 keV)
探测器	200 μm p型金刚石 500 μm 硅
功耗	10 W(脉冲模式) 6.5 W(连续模式)

专用高速数据采集系统

- 高带宽 (~40 Gbps), 多路串行接口
- 基于Xilinx Kintex-7 系列FPGA的专用前端数据采集卡PDX8008A1
 - 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内存中
- 目前可稳定工作在50 kfps采集速率下



数据采集系统架构

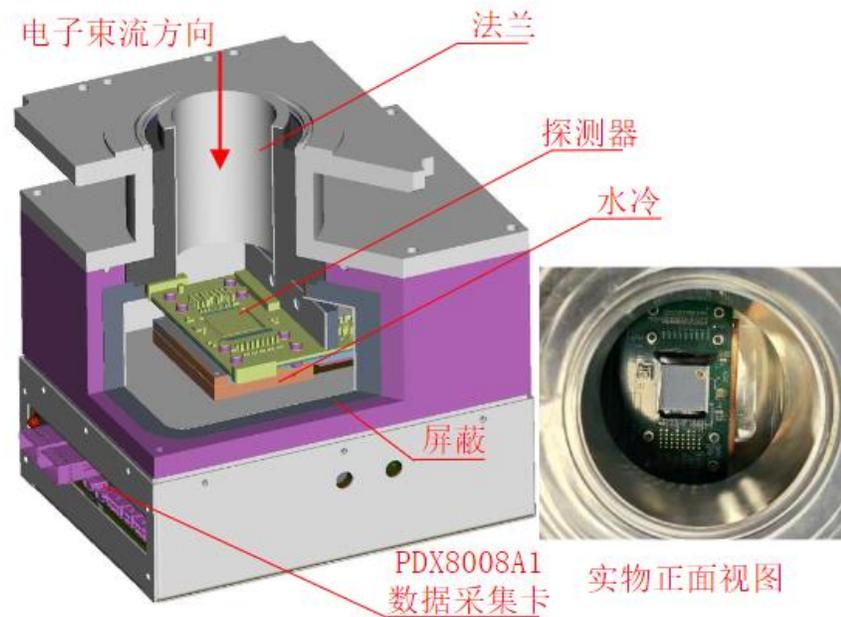
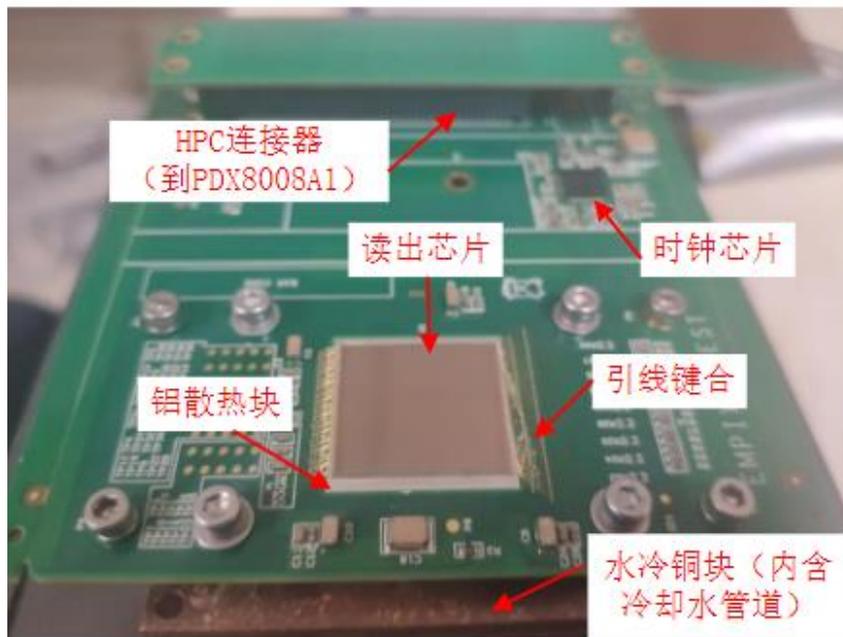


软件界面



原型探测器系统设计

- 温控：TEC+水冷级联以实现真空中探测器的温度控制
- 真空：FPC用epoxy密封实现真空馈通
- 辐射屏蔽：Al+Pb屏蔽体
- 扫描同步：高速DAC及驱动器





原型探测器系统性能测试环境

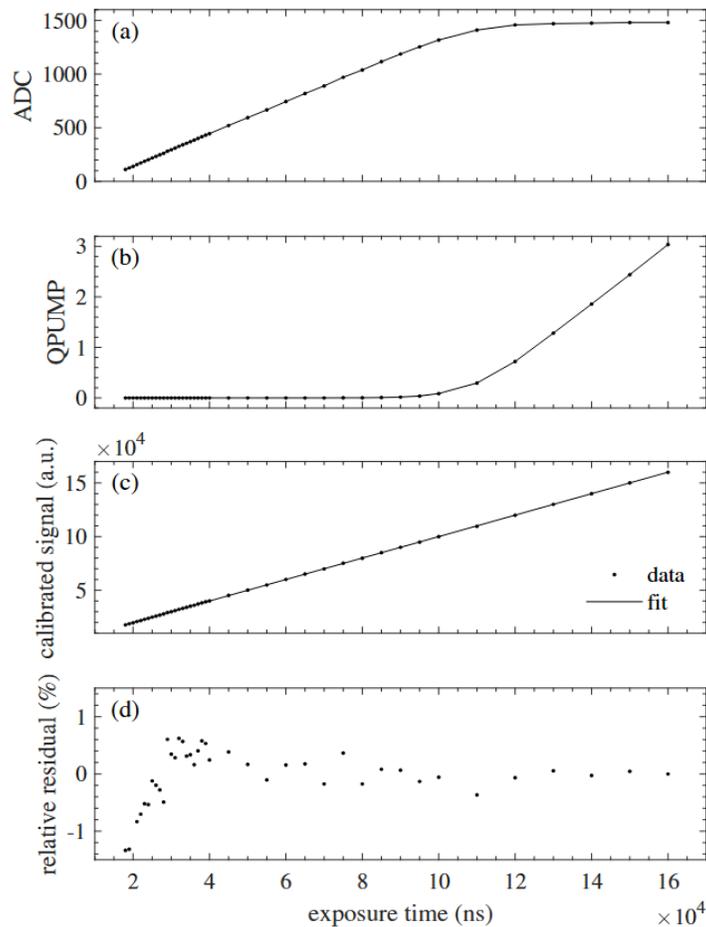
- Tecnai F20透射电镜和JEM-2010F透射电镜
- 200 keV电子（场发射）
- 500 μm 厚硅探测器
- 相机测试内容：
 - 平场校正（增益和一致性）
 - 低剂量响应（单电子分辨）
 - 刃边成像（MTF和DQE）
 - 高帧率4D-STEM成像验证



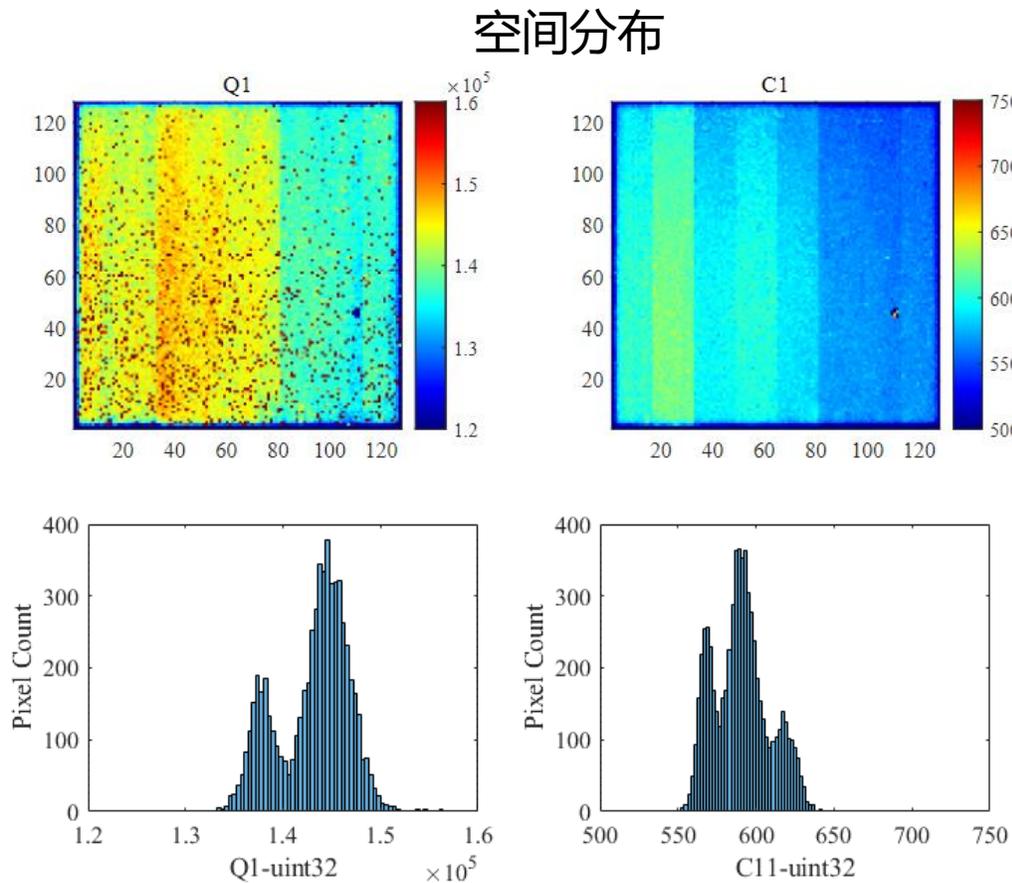
安装在F20电镜上的原型相机系统

原型探测器系统性能测试

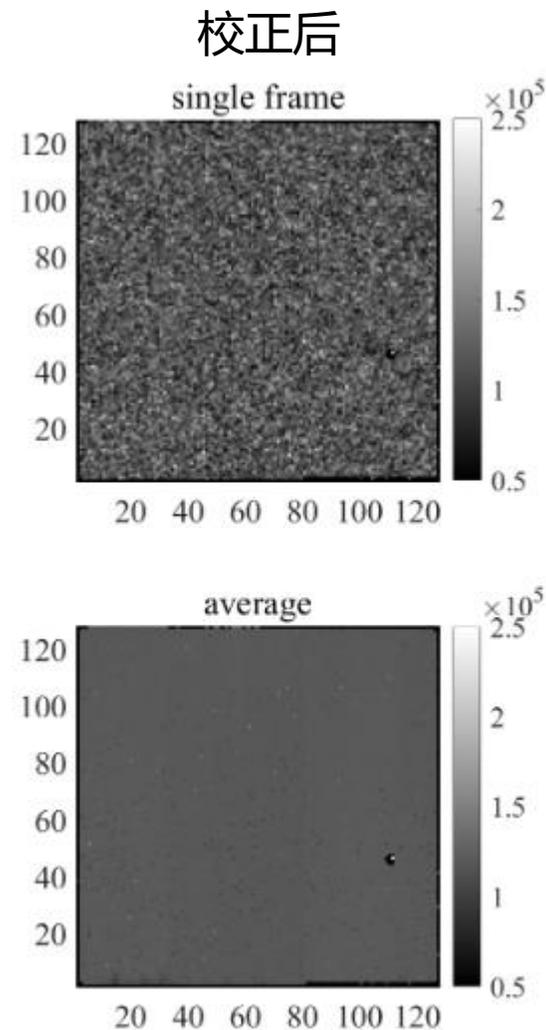
增益标定：平场光照射下扫描积分时间做多元线性回归 (5 kfps)



响应曲线



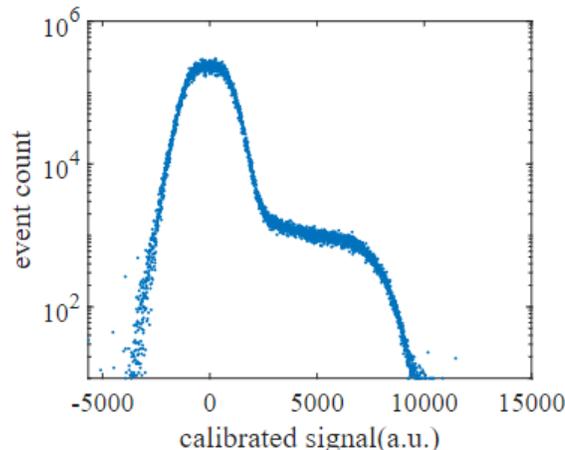
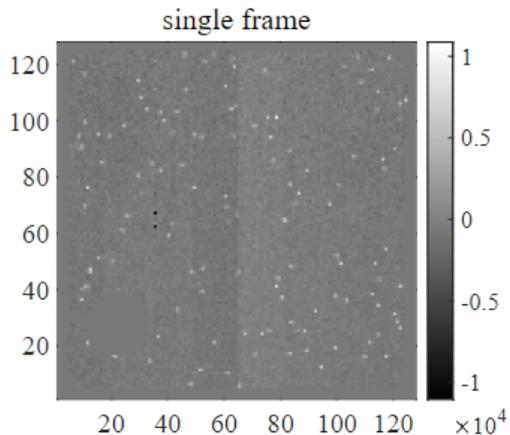
$$Q_{tot} = Q1 * qpump + C1 * adc + offset$$



原型探测器系统性能测试

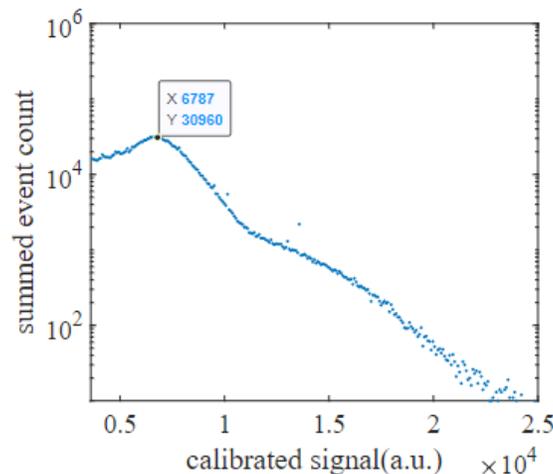
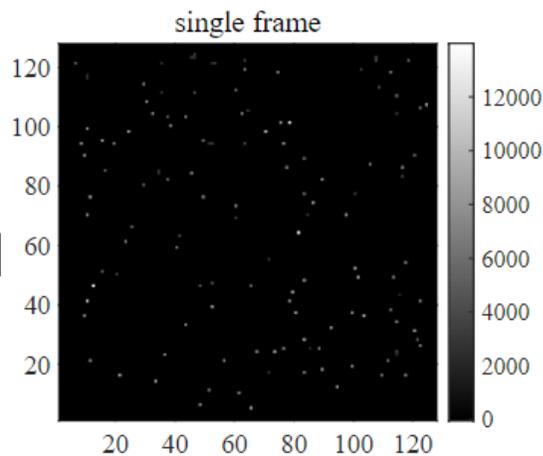
□ 低剂量响应：减除背景后的图像数据做能谱分析

单像素



电子剂量：0.03 e/pixel/frame

噪声抑制加
3x3像素求和

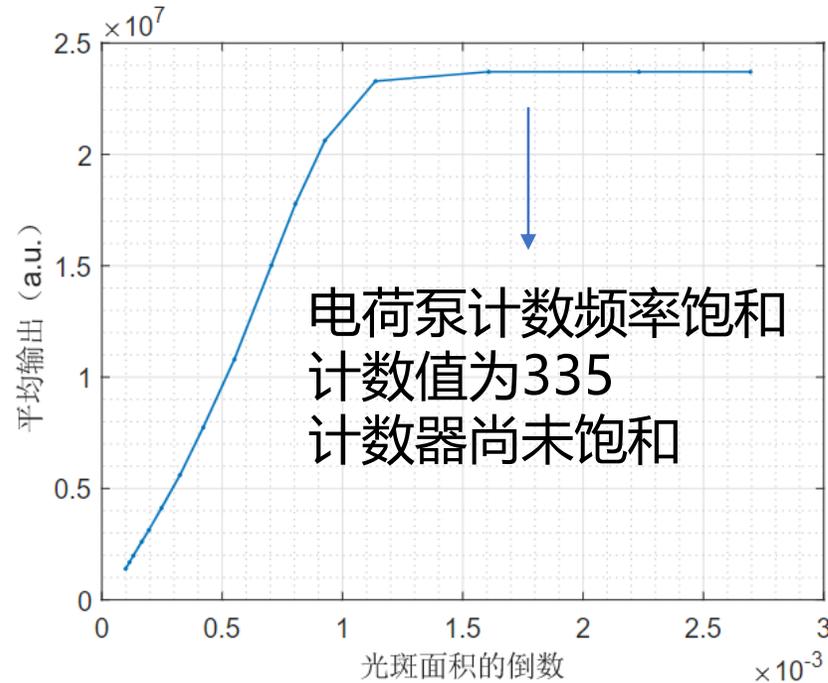
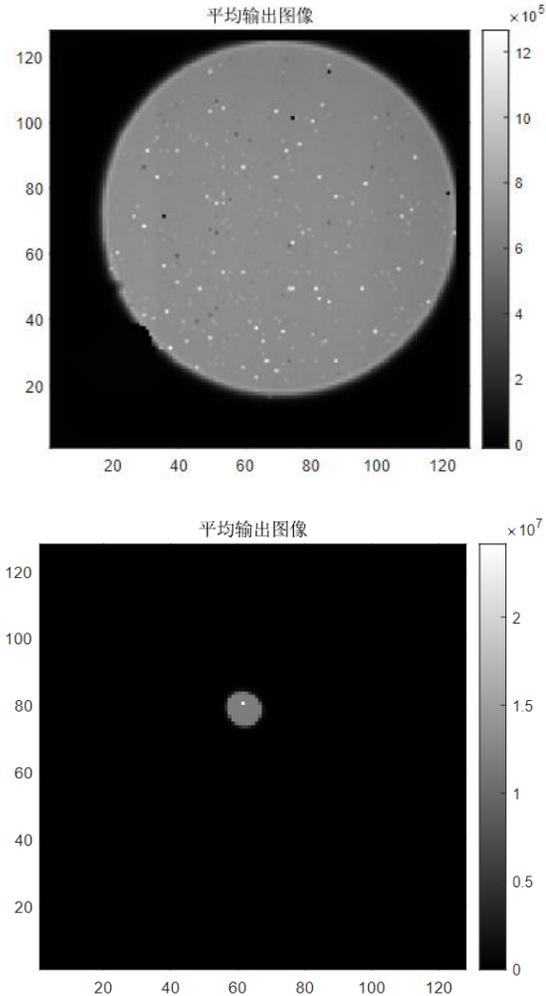


噪声约32.4 keV，是仿真值的10倍

1. 部分电路设计问题（已定位，可改进）
2. 像素不一致性
3. 像素间串扰

原型探测器系统性能测试

□ 动态范围评估：测量不同光斑大小下的输出图像



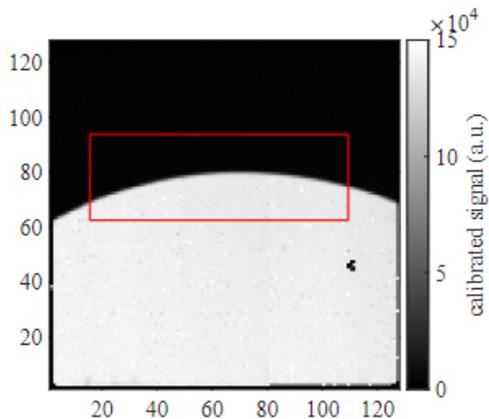
饱和时计数率为每像素248 Mcps
(39.9 pA/pixel)
50 kfps下动态范围为21000: 1
更低帧率下动态范围可达128000: 1

注：磁透镜聚焦时，不同光斑大小下总电子剂量恒定

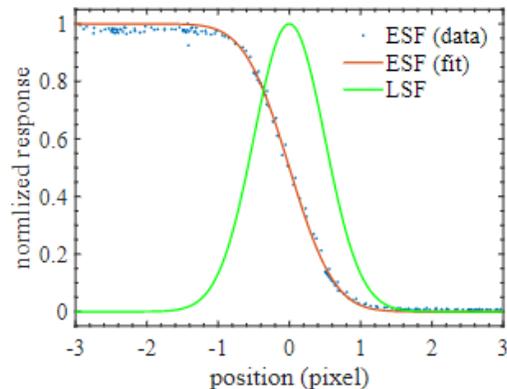
原型探测器系统性能测试

□ MTF和DQE测量：刃边成像获取调制传递函数，平场图像获取NPS

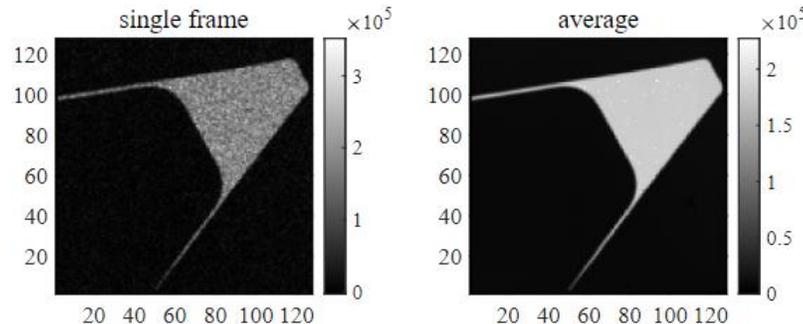
图像采集剂量：
17.9 e/pixel/frame



(a) 探测器采集的光阑边缘的图像



(b) 边缘扩展函数与线扩展函数

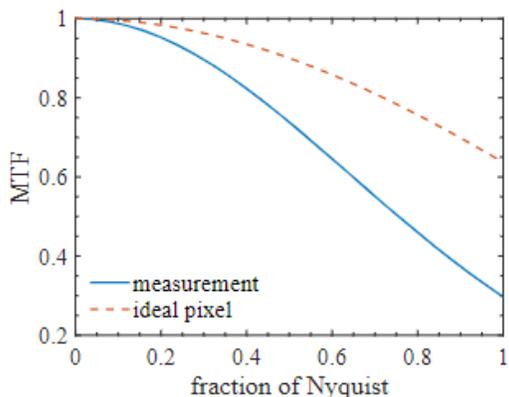


(a) “A”型凹槽

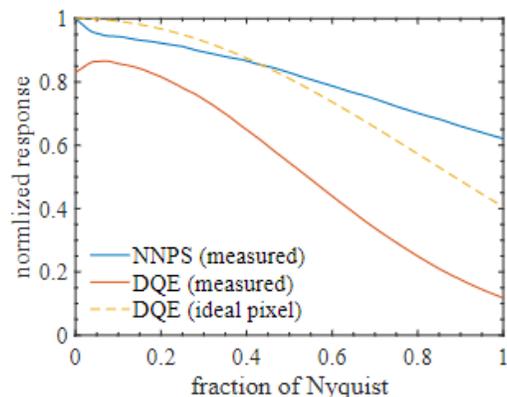
$$DQE(\omega) = \frac{d^2 MTF^2(\omega)}{n NPS(\omega)}$$

d: 平均输出
n: 电子剂量

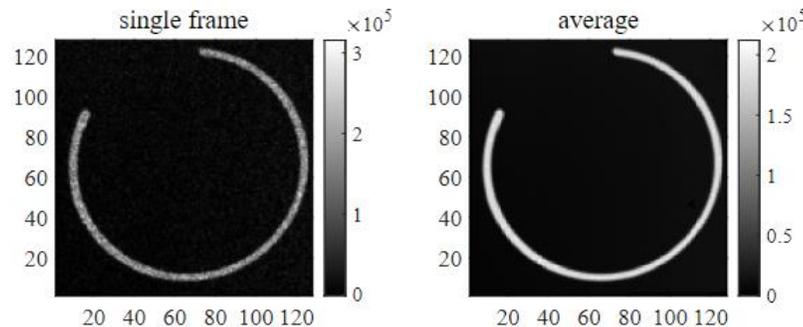
MTF(0.5) = 0.74
MTF(1) = 0.30



(c) 调制传递函数



(d) 探测量子效率

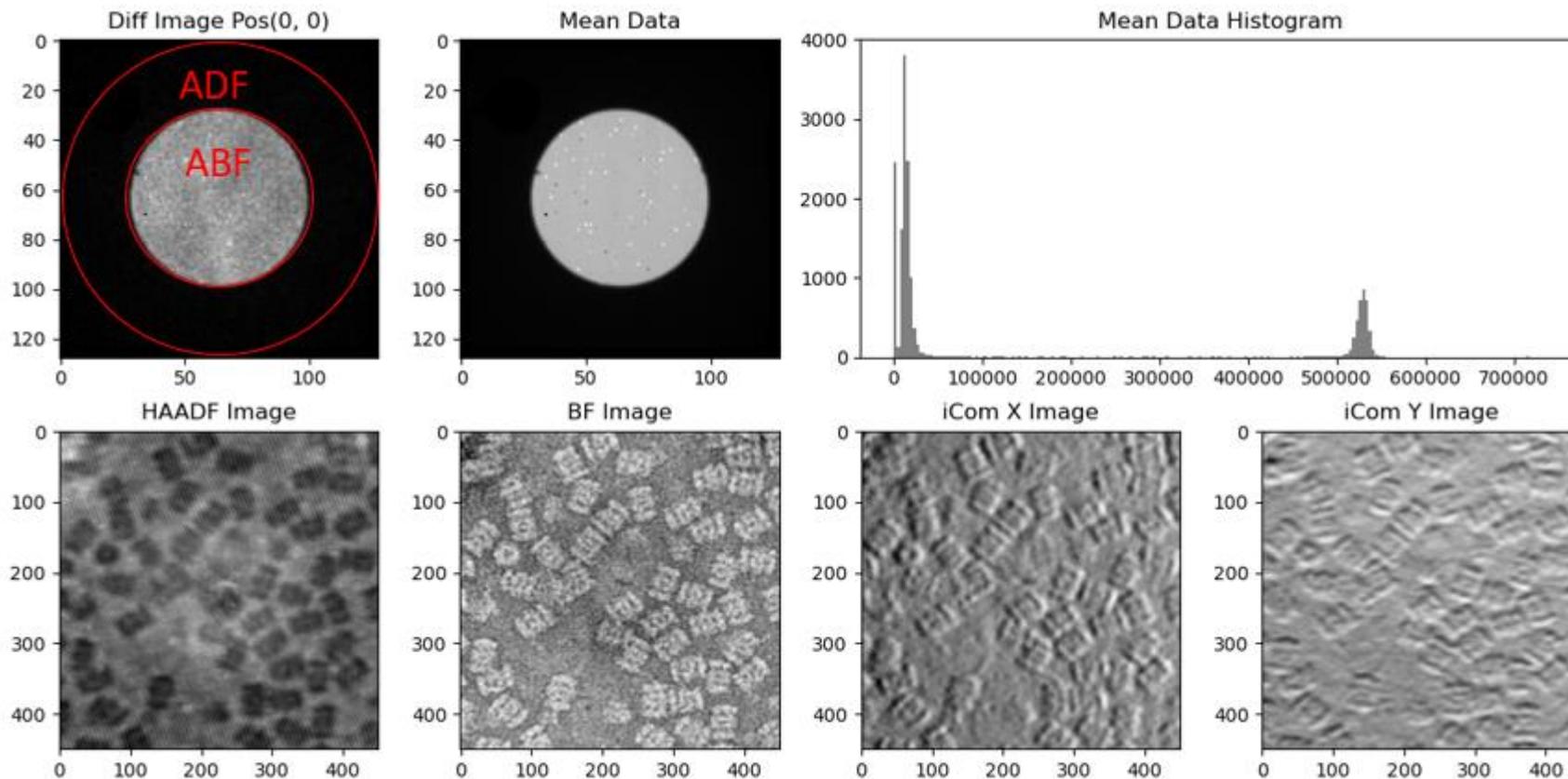


(b) “C”型凹槽

典型透射像

原型探测器系统成像实验

□ 负染色蛋白酶 (18 nm×8 nm) 的4D-STEM数据集和重建结果



910 kx放大倍数

450×450扫描点

5 kfps帧率, 157.6 μs曝光时间

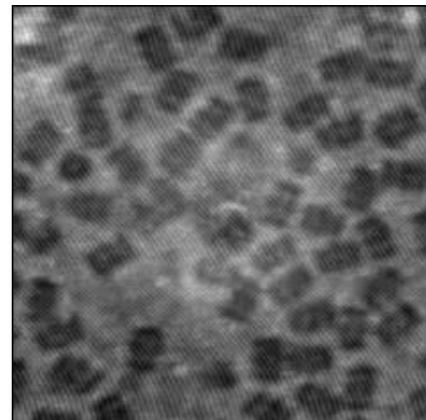
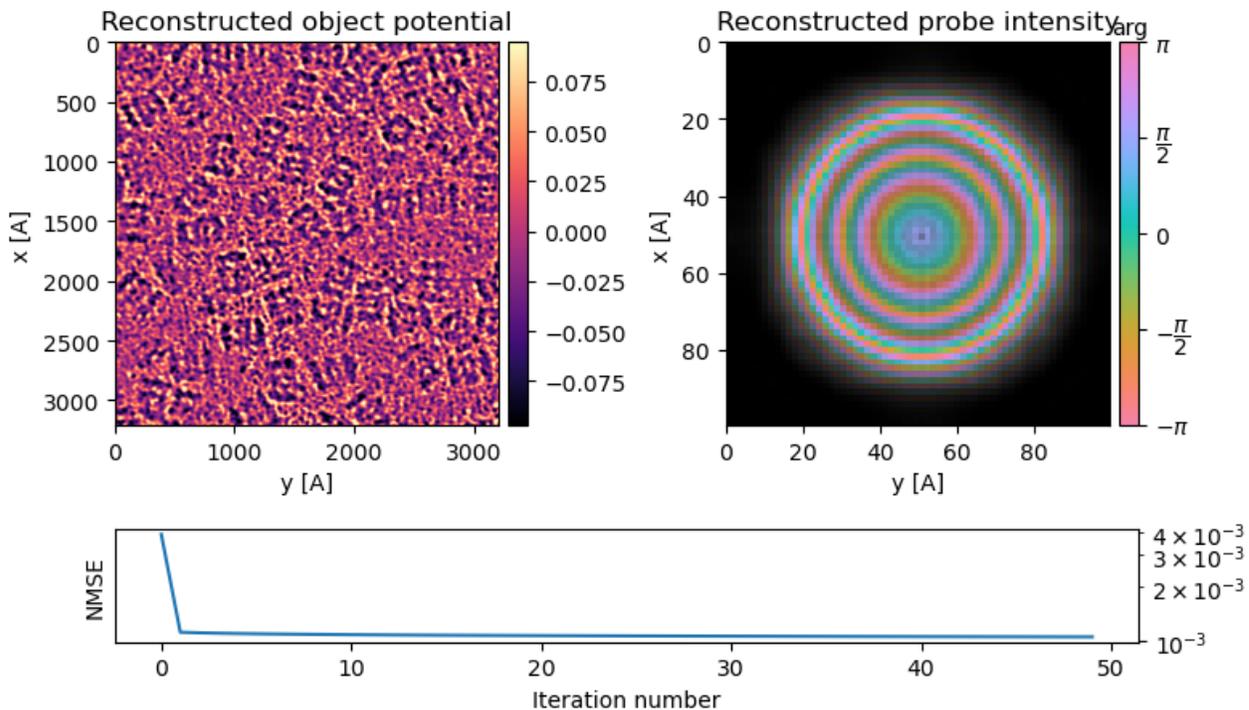
透射盘强度: 78 e/pixel/frame

ADF图像的条纹可能由系统的共模噪声造成

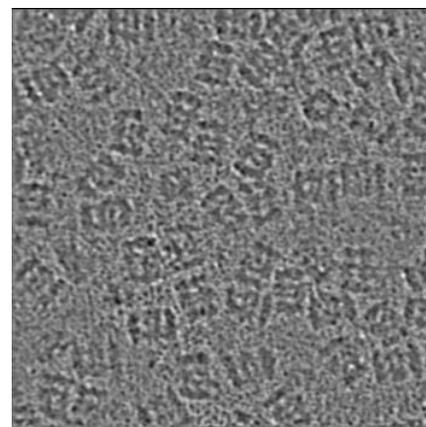
原型探测器系统成像实验

□ 负染色蛋白酶 (18 nm×8 nm) 的4D-STEM数据集和重建结果

Normalized mean squared error: 1.053e-03



ADF



Ptychography

910 kx放大倍数

450×450扫描点

5 kfps帧率, 157.6 μs曝光时间

透射盘强度: 78 e/pixel/frame

使用Ptychography重建的样片图像和探针 (电子束) 图像



总结

	EMPAD	EMPAD-G2	本课题
像素尺寸	150×150 μm ²	150×150 μm ²	150×150 μm ²
像素阵列	128×128	128×128	128×128
读出噪声	1.4 keV	2.6 keV	32 keV
输出位宽	16 bit Qpump +14 bit ADC	18 bit Qpump+1 bit gain +14 bit ADC	11 bit Qpump+1 bit gain +12 bit ADC
最高帧率	1.16 kfps	10 kfps	50 kfps
最大输入电流	2.3 pA@200 keV	263 pA@200 keV	39.9 pA@200 keV
动态范围	2.0 × 10 ⁶ @1 kfps	1.3 × 10 ⁷ @10 kfps	2.1 × 10 ⁴ @50 kfps 1.28 × 10 ⁵ @10 kfps ^a
探测器材料	500 μm 厚硅	500 μm 厚硅	500 μm 厚硅 或200 μm 厚金刚石
探测量子效率	0.93@80 keV 0.94@200 keV	0.9@80 keV 0.9@120 keV 0.94@300 keV	0.83@200 keV

本报告一款用于电子显微成像的积分式像素读出芯片及探测器系统，其连续工作帧率可达50 kfps，各项性能达到国际上同类探测器先进水平。

在200 kV电镜实验中，硅探测器实测最大输入计数率达每像素248 Mcps，单帧动态范围最高可达128000:，单电子信噪比为6.2:1，DQE在零频处达0.83，初步验证了其成像应用。

^a 根据50 kfps 的实验结果外推得到。



□ 基于本探测器系统进一步测试与改进

- 对本探测器系统开展更为全面的评估与验证，包括辐照效应、长期稳定性等性能的测试等。
- 利用原型探测器在低剂量条件下实现亚像素分辨率和单电子计数，进一步提升信噪比，以获得更优的成像分辨率。对原型读出芯片相关设计进行改进和优化，解决噪声偏大等问题。

□ 下一代高帧率电子计数型探测器的研发

- 更大阵列（单芯片256阵列，通过拼接等方式实现512甚至更大的阵列）
- 通过片上数据压缩、高速串行传输等方式进一步提高帧率
- 探索可重构式像素读出方案，适应不同应用对帧率和动态范围的需求