



清华大学 工程物理系

Department of Engineering Physics, Tsinghua University

第四届半导体辐射探测器研讨会

用于X射线和电子成像的 混合型像素探测器研制进展

邓智

清华大学·工程物理系

2024年5月25日·青岛

目录 CONTENTS

01 | 混合型像素探测器

03 | 直接电子成像

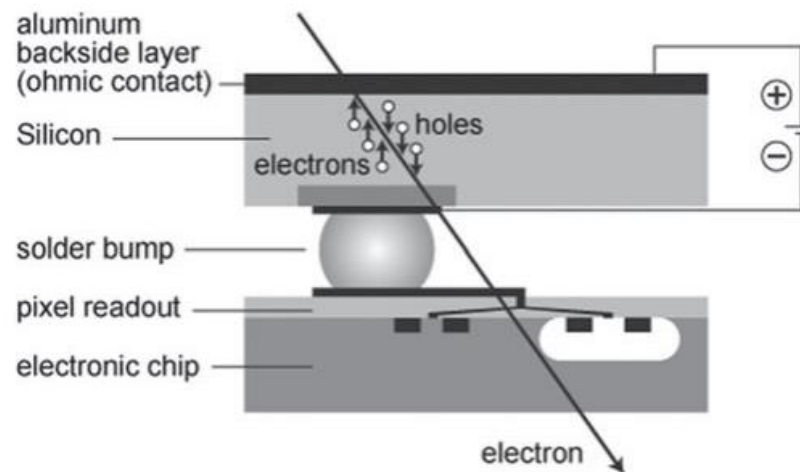
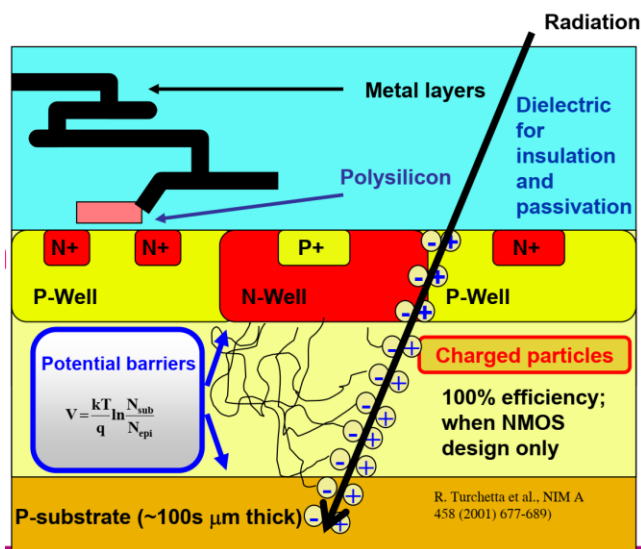
02 | 光子计数型X射线成像

04 | 小结与展望

01

Hybrid Semiconductor Pixel Detectors
混合型半导体像素探测器

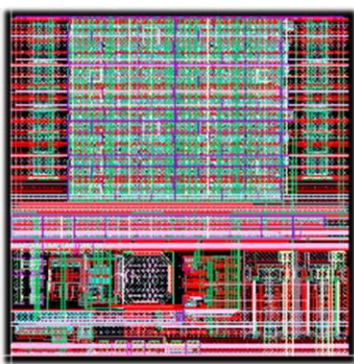
- 自上个世纪90年代以来、半导体像素探测器已经在高能粒子物理实验、天文探测以及辐射与粒子成像等领域中得到非常广泛的应用
- 分为单片集成型 (Monolithic) 和混合型 (Hybrid) 两种：前者具有更高的像素密度；后者则可以集成更为灵活的功能



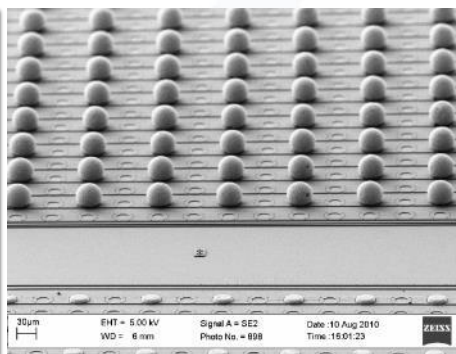
- 探测器和读出芯片分别加工、通过高密度倒装工艺实现探测器像素和读出芯片的互连
- 按探测方式可以分为**电荷积分**、**光子（粒子）计数**和**单事例探测**三种
- Pros: 探测器和读出电路可以分别优化，比如探测器可以采用其他的半导体材料；读出电路可以集成更多功能而不是简单的3T或4T；读出帧率可以更快
- Cons: 受限于倒装工艺，目前像素尺寸多在50微米以上



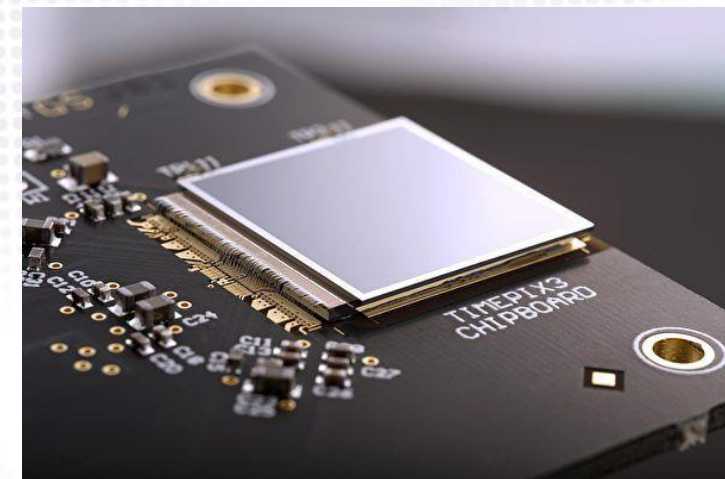
晶体材料



ASIC



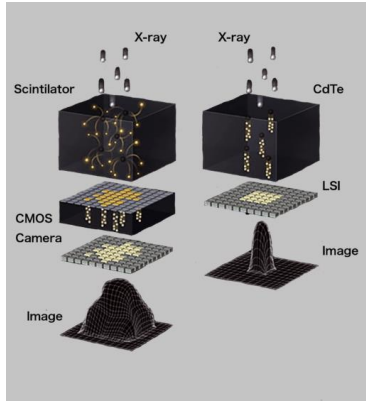
倒装键合



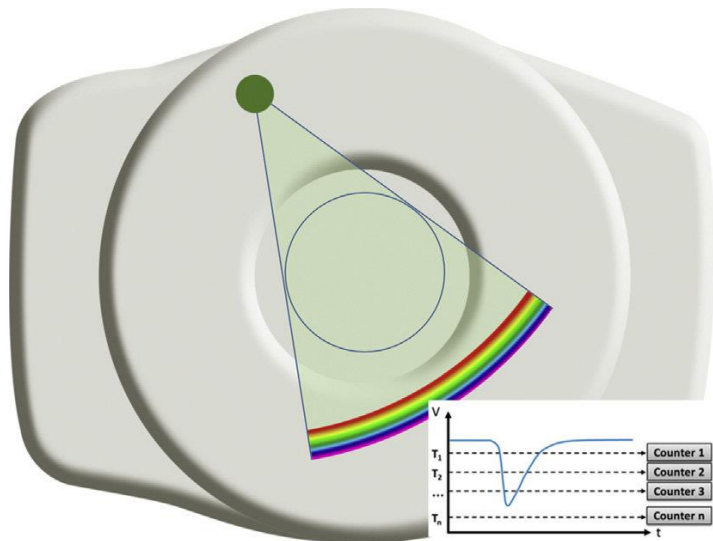
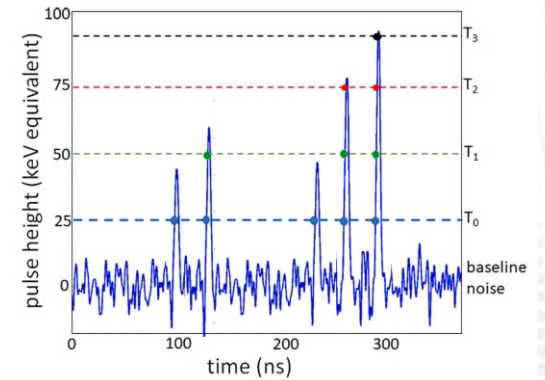
02

Photon Counting X-Ray Imaging
光子计数型X射线成像

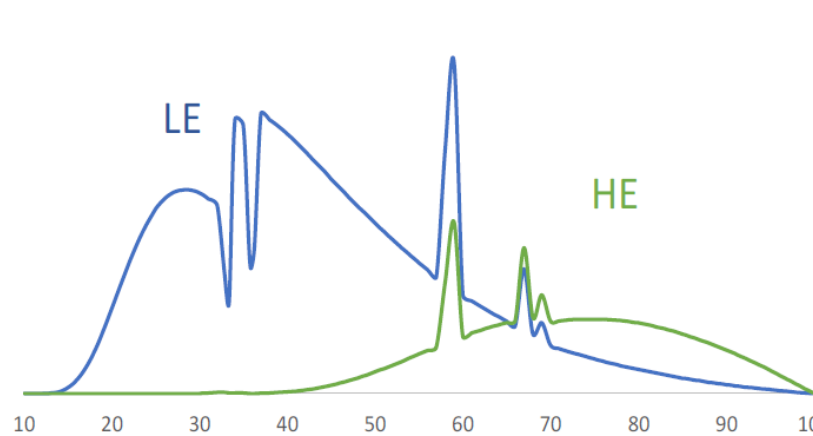
光子计数探测可以直接区分单个X射线的能量，X射线图像由黑白走向真彩色：



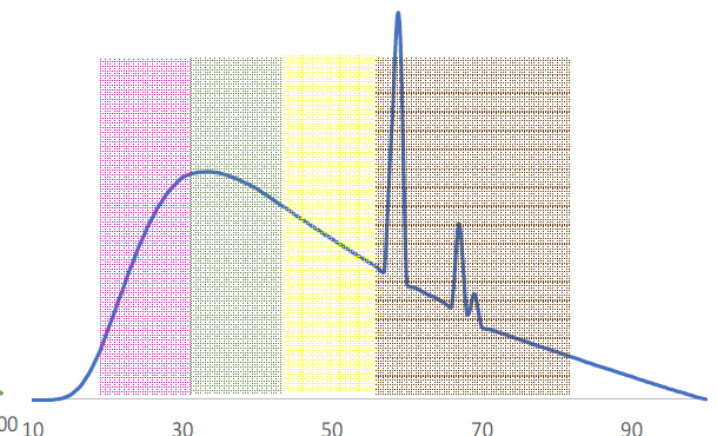
- 直接探测方式，实现超高空间分辨率
- 实现“零”电子学噪声读出、降低剂量
- 极大提升物质成分的识别和分析能力



Dual layer
(0.3mm CsI, 0.7 mm Cu, 5mm CsI)



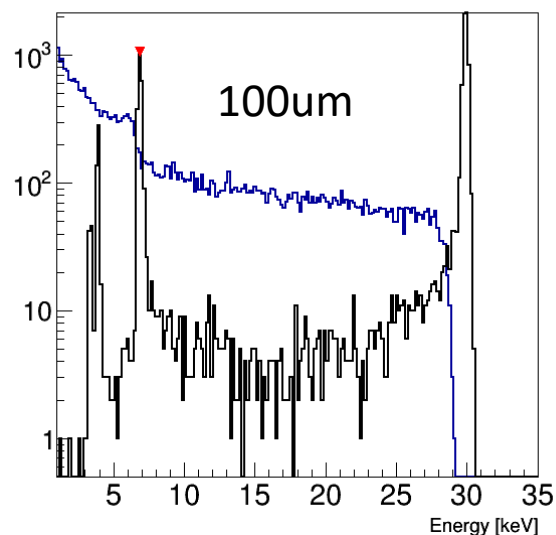
100 kV, 2mm alu, 4 channels



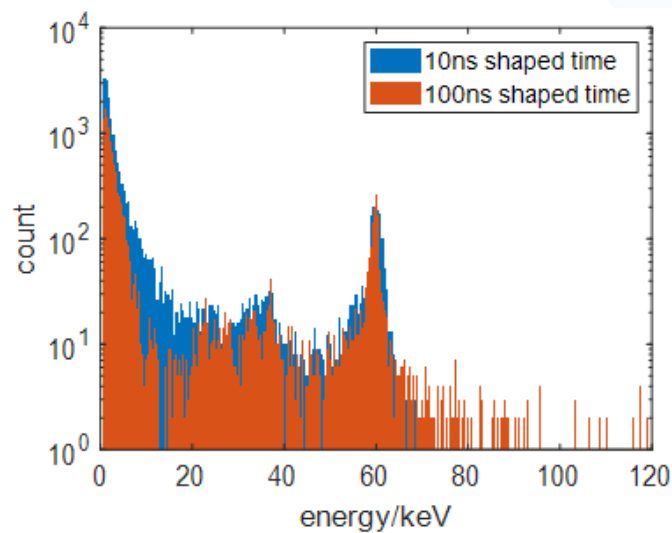
➤ 如何提高单位面积的计数率?

- 探测器材料的稳定性 (极化、温度)
- 减小像素?
- 缩短成形时间?

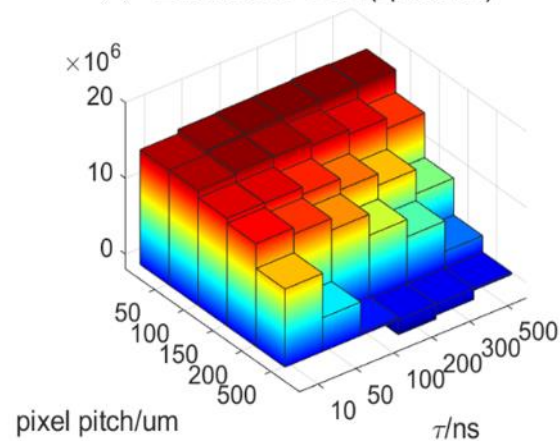
减小像素尺寸



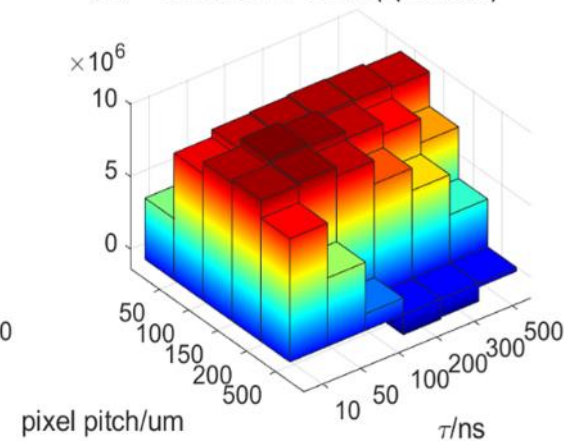
缩短成形时间



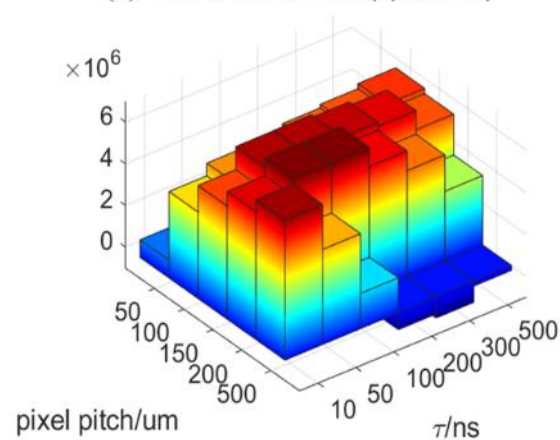
(a) ETH:12keV OCR/(cps/mm²)



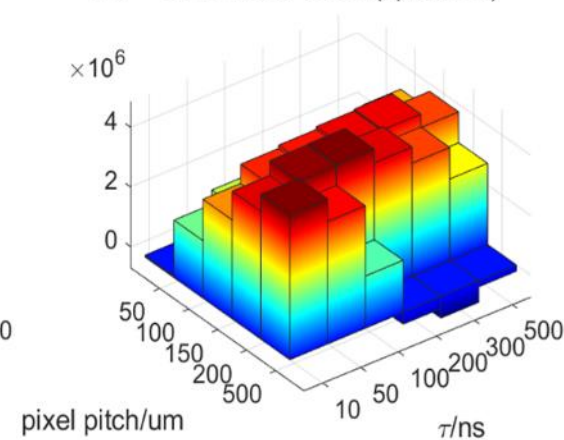
(b) ETH:24keV OCR/(cps/mm²)



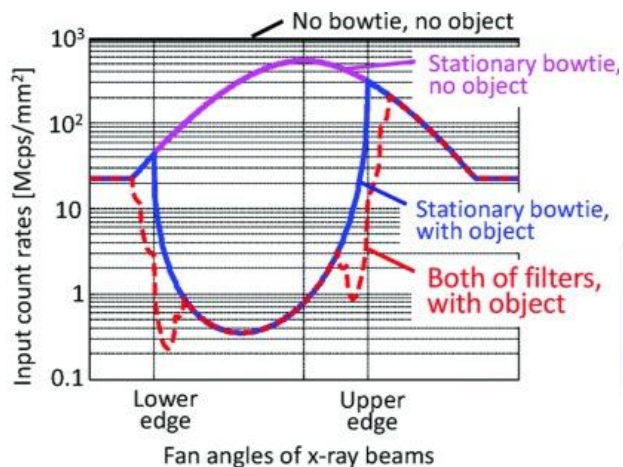
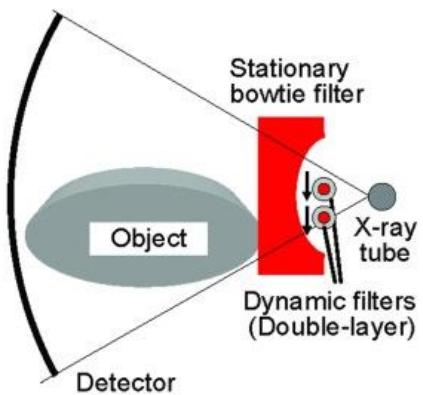
(c) ETH:36keV OCR/(cps/mm²)



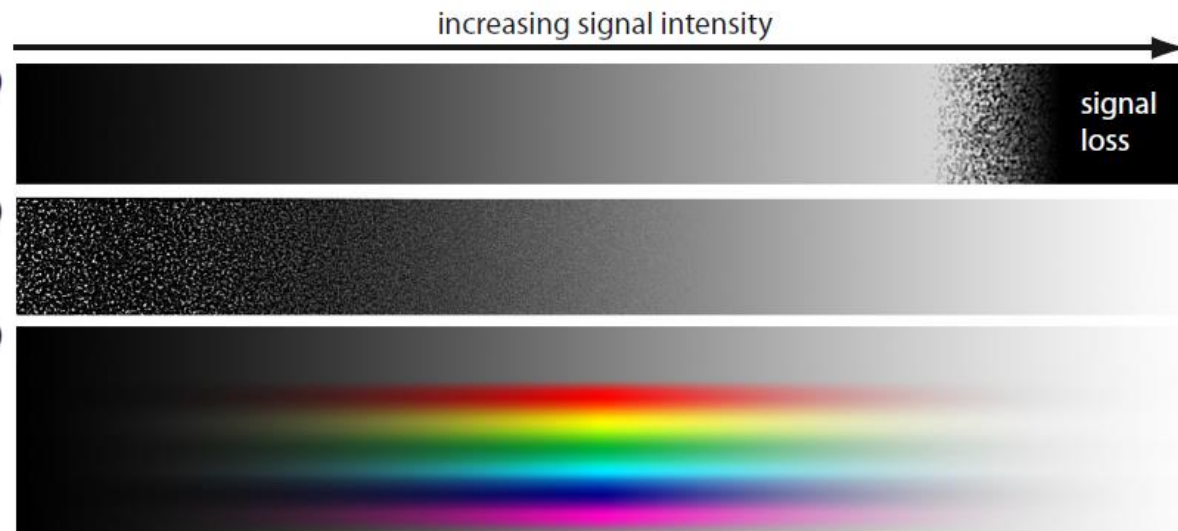
(d) ETH:48keV OCR/(cps/mm²)

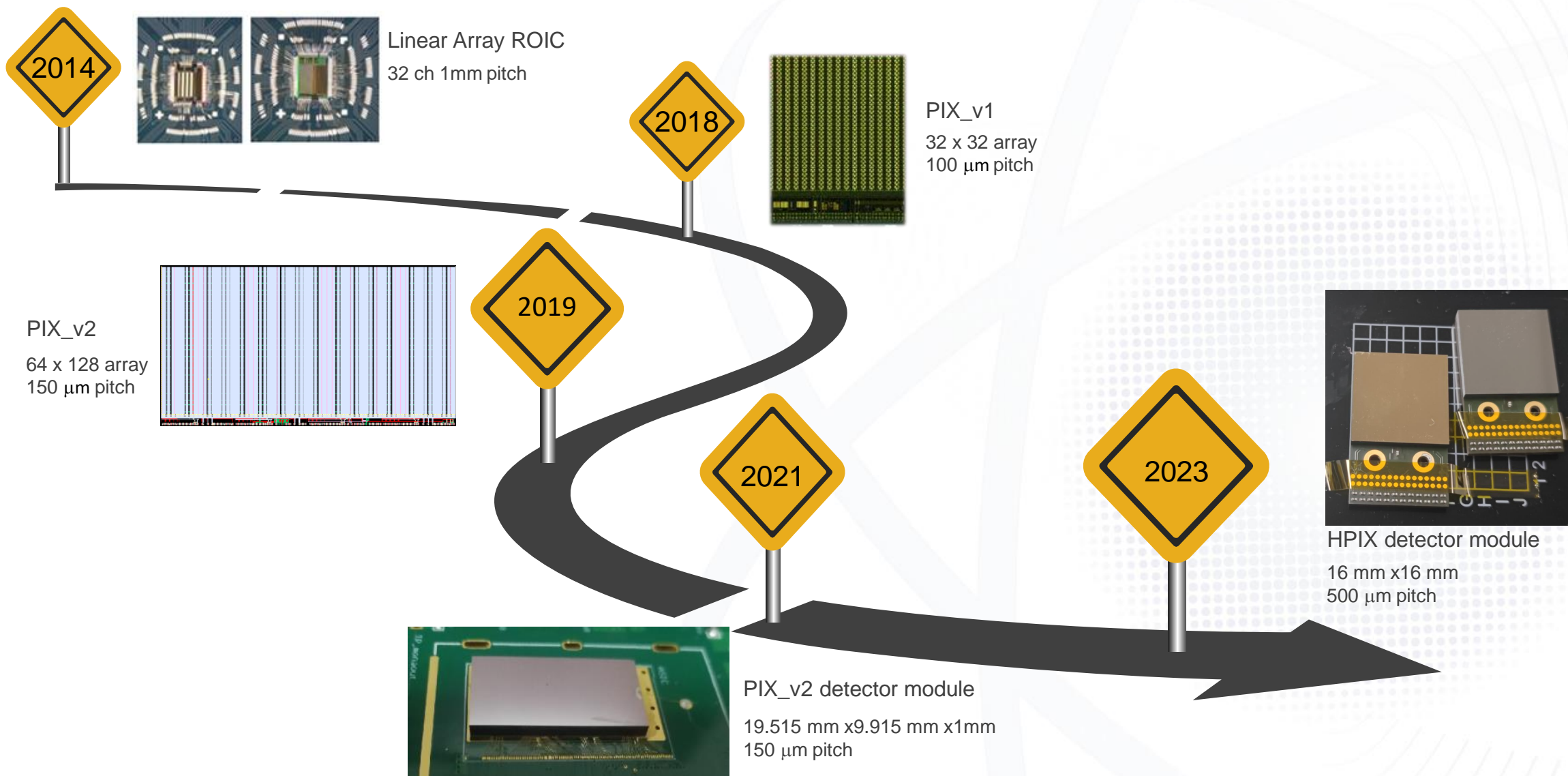


- CT应用中入射X射线计数率可达~100Mcps/mm² 乃至更高，给光子计数探测器带来很大挑战，但能量积分探测器在高计数率下响应稳定
- 光子计数+能量积分两种探测模式
 - 低计数率下采用光子计数，去除暗电流影响，获取能谱信息
 - 高计数率下采用能量积分，大动态范围



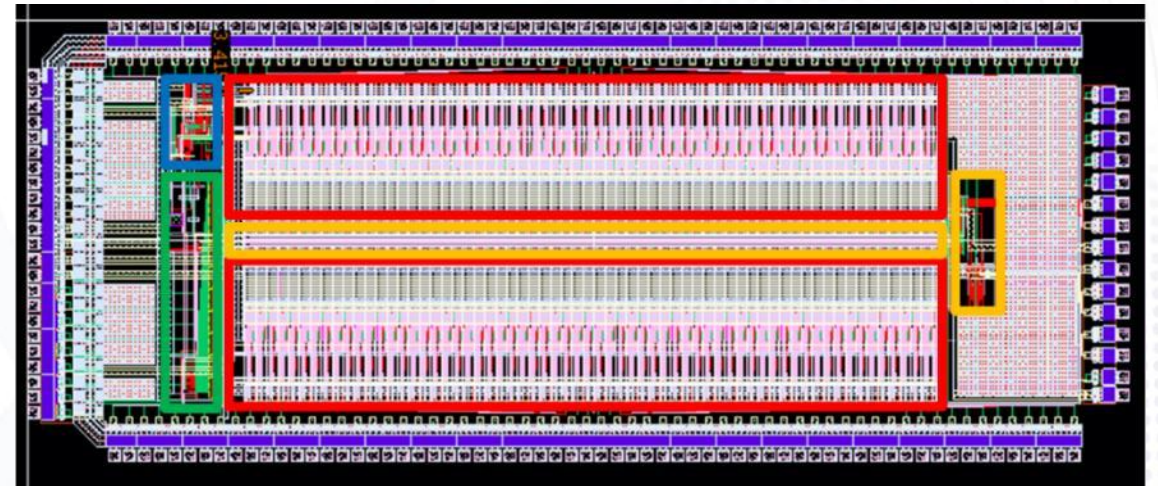
计数
积分
双模





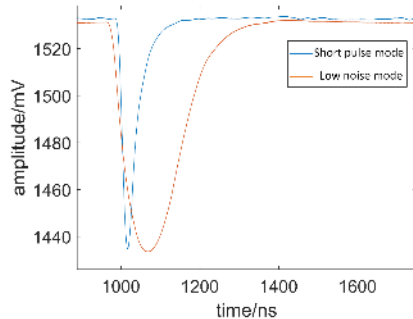
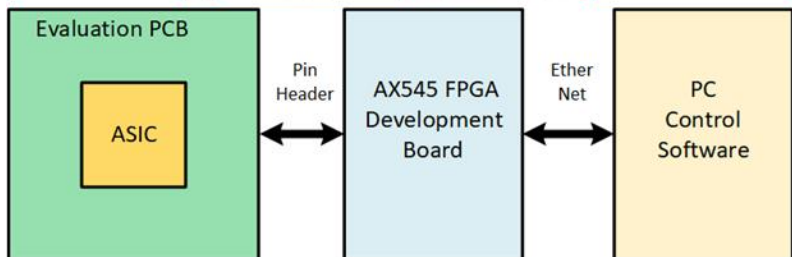
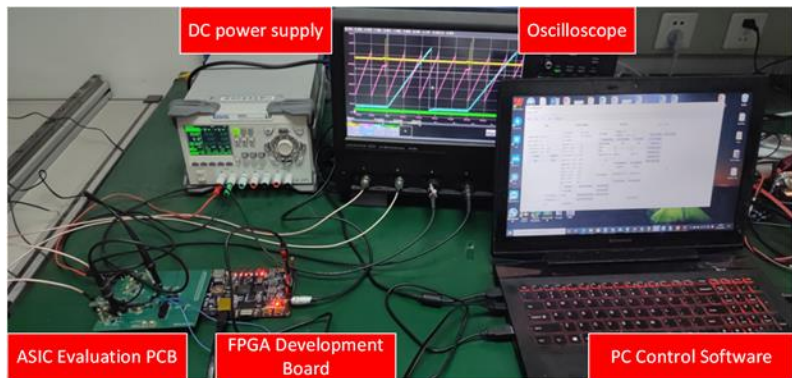
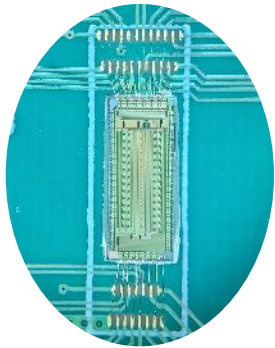
HPIX: 128通道光子计数-积分混合成像读出芯片

参数	值
通道数	128
计数模式输入范围	5.12fC (160keV光子@CdTe)
计数器	15bit
计数模式增益	44mV/fC
计数模式脉宽	50ns/120ns
噪声	450e-/150e-
能窗数目	2
积分模式电荷量	20pC (9.4k个60keV光子)
功耗	324uW/pixel
读出帧率	<10 kHz

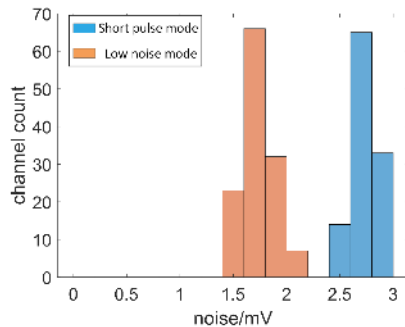


- 128路读出通道
- 数据采集/读出控制电路
- 慢控制电路、DAC电路
- 模拟偏置电路、斜坡信号产生电路

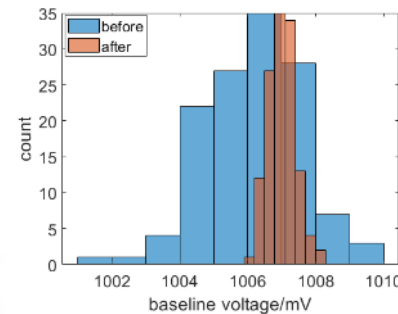
HPIX芯片性能测试



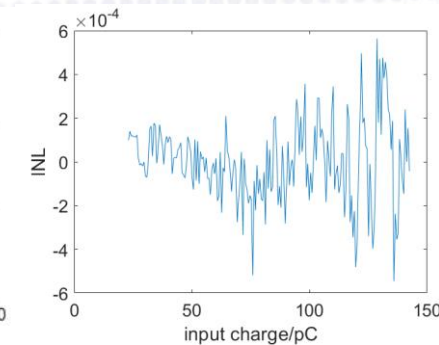
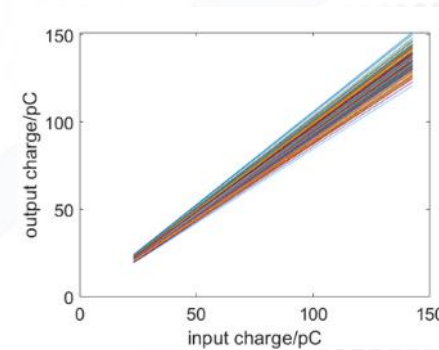
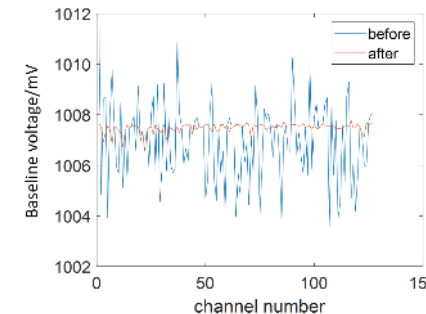
监测波形:
37ns FWHM@高计数率模式
84ns FWHM@低噪声模式



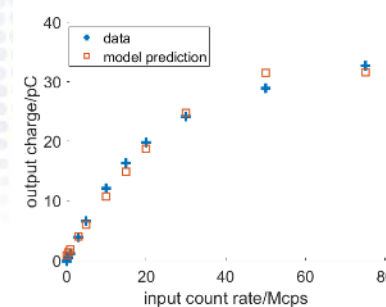
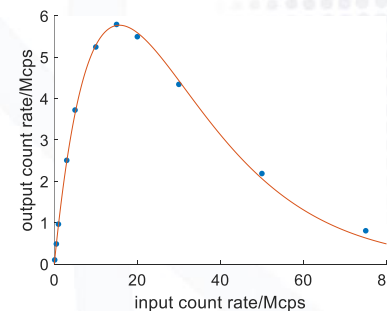
噪声:
~2.4 keV@高计数率模式
~1.4 keV@低噪声模式



阈值不一致性: 1.3 keV@调节前; 0.33 keV @调节后

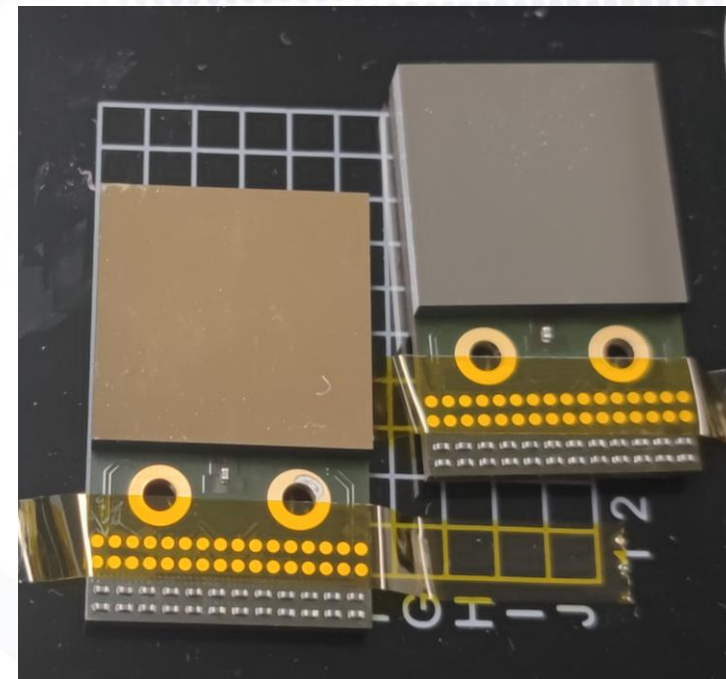
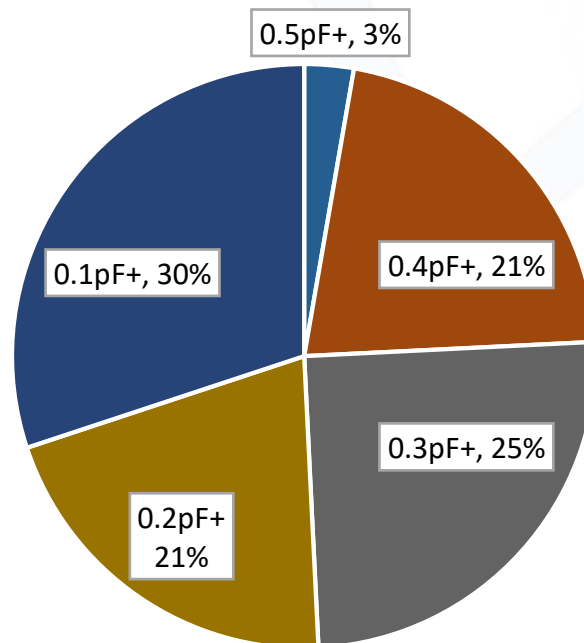
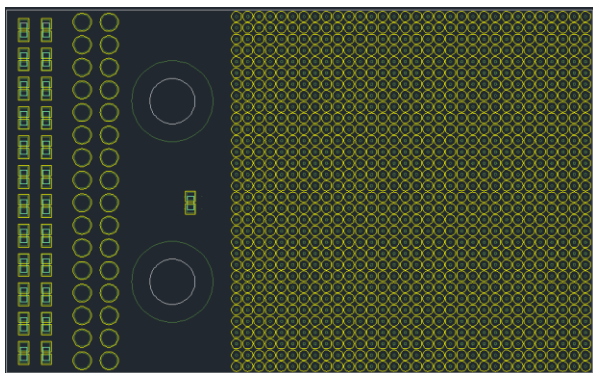
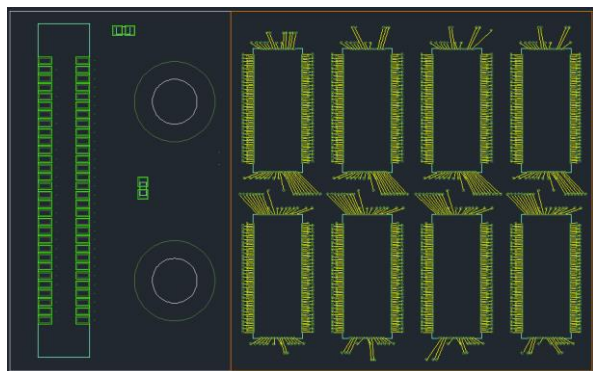


积分通道: 量程150pC, INC<0.076%, 噪声~0.6fC

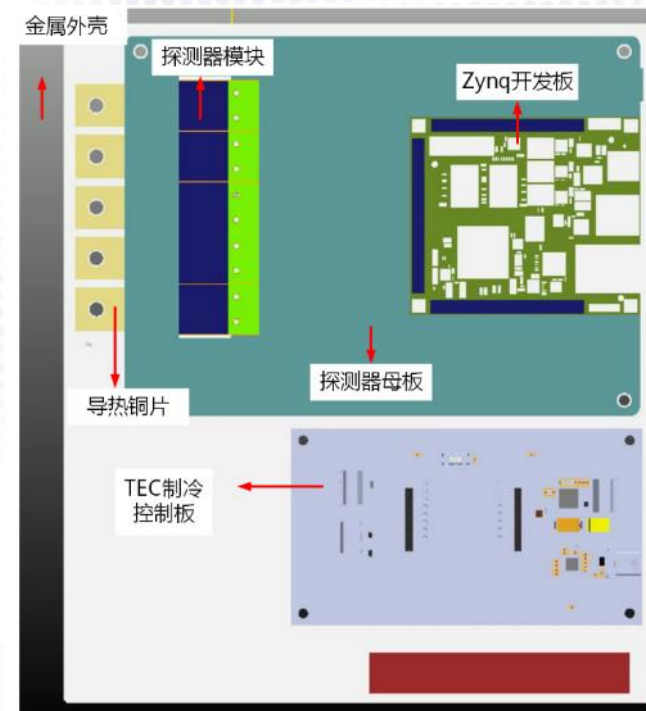
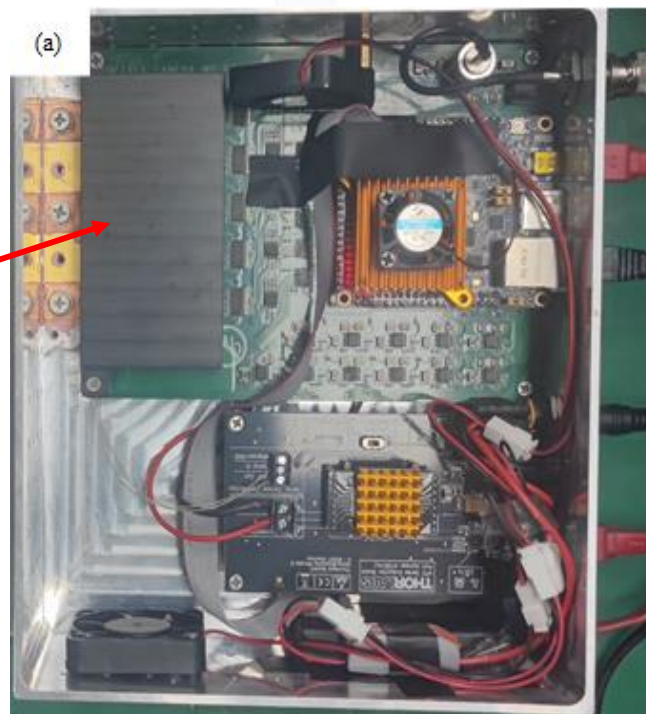
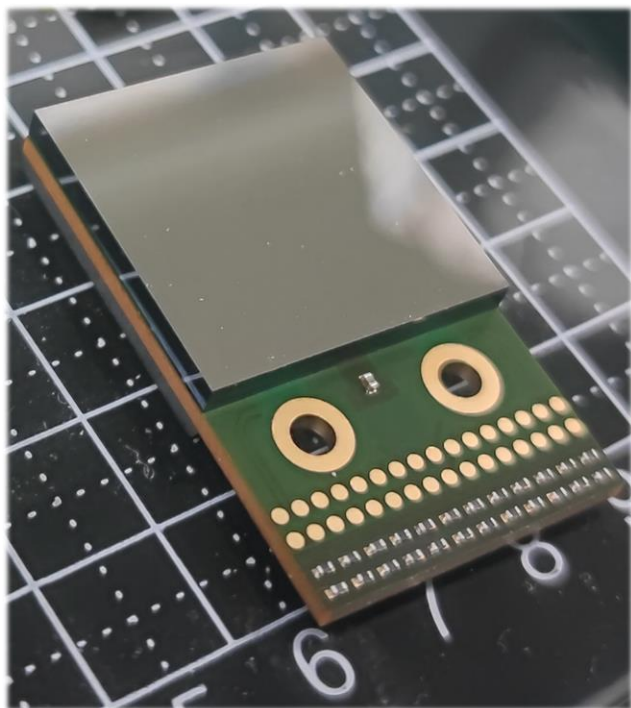


随机信号: 72Mcps/mm²@计数通道, 300Mcps/mm²@积分通道

- 优化数字走线，降低模拟电路受到的干扰；
- 优化读出芯片像素-探测器像素走线的电容值与一致性；
- 把芯片IO引到基板一侧，三面可拼，便于扩展成像面积HPIX芯片

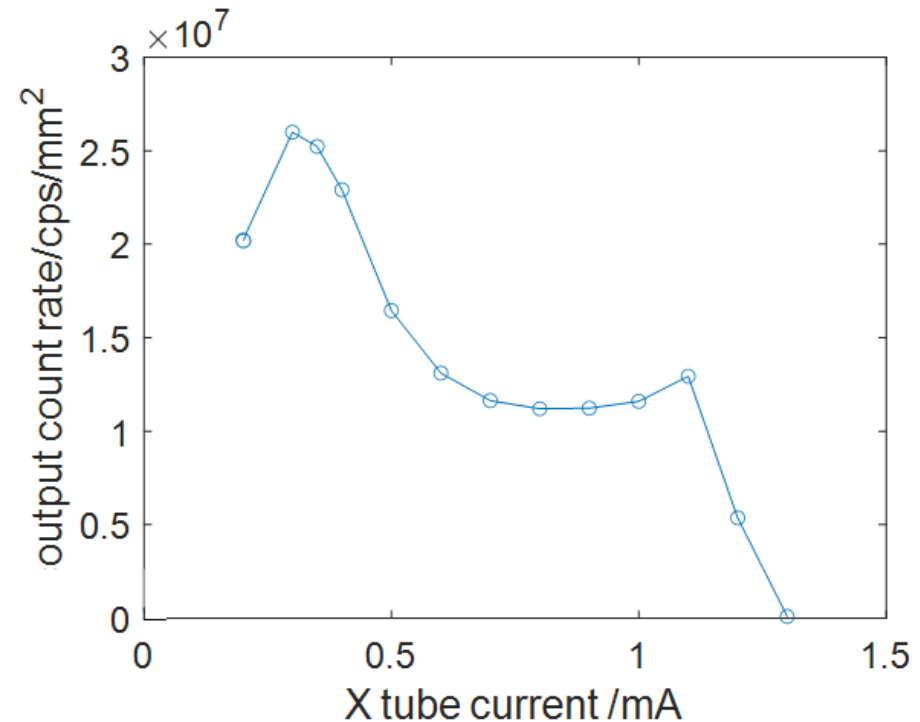
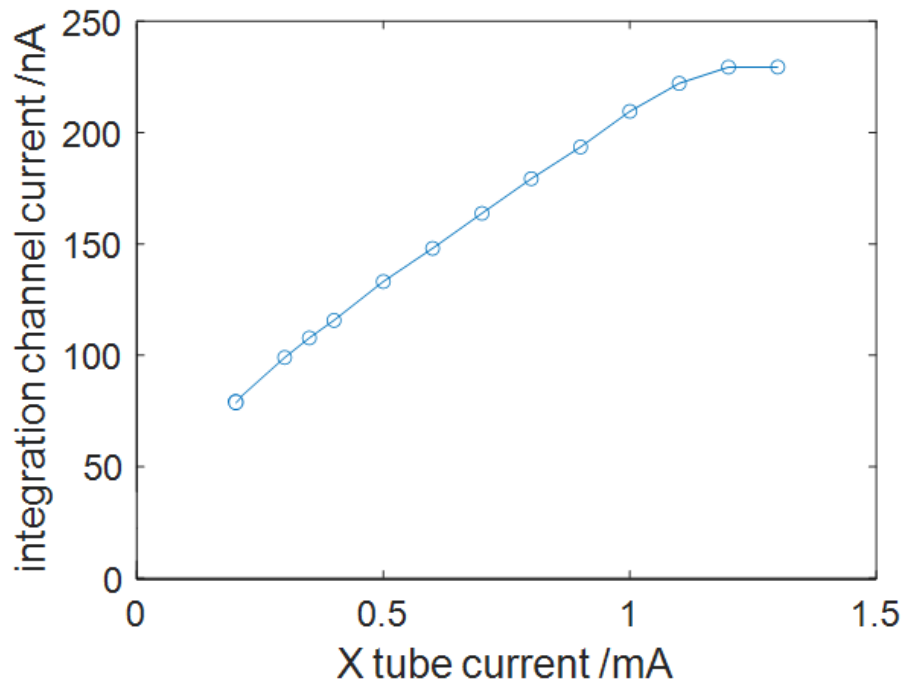


- 探测器模块的拼接
- 数据采集系统
- TEC控温



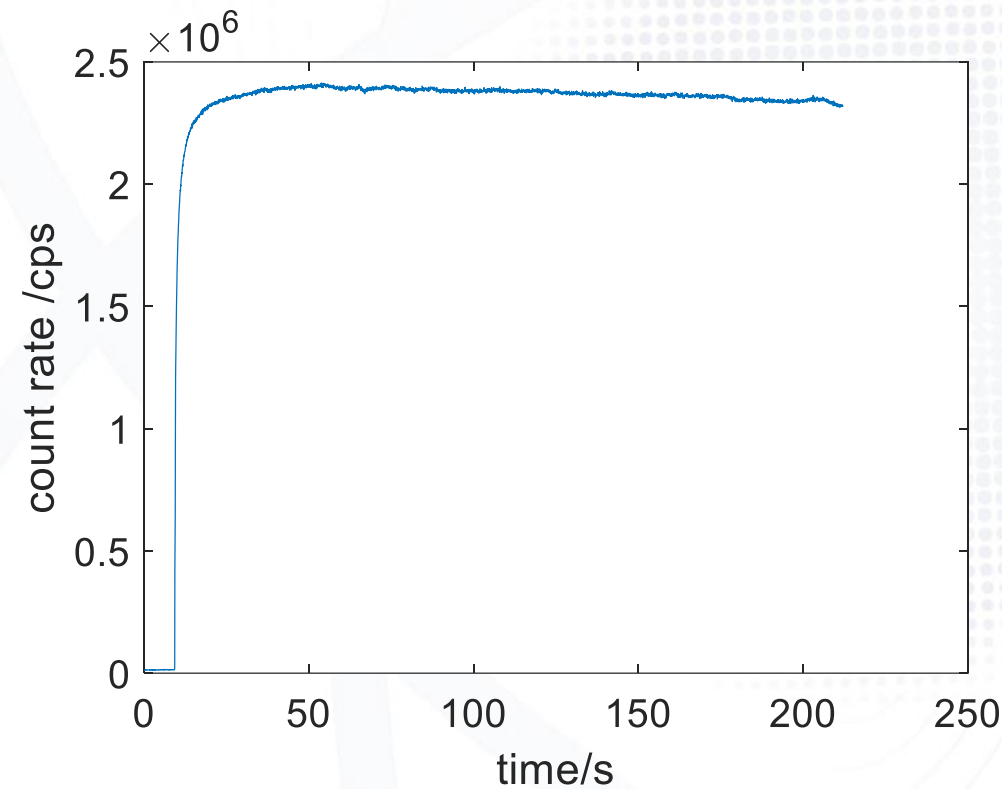
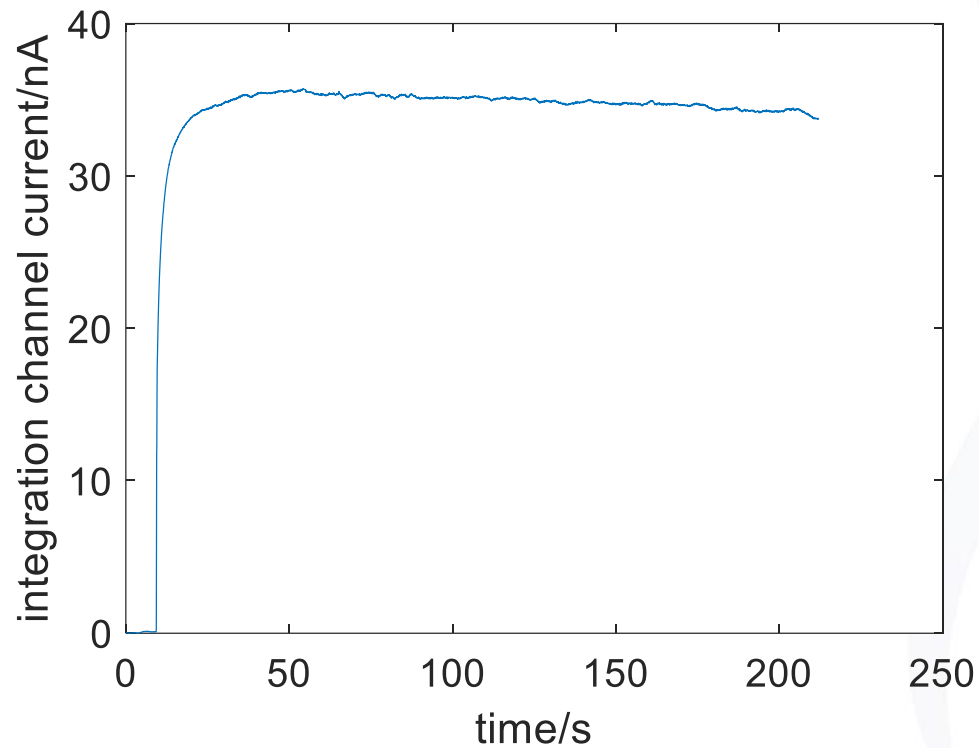
➤ 计数率响应

- 计数通道最大输出计数率为26 Mcps/mm²,对应随机输入计数率71 Mcps/mm²
- 在此计数率以上计数通道已经出现明显饱和,但积分通道数据仍有效 (饱和计数率约在280 Mcps/mm²)

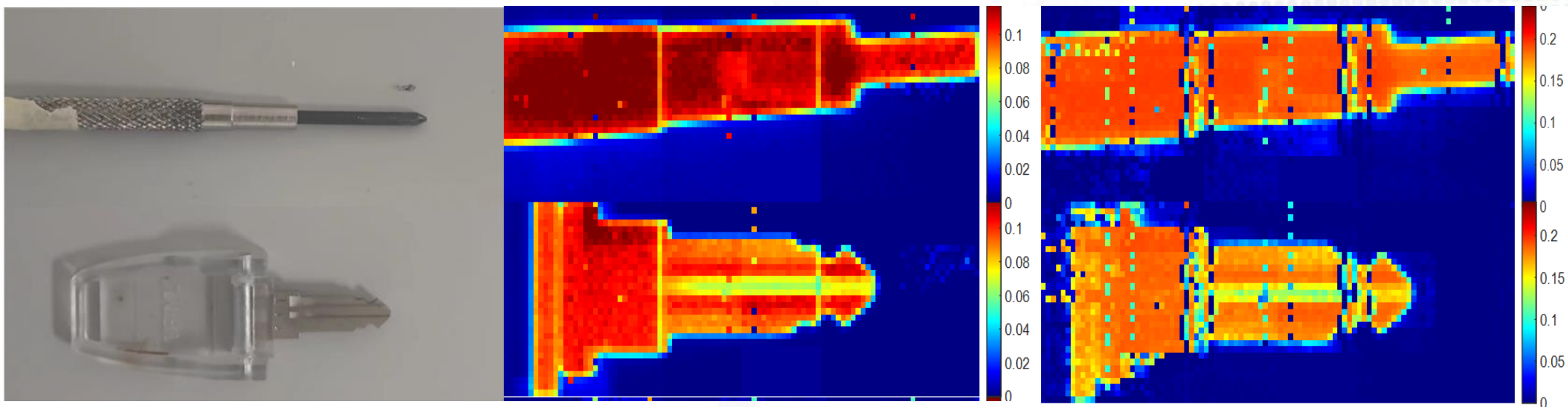


➤ 稳定性测试

- 积分/计数通道响应均随时间变化，趋势几乎相同
- 变化率 $< 0.035\%/s$

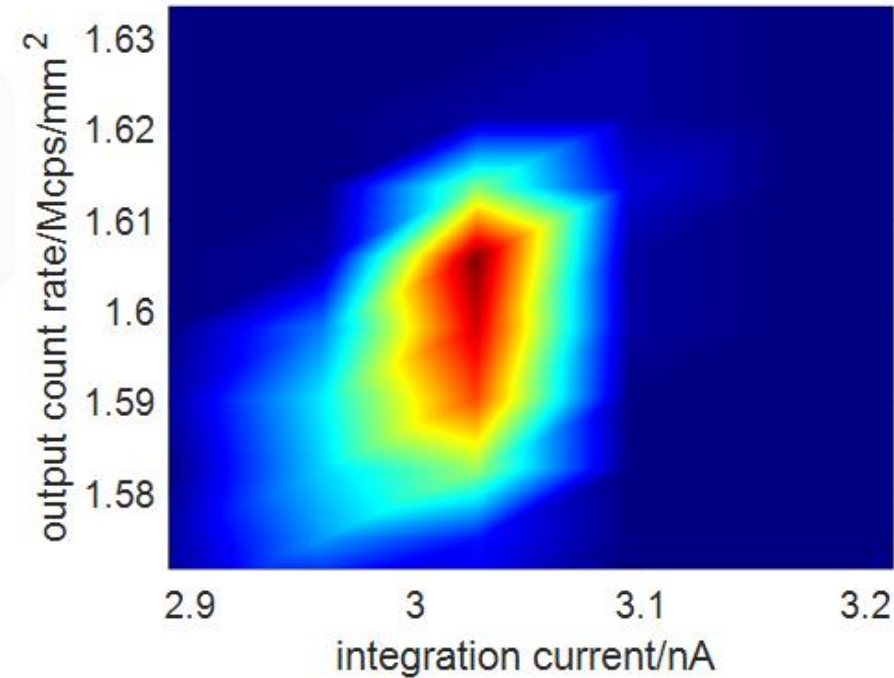
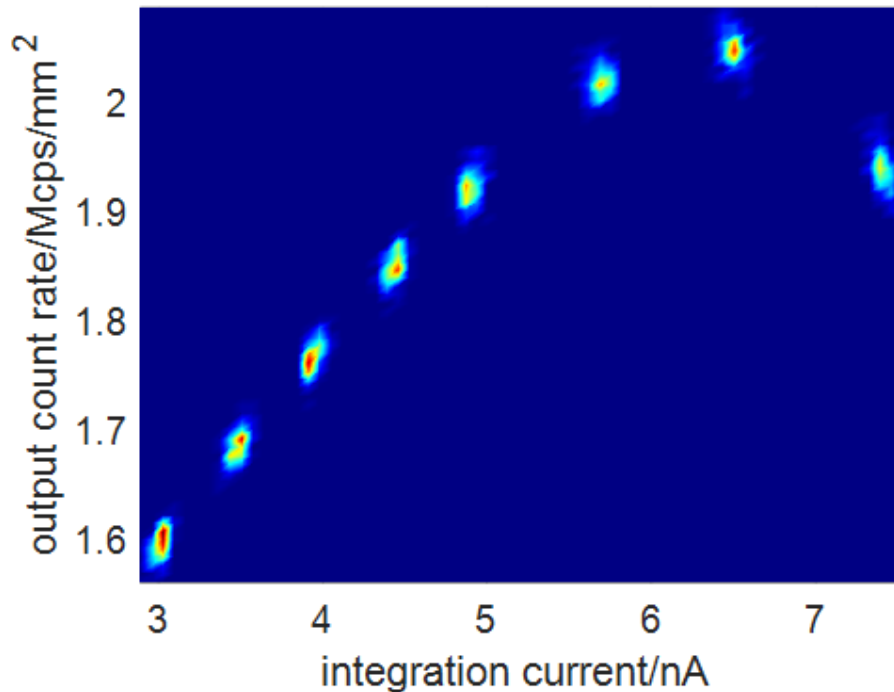


- 透射成像测试
- 计数通道有若干坏点，已经确定其成因
- 积分通道相较而言具有较强的抗干扰能力

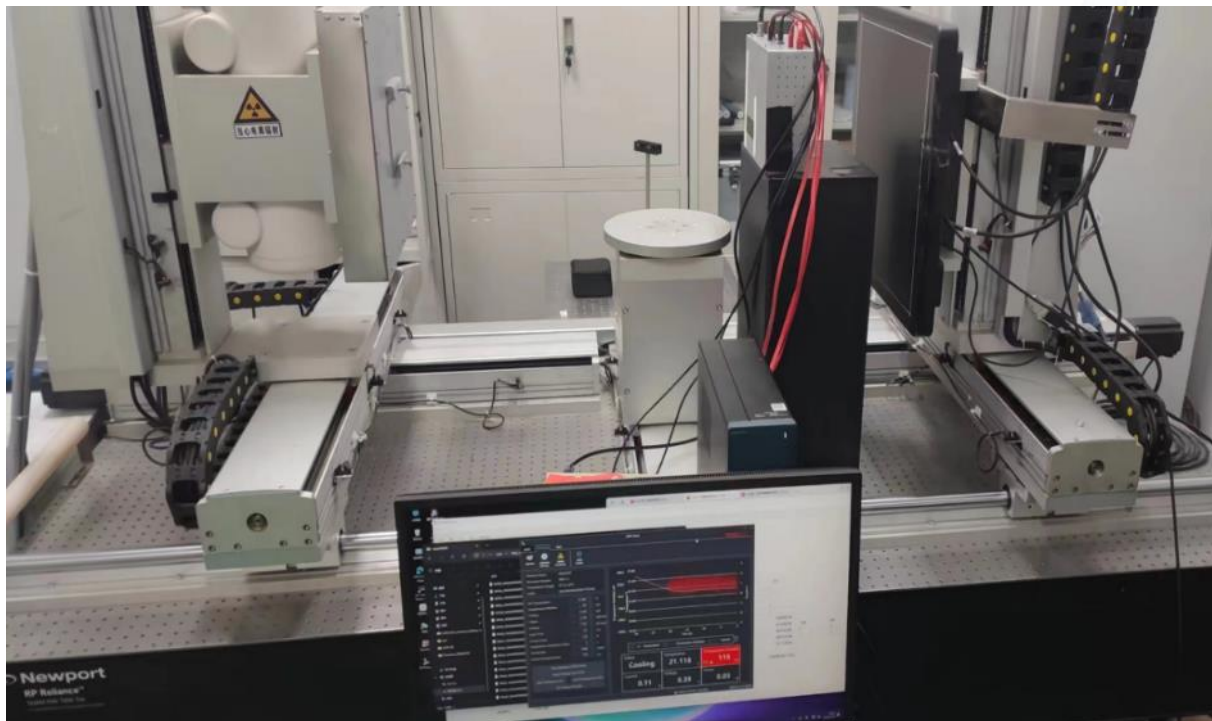


➤ 成像测试

- 积分-计数数据散点图表明双模信息具有相关性;
- 散点图中存在“亮线”，大部分数据点分布在正斜率“亮线”附近：积分通道数据和计数通道-计数数据具有显著正相关性

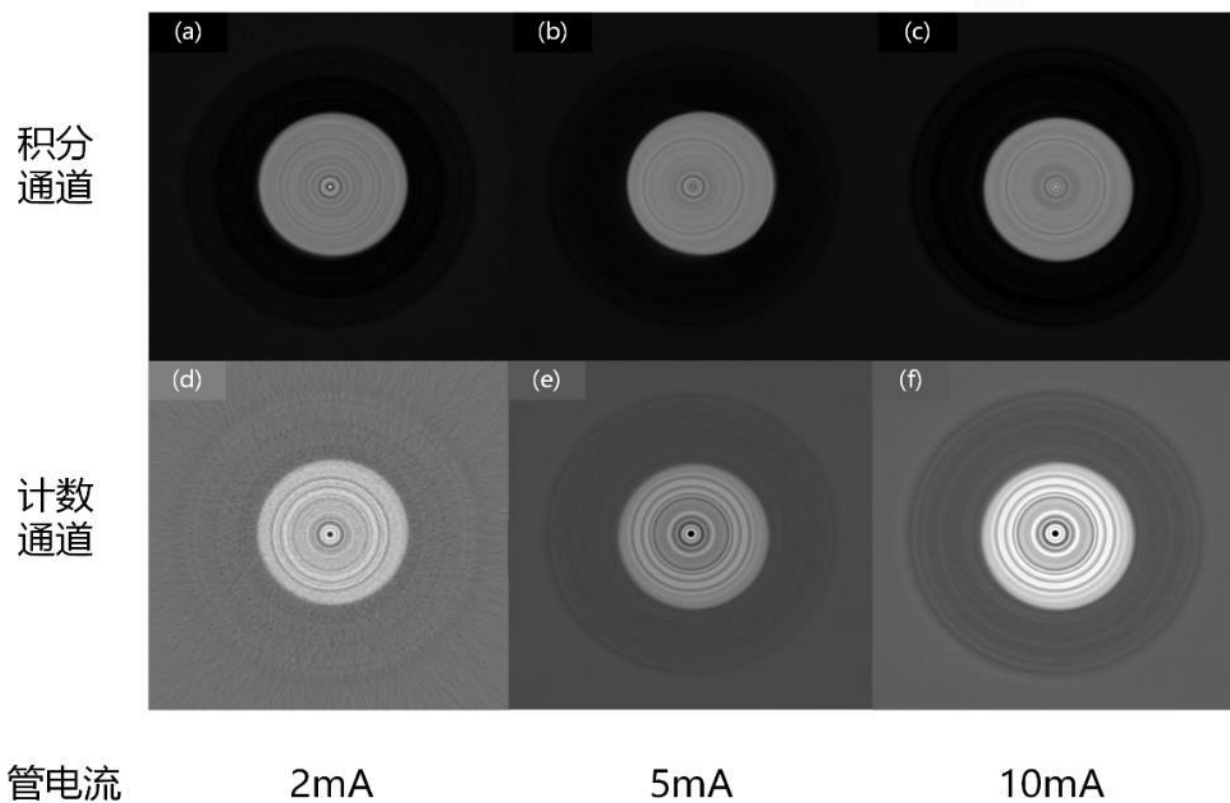


► CT成像测试



采集条件	值
X光管管电压	120 kVp
X光管管电流	2mA/5mA/10mA(分别对应低/中/高堆积严重情况)
X光管出光到探测器开始采集的间隔时间	60 s
转台转速	12°/s
探测器帧率	100 Hz
探测器温度 (芯片面)	21°C
探测器高压	-400V

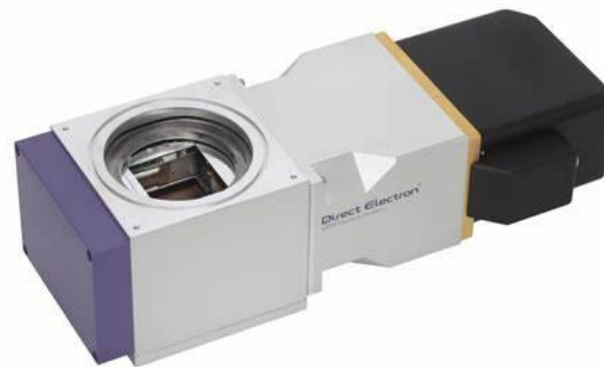
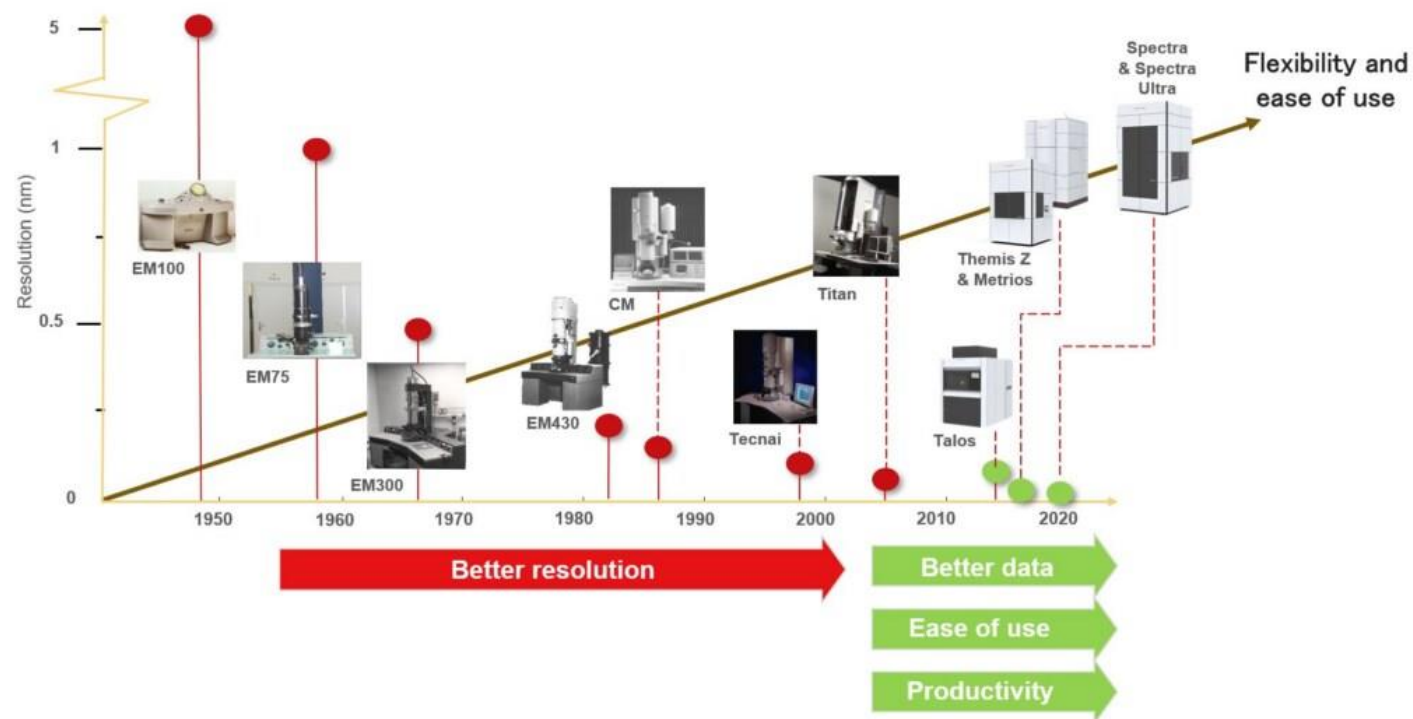
► 成像测试



03

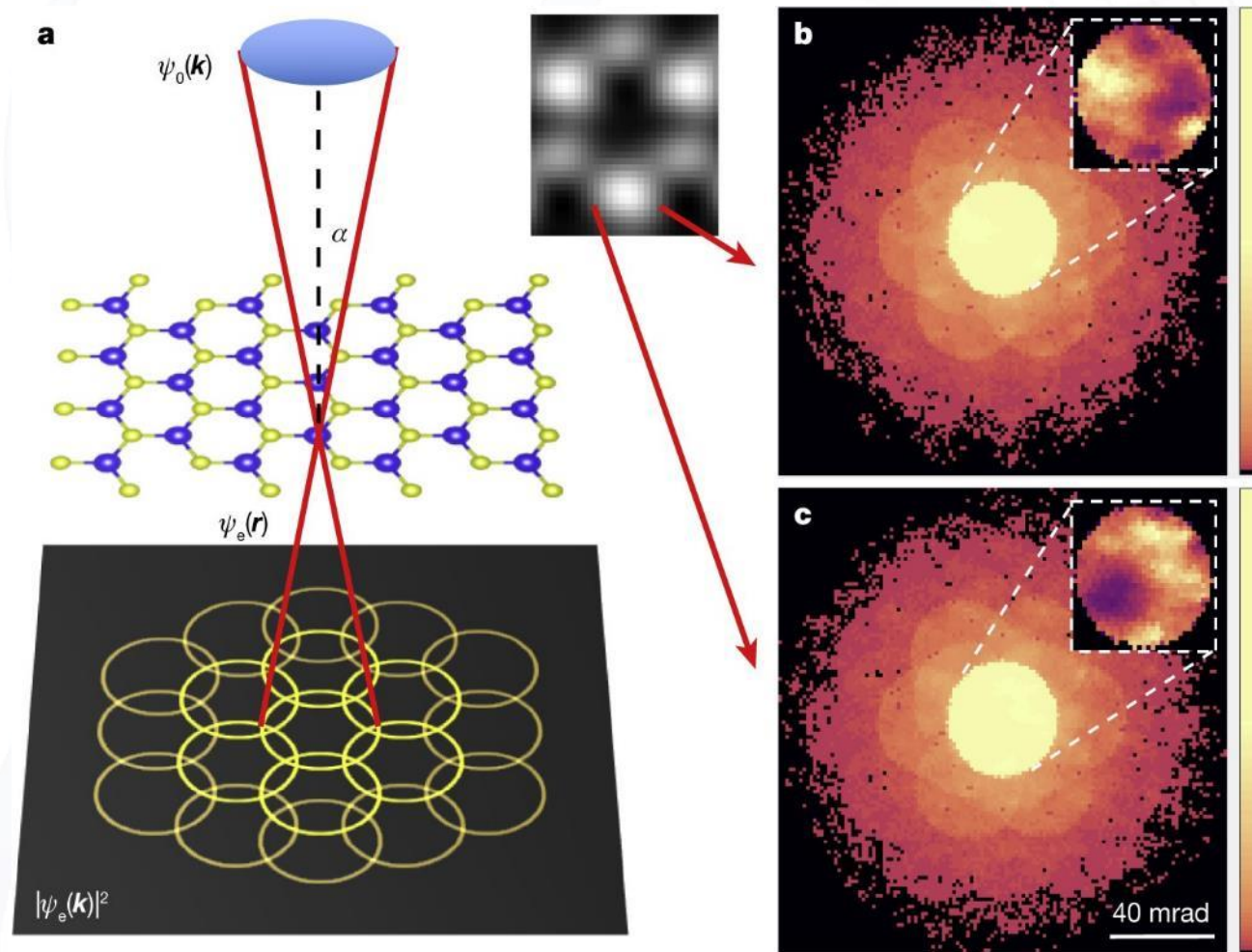
Direct Electron Imaging Detectors
电子直接成像探测器

- 电镜已经成为现代科学技术中不可缺少的重要工具，在材料、生物、生命科学和半导体制造等领域中得到非常广泛的应用
- 近二十年来，电子显微成像迎来了突破性的进展，分辨率可达亚埃量级，得益于以下方法和技术的进步。而电子探测相机是电镜系统中的重要组成部分，也是决定图像分辨性能的关键部件
- 电镜技术发展的新契机：不依赖于电子光学的计算成像、更多物理信息 → 对电子探测技术提出的新需求

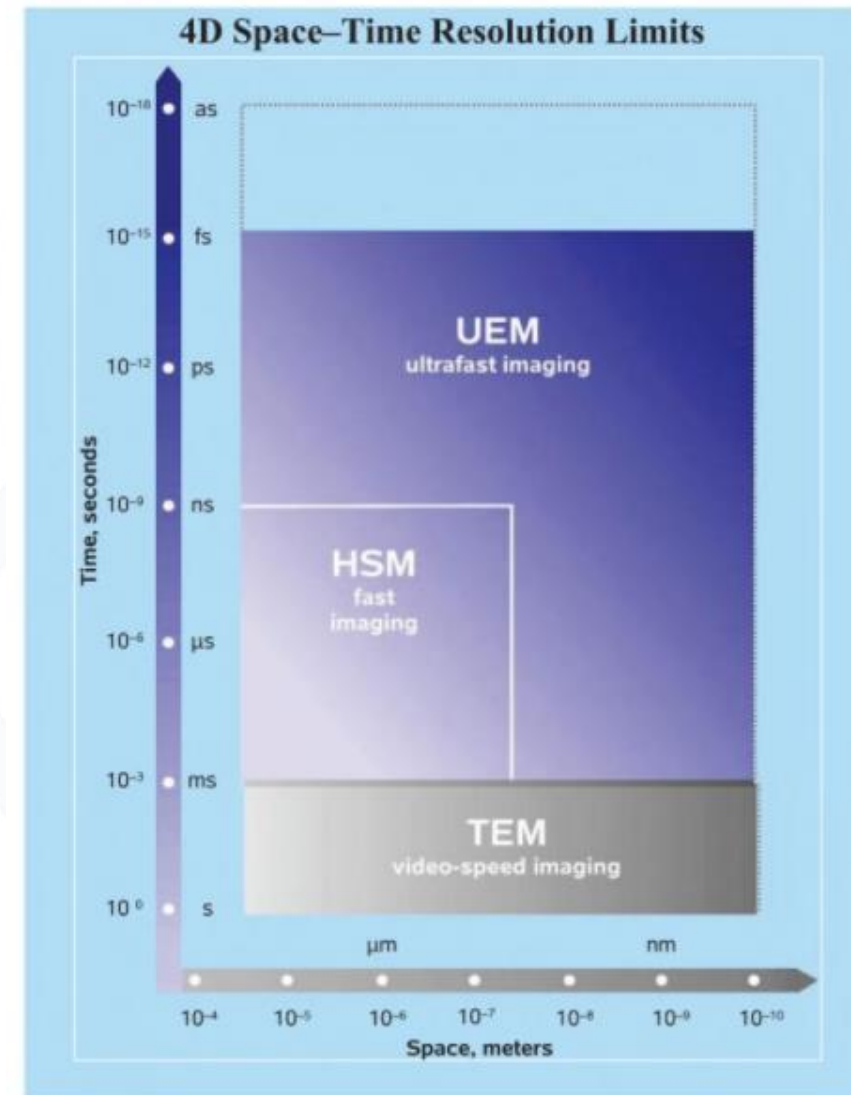


4维扫描透射电镜 (4D-STEM)

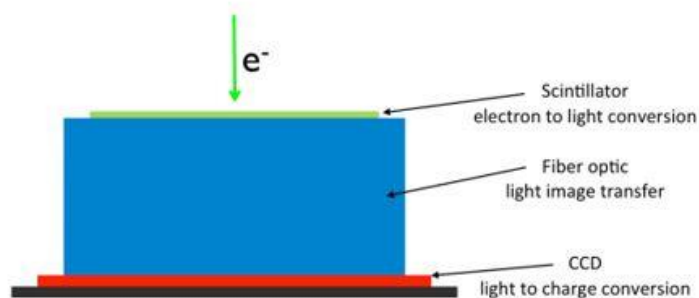
- 电子以会聚束在样品上进行二维扫描，同时在像平面使用二维探测器记录图像
- 电子束半会聚角 α 决定了理想情况下的空间分辨率
- 相比于传统TEM的优势：
 - 可以突破电子光学的限制
 - 空间分辨率的提升（亚埃量级）
 - 可观测区域的扩展
- 对探测器的新需求：
 - 大动态范围
 - 高帧率



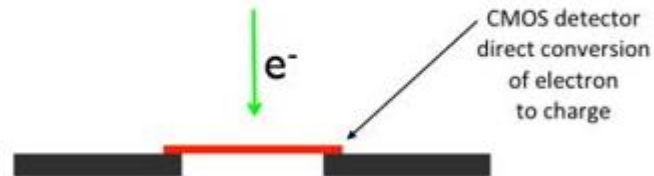
- 光阴极微波电子枪产生超短电子束(<ps)
 - 单发电荷量: pC(准直前), fC (准直前)
 - 典型电子能量: 1~3 MeV
- 原子尺度的超快动力学过程:
 - 物质的相变过程、化学反应的动力学路径、甚至生物过程的功能
- 瞬态强束流照射要求探测器必须具有足够大的动态范围以及快时间响应



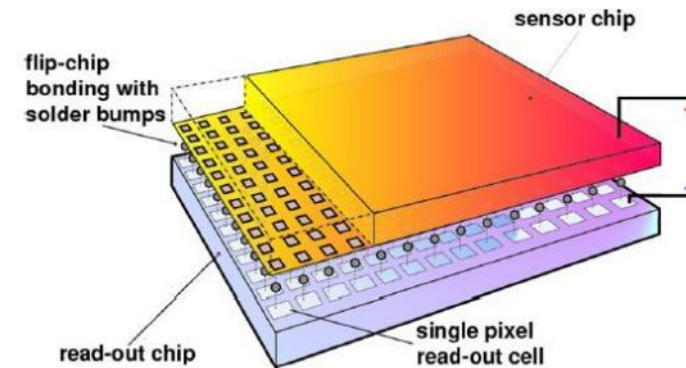
• 电子探测相机由间接向直接、由单片集成向混合式技术发展



- 间接电子探测器
闪烁体+CCD等光电探测器
- 噪声和分辨率差
 - 动态范围小



- 单片集成式像素探测器 (MAPS)
- 分辨率高
 - 辐照敏感
 - 动态范围受限
 - 适用于高分辨TEM



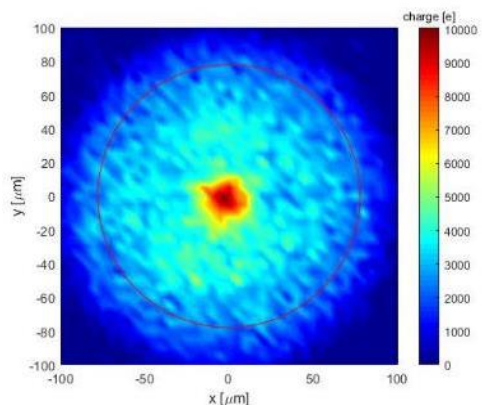
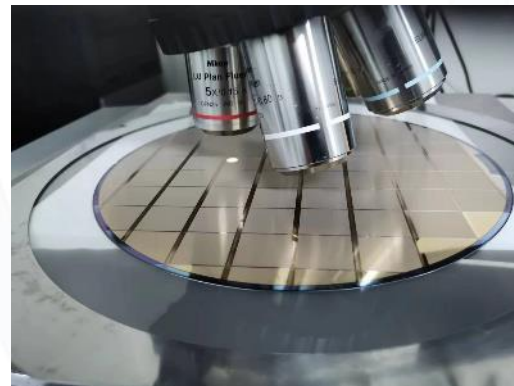
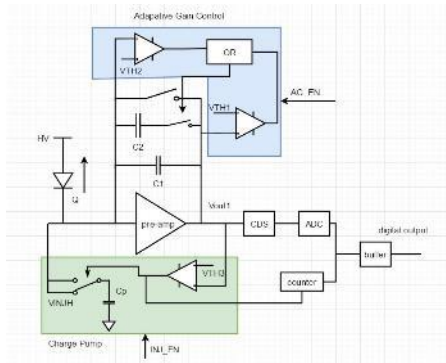
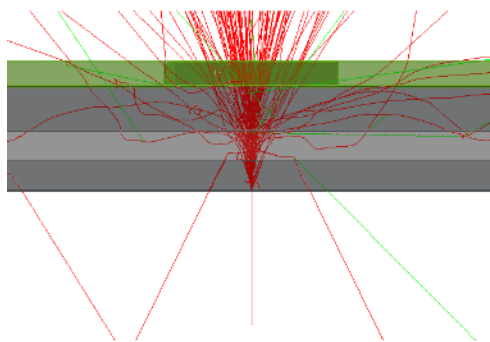
- 混合式像素探测器
- 分辨率中
 - 耐辐照
 - 动态范围宽
 - 适用于STEM、电子衍射、层叠成像

2000年代

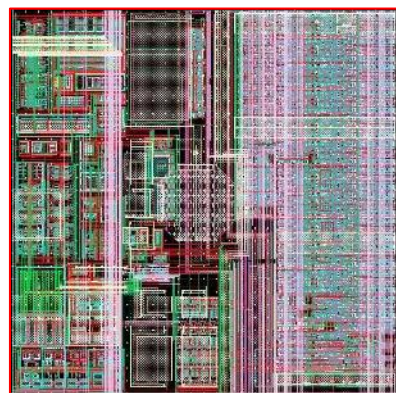
2010年代

2020年代

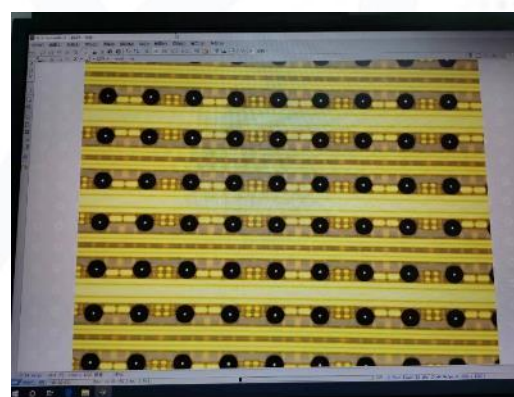
• EMPIX: 宽动态范围、高帧率电子成像探测器



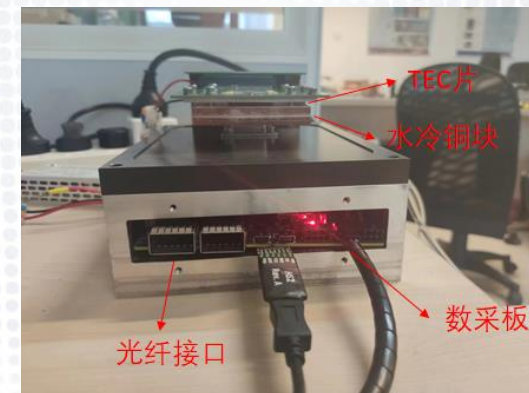
探测器仿真



读出芯片设计



晶圆倒装



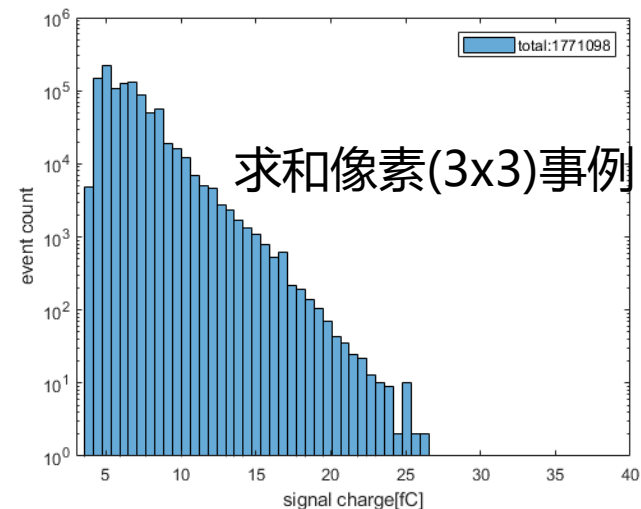
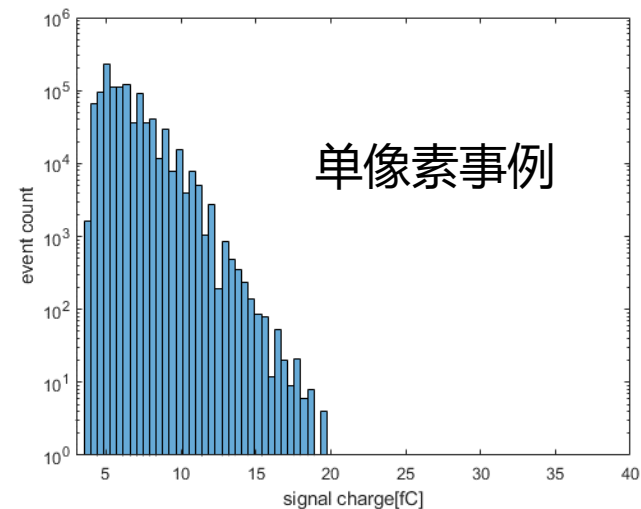
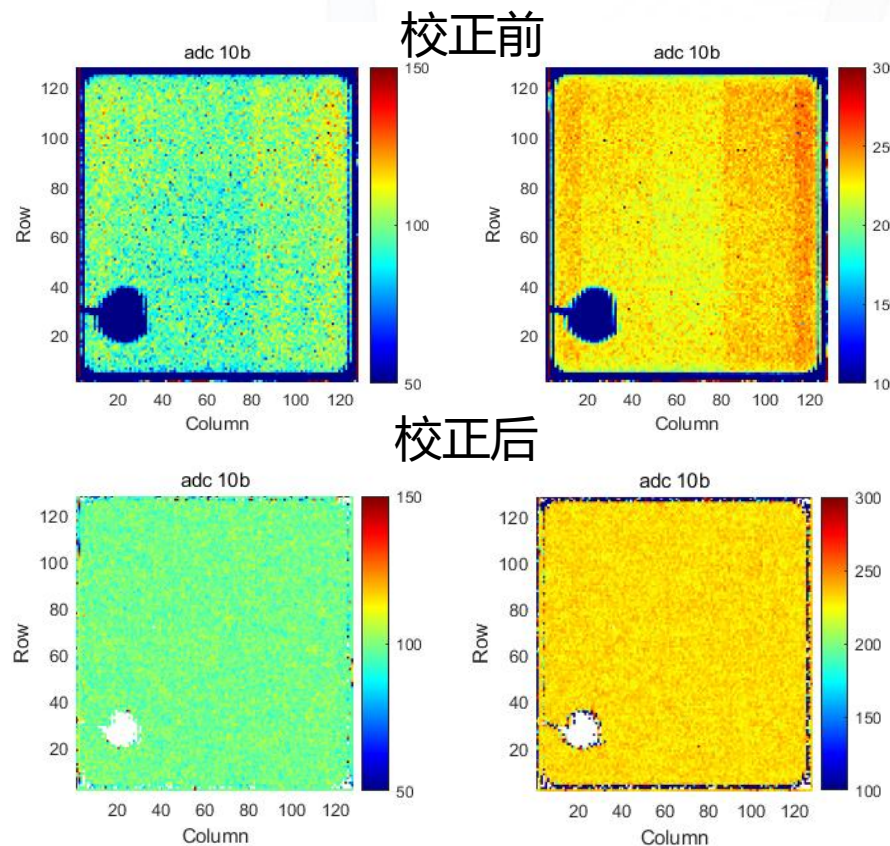
探测器装配



• 性能对比

	EMPIX-原型	EMPIX-100K	EMPAD	EMPAD-G2
Pixel Size	150 um x 150 um	150 um x 150 um	150 um x 150 um	150 um x 150 um
Pixel Array	32 x 8	128 x 128	128 x 128	128 x 128
Input Range	12.5 pC/10 ⁶ keV	55 pC/4.5x10 ⁶ keV	16.4 nC/3.7x10 ⁸ keV	18.5 nC/4.2x10 ⁸ keV
Noise	563 e (ENC)	600 e (ENC)	388 e (ENC)	714 e (ENC)
Resolution	12 bits, Adaptive gain	24 bits, Q-pump(50 MHz) +Adaptive gain	32 bits, Q-pump(1 MHz)	32 bits, Q-pump(100 MHz) +Adaptive gain
ADC	片内线性放电ADC	片内线性放电ADC	片外pipeline ADC	片外pipeline ADC
Frame Rate	7.7 kHz max.	100 kHz	1.16 kHz	10 kHz
Sensor	200 um p-Diamond	200 um p-Diamond 500 um Silicon	500 um Silicon	500 um Silicon
Input Signal Current	96.25 nA	5.5 μA	143 nA	14.5 μA
Power Consumption	467 μW/pixel(Total, Test) 413 μW/pixel(Analog, Test)	632 μW/pixel(Analog, Mode 1) 437 μW/pixel(Analog, Mode 0)	<244 μW/pixel	

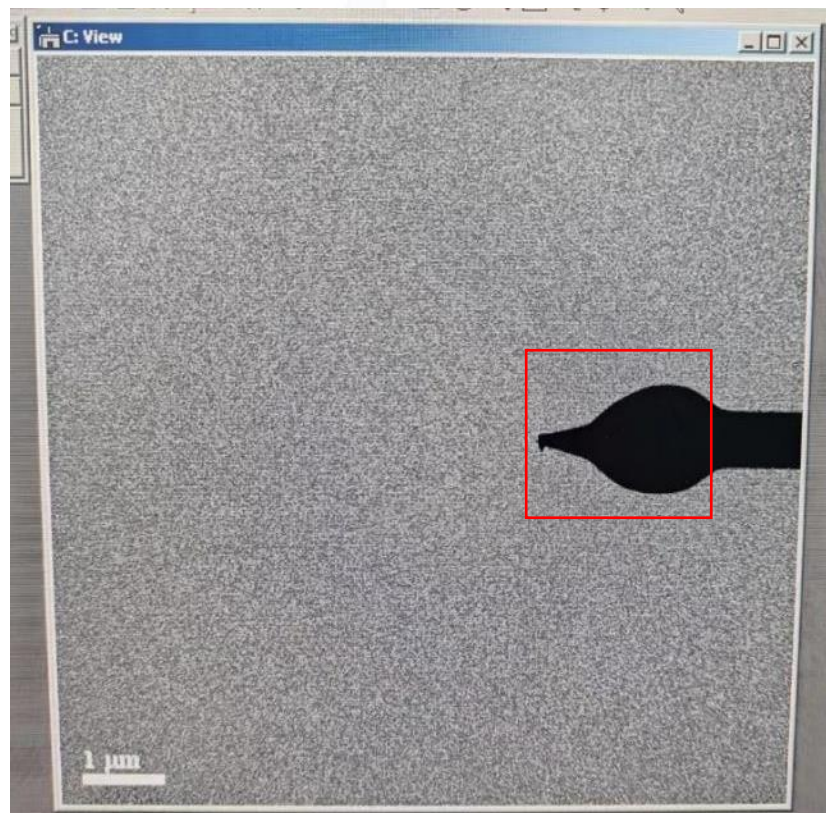
• 商用电镜测试 (200keV)



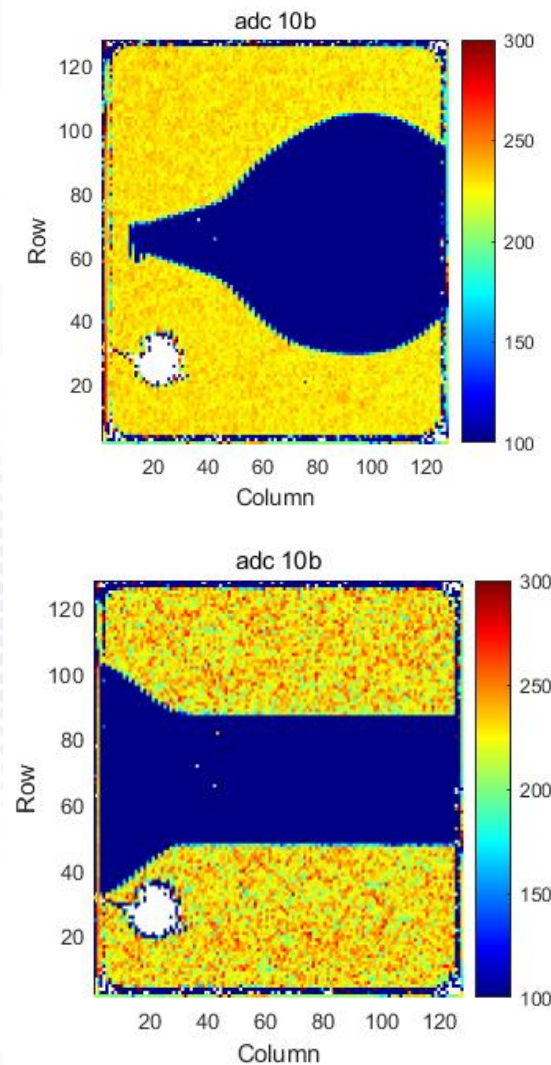
• 商用电镜测试 (200keV)



荧光屏上的图像



CCD上的图像

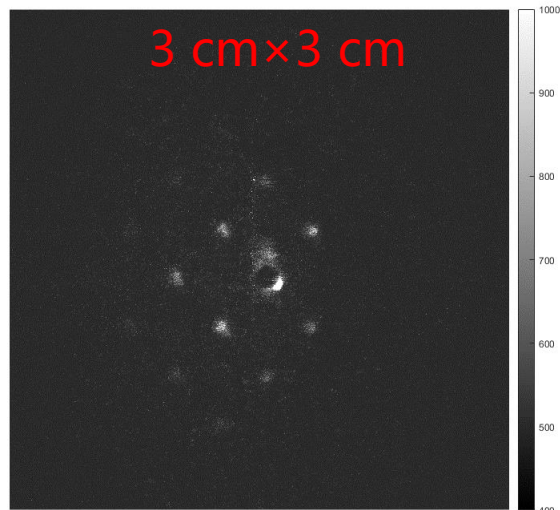


EMPIX2上的图像

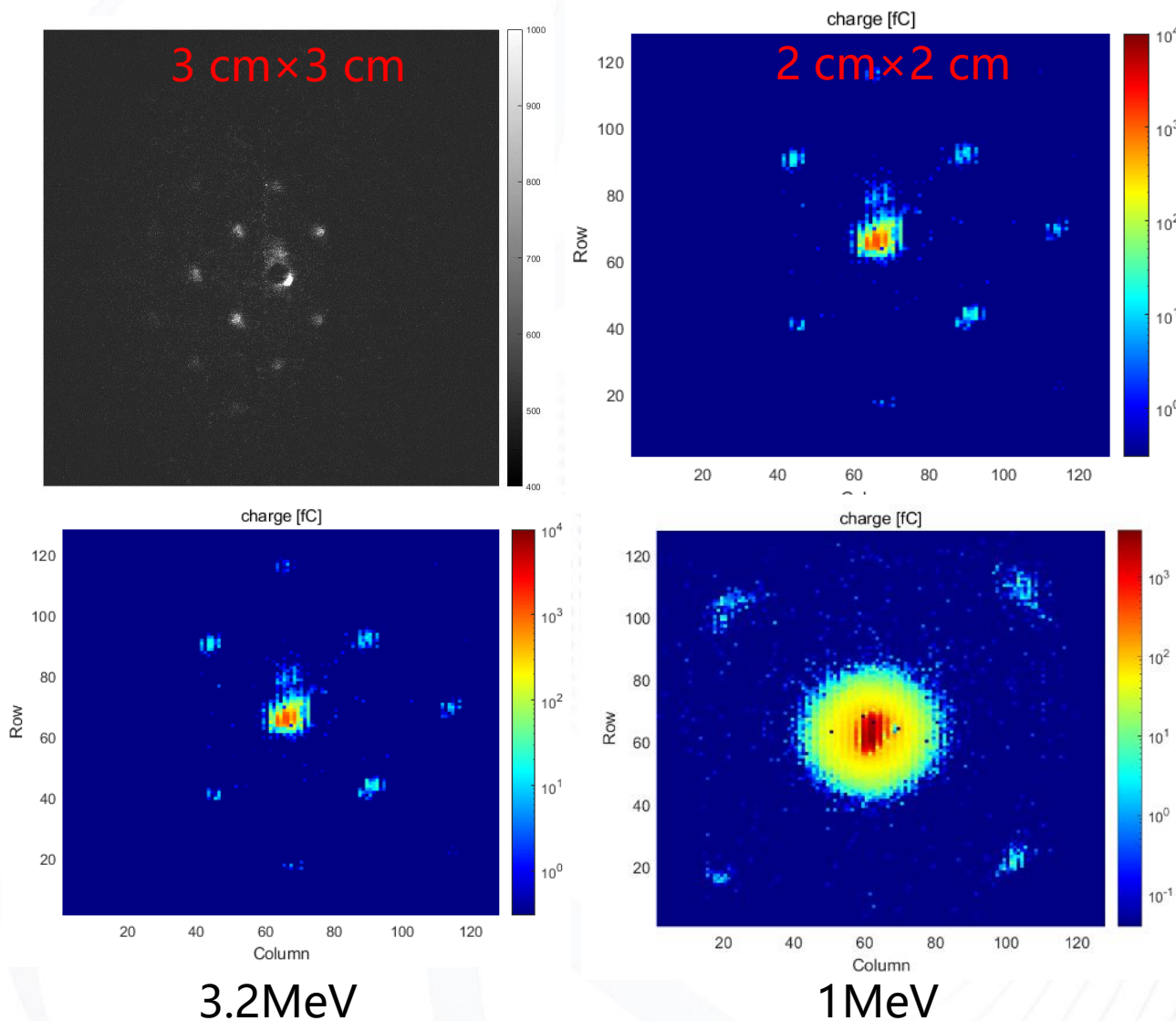
• MeV电子束流测试 (单晶Au标准样品)



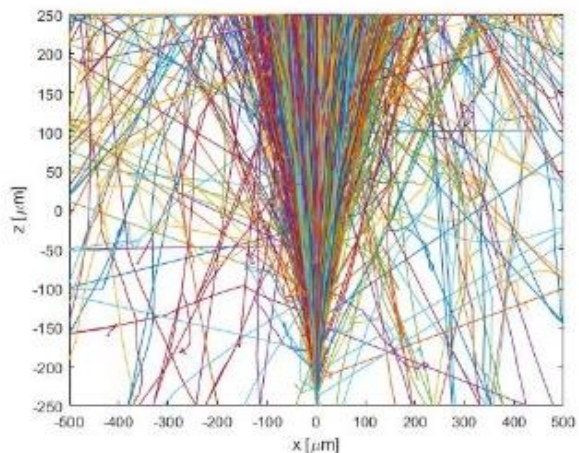
EMCCD图像 (50发累计)



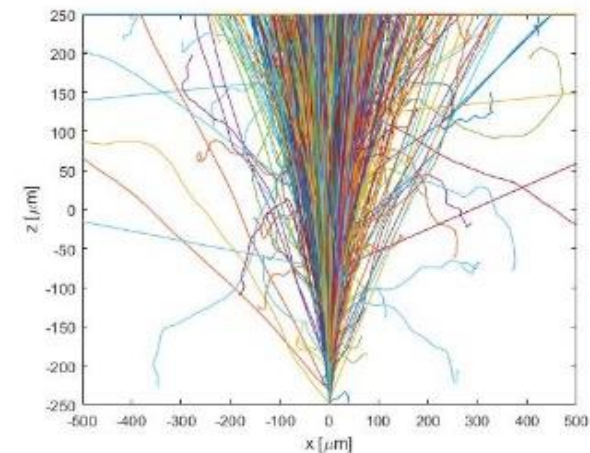
EMPIX2 300发平均图像



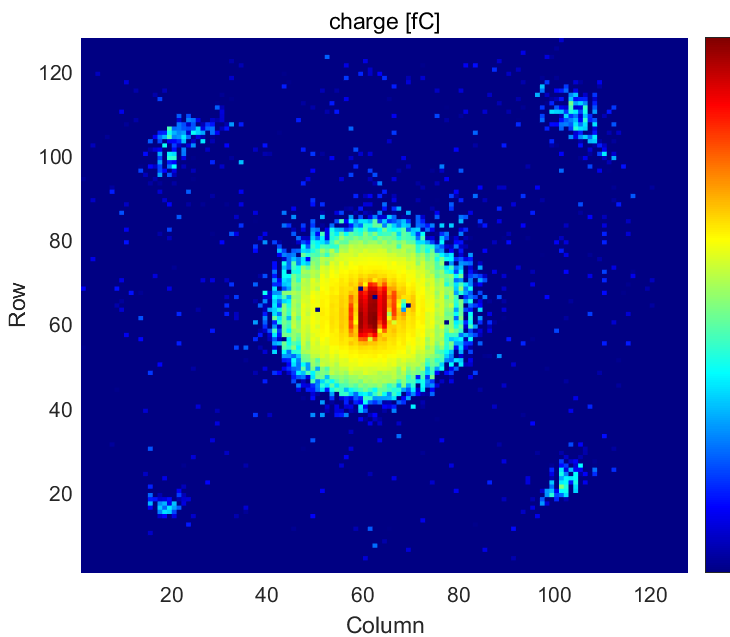
- MeV电子束流测试 (单晶Au标准样品, 1MeV电子)



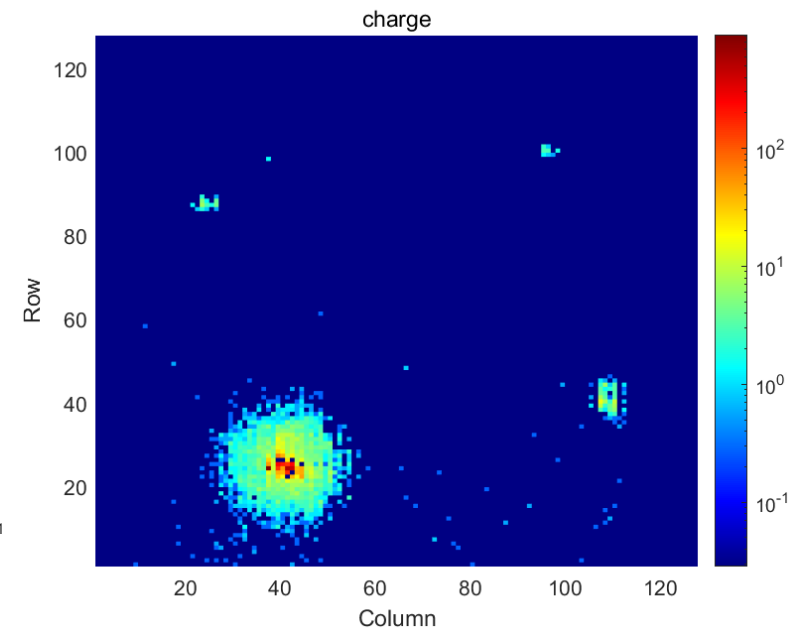
硅



金刚石



硅探测器



金刚石探测器

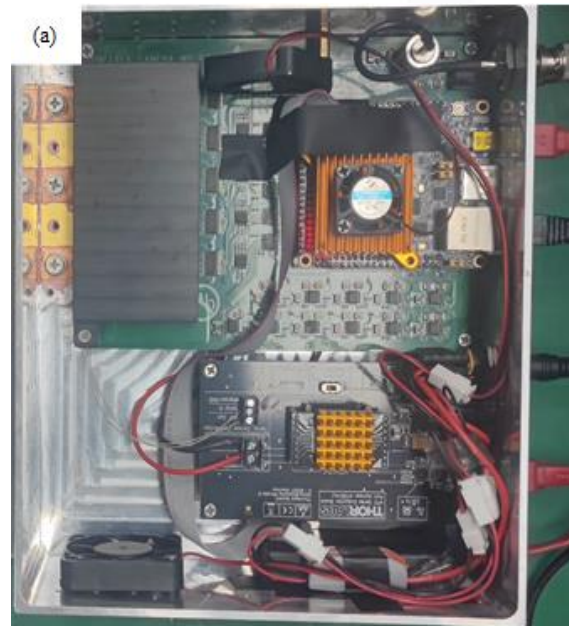
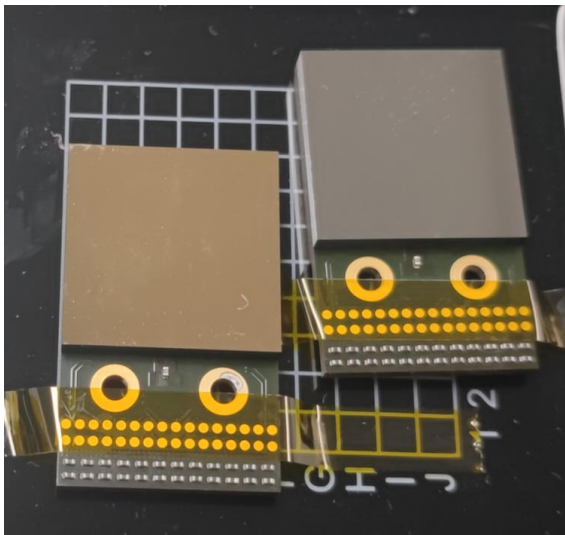
04

Summary

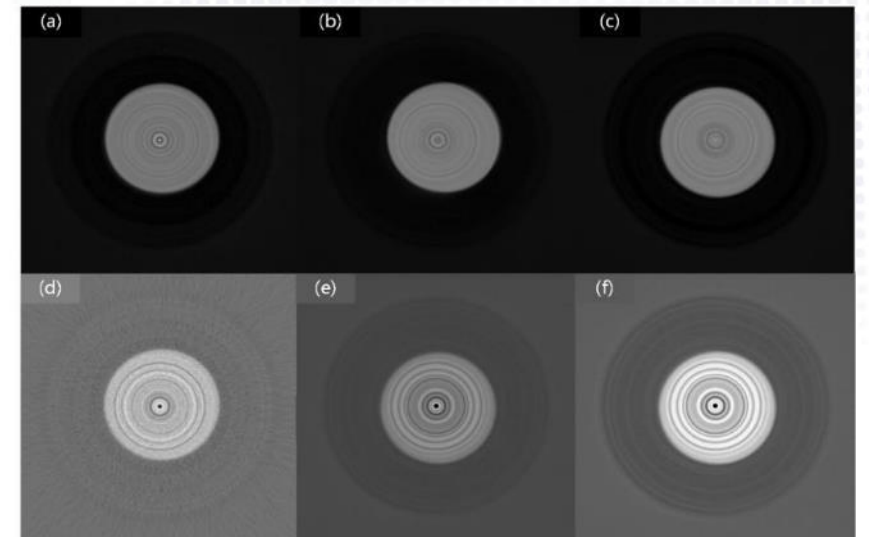
小结与展望



- 光子计数X射线CT成像的混合型半导体像素探测器研制，实现光子计数和能量积分同时成像：
 - 实现0.5mmx0.5mm像素，32x32阵列
 - 通量范围涵盖单光子~280Mcps/mm²
- 初步验证了光子计数和积分同时成像的可行性，下一步开展图像分析；同时搭建更大面阵的探测器进行成像验证

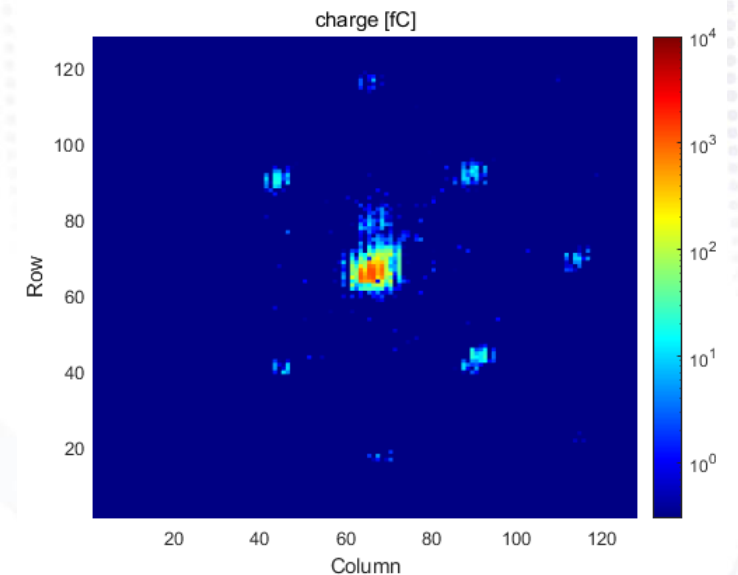
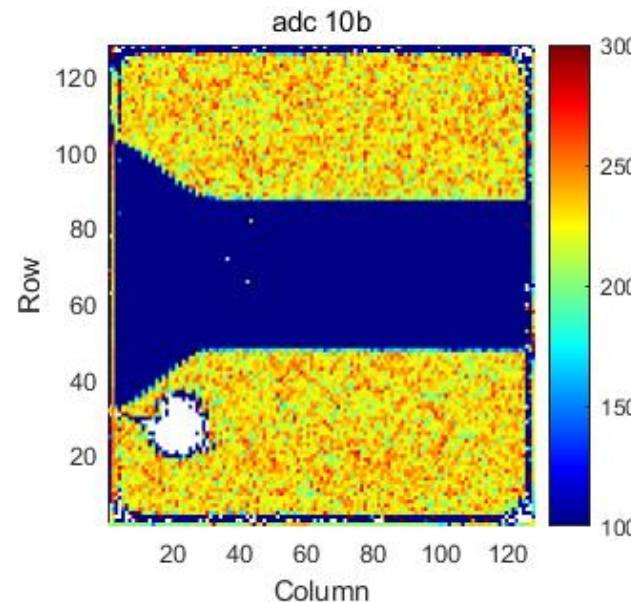


积分
通道



计数
通道

- EMPIX: 高帧率、大动态范围电子直接成像相机:
 - 像素尺寸为150微米 x 150微米, 阵列128 x 128
 - 单电子敏感, 动态范围达到24bit
 - 帧率达到100 kfps
- 下一步将开展层叠成像测试研究, 实现“无透镜”计算成像





谢谢