



清华大学 工程物理系

Department of Engineering Physics, Tsinghua University

第二十一届全国核电子学与核探测技术学术年会

光子计数型能谱CT 探测器技术进展

邓智

清华大学工程物理系

湖北恩施

2023年8月8-11日

目录 CONTENTS

01 | 能谱CT及探测器技术的挑战

02 | 光子计数探测器的发展

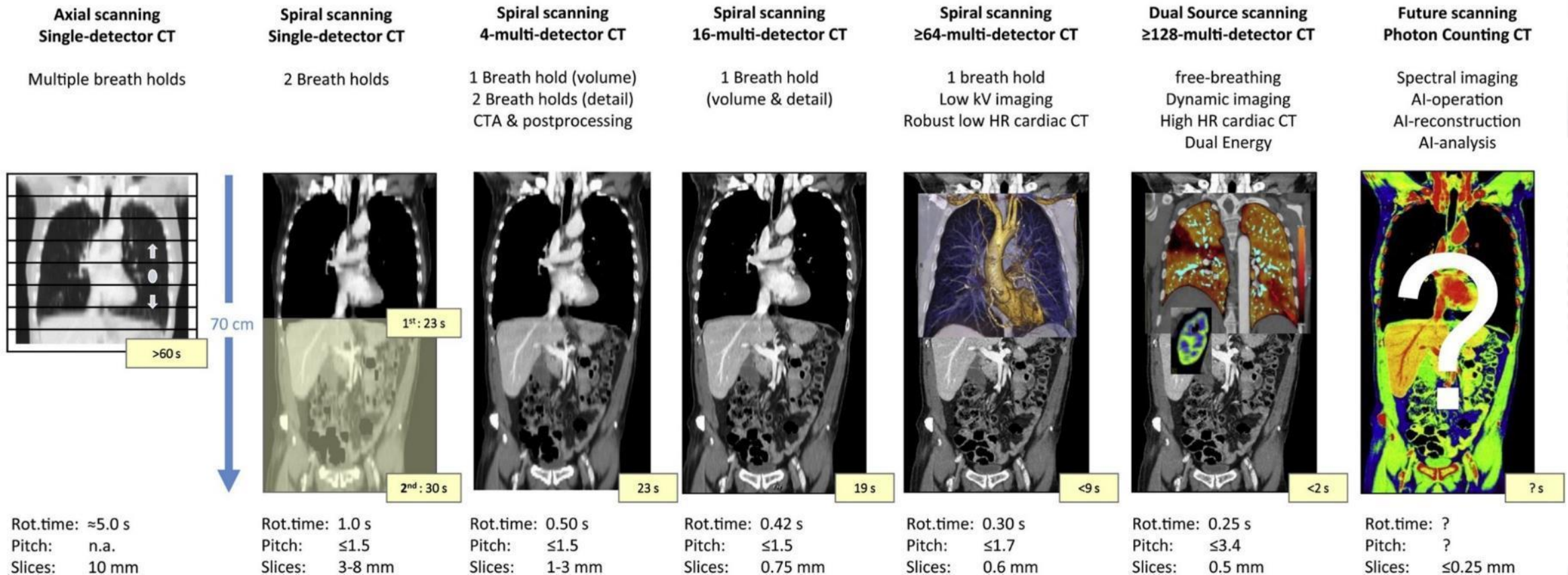
03 | 光子计数探测器的研制@清华

04 | 小结与展望

01

Spectral CT and Challenges on Detector Technology
能谱CT及探测器技术的挑战

- X射线CT可以提供高分辨的三维解剖图像，广泛应用于医学诊断和工业无损检测等领域
- 经过50年发展CT成像的时空分辨得到极大提升，以医疗CT为例：空间分辨~0.25mm，时间分辨率~100ms

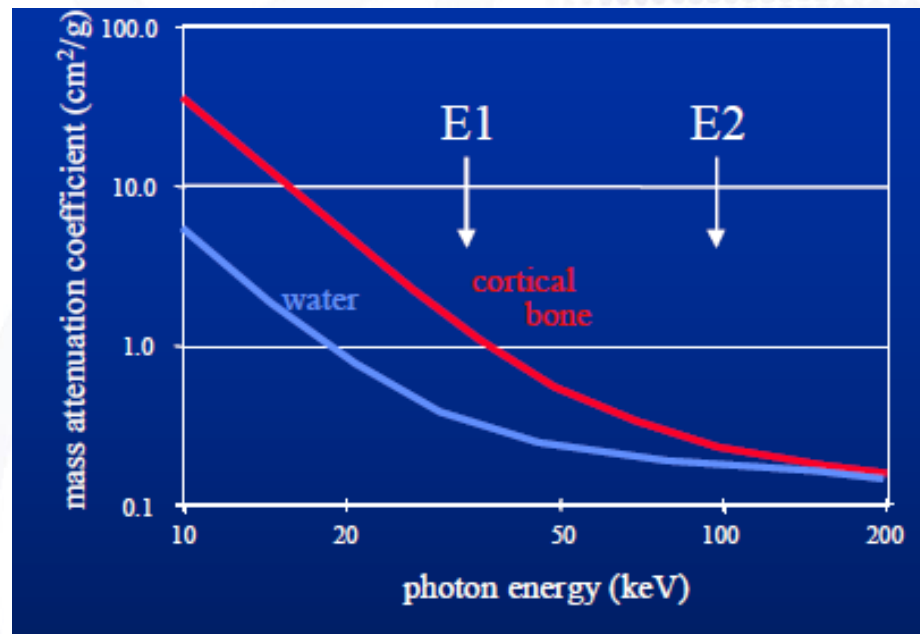
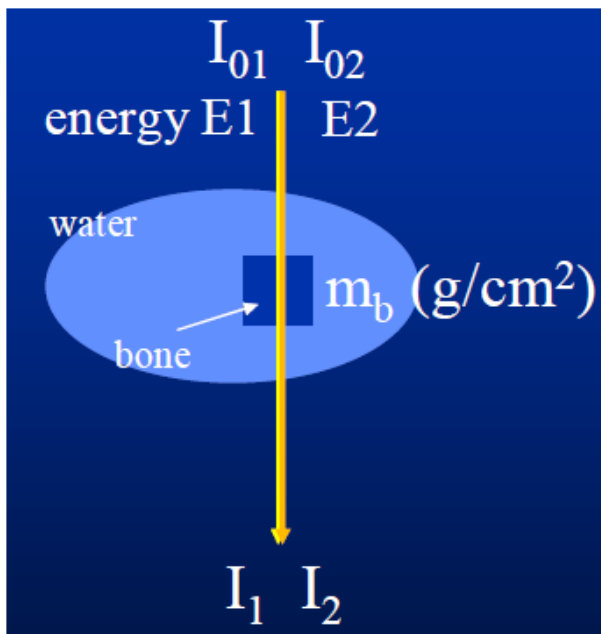


➤ 能谱CT在解剖信息的基础上提供额外的**物质成份**信息，从而提升诊断和检测能力

➤ 中低能X射线质量衰减系数： $\mu/\rho = (\mu/\rho)_P + (\mu/\rho)_C$, $(\mu/\rho)_P \propto \frac{Z^3}{E^3}$, $(\mu/\rho)_C \propto \frac{Z}{E}$

➤ 不同能量X射线的衰减： $I_1 = I_{01} e^{-[(\mu/\rho)_{w1} \cdot m_w + (\mu/\rho)_{b1} \cdot m_b]}$

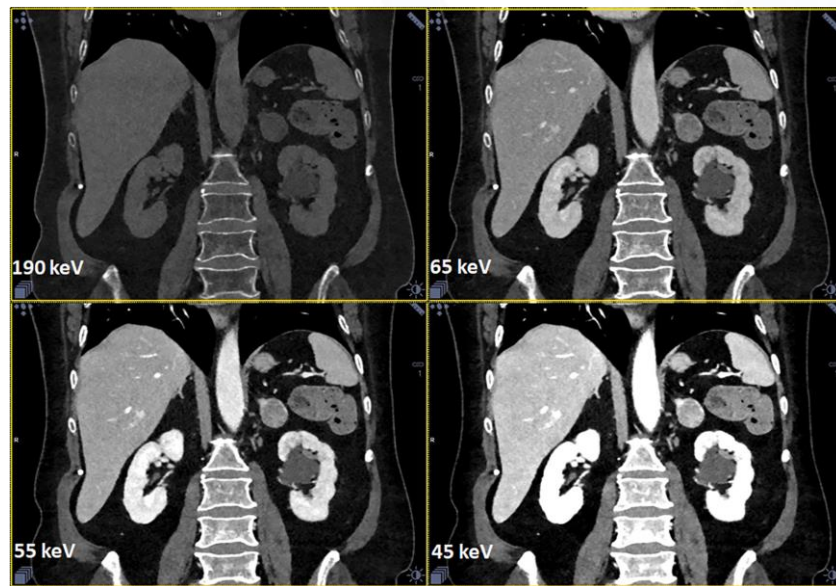
$$I_2 = I_{02} e^{-[(\mu/\rho)_{w2} \cdot m_w + (\mu/\rho)_{b2} \cdot m_b]}$$



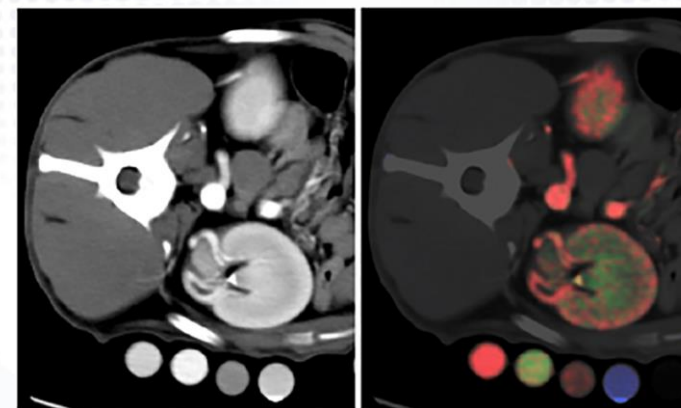
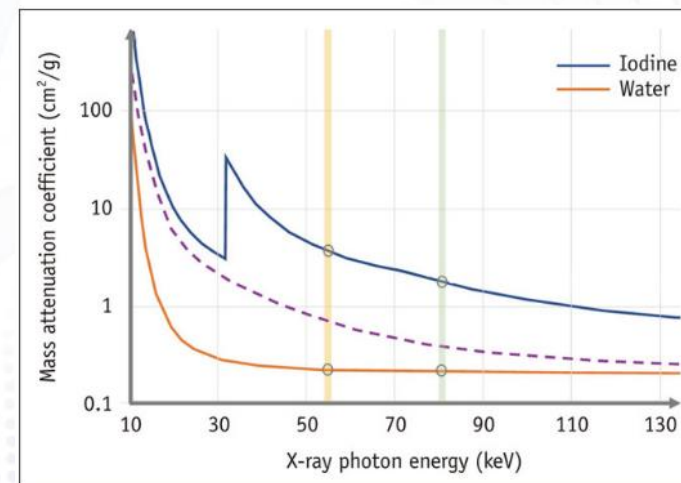
- 物质识别 (软组织、骨骼...)
- 提高对比度 (VMI: Virtual Mono-Energy Imaging)
- K-edge成像 (功能成像)



骨骼识别

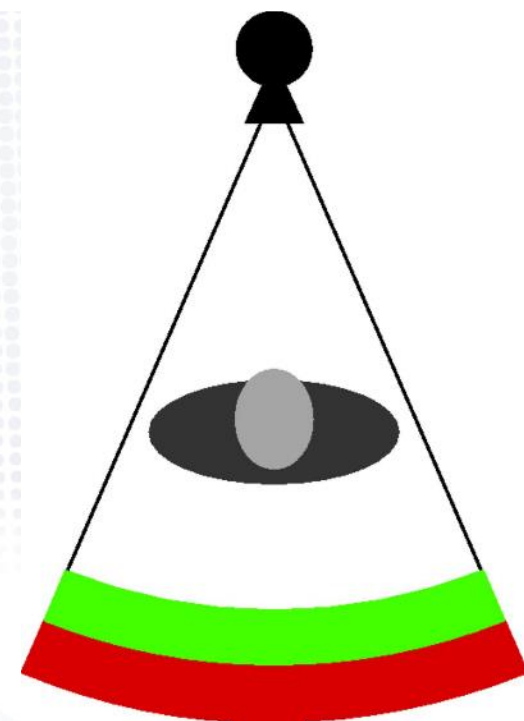
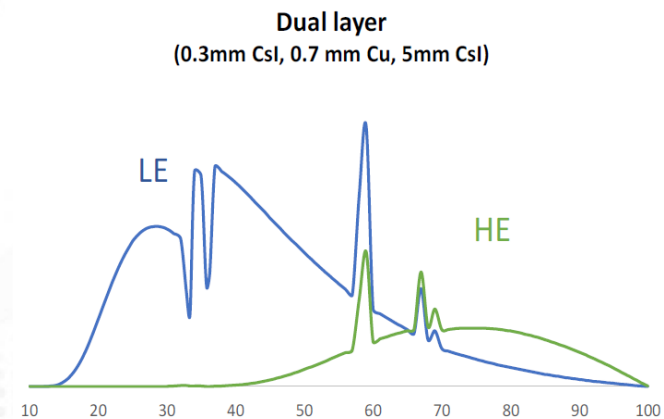
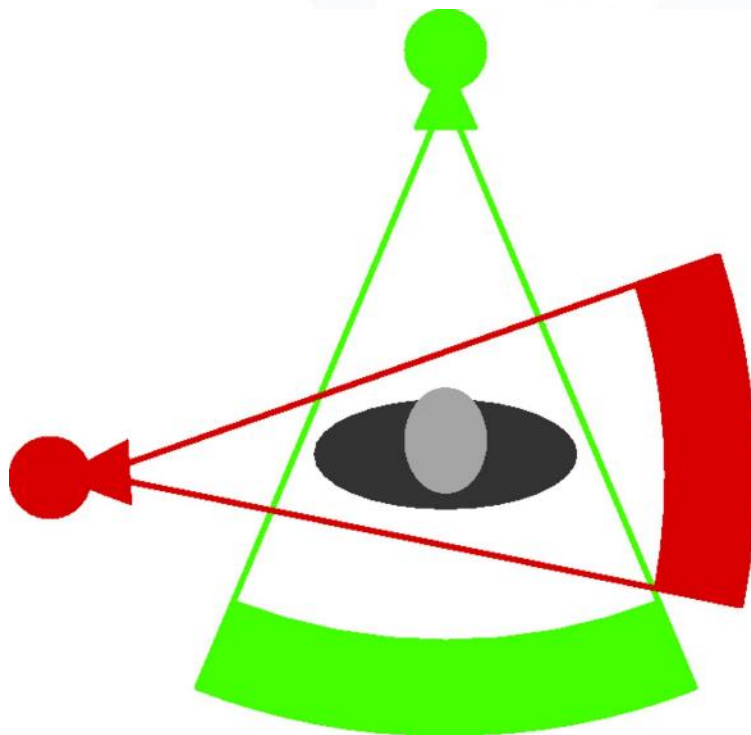
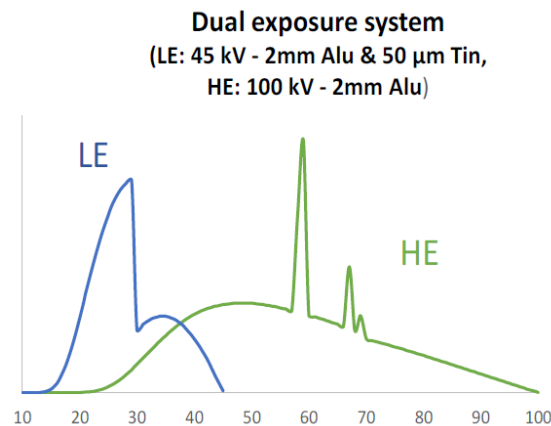
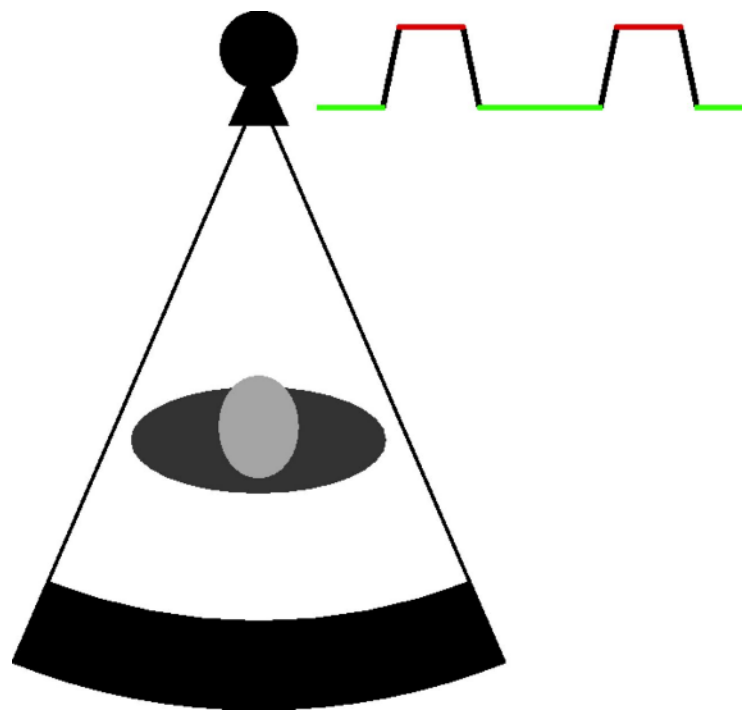


VMI

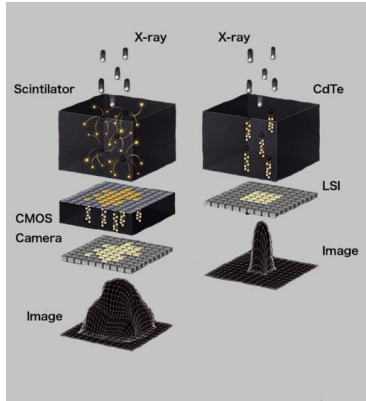


K-edge成像

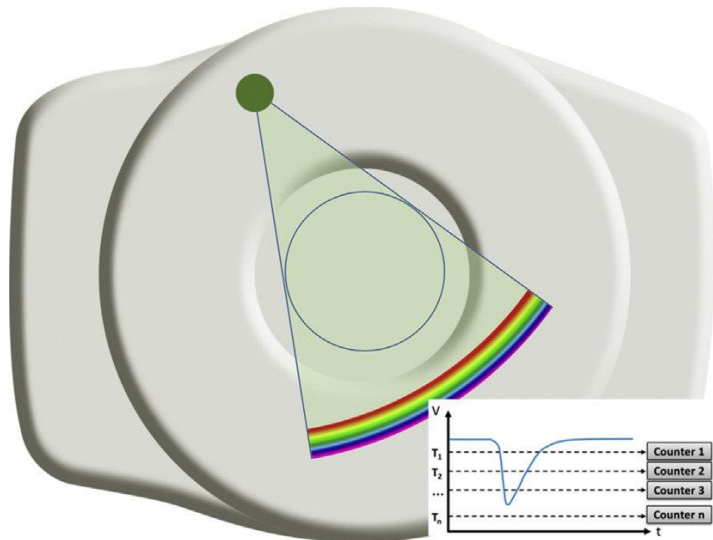
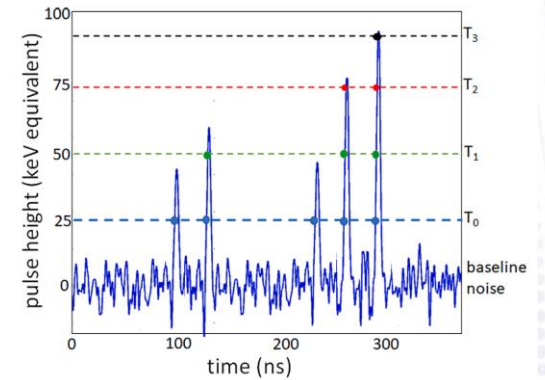
- kV-Switching
- 双源 (Dual-Source)
- 双层探测器 (Dual-Layer)



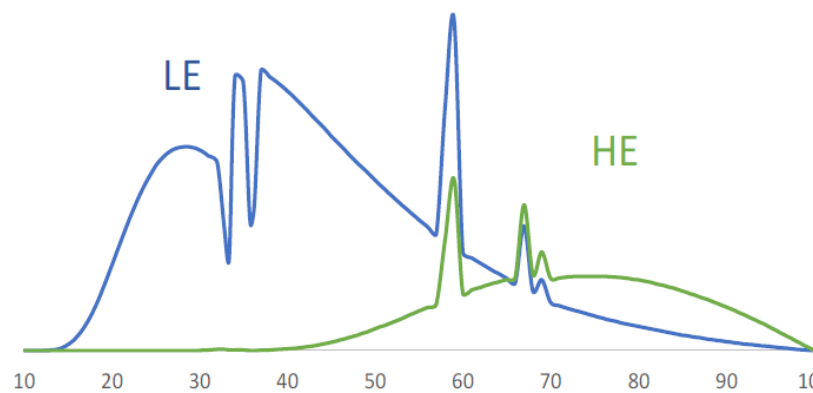
光子计数探测可以直接区分单个X射线的能量，X射线图像由黑白走向真彩色：



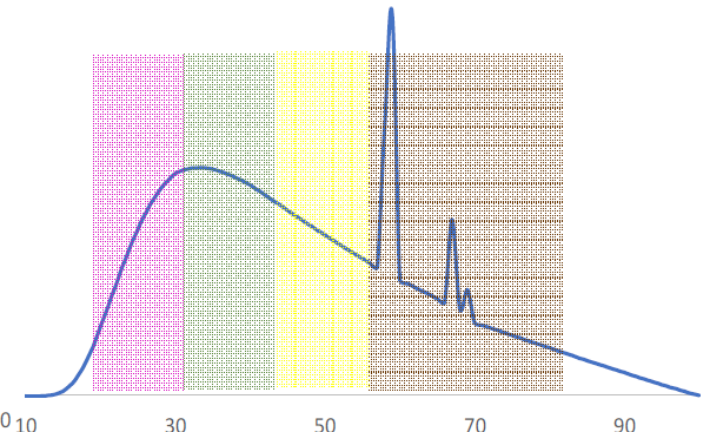
- 直接探测方式，实现超高空间分辨率
- 实现“零”电子学噪声读出、降低剂量
- 极大提升物质成分的识别和分析能力



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



100 kV, 2mm alu, 4 channels

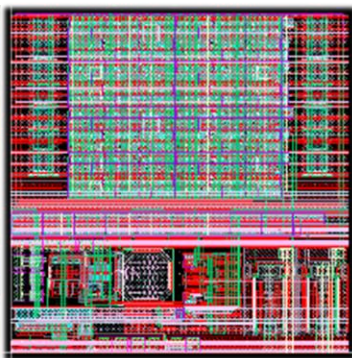


- X射线成像能量最高可到160keV → 探测器**材料**
- 入射X射线计数率最高可达~100M cps/mm² → 高速**ASIC** HL-LHC顶点探测器的计数率为3GHz/cm²
- 为了实现高计数率，通常采用百微米级像素 → 高密度**互连与拼接**
- 从探测器模块到搭建探测器系统的过程中，如何保证其能谱和计数率响应的稳定性和一致性成为关键 → 结合**标定算法优化**

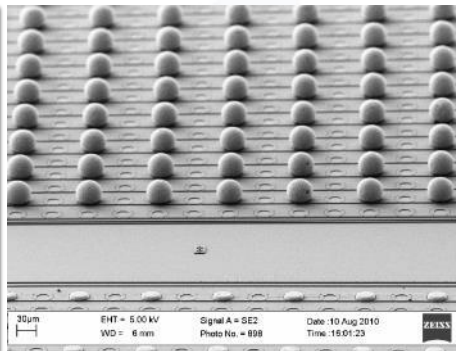
光子计数探测器



晶体材料



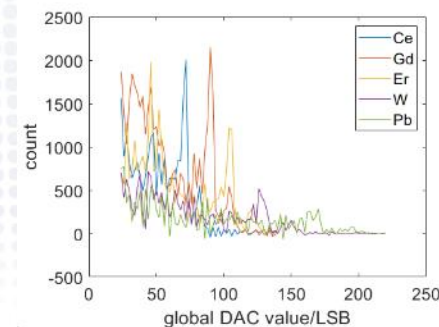
ASIC



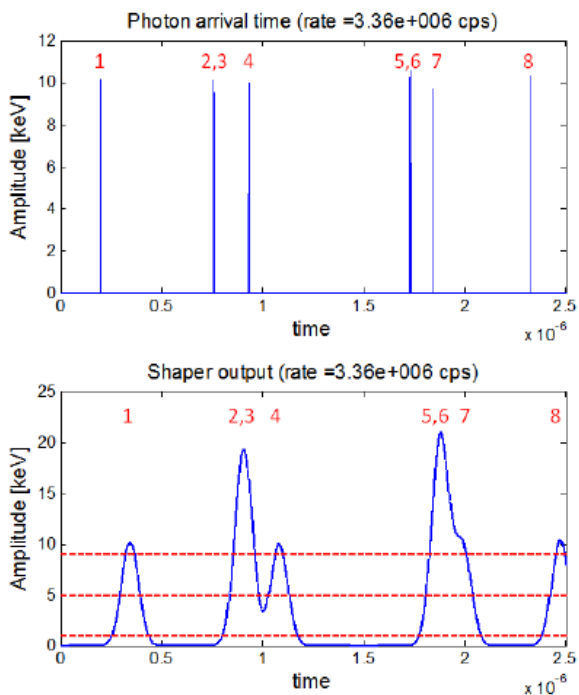
倒装键合



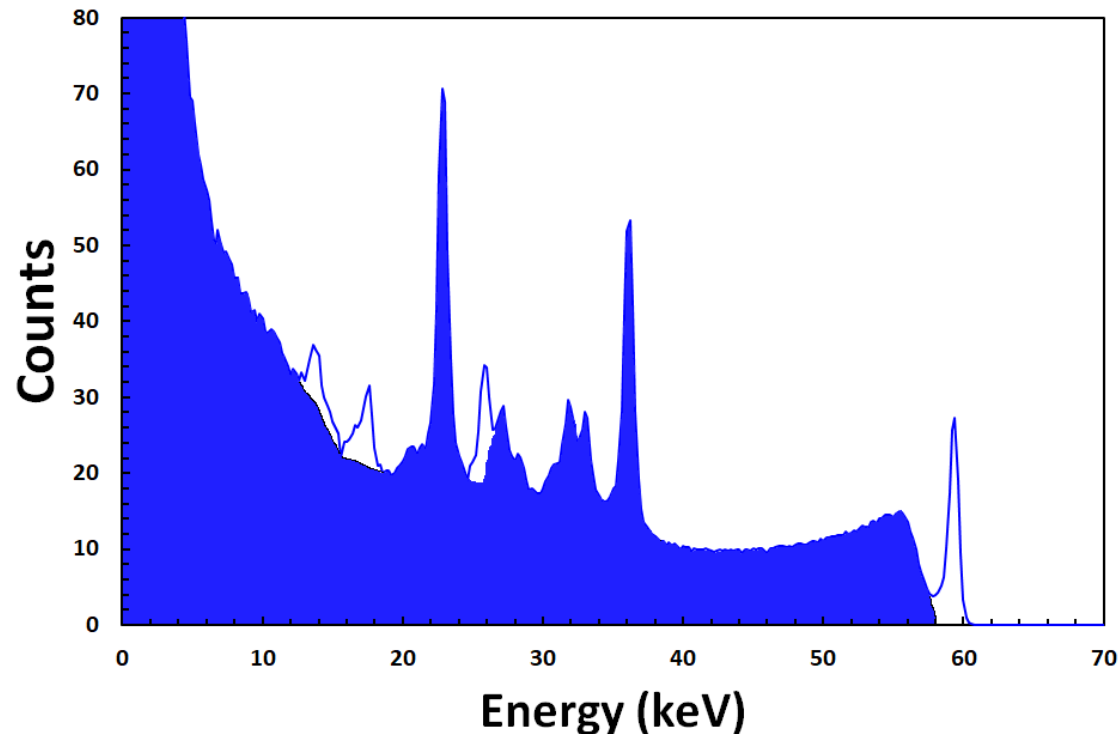
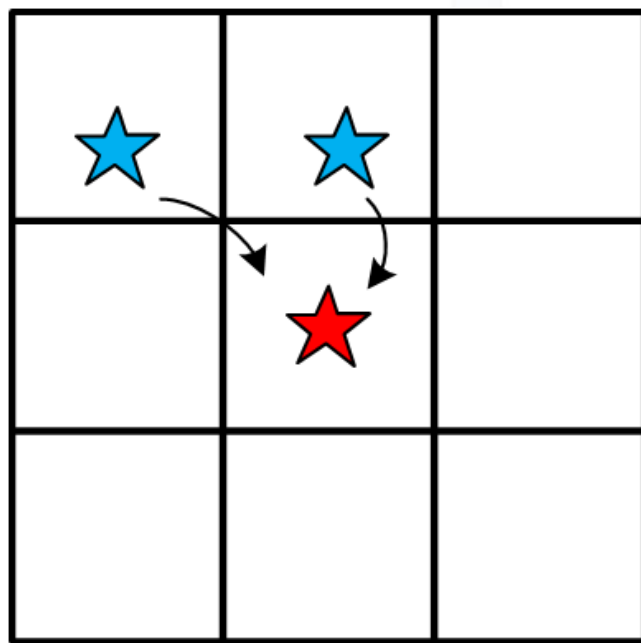
标定算法



探测器在高计数率下的计数损失和能谱畸变



信号堆积



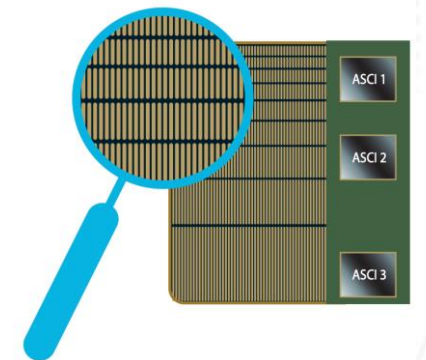
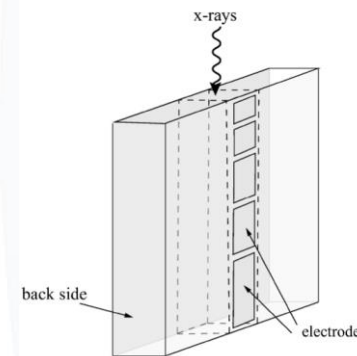
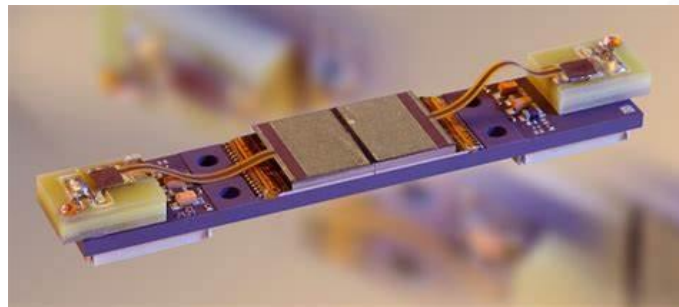
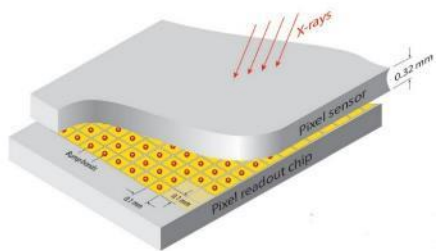
能谱畸变

02

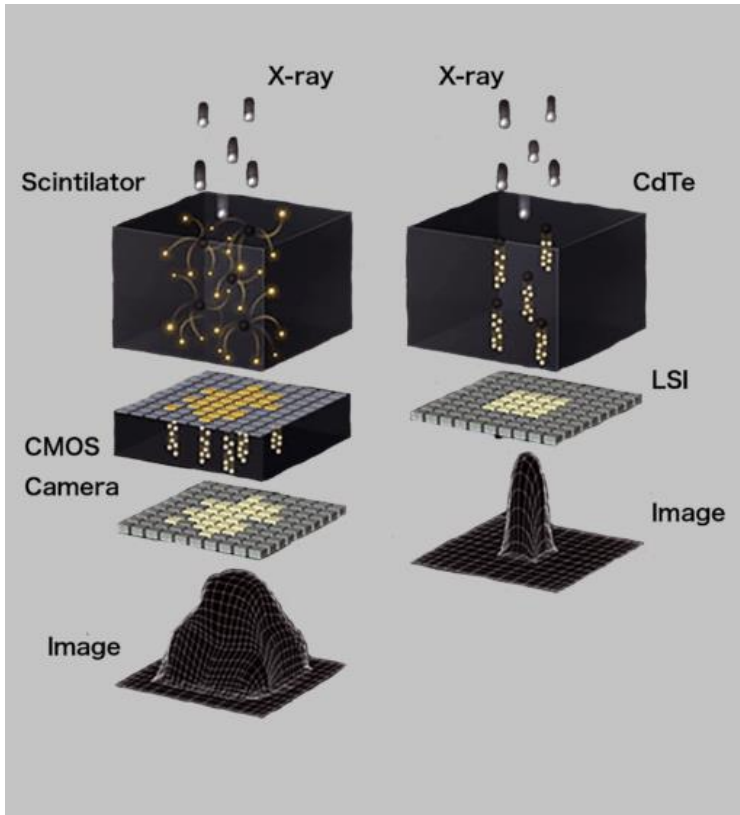
Progress on Photon Counting Detectors
光子计数探测器的发展

目前发展情况

- 2011年西门子成为碲化镉 (CdTe) 探测器公司 **Acrorad** (日本) 的大股东, 目前正在德国福希海姆建造一家新工厂, 用于生产CdTe晶体材料, 总投资额高达8000万欧元, 计划于2026年投入运营
- 2019年Varex Imaging (万睿视) 收购瑞典光子计数探测器公司 **Direct Conversion**
- 2019年Detection Technology(DT) 收购法国光子计数探测器公司 **MULTIX**
- 2020年11月GE收购深硅 (deep silicon) 探测器公司 **Prismatic Sensor AB** (瑞典)
- 2021年9月佳能全资收购碲锌镉 (CZT) 探测器公司 **Redlen** (加拿大)
- 2023年4月英国 **Kromek Group** 和美国 **Analogic** 公司宣布达成合作协议, 共同开发下一代基于碲锌镉(CZT) 的探测器解决方案, 用于医疗成像和安全领域的光子计数CT

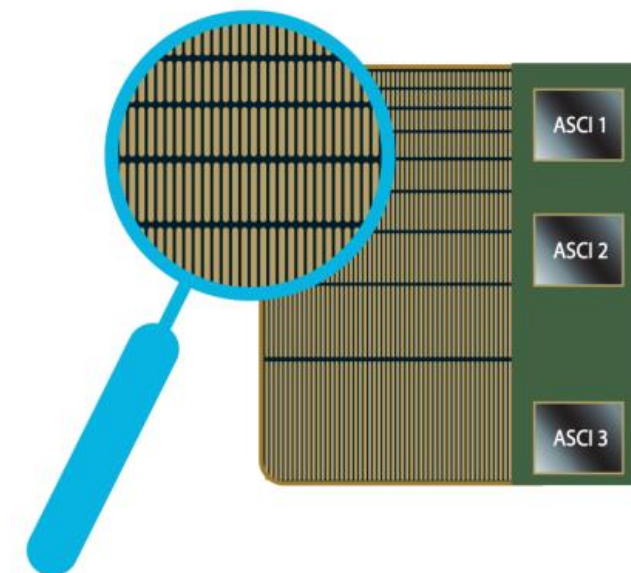
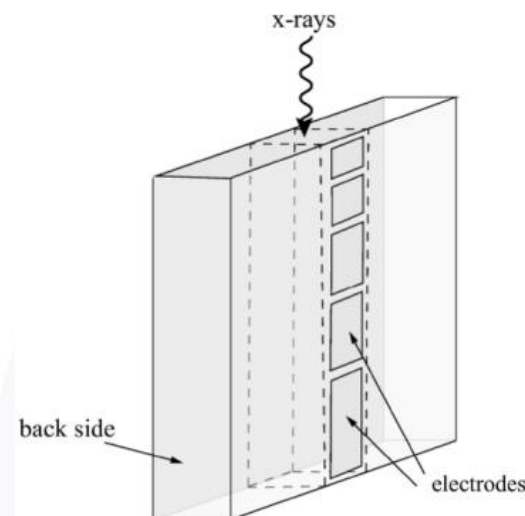


- 西门子、Philips、佳能采用CdTe/CZT探测器
- 对X射线有较好的阻止本领以及光电吸收效率
- 极化效应、特殊工艺



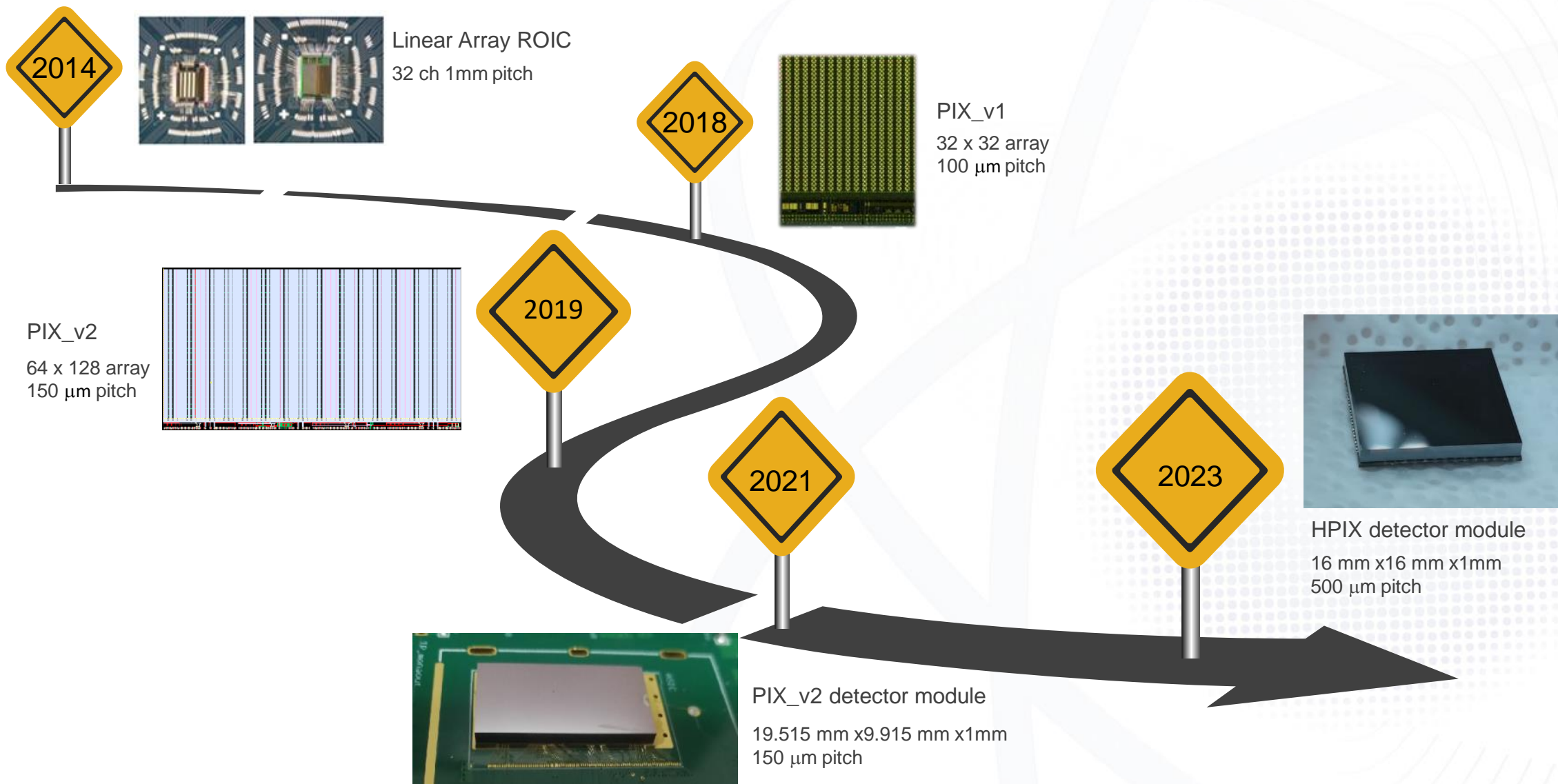
指标	Siemens NAEOTOM Alpha	Phillips iCT
探测器材料	1.6mm CdTe	2mm CZT
像素尺寸	0.275 x 0.322 mm ²	0.5 x 0.5 mm ²
模块阵列	标准模式: 1700 x 160 UHD模式: 3400 x 320	1848 x 64
能窗数目	标准模式: 2 UHR模式: 1	5
噪声	-	260 e
输出计数率	-	15 Mcps/pixel
功耗	-	3mW/pixel
视野 (isocenter)	50 cm FOV, 5.76 cm Z	50 cm FOV, 1.75 cm Z

- GE采用Edge On型硅微条探测器技术
 - 厚度0.5mm, 微条中心距0.4mm, 对应像素尺寸为0.4mmx0.5mm
 - 微条长度30mm, 分为16段
 - 8个能窗
- 成熟的硅微条探测器工艺
- 散射非常严重, 需要复杂的信号处理



03

Development of Photon Counting CT Detector @ Tsinghua' group
光子计数探测器的研制@清华



和国内外同类型芯片的对比

- 关键性能指标相当
- 掌握百微米级像素芯片定制化设计能力



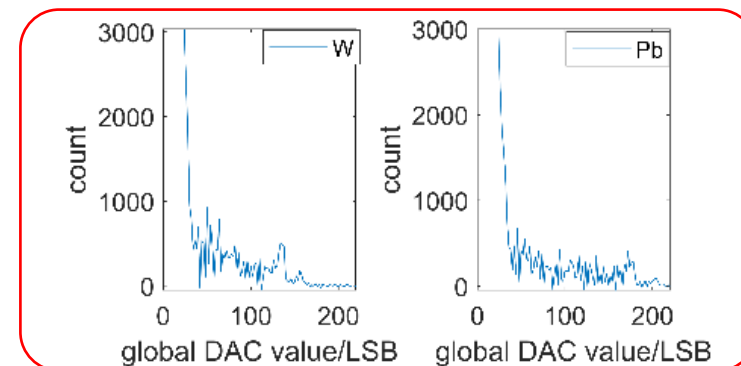
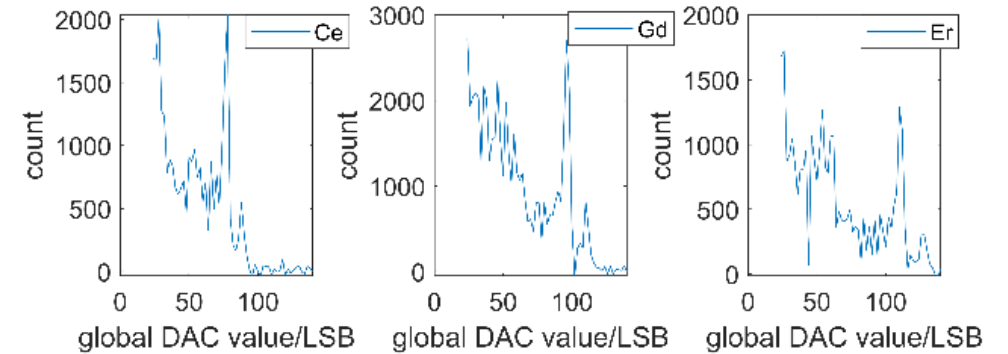
芯片	阵列	像素尺寸 ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	能窗	噪声 (e)	达峰时间 (ns)	可拼 边数	工艺 (nm)
Medipix3	256 x 256	55 x 55	2	80	120	3	130
Pilatus 3	60 x 97	172 x 172	1	123	110	3	250
Xcounter PC	128 x 128	100 x 100	2	-	-	3	-
Eiger	256 x 256	75 x 75	1	>120	30	3	250
Samsung PC	128 x 128	60 x 60	3	68	-	-	130
Siemens PC	64 x 64	225 x 225	2	-	20	-	-
ChromAIX 2	22 x 32	500 x 500	5	400	10	3	350
XPAD3	80 x 120	130 x 130	2	127	150	3	250
HEP-BPIX	104 x 72	150 x 150	1	-	20	3	130
PIX_V1	32 x 32	100 x 100	2	75	100	3	180
PIX_V2	64 x 128	150 x 150	4	67	100	3	180

荧光能谱

靶	靶材	能量 keV	分辨率 FWHM
Ce	CeO ₂	34.57	6.60%
Gd	Gd ₂ O ₃	42.76	5.84%
Er	Er ₂ O ₃	49.10	4.74%
W	W powder	59.31	6.46%
Pb	PbO ₂	74.97	7.11%

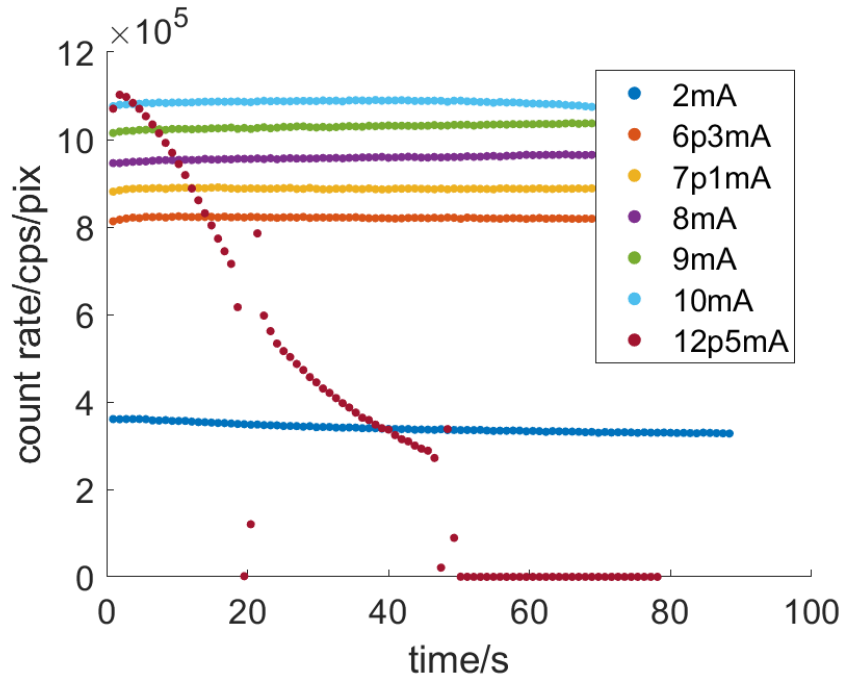


材料	CdTe
尺寸	19.515 mm x 9.915 mm x 1mm
像素尺寸	150 μm x 150 μm
像素阵列	64 x 128

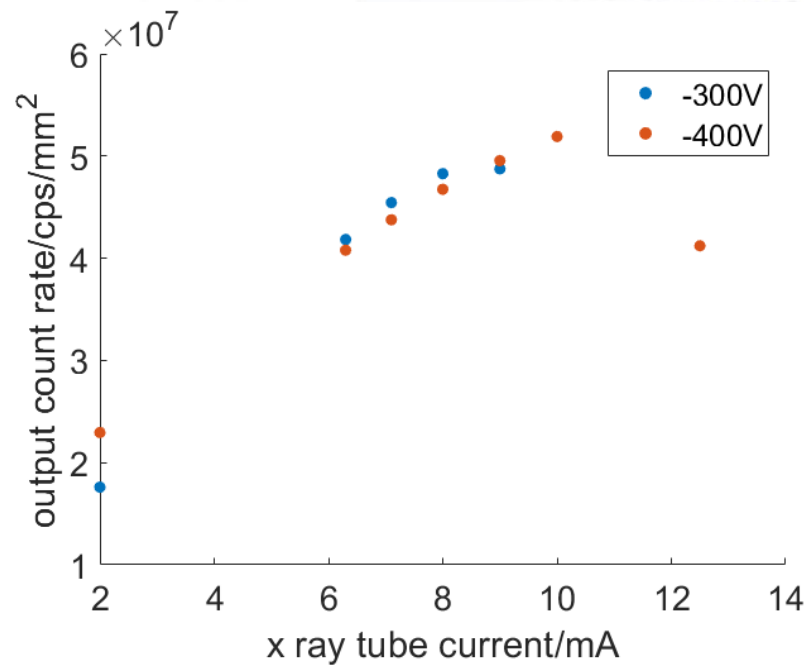


电荷共享效应

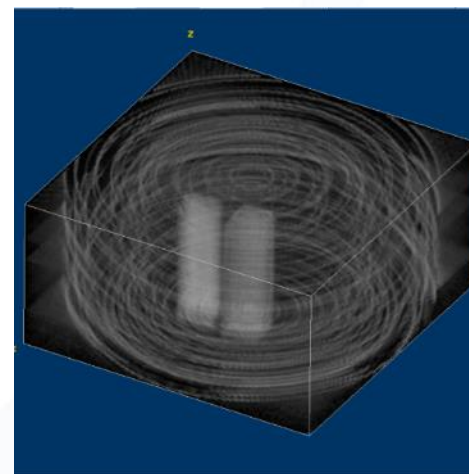
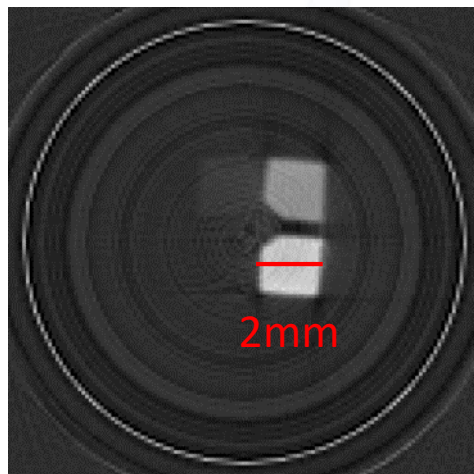
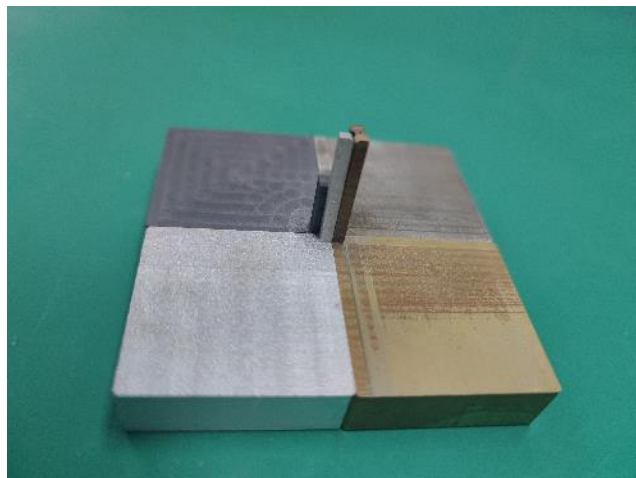
饱和计数率：与偏压和温度有关



最高输入饱和计数率 149 Mcps/mm²



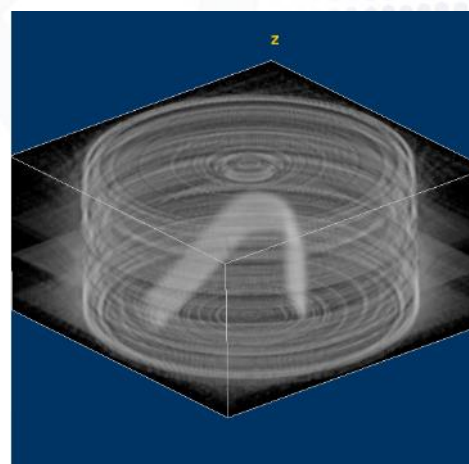
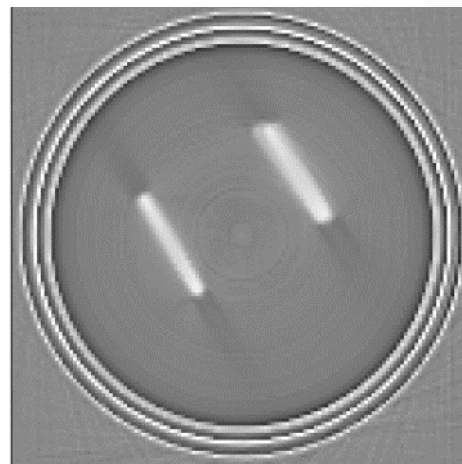
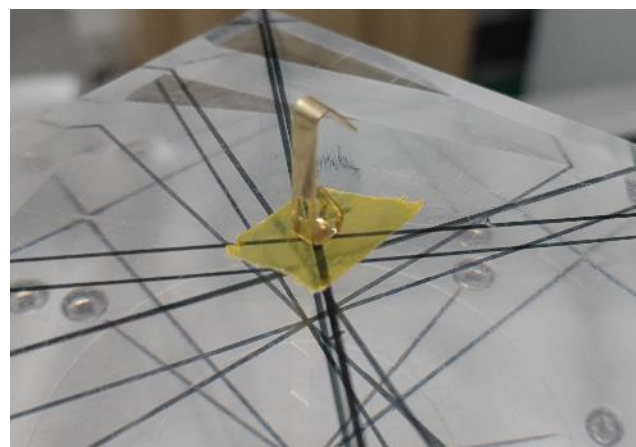
CT成像



成像条件

管电压120kV
管电流2mA

模体材料
C/Fe
Al/Cu

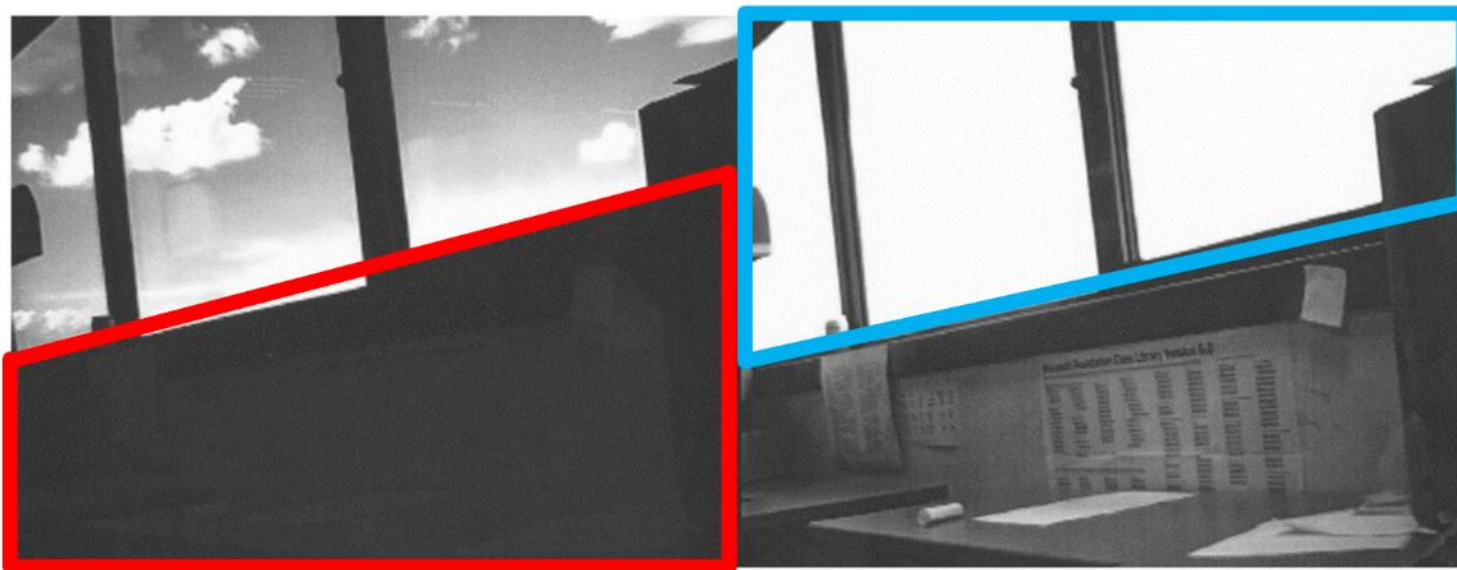


小物体材料
Cu

实现X射线光子计数和能量积分同时探测

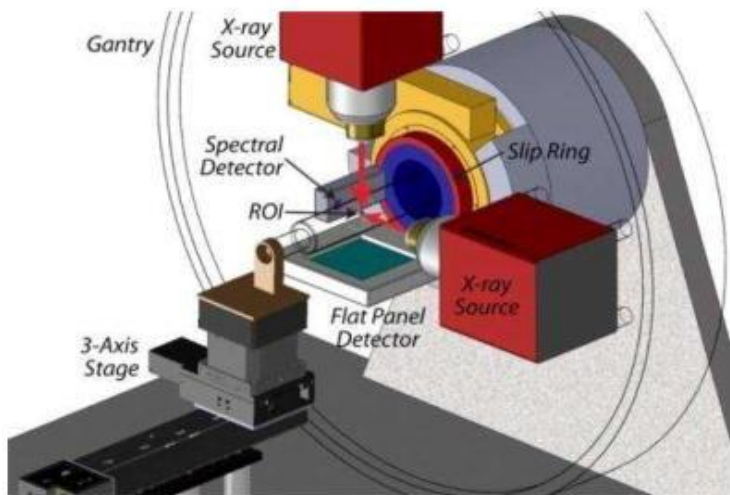
- 光子计数：低计数率下去除电子学噪声，获取能谱信息
- 积分：高计数率下线性输出，实现大动态范围

在光学领域中也同样面临类似的问题

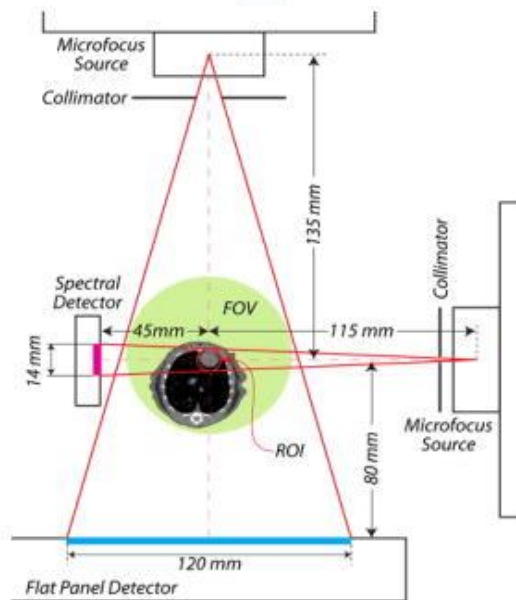


不同曝光时间下高亮（高计数率）和昏暗（低计数率）区域的CMOS图像

不同实现方案

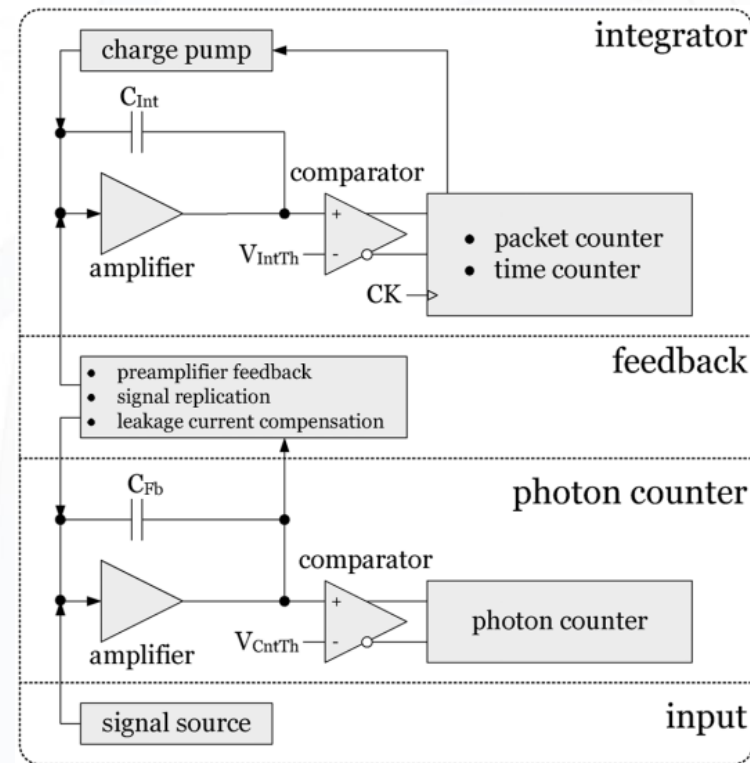


(a) A 3D rendering of the system



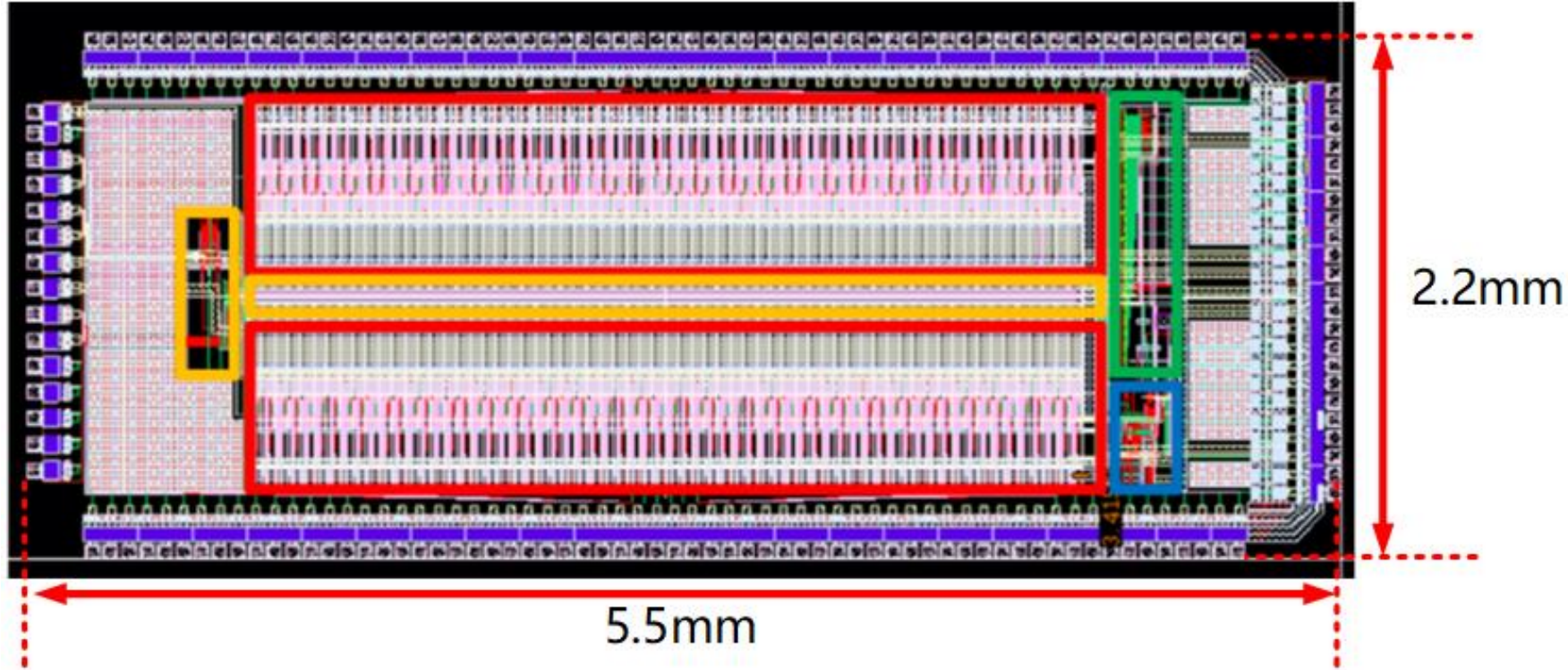
(b) A 2D sketch of the system

双源双探



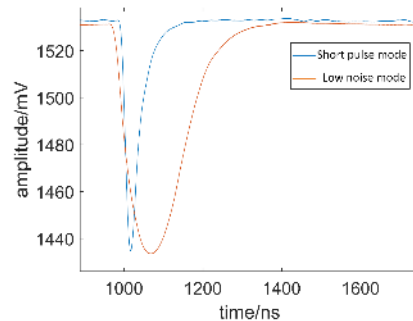
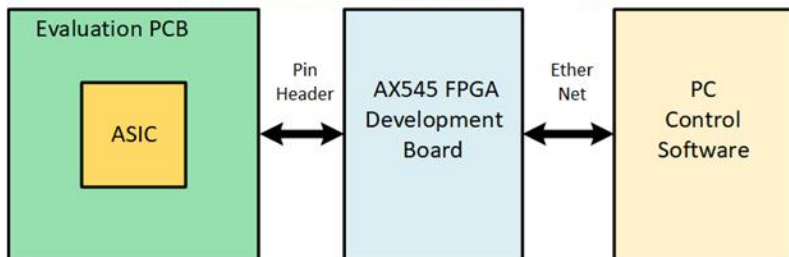
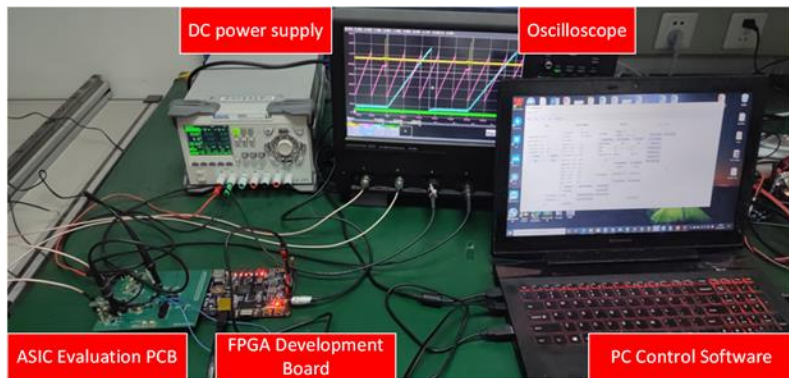
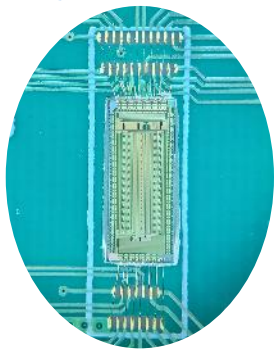
CIX

HPIX: 128通道光子计数-积分混合成像读出芯片

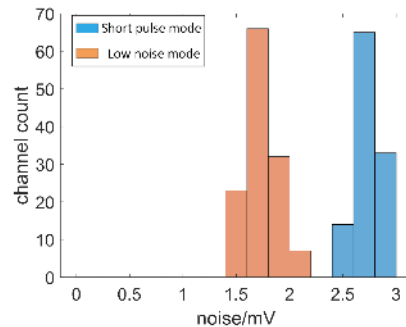


- 128 channels
- Data readout & ASIC control
- SPI control & DAC
- Analog bias & Ramp generation
- Others: filter capacitor & IO

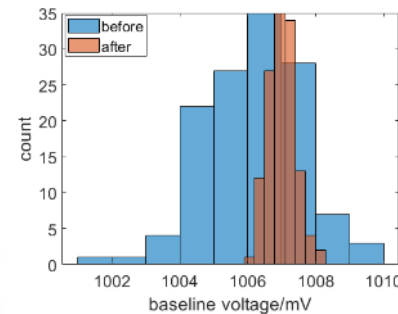
HPIX芯片测试



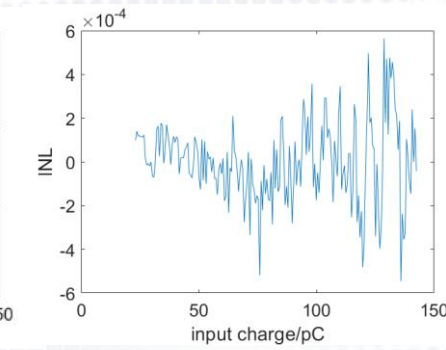
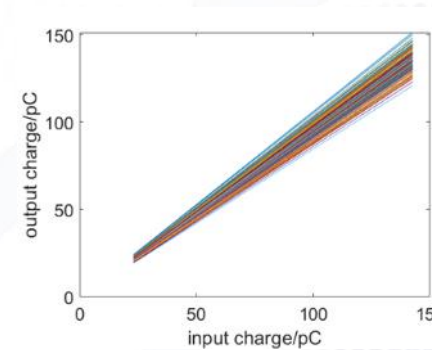
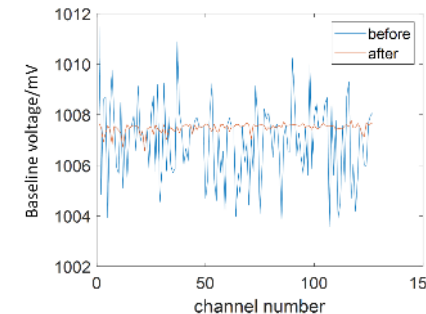
监测波形:
37ns FWHM@高计数率模式
84ns FWHM@低噪声模式



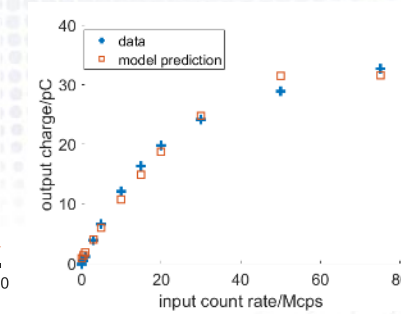
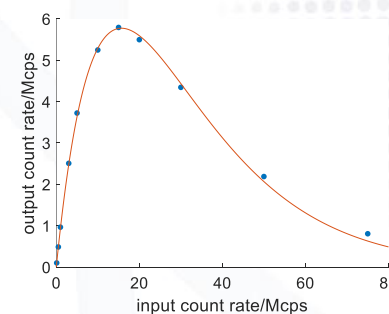
噪声:
~2.4 keV@高计数率模式
~1.4 keV@低噪声模式



阈值不一致性: 1.3 keV@调节前; 0.33 keV @调节后



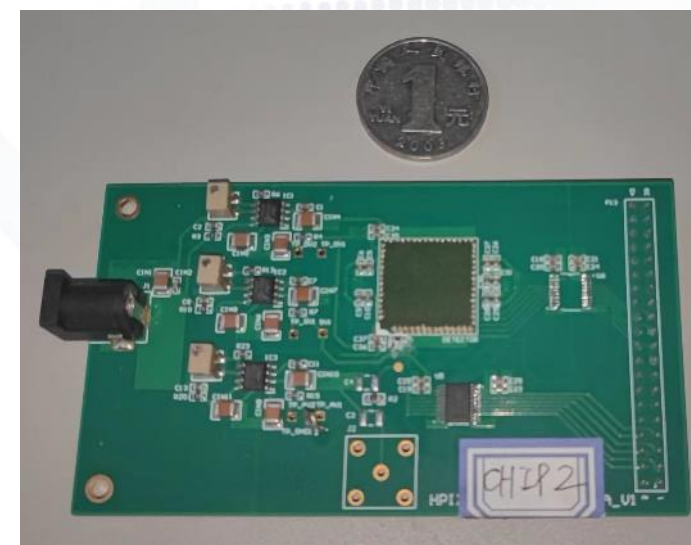
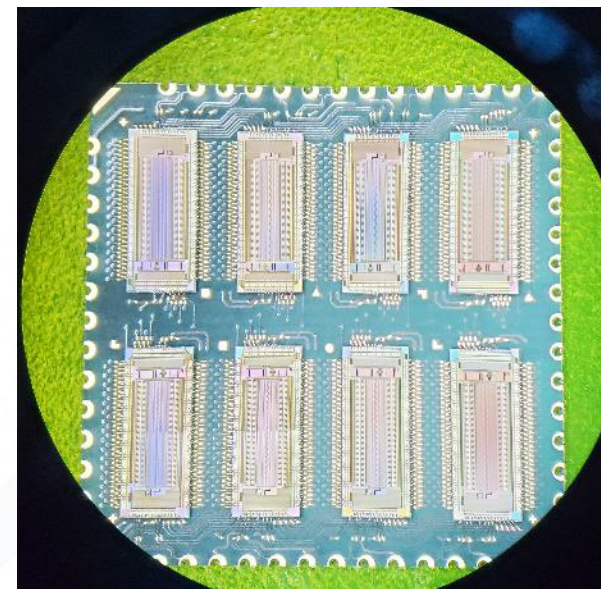
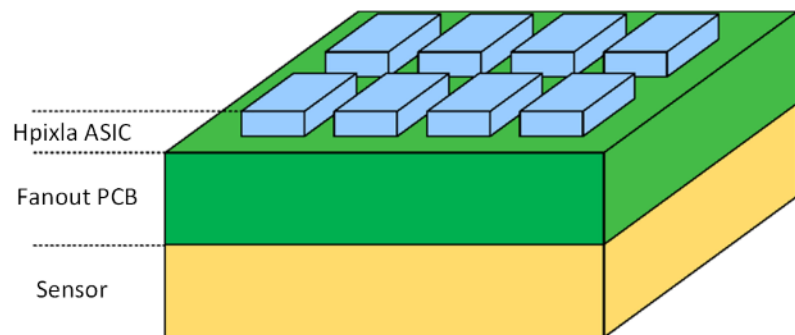
积分通道: 量程150pC, INC<0.076%, 噪声~0.6fC



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

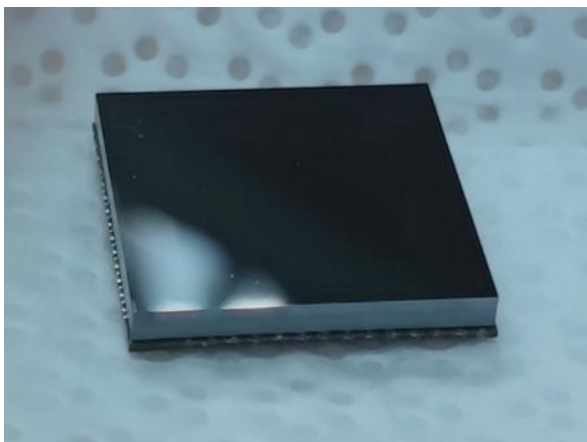
基于HPIX芯片的探测器模块

- 0.5mm x 0.5mm像素, 32x32阵列
- 通过高密度基板实现四面可拼接
- 饱和输出计数率: 72Mcps/mm²
- 积分: 150pC (300Mcps/mm² @ 60keV)
- 帧率: 10kfps
- 功耗: 130mW/cm²



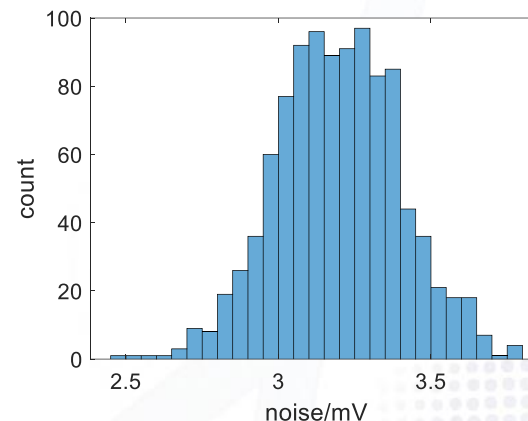
基于HPIX芯片的探测器模块测试

- 完成模块的电子学测试，各项性能比单颗芯片略低，符合预期
- 完成和CdTe探测器的倒装，正在搭建成像验证系统
- 计数、积分混合成像性能的仿真和算法研制

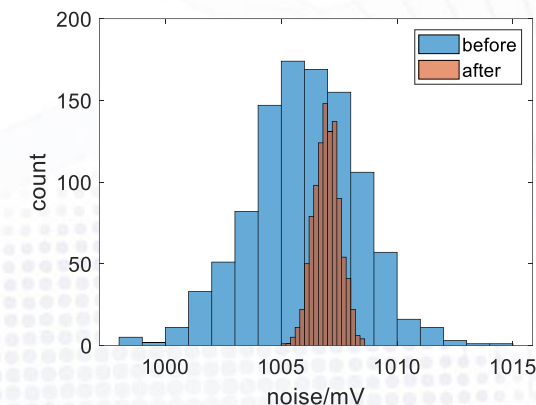


探测器倒装模块：16mmx16mmx1.6mm

计数通道性能

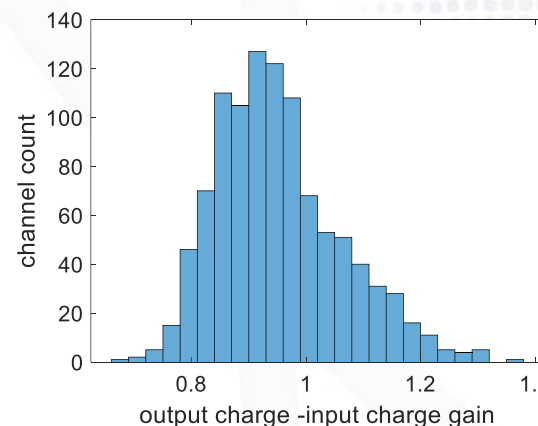


噪声比单颗芯片增大10%

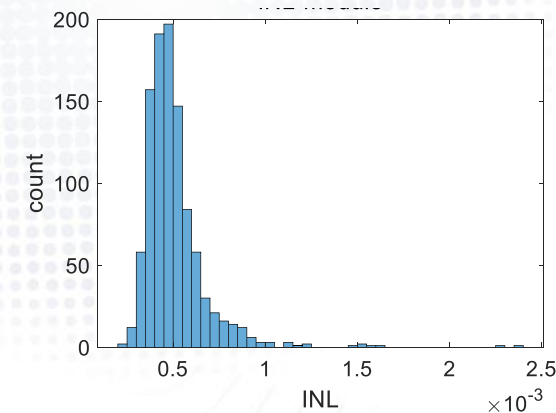


阈值不一致性变大2倍：0.66keV

积分通道性能



增益不一致性变大



积分非线性 < 0.1%

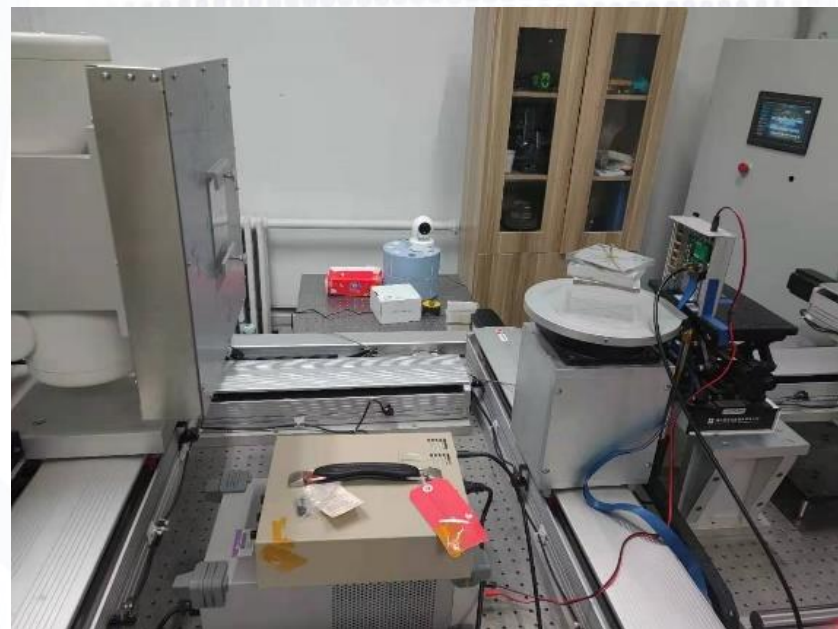
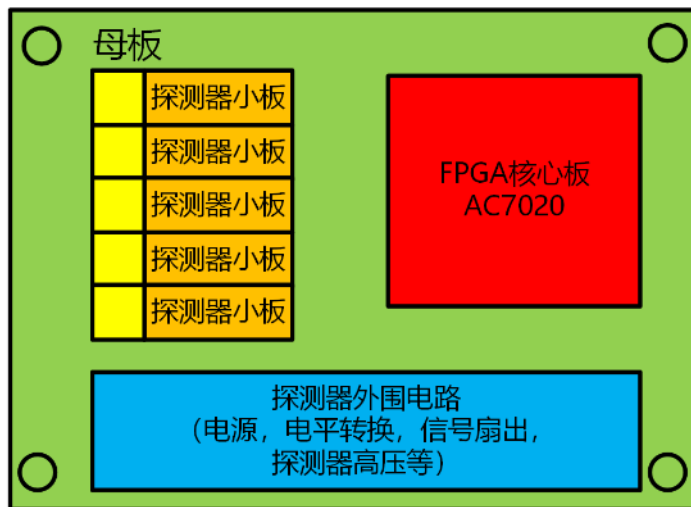
探测器模块测试

- 基本功能测试：标定、计数通道 & 积分通道性能
- 计数率测试：计数通道、积分通道，极化效应
- 温度效应测试
- 成像性能测试：透射、CT成像



探测器模块测试板

外壳



成像测试平台

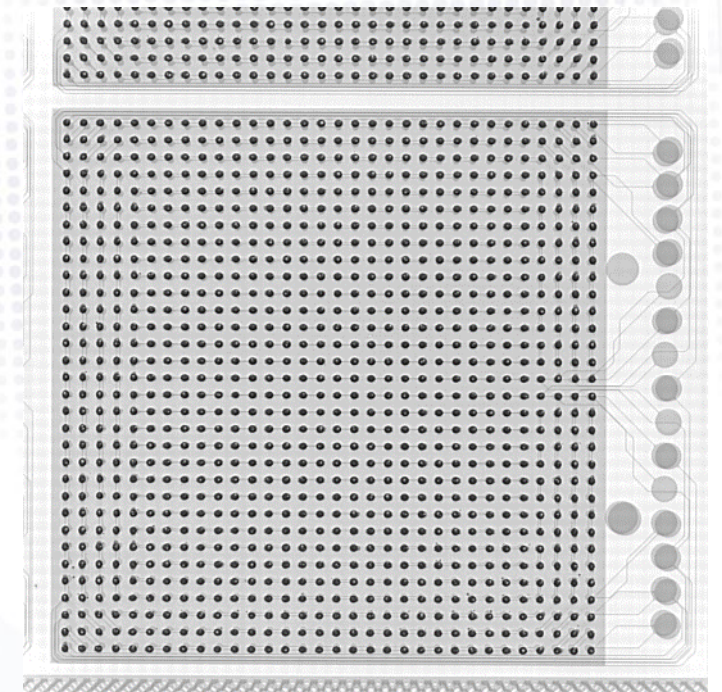
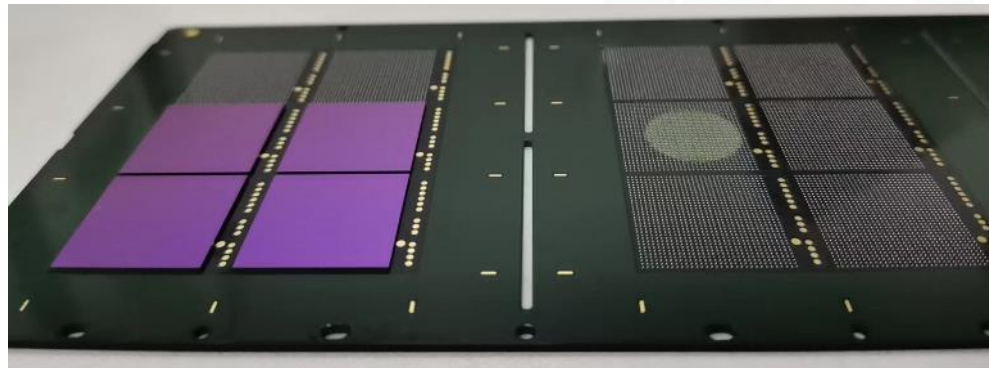
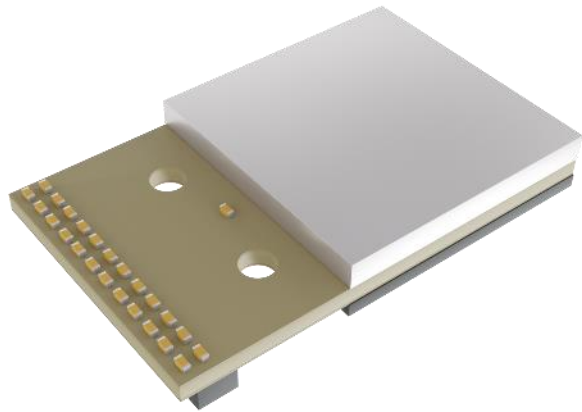
04

Summary

小结与展望



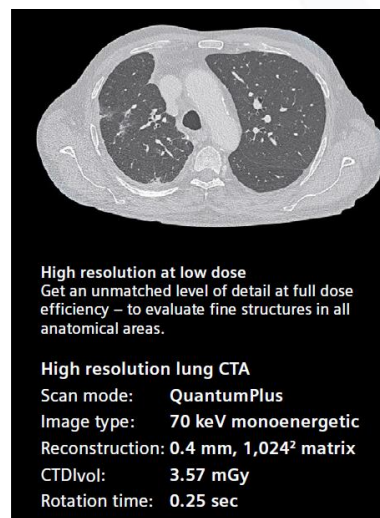
- 光子计数是能谱CT最有‘效率’的实现方式，但对探测器提出了极大的挑战：
 - 100微米级、100keV能量、~100Mcps/mm²计数率
 - 需要探测器材料、读出电子学以及标定和成像算法协同优化
- 国内核电子学与探测领域已经开展相关的关键技术研究，但离实际应用还有一定差距



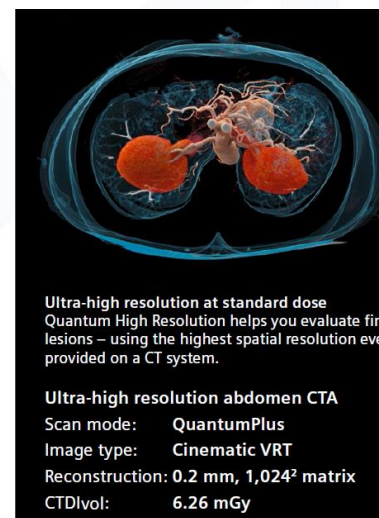
- 全球首台FDA认证的光子计数CT已于2021年10月问世，在高分辨、低剂量等方面体现出较大的优势，但在能谱信息的提取和利用上尚未尽如人意
- 光子计数探测器技术的发展仍然有较大的空间，也是核电子学与探测领域的同行们大有作为的方向之一



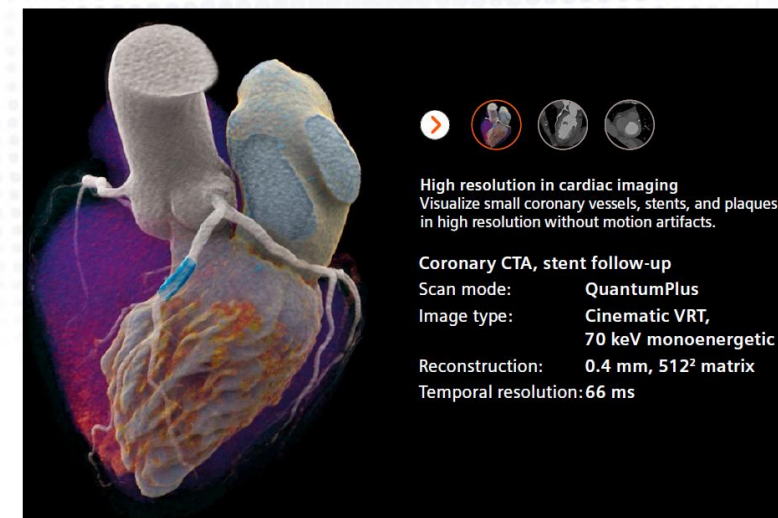
西门子NAEOTOM Alpha光子计数CT



低剂量模式



高分辨模式



心脏冠脉成像



谢谢