



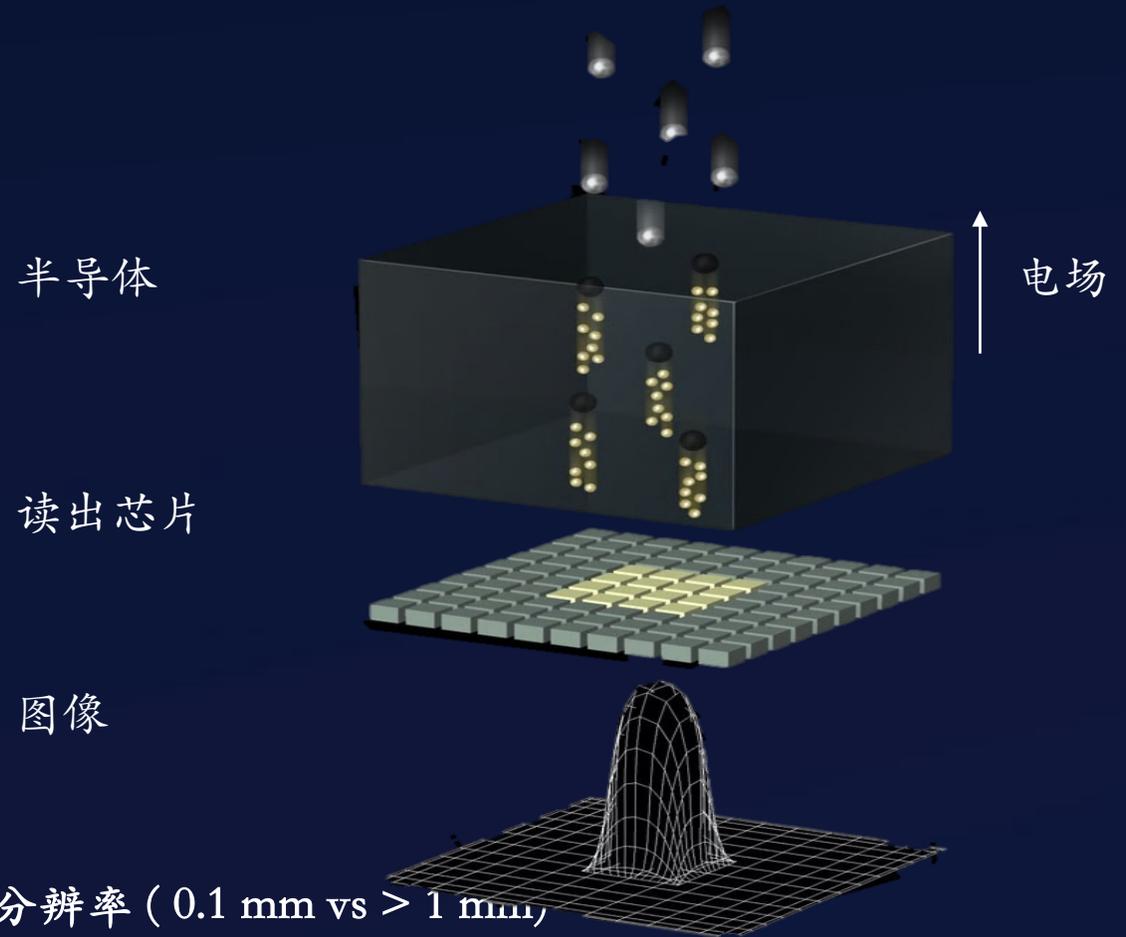
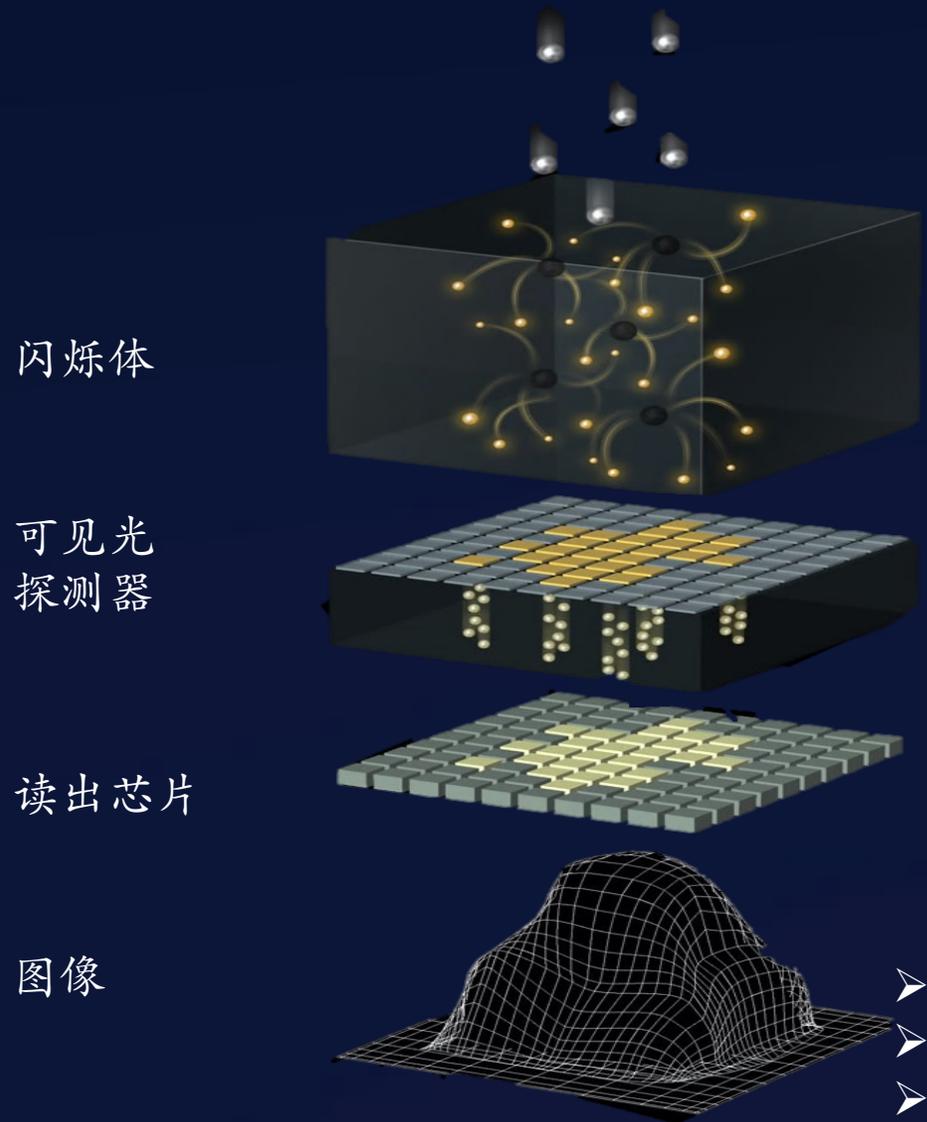
化合物半导体探测器在医学影像系统 中的应用

报告人：赖晓春

时间：2022/07/08

- 背景介绍：探测器、成像系统、化合物半导体
- 化合物半导体探测器在超高分辨率分子影像中的应用
- 化合物半导体探测器在光子计数能谱CT中的应用
- 水平堆叠漂移型砷化镓探测器

医学影像系统中的闪烁体探测器与半导体探测器



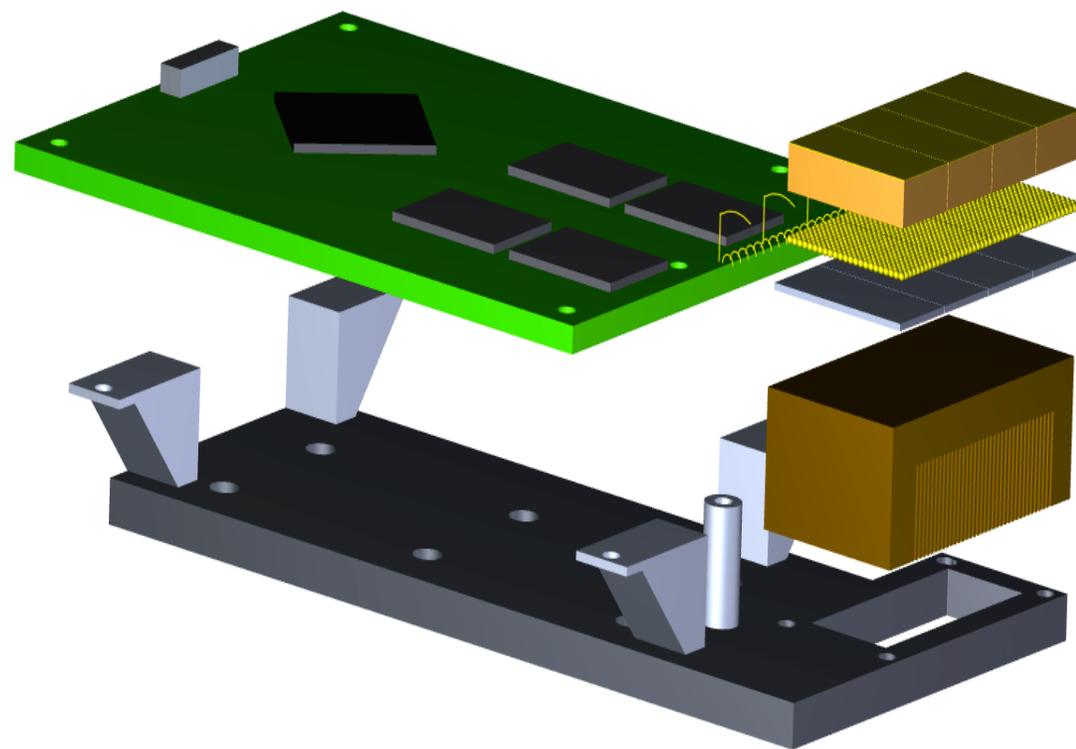
- 更优的空间分辨率 (0.1 mm vs $> 1 \text{ mm}$)
- 极佳的能量分辨率 ($< 1\%$ vs 10%)
- 脉冲拖尾短 (10 ns vs 1000 ns)
- 化合物半导体: 禁带宽度可调 $> 1.4 \text{ eV}$, 如 CZT/CdTe/GaAs/CsPbI₂Br; 在室温下具备较低的热噪声, 为其在医学影像系统中应用奠定了基础

- 背景介绍：探测器、成像系统、化合物半导体
- 化合物半导体探测器在超高分辨率分子影像中的应用
- 化合物半导体探测器在光子计数能谱CT中的应用
- 水平堆叠漂移型砷化镓探测器

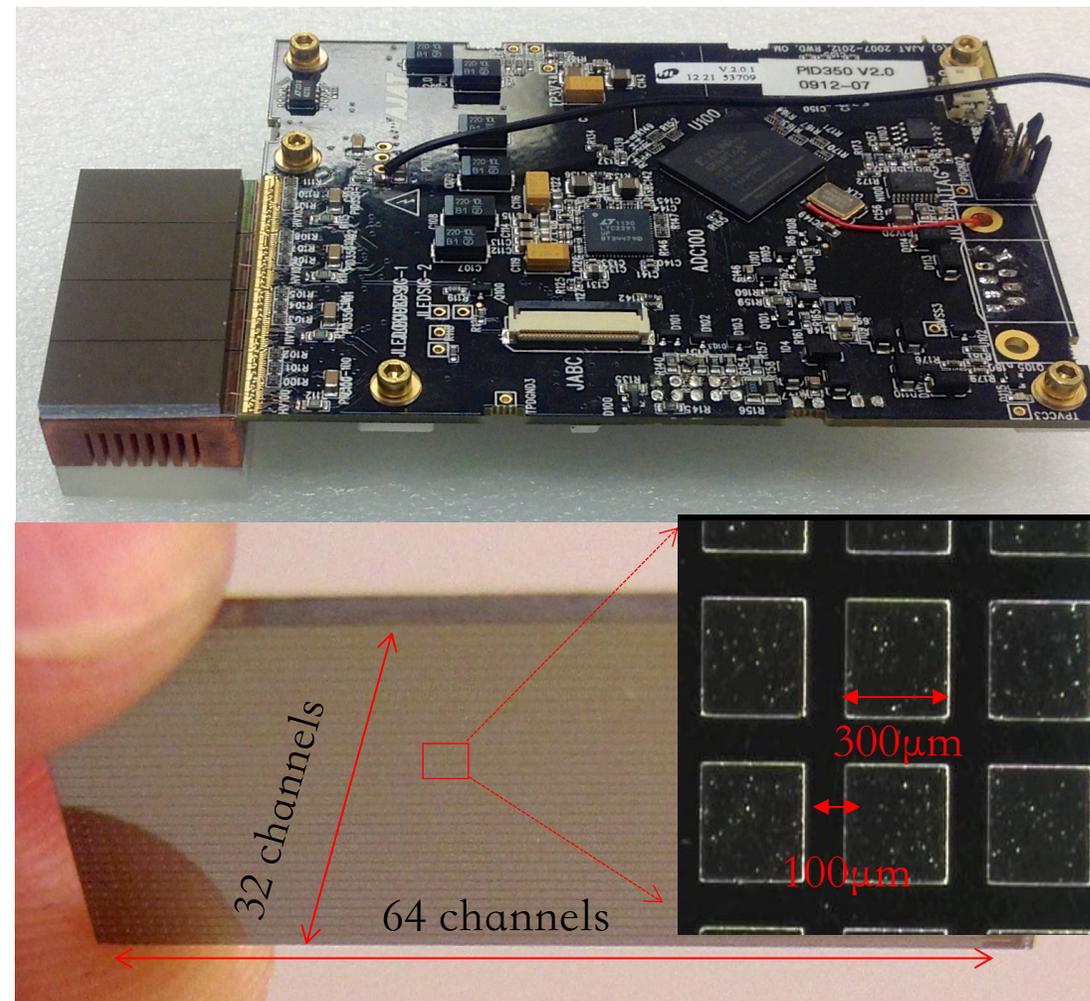
基于化合物半导体(CdTe)的高分辨率探测器



0.35 mm 分辨率CdTe探测器结构图



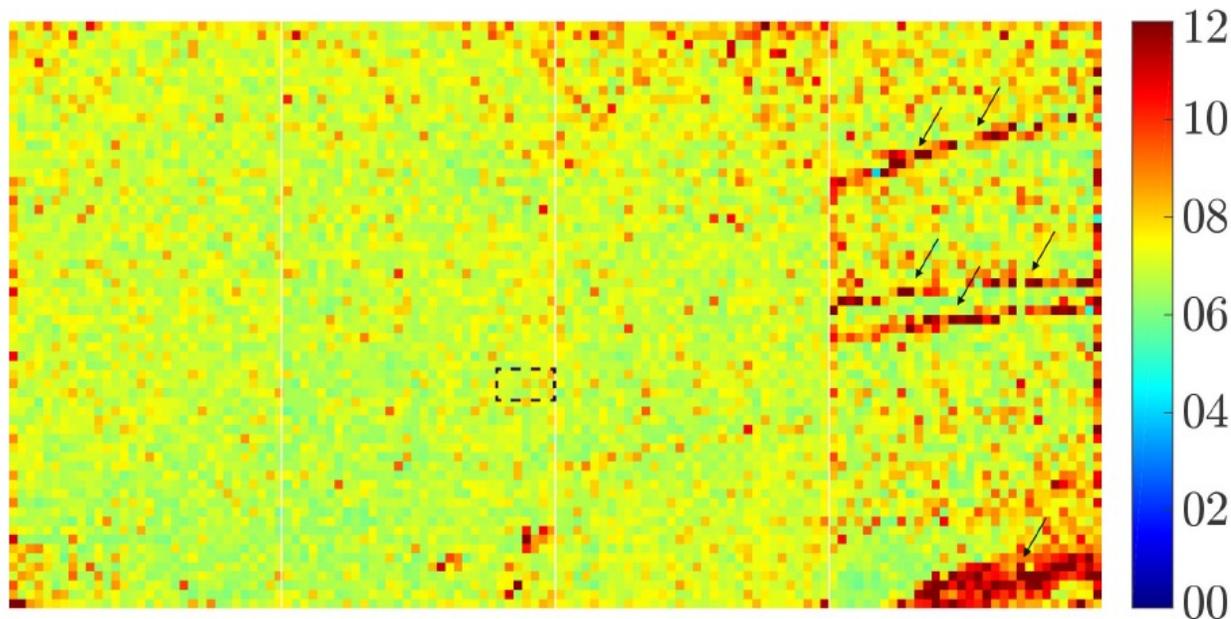
0.35 mm 分辨率CdTe探测器和读出芯片



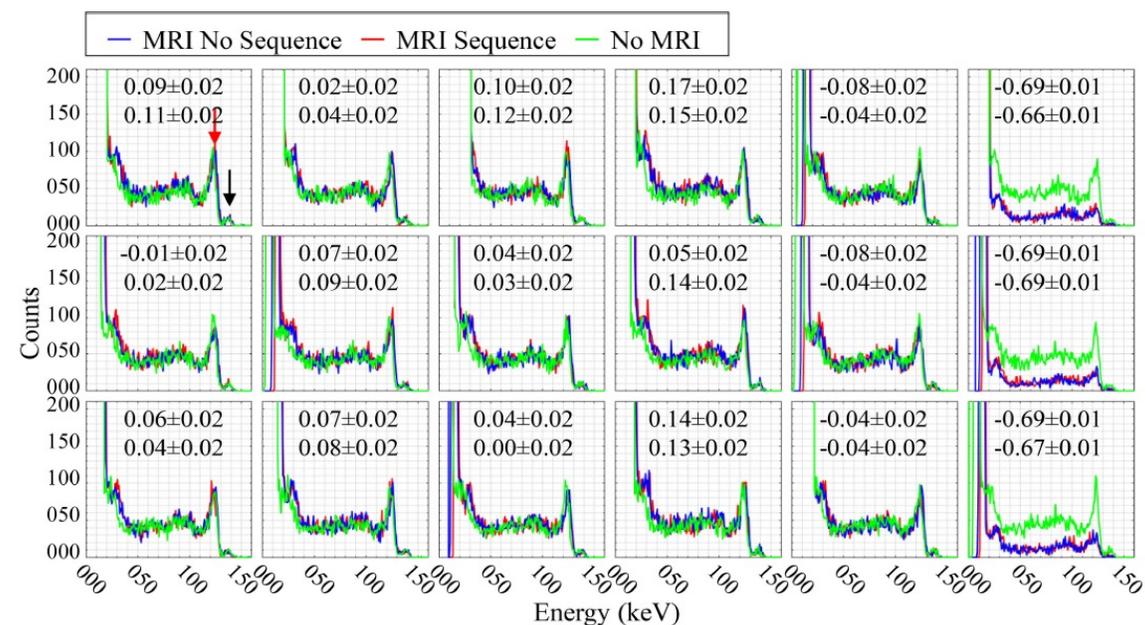
基于宽禁带半导体超高分辨率探测器



能量分辨率



核磁兼容性测试

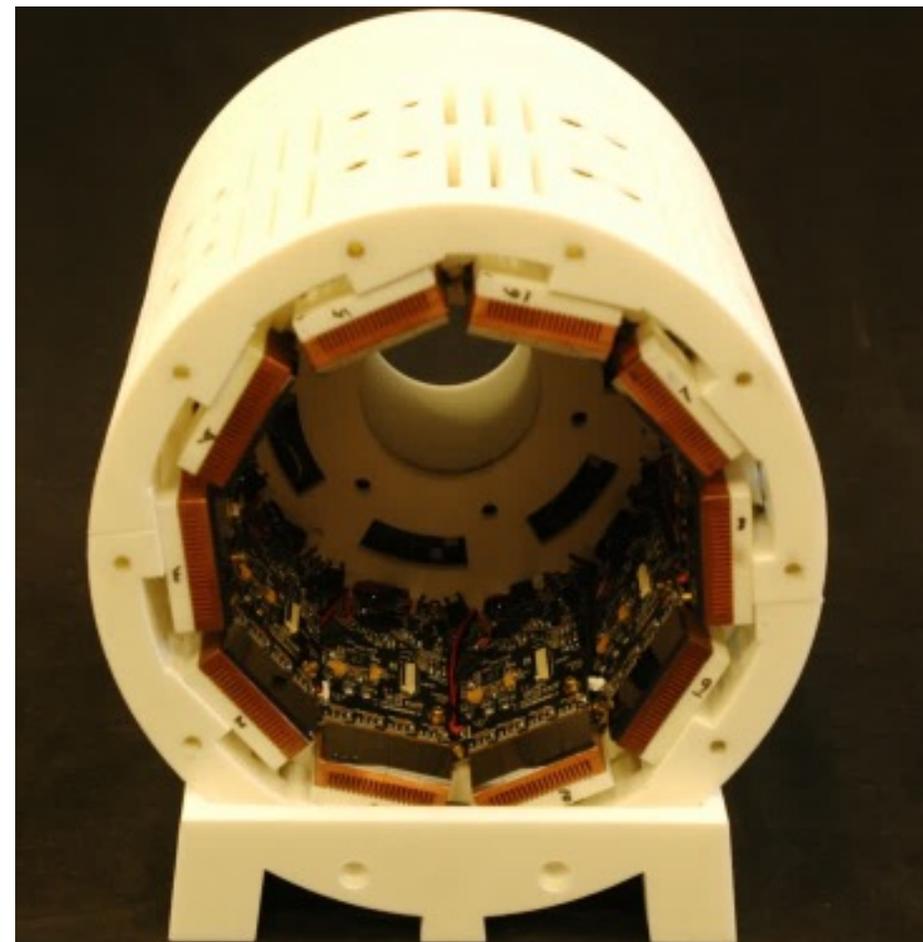
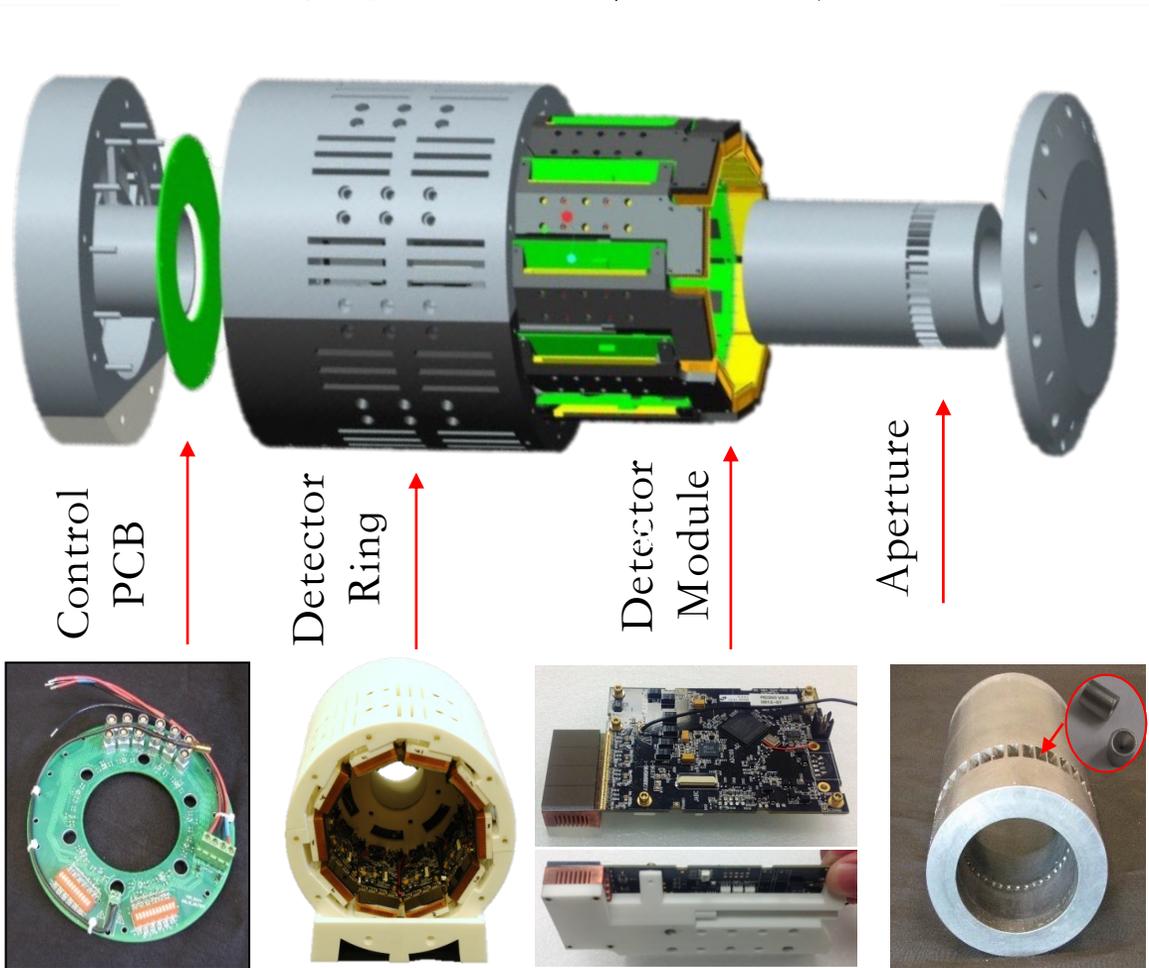


- 该型探测器模块能量分辨率中值~7keV; 8192通道中只有不到10个坏通道
- 具备良好的核磁兼容特性

基于40块CdTe探测器全环静态SPECT系统

全环静态SPECT系统设计

基于40块CdTe探测器的全环静态系统



X. Lai and *et al.*, "First sub-500 μm -Resolution Simultaneous SPECT/MRI Imaging with the MRC-SPECT-I: An Ultrahigh Resolution MR-compatible SPECT System Using Highly Pixelated Semiconductor Detectors" IEEE NSS/MIC Conference Record, 2016

X. Lai and *et al.* "Design, Performance Evaluation, and Modeling of an Ultra-High Resolution Detector Dedicated for Simultaneous SPECT/MRI",

IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Science, 2021

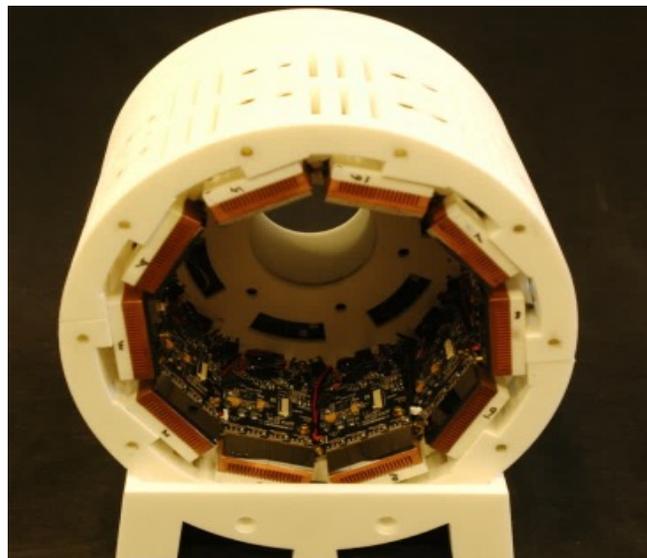
SPECT/MRI双模态成像系统, MRC-SPECT-I



上海科技大学
ShanghaiTech University



0.35 mm 分辨率CdTe探测器和读出芯片



基于40块CdTe探测器的全环静态系统



双模态成像系统 SPECT/MRI

开发用于治疗脑胶质瘤的免疫/干细胞疗法需高分辨率和高灵敏度的双模态成像系统，但有如下挑战：

- 基于传统闪烁体的探测器难以满足高分辨率要求；
- SPECT与MRI的兼容性，如SPECT探测器及电子元件需在高磁场（地表磁场的6000倍）下正常工作，同时对磁场均匀性的影响需小于5 ppm（百万分之一）。
- 传统双探测器机械旋转扫描很难满足灵敏度和成像时间的要求，同时会影响MRI成像。

解决方案：

- 研发基于碲化镉（CdTe）半导体材料（而不是闪烁体）的探测器，该探测器实现前所未有的高分辨率（**0.35 mm**，传统SPECT探测器 > 1 mm）
- 优化电路和元件，保证电磁兼容
- 基于40块CdTe探测器研发了**全环静态系统**，保证灵敏度和成像时间，避免了因机械转对MRI成像的影响



PSI

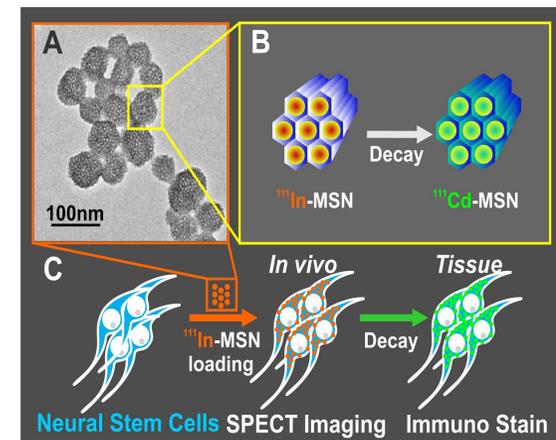
神经干细胞成像与SPECT/MRI 双模态成像系统

神经干细胞疗法对治疗脑胶质瘤极具潜力；基于 ^{111}In (2.8天) 标记的SPECT影像示踪对研究神经干细胞的迁移特性，疗法的安全性和有效性极为重要。现有系统有如下不足：

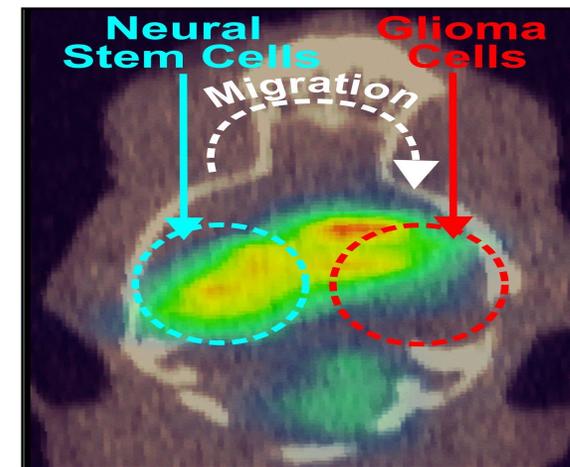
- 低灵敏度 (Trifoil SPECT/PET/CT为例：最小可测活度 ~ 8 uCi, 相当于20万个神经细胞)；
- 空间分辨率极低 (~ 2 mm)；
- 极差的软组织对比度

开发用于治疗脑胶质瘤的免疫/干细胞疗法需高分辨率 (< 0.5 mm) 和高灵敏度的双模态成像系统，但有如下挑战：

- 基于传统闪烁体的探测器难以满足高分辨率要求；
- SPECT与MRI的兼容性，如SPECT探测器及电子元件需在高磁场 (地表磁场的6千倍 ~ 3 万倍) 下正常工作，同时对磁场均匀性的影响需小于5 ppm (百万分之一)。
- 传统双探测器机械旋转扫描很难满足灵敏度和成像时间的要求，同时会影响MRI成像



^{111}In 标记的神经干细胞
可用SPECT 示踪



神经干细胞趋向性



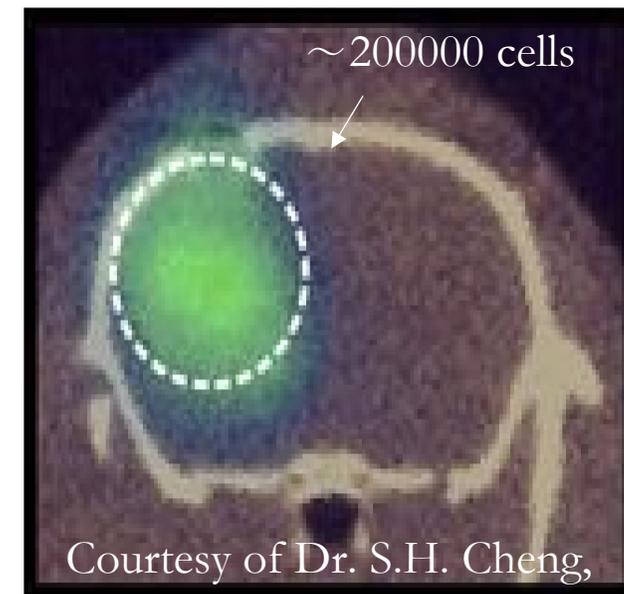
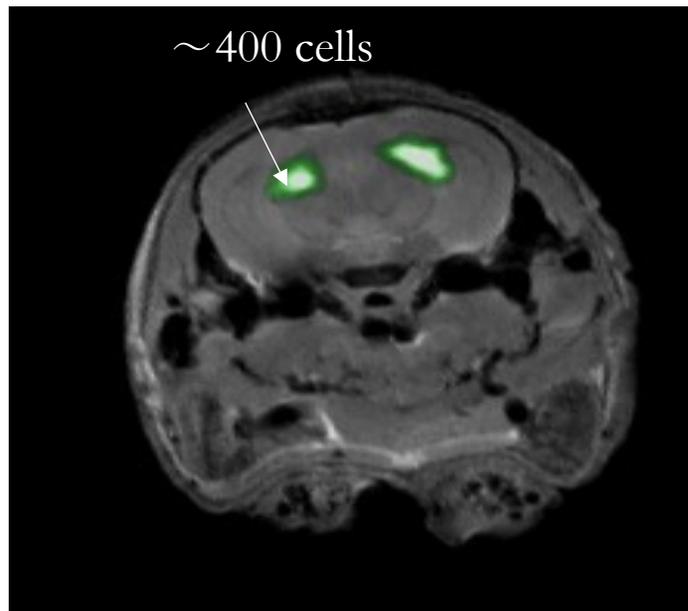
MRC-SPECT-I 成像测试



0.50 mm



0.35 mm



Courtesy of Dr. S.H. Cheng,

- SPECT/MRI 的空间分辨率从 **1.7 mm** 提高到 **0.35 mm**
- 是世界首台也是唯一一台分辨率优于 **0.5 mm** 的 SPECT/MRI
- 将神经干细胞最低检测数从 **20万** 个降到 **400** 个，性能提升了3个数量级
- 具备丰富的软组织分辨能力

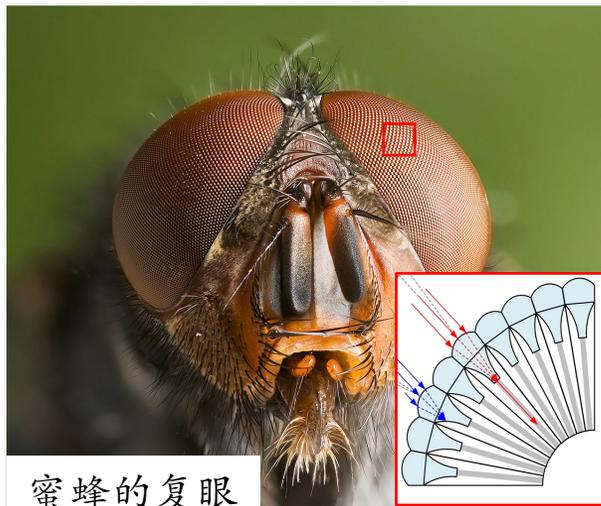
X. Lai and et al., "First sub-500 μm -Resolution Simultaneous SPECT/MRI Imaging with the MRC-SPECT-I: An Ultrahigh Resolution MR-compatible SPECT System Using Highly Pixelated Semiconductor Detectors" IEEE NSS/MIC Conference Record, 2016

E. M. Zannoni, X. Lai, and et al. "In vivo simultaneous SPECT-MR imaging of therapeutically engineered stem cells", Journal of Nuclear Medicine May 2017, 58 (supplement 1) 399;

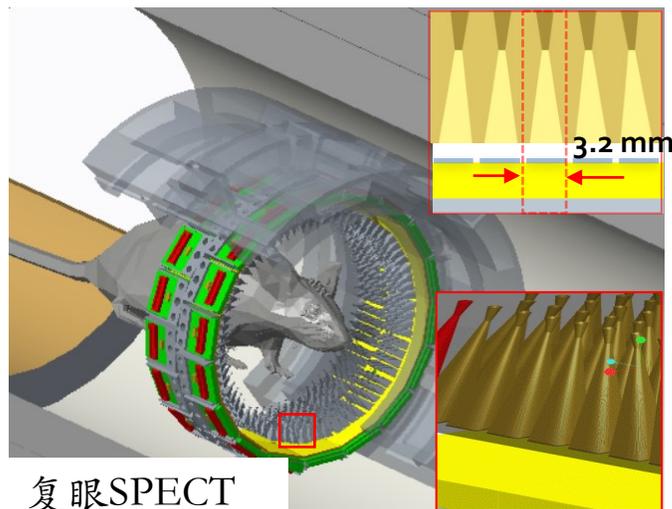


PSI

基于超高分辨率半导体探测器的复眼SPECT



蜜蜂的复眼



复眼SPECT

西门子SPECT



复眼SPECT大小相当于可乐瓶的体积

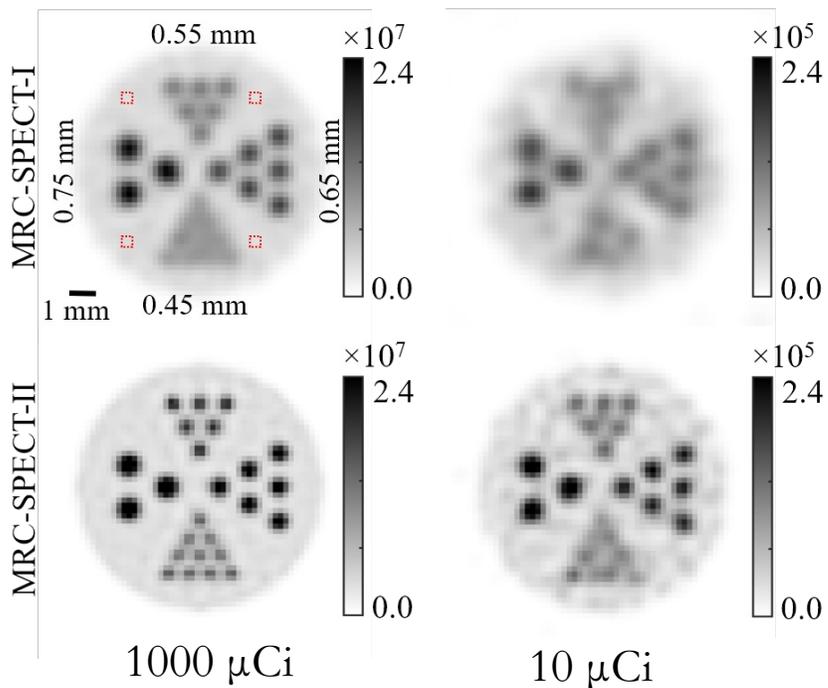
- 复眼由千上万个成像单元组成，同时结构紧凑，具备超高灵敏度。将该设计应用于SPECT有望突破现有系统的灵敏度极限，但：
 - 为保证单个成像单元的成像能力，探测器像素须不大于0.1 mm，但0.1mm 像素元之间会相互干扰，导致信号丢失。
← 在读出芯片上加矫正功能降低信号干扰
 - 如何设计并制造如此复杂的成像系统？
← 用3D打印技术打印整个成像阵列
 - 紧凑的结构，单个成像单元3.2 mm (传统 25 mm)，整个系统由1536个成像单元 (传统 < 100) 构成，但大小相当于可乐瓶的体积；



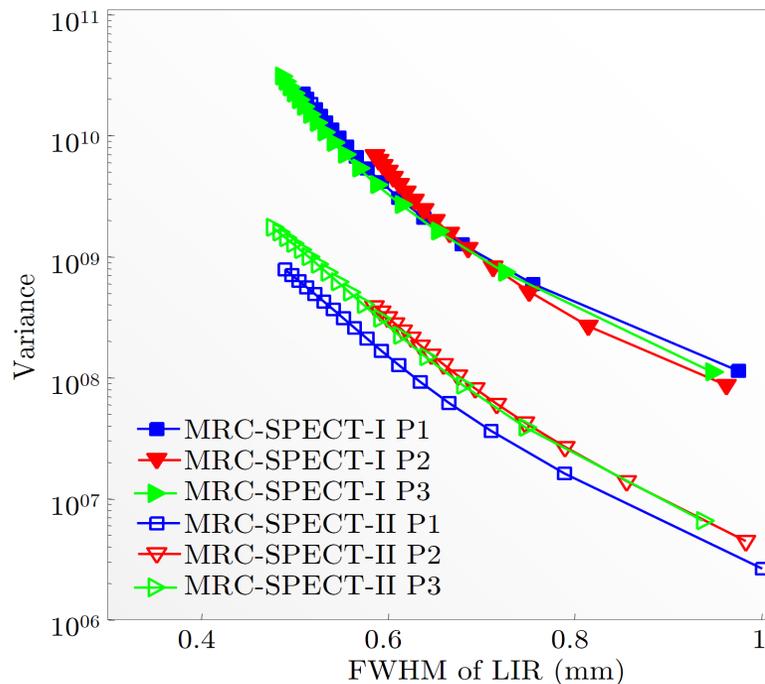
复眼SPECT成像质量分析



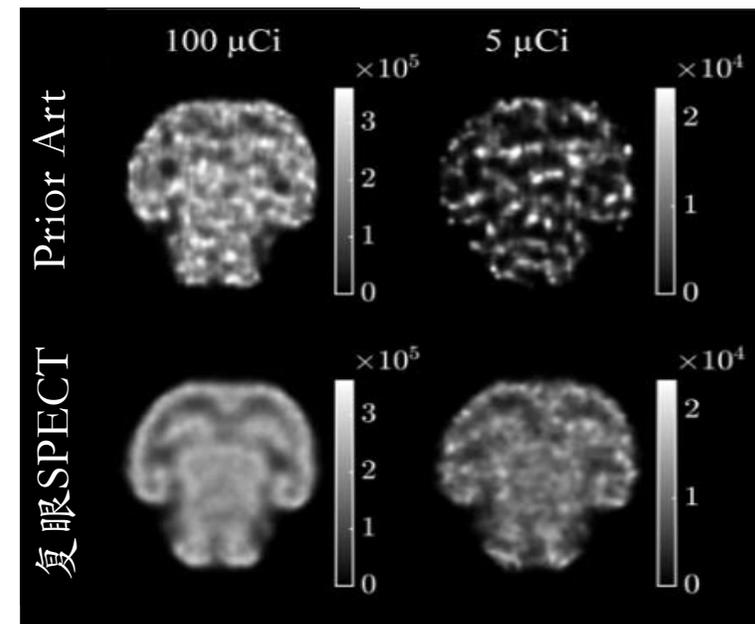
空间分辨率



RV 曲线



超低剂量成像



可望实现超低剂量全脑成像

(5 μCi , 核安全法规规定的需采取防护措施的下限)

X. Lai and L.J. Meng, "Simulation Studies of Inverted Compound Eye for Second Generation MRI Compatible SPECT Imaging", *Physics in Medicine and Biology*, 2018.

- 背景介绍：探测器、成像系统、化合物半导体
- 化合物半导体探测器在超高分辨率分子影像中的应用
- 化合物半导体探测器在光子计数能谱CT中的应用
- 水平堆叠漂移型砷化镓探测器

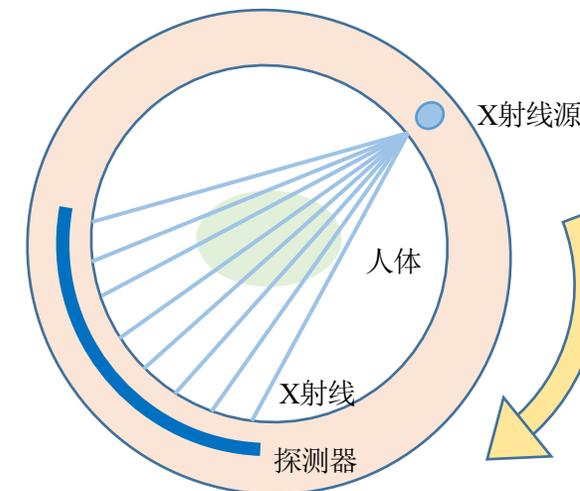
X射线成像与计算机断层扫描 (CT) -1



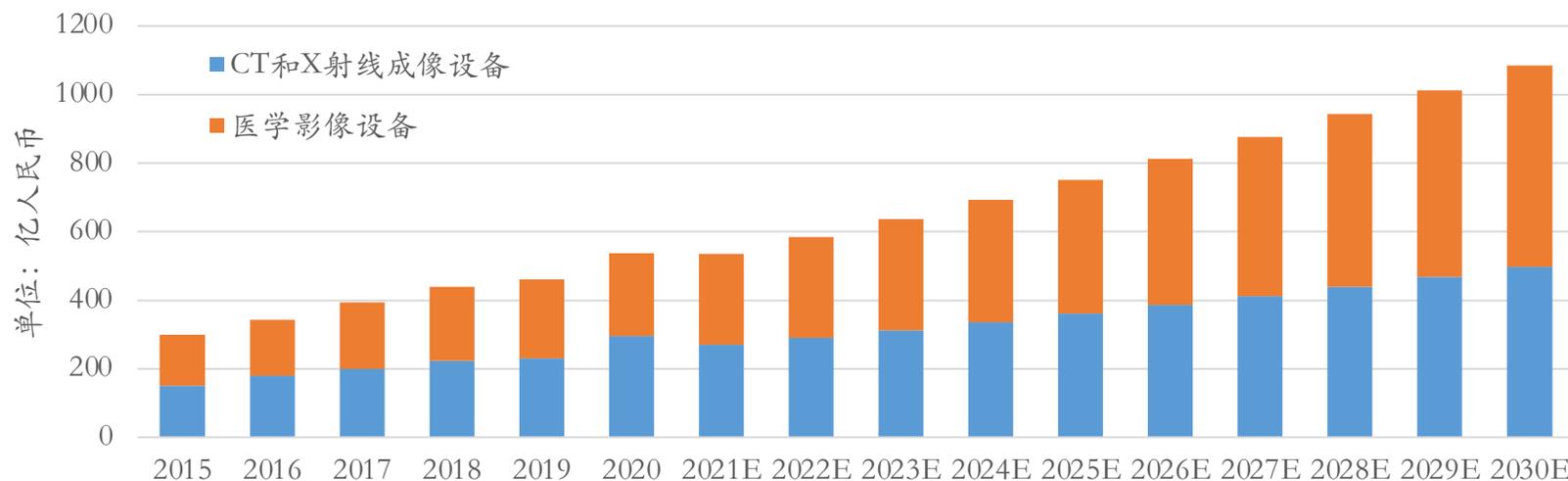
X射线成像



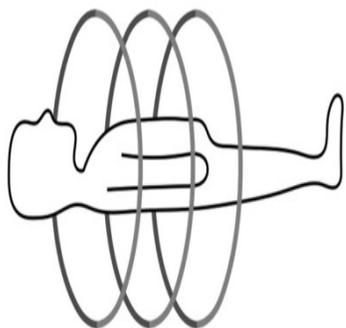
CT成像



中国医学影像设备市场规模

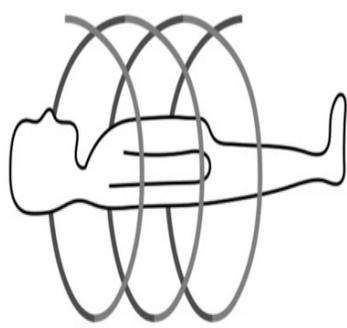
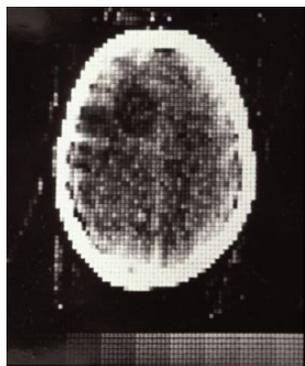


X射线成像与计算机断层扫描 (CT) -2



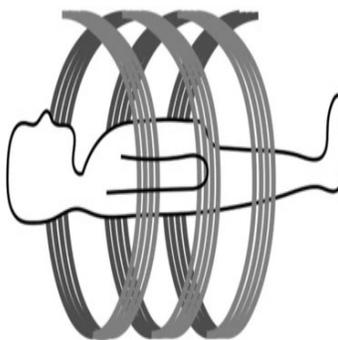
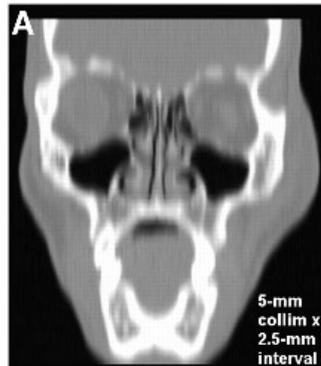
单层CT

1970



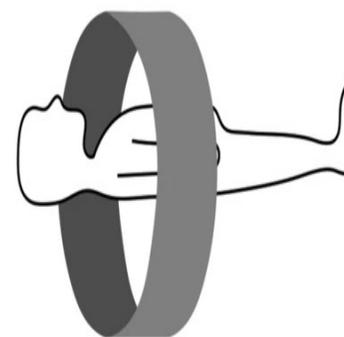
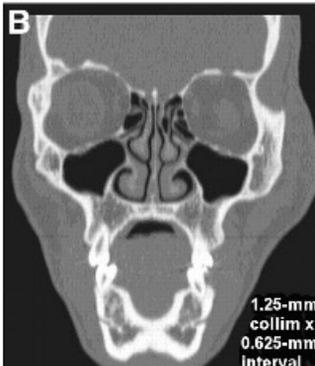
单层螺旋CT

late 1980



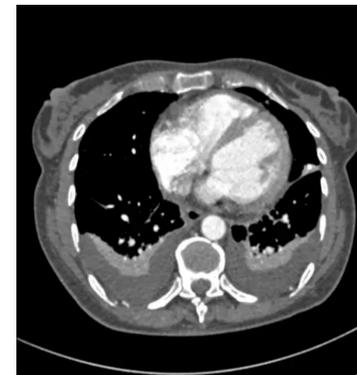
多层螺旋CT

1998



多排 CT

2007



彩色成像

低辐射剂量

高空间分辨率

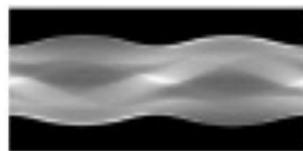
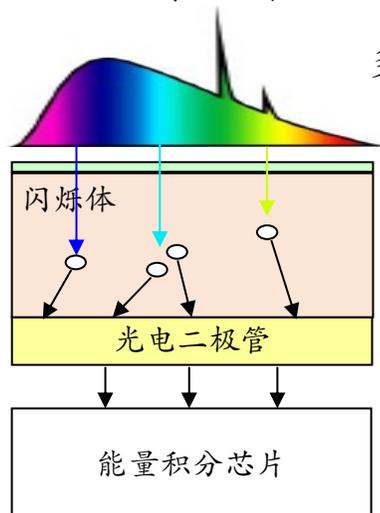


PSI

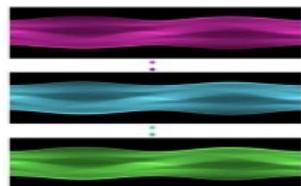
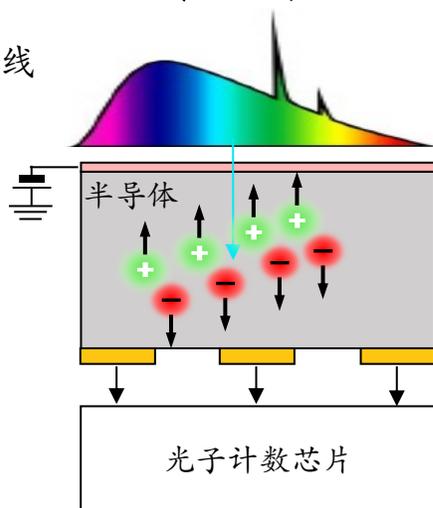
光子计数能谱CT及其优势



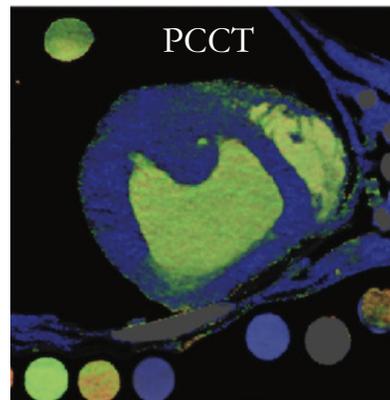
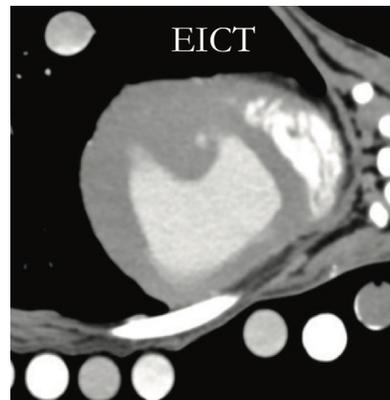
传统能量积分型探测器 (EID)



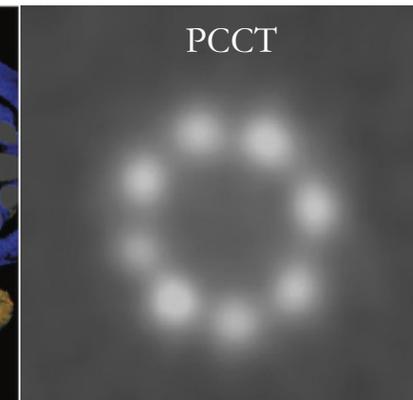
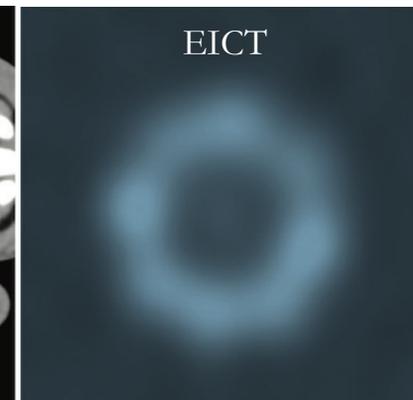
光子计数型探测器 (PCD)



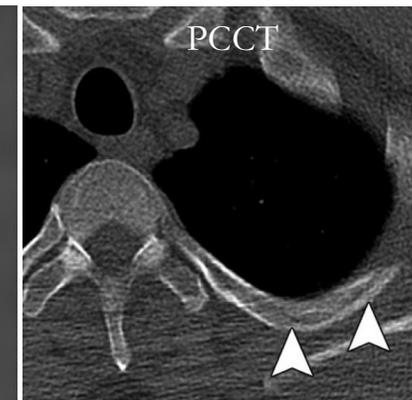
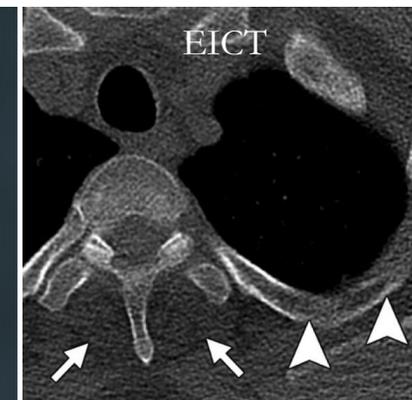
彩色成像



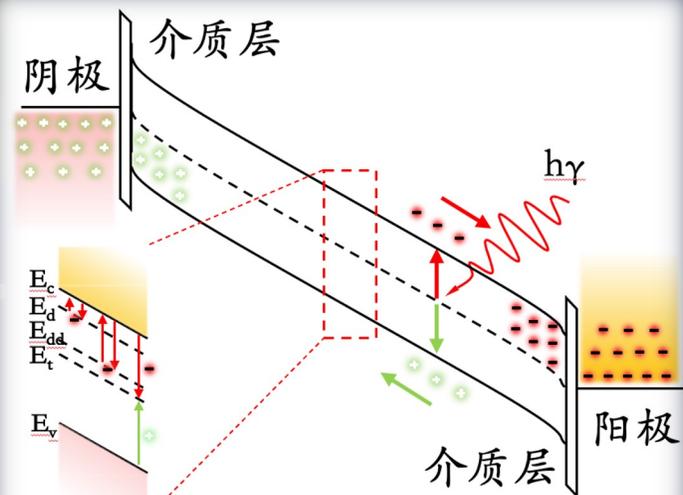
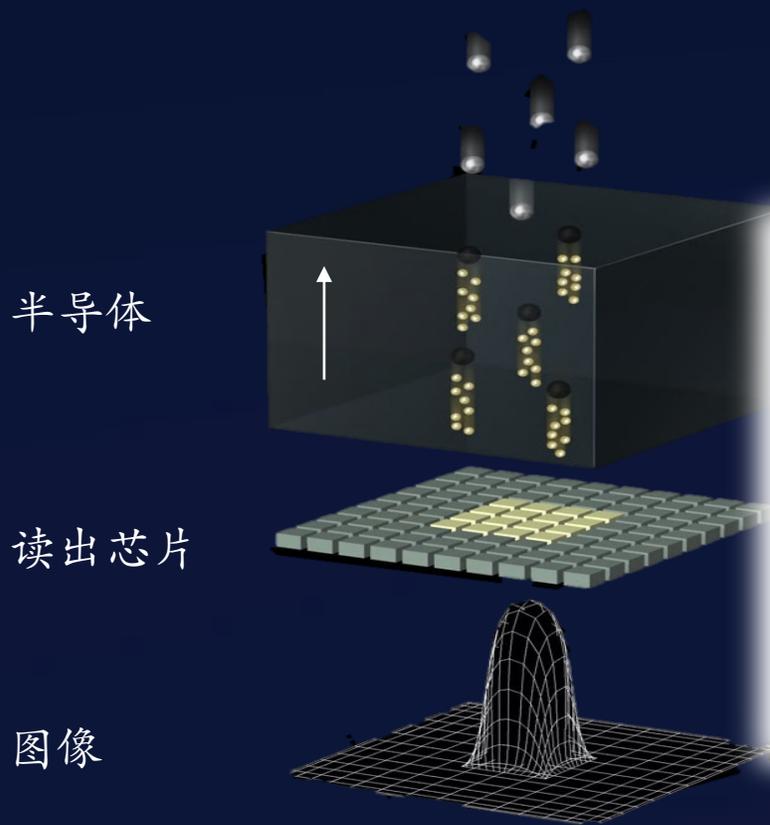
高空间分辨率



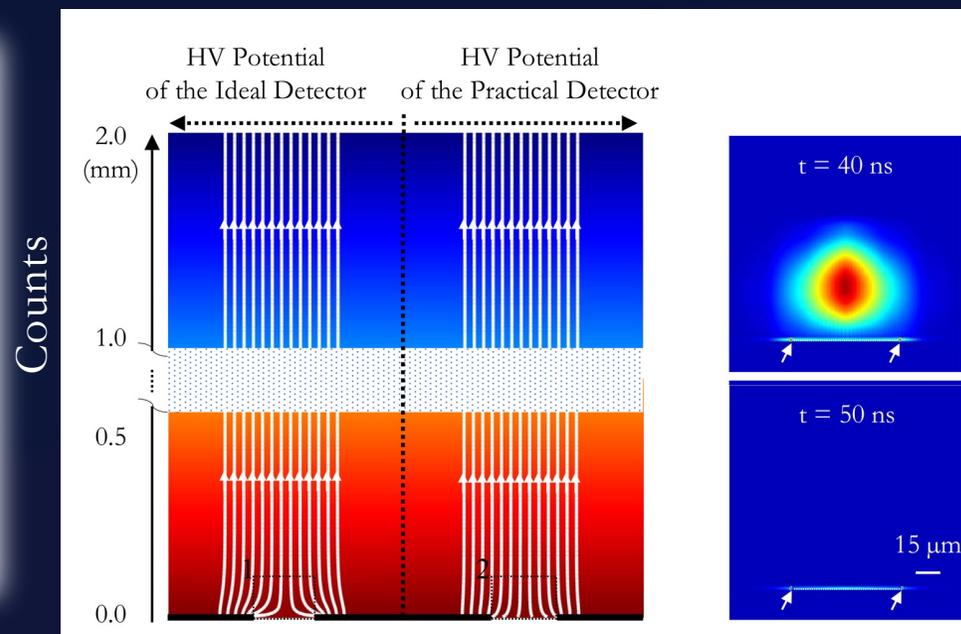
低电子学噪音



光子计数能谱CT探测器面临的挑战: 强流强下电荷运输的不稳定 ← 化合物 半导体制备、表面处理工艺、电极处理工艺



电荷运输与能带结构图



表面处理工艺缺陷将导致电场泄漏, 进而影响电荷收集, 改变探测器的能量响应, 影响稳定性[2]

[1] Xiaochun Lai, et al. "Modeling Photon Counting Detector Anode Street Impact on Detector Energy Response." IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences 5.4 (2020): 476-484.

光子计数能谱CT探测器面临的挑战：读出芯片

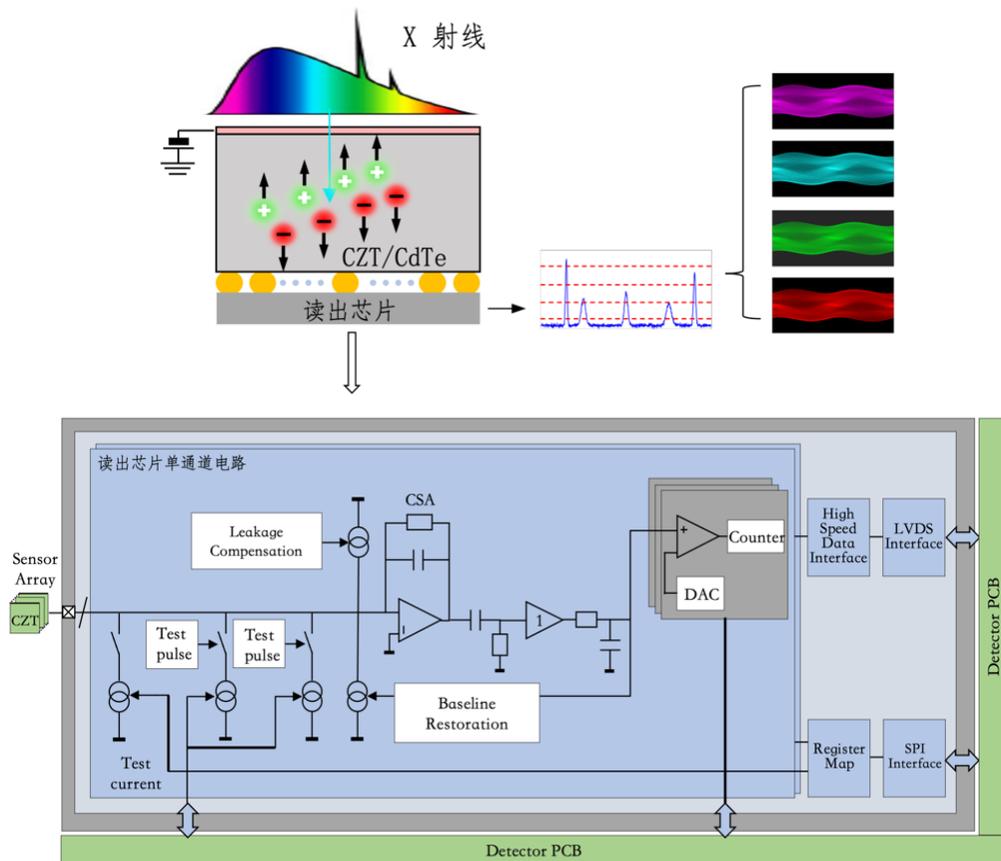


图 1: 光子计数能谱CT探测器与读出芯片示意图

1. 每个X射线光子产生的电流信号脉冲极快（数纳秒级），强度极弱（数十纳安级）
2. X射线光子流强范围跨越8个数量级——在每平方毫米内，低至每秒数个光子，高可超每秒一亿个光子
3. 面对以上严苛的应用场景，为避免不同光子信号的堆积，如何在**控制功耗**的前提下，以**极快速度**（死时间需小于数十纳秒）对每个光子产生的微、弱、快电流脉冲进行处理（包括放大、滤波、成形、促发等），最终准确地获得**光子能量信息**？
4. **CT对芯片稳定性要求极高**



研发现状-国际主流厂商



上海科技大学
ShanghaiTech University

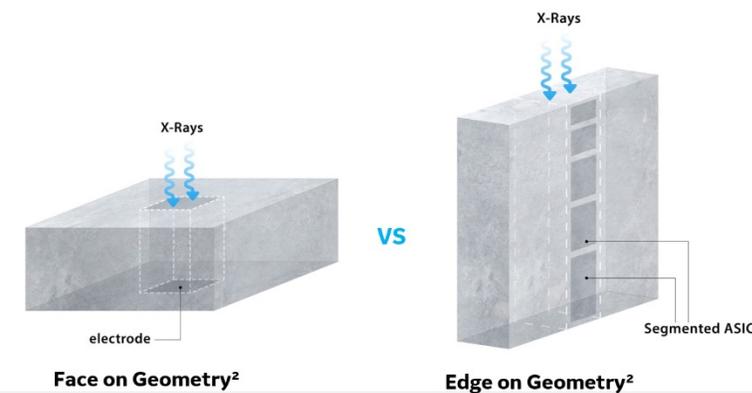
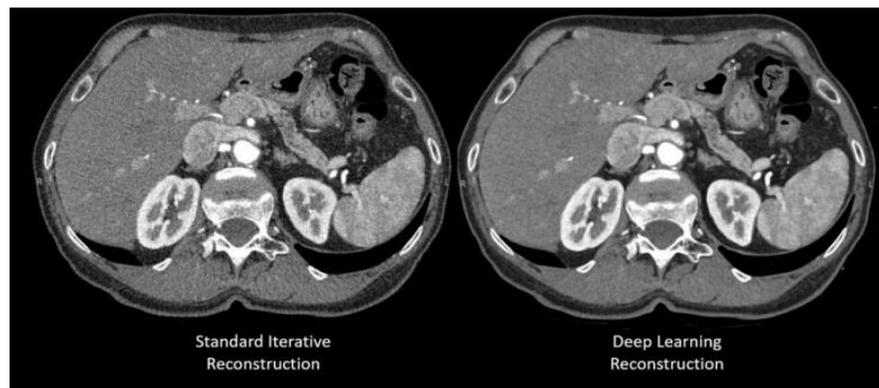
2021年西门子 (Siemens) 经过十五年的努力, 公布全球首台临床光子计数能谱CT



2021年佳能 (Canon) 收购 Redlen, 于2021年开始临床实验



2021年, 通用电气 (GE) 收购 Prismatic, 原型机进入临床试验



PSI

PHOTONIC SENSING AND IMAGING LAB

- 现有的光子计数探测器研发路线(基于化合物半导体/硅)由于专利壁垒、技术积累、供应链及成本等因素限制了我国在该领域的产业布局
- 光子计数能谱CT及探测器被列入我国《“十四五”医疗装备产业发展规划》,是科技部“十四五”重点攻关对象。

- 背景介绍：探测器、成像系统、化合物半导体
- 化合物半导体探测器在超高分辨率分子影像中的应用
- 化合物半导体探测器在光子计数能谱CT中的应用
- 水平堆叠漂移型砷化镓探测器

1. PCD: 材料选择



用于制备PCD的材料及其属性

探测器	电子漂移速度 ($cm^2/s \cdot v$)	空穴漂移速度 ($cm^2/s \cdot v$)	等效拦截厚度① (mm)	散射-光电 比②	特征X射线平均自由程③ (μm)	成本
CZT/CdTe	1100	100	2	0.08	60.3	极高
Si	1400	480	60	5.70	13.5	低
GaAs	8000	400	6	0.30	15.3	低

①: 对120 keV能量光子的探测效率等效于2mm CZT/CdTe 探测器, 2 mm 是主流临床光子计数CZT/CdTe探测器的厚度

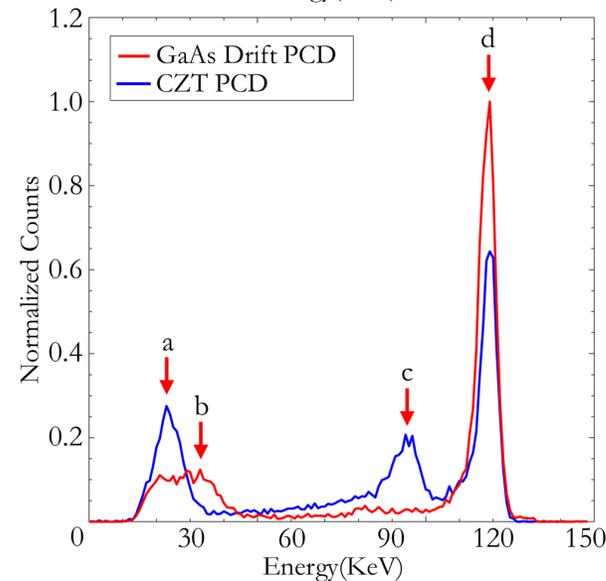
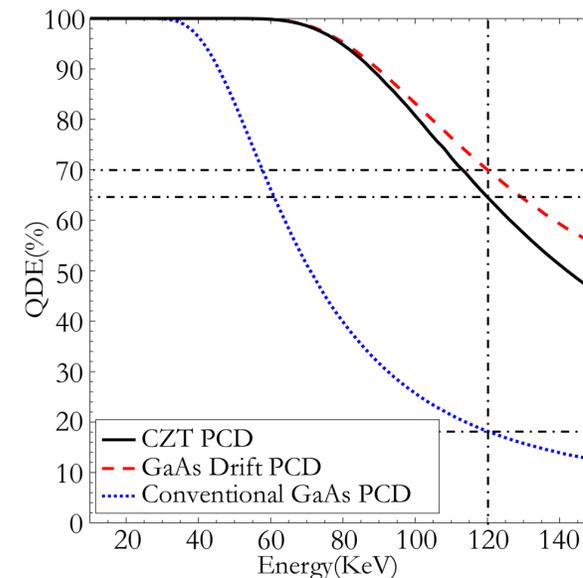
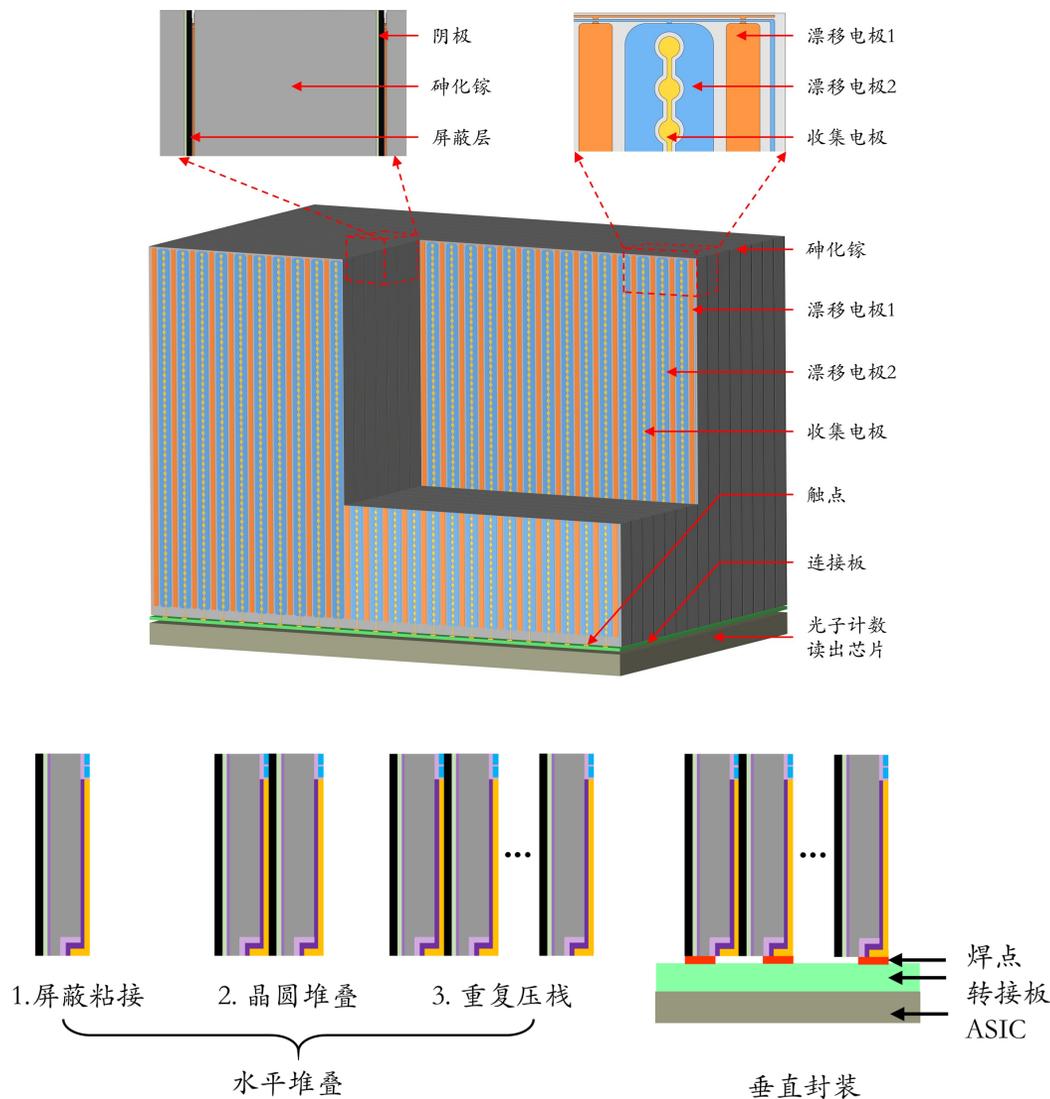
②: 光电事件与散射事件比, 此值越低越好

③: 特征X射线运动多长距离后会与物质发生一次相互作用, 此距离越短代表相邻像素的串扰越小

砷化镓 (GaAs) 材料优势: 载流子漂移速度快、探测效率高、散射-光电比小、像素串扰小、成本低。



3. 水平堆叠漂移型砷化镓探测器：结构设计

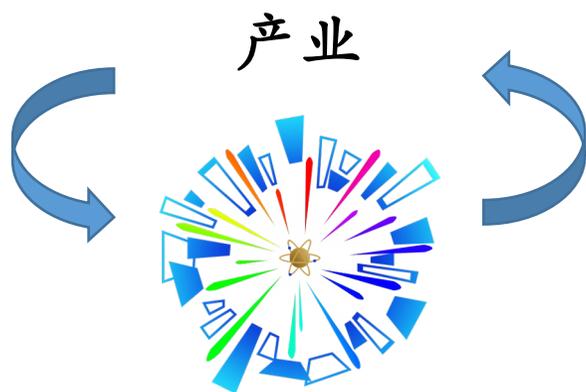


一种传感器、X射线探测器及其应用， 专利申请号：202210357116.5



PSI

- 未来十年，光子探测与成像实验室（PSI-Lab）将聚焦于光子探测器与成像系统开发，特别是在光子计数能谱CT领域，力争：



协助前沿产品开发，助力产业发展
积累底层工艺技术，突破产业瓶颈
探索新型技术路线，引领产业升级

- 实验室招聘了两名工程师，2021年招收了1名博士研究生、2名硕士研究生；2022年新进4名研究生。
- 实验室用于180平米的实验室和办公空间；所依托的上海科技大学建立的量子器件中心，具备晶圆代工厂级的制备能力，占地2600余平方米，设有百级（ISO-5）和千级（ISO-6）两个洁净室区域，有清洗、镀膜、干法刻蚀、湿法刻蚀、光刻、封装等先进微纳工艺设备。



谢谢！烦请各位专家指正！