中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

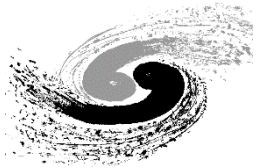
一种解决电荷共享效应的像素探测器读出芯片设计

崔珊珊 魏微 张杰 李木槿 李航旭 李贞杰
江晓山 朱科军 刘鹏 王铮 陈元柏

中国科学院高能物理研究所

2021年11月27日

主要内容



- 项目背景
- 读出芯片设计
- 芯片算法验证与测试
- 总结与展望

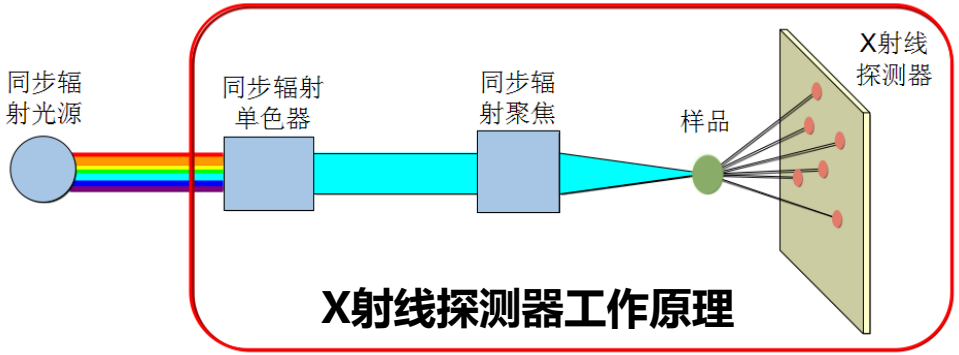
高能同步辐射光源(HEPS)

- 项目简介
  - 同步辐射光源是在原子分子尺度上探索物质微观世界的强大武器和工具
  - 正在北京怀柔建设的我国第四代同步辐射光源，世界上亮度最高的光源之一
  - 高能同步辐射光源(High Energy Photon Source)
- 光源特性
  - 覆盖从远红外到硬X射线范围的连续光谱
  - 高亮度，高准直性、良好的相干特性
- 应用
  - 广泛应用于基础学科研究、应用研究、高技术产品开发
  - 涵盖生命科学、材料科学、环境科学、凝聚态物理等领域

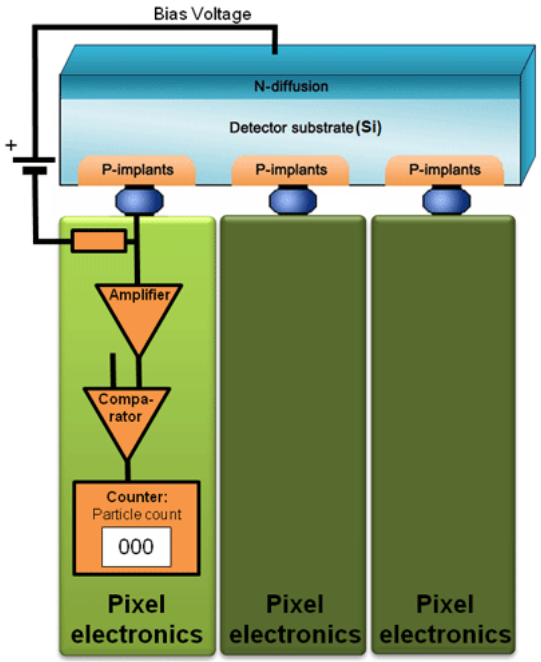
SARS病毒相关复合物结构

光子计数型像素探测器

- **探测器整体结构**
  - 针对高能同步辐射应用，研制实现了X射线二维硅像素探测器系统
  - 基于混合型单光子计数模式下的像素探测器结构
  - 全耗尽体硅传感器+倒装焊连接+像素ASIC读出芯片的架构



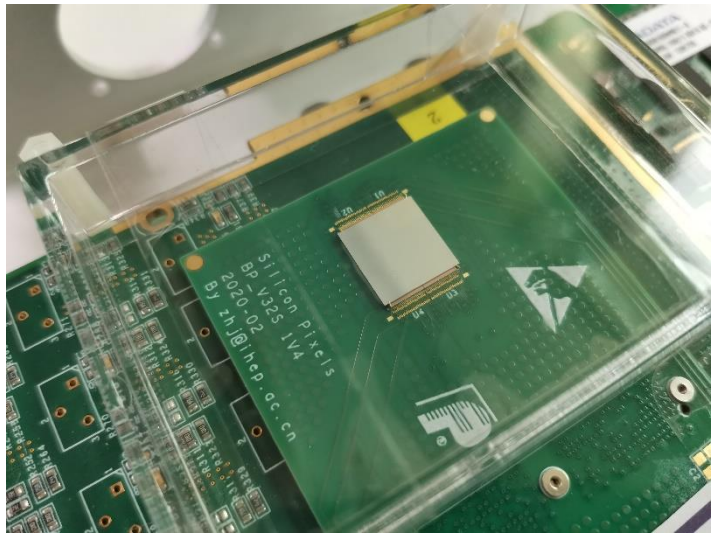
- **光子计数模式**
  - 基于积分放大-过阈甄别-计数读出的架构
  - 基于该像素内的信号放大甄别结构，可实现“零噪声”的信号探测
  - 每帧完成对入射粒子的数字积分，以帧刷新的方式进行读出



光子计数像素探测器结构框图

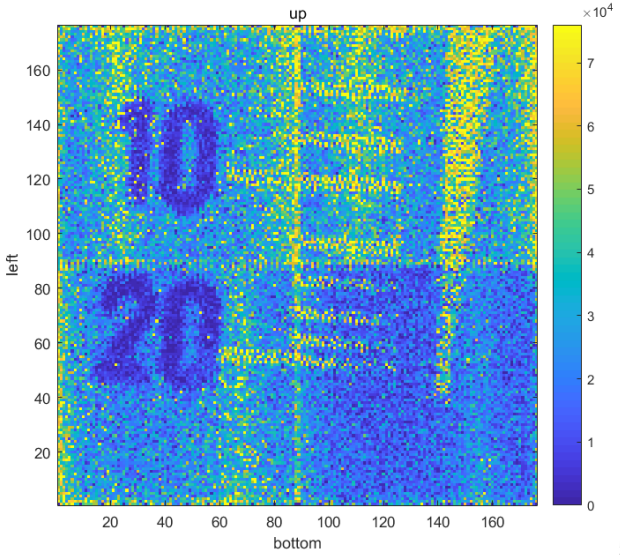
已有研究基础

- **HEPS-BPIX3芯片[1]**
  - 实现了对入射信号的积分放大与甄别，以及对甄别数字脉冲的计数与读出
  - 像素尺寸55×55μm^2，芯片尺寸4.9×6.1mm^2，工程批流片



模块测试系统（局部图）

- **模块结构**
  - 模块面积 9.68×9.68 mm^2，包含4个单芯片，2行2列分布
  - sensor和ASIC通过倒装焊连接
  - 分别在X光机、北京同步辐射装置4B9A束流线站进行联调测试
  - 完成裸片测试、芯片测试及刻度、模块测试
  - 已通过国家重点研发计划项目验收，列入HEPS工程序列

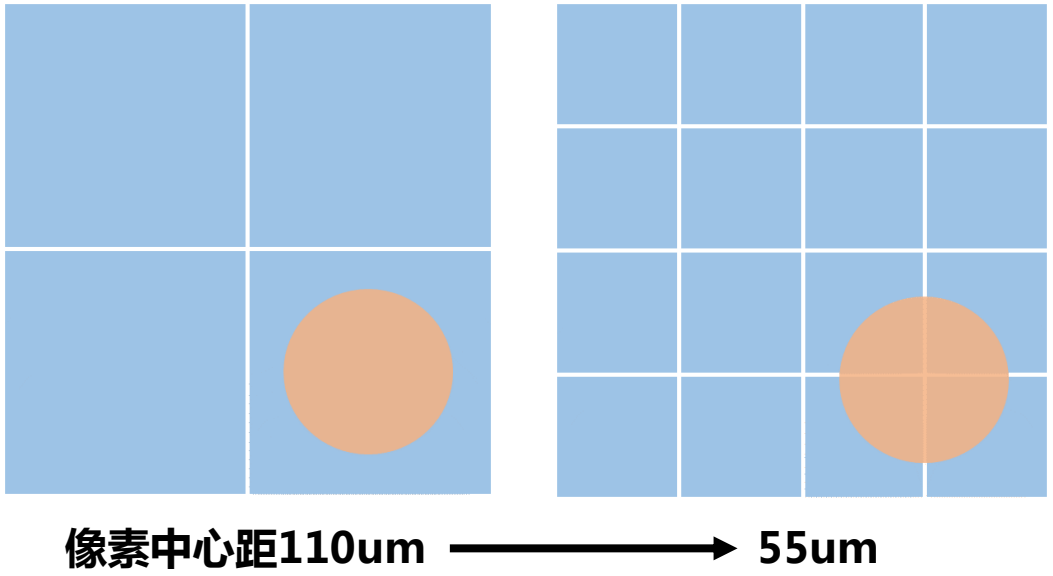


线对卡成像图

[1] S. Cui, W. Wei*, et al. HEPS-BPIX3: A Fine Pitch Pixel Readout Chip Working in Single Photon Counting Mode for Synchrotron Radiation Applications 2021 JINST 16 P08004

电荷共享效应[2]

- 产生机理
  - 电子空穴对沿电场漂移时，电荷束团直径不断增大
  - 当束斑同时击中两个或多个像素时，各像素所接收的电荷量之和为束团的实际能量
- 影响
  - 该效应会降低光子计数型芯片的能量分辨率
- 相关因素
  - 收集极平面上的束斑大小与漂移距离有关
    - 传感器厚度
    - 传感器材料
  - 收集极平面上束斑大小与收集像素尺寸有关
    - 读出像素尺寸

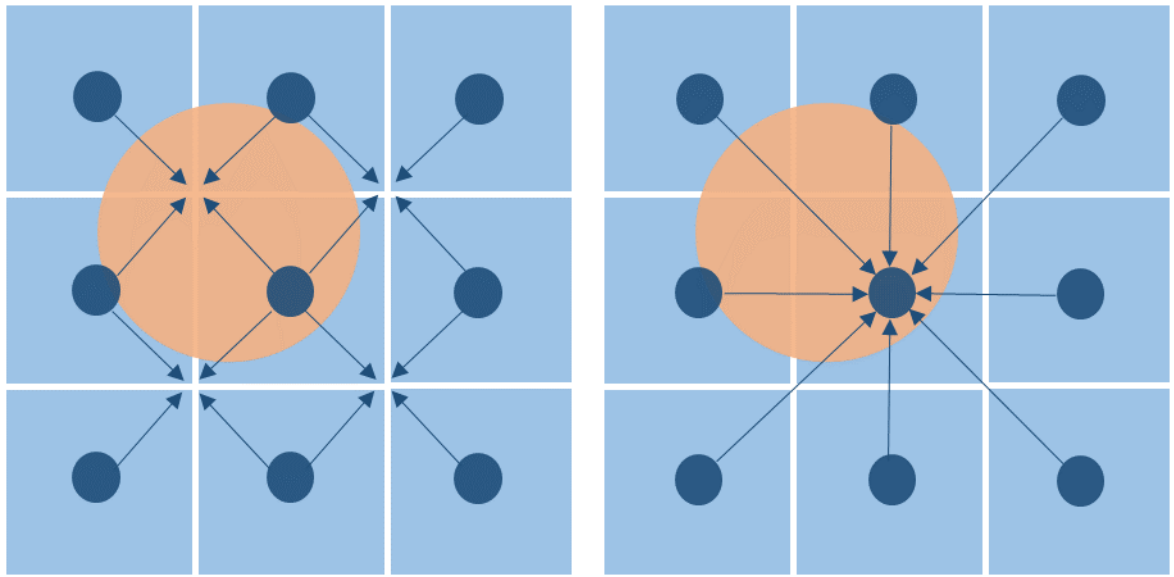


[2] M.Chmeissania, B. Mikulec*. Performance limits of a single photon counting pixel system NIMA Volume 460, Issue 1, 11 March 2001, Pages 81-90

行为级解决方案

- 解决电荷共享效应方案
  - 像素能量求和：用以确定束斑总能量是否过阈
  - 像素中心仲裁：用以确定最大像素信号

- 具体解决
  - 以3行3列像素为一组
  - 每4个像素进行求和
    - 判断总能量是否达到探测能量阈值
  - 每9个像素进行比较
    - 判断CEN像素是否为最大能量像素
  - 以上两个条件同时满足
    - CEN像素进行计数操作

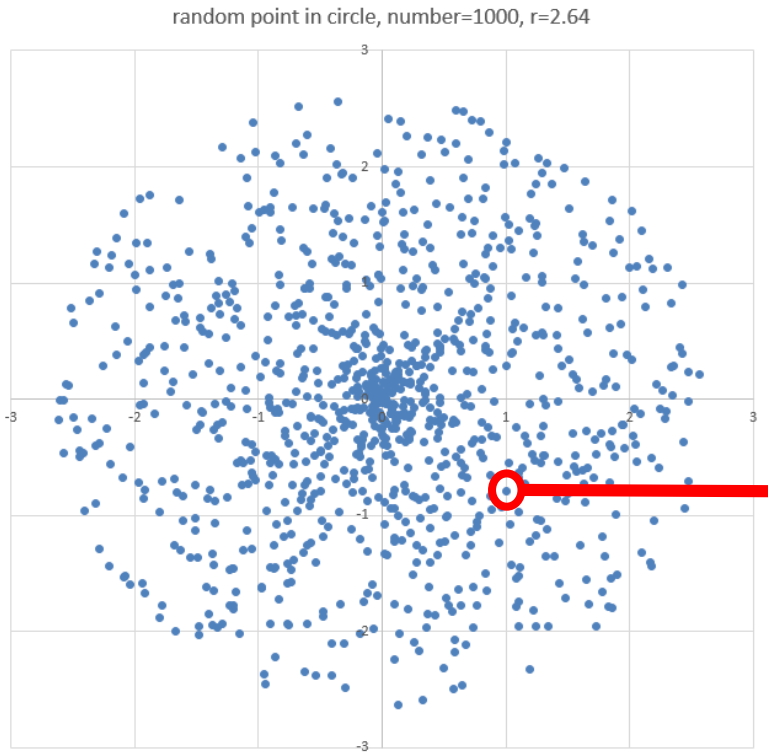


像素求和　　像素比较

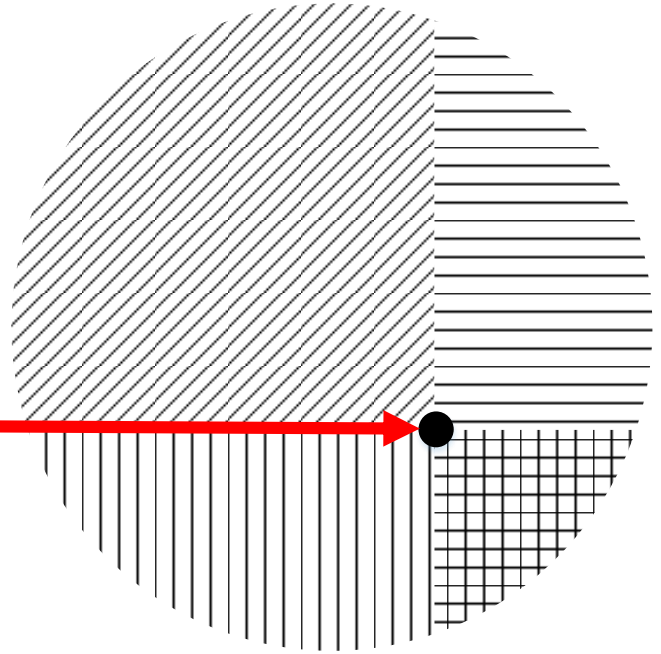
芯片算法验证

- 软件建模算法验证
  - 基于Python环境，对1000个电荷共享事例进行仿真
  - 结果显示该方案可正确处理电荷共享事例，准确率好于90%

- 具体步骤
  - 击中点均随机产生
  - 符合高斯分布
  - 圆面积代表光子能量



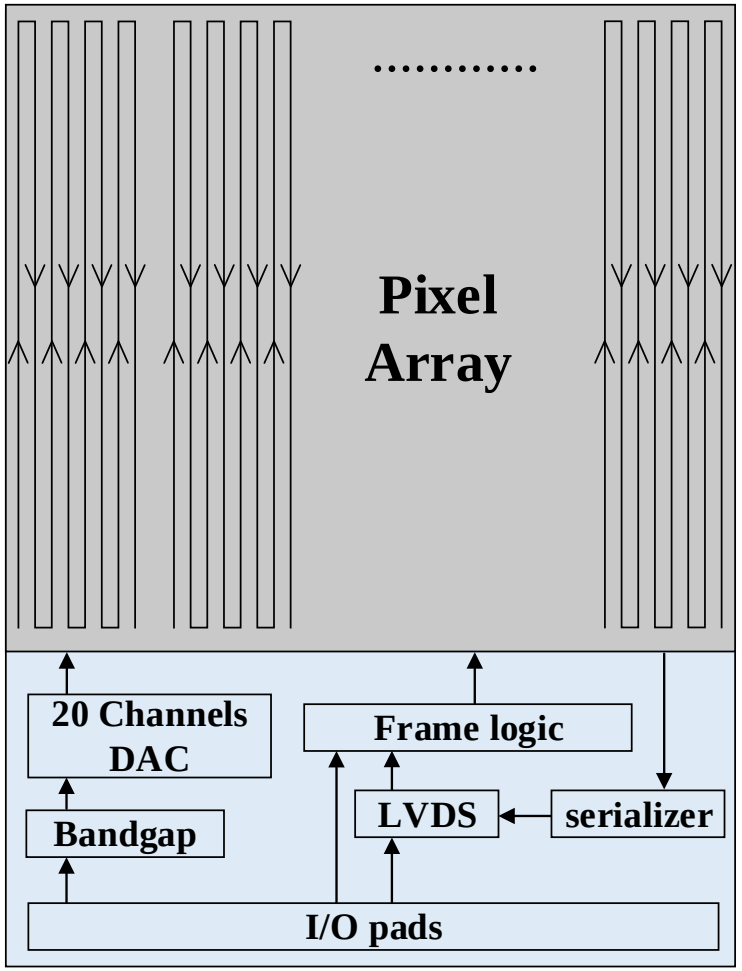
Python算法验证效果图



一个典型事例

芯片架构

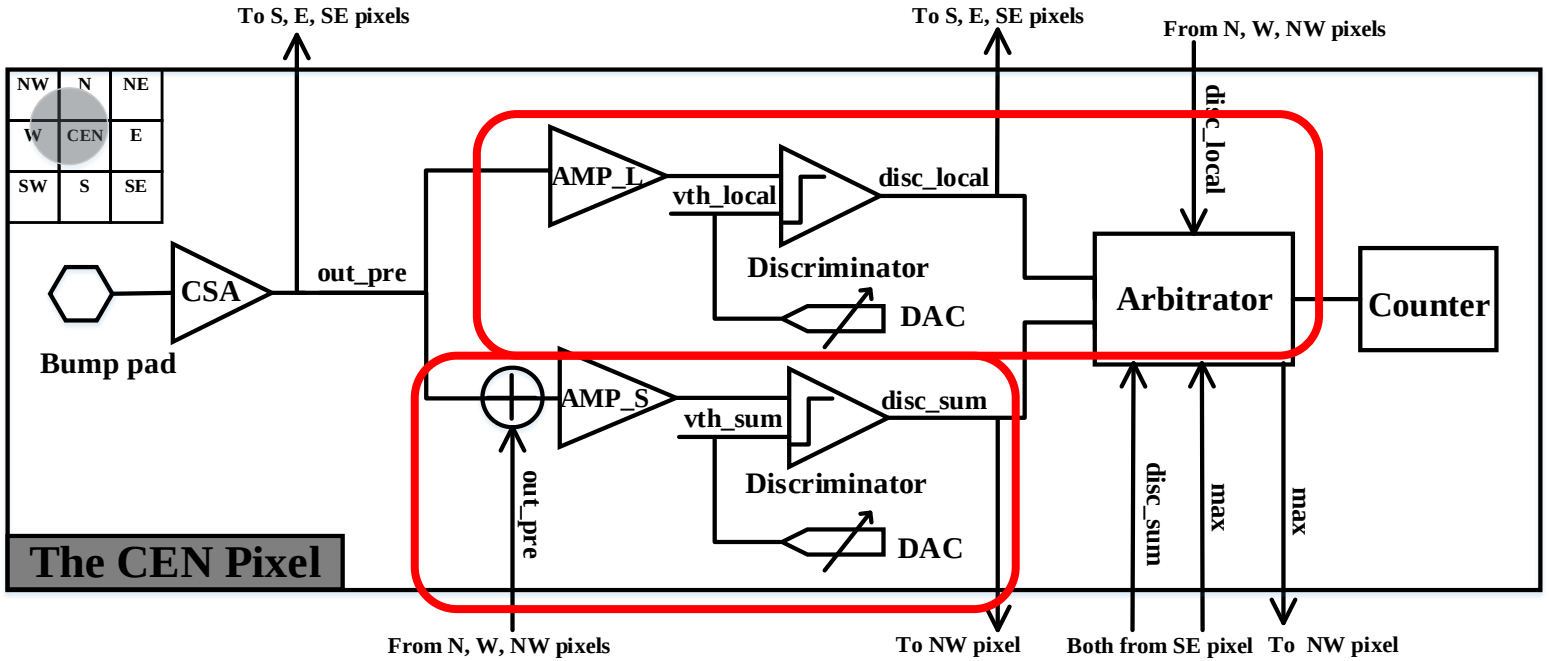
- 实现功能
  - 每帧完成对入射粒子的数字积分，以帧刷新的方式进行读出
  - 解决了小像素尺寸芯片中普遍存在的电荷共享效应
- 像素阵列灵敏区
  - 像素单元电路基于电荷前放+甄别+计数读出结构
    - 用于实现对入射信号的积分放大与甄别
    - 消除电荷共享效应的影响
- 外围电路
  - 基准电压源、多通道DAC电路、帧逻辑电路
    - 负责为像素单元电路提供偏置电压以及全局阈值
  - 读出单元和IO接口
    - 负责芯片数据的读出



HEPS-BPIX4 芯片架构

像素单元电路设计

- **解决电荷共享效应方案**
  - 像素中心仲裁：用以确定最大像素信号
  - 像素能量求和：用以确定束斑总能量是否过阈
- **模拟单元电路**
  - 前置放大器
  - 成形电路、甄别器
  - 局部阈值调节DAC
- **数字单元电路**
  - 仲裁模块、计数器链
  - 时序控制逻辑

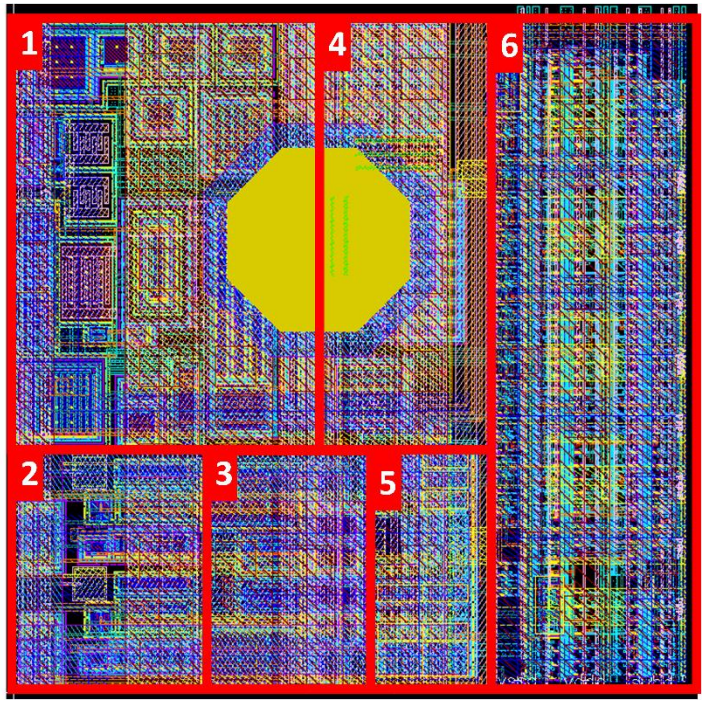


HEPS-BPIX4像素单元电路框图

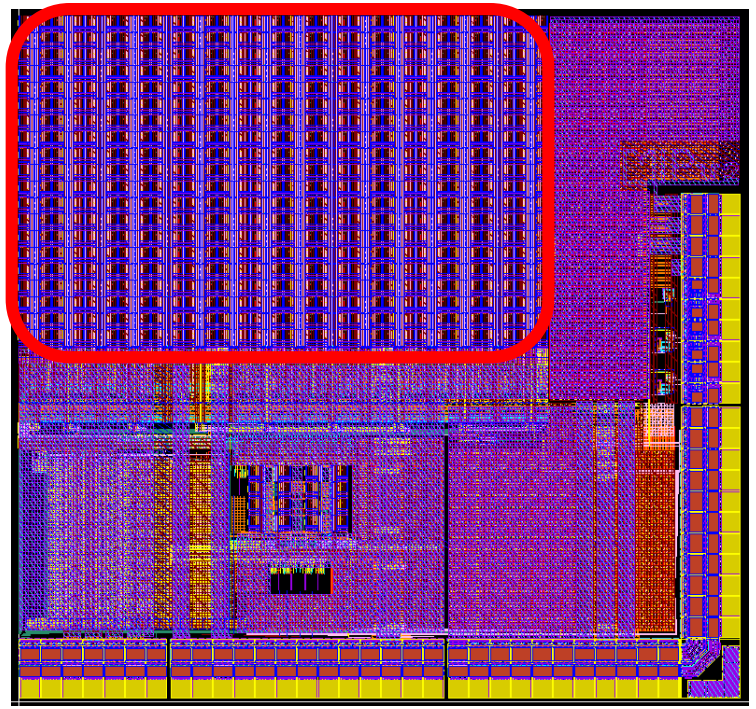
- **相比国外Medipix方案，极大降低像素间互连的复杂度，提供更优化的解决策略**

芯片版图设计

- 版图考虑
  - 需要考虑对敏感器件提供噪声保护以及寄生阻容对电路性能的影响
  - 在有限的面积中手动完成像素单元之间的互连功能
- 芯片版图
  - 像素阵列20行*32列
- 像素单元版图
  - 1 前放电路
  - 2 成形电路
  - 3 甄别电路
  - 4 DAC电路
  - 5 仲裁电路
  - 6 数字电路



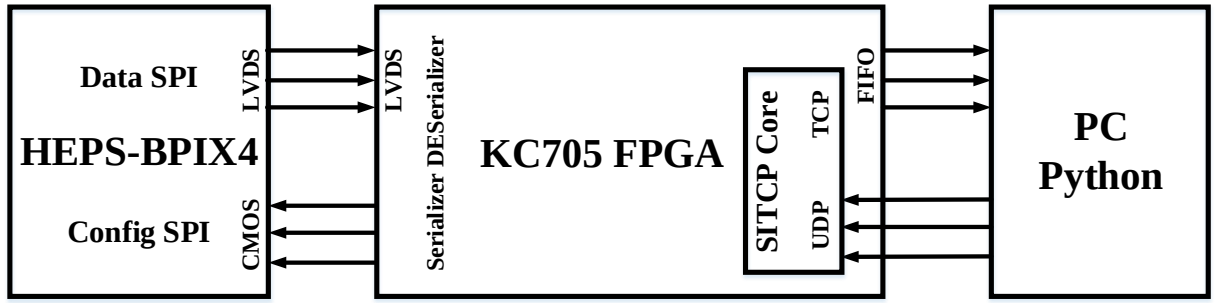
HEPS-BPIX4像素单元版图



HEPS-BPIX4芯片版图
芯片尺寸2.4mm*2.4mm

芯片测试环境

- 芯片测试系统
  - 硬件基于FPGA KC705开发板
  - 软件基于Python程序
  - 所有测试仪器与设备均由Python进行远程控制



HEPS-BPIX4芯片测试框图

- 特定需求
  - 通过网络协议控制处于同步模式的两台两通道产生器
  - 同时输出4个幅度可调的脉冲信号给芯片
  - 每组信号幅度满足高斯分布，最大程度模拟光子事例

HEPS-BPIX4芯片测试环境

初步测试

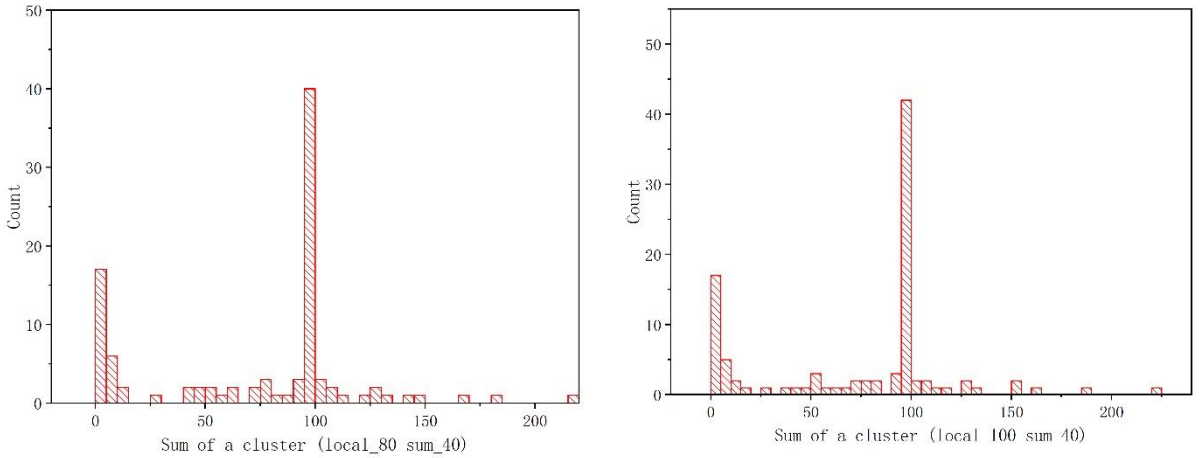
- **功能验证** 输出波形正常，前放实现初步积分放大，成形实现二级放大，甄别输出数字脉冲信号
- **性能测试** 分别从输出端噪声电压和S_curve得到等效噪声电荷，测试结果与仿真结果相符

HEPS-BPIX4芯片输出波形

HEPS-BPIX4	仿真结果	测试结果(T2-a21)
模拟噪声 (CSA+AMP)	3.98mV	5.8mV
ENC	118e- @33.5mV/ke-	121e- @48mV/ke-
S-curve噪声	6.25mV	7.5mV
ENC	125e- @50mV/ke-	150e- @50mV/ke-

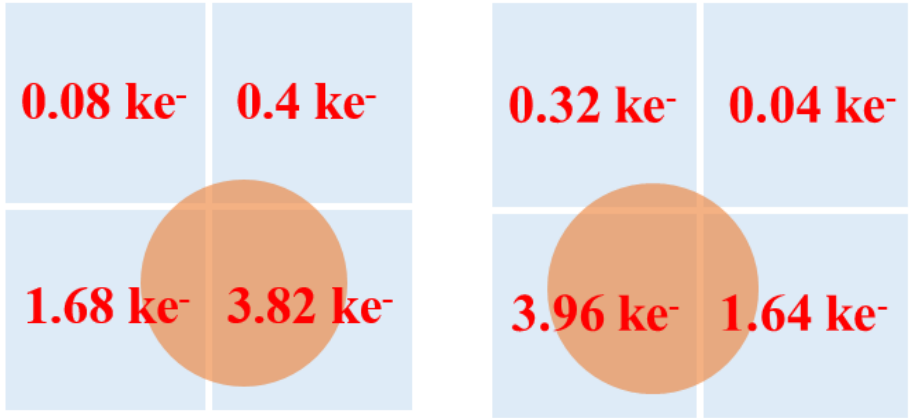
电荷共享测试

- 测试设置
  - 对4行4列的像素阵列进行测试
  - Python程序按照高斯分布给出刻度电压幅度
  - 对100组电荷共享事例在不同配置下测试



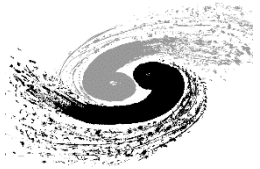
像素总计数的分布直方图

- 结果与分析
  - 多组不同阈值配置情况下测试的统计数据
  - 可得HEPS-BPIX4芯片合适的阈值配置值
  - 表明电荷共享方案实现预期效果



两种典型电荷共享事例

总结与展望



- 实现了消除电荷共享效应的像素探测器读出芯片设计
- 对该像素单元架构进行了算法级验证，实现了好于90%的正确率
- 对芯片进行了初步测试，实现了对电荷共享效应的有效抑制
- 下一步可继续完成对芯片的刻度测试与上光测试

THANK YOU