

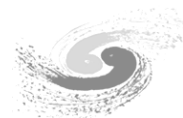
HEPS-BPIX2: The Hybrid Pixel Detector with TSV Processing for High Energy Photon

魏微, 张杰, 李贞杰, 李航旭, 丁叶,
张研, 冉璐雯, 荆小平, 董明义, 季筱璐,
孙芸华, 江晓山, 朱科军, 刘鹏, 陈元柏

中国科学院高能物理研究所
核探测与核电子学国家重点实验室

中国物理学会高能物理分会
第十三届全国粒子物理学术会议

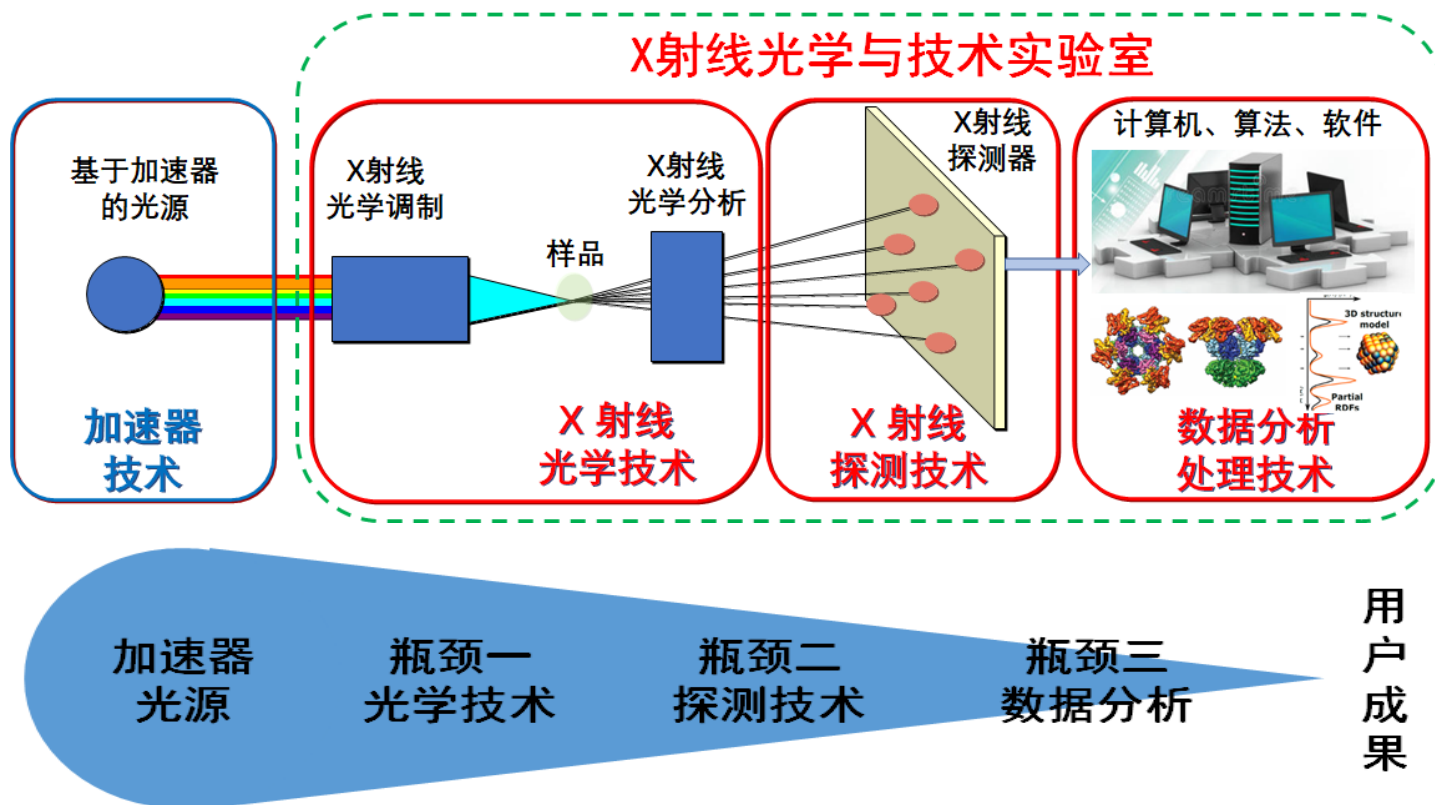
2021-08-16



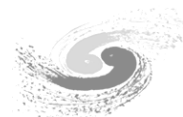
- 背景介绍
- 读出芯片简介
- 探测器系统原型样机
- 模块与样机测试
- 总结与展望

高能同步辐射光源

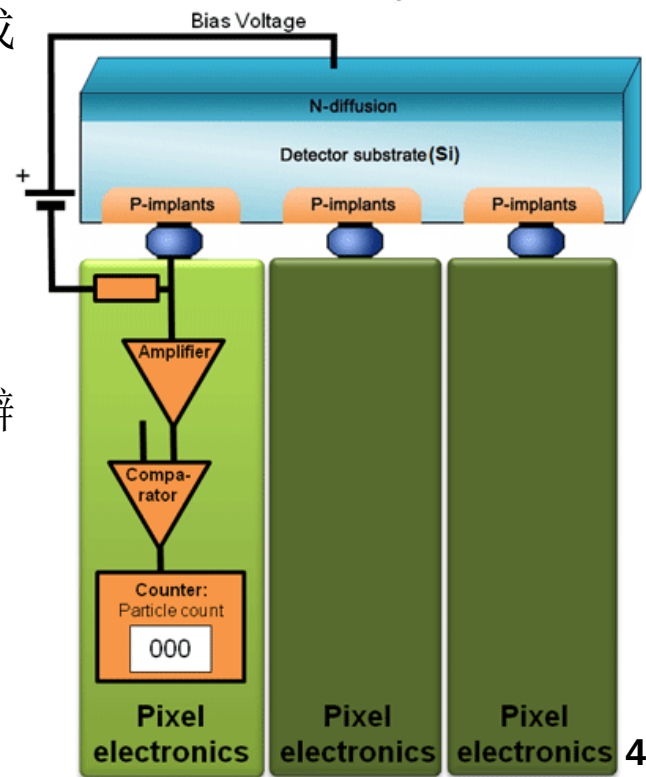
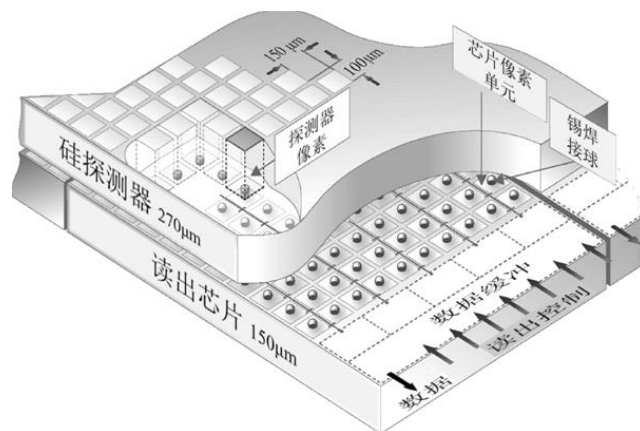
- 第四代同步辐射光源
 - 2021年6月28日,首台科研设备安装,标志着这一大科学装置正式进入设备安装阶段

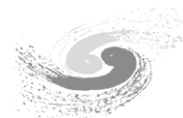


光子计数型探测器



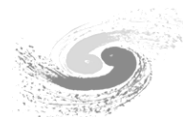
- 光子计数技术来源于高能物理领域
- 直接成像
 - 避免闪烁体造成的X射线散射，无暗噪声的影响，无需苛刻的温度控制和湿度控制系统，可靠性强，能满足大规模应用需求
 - 传统的CCD成像系统采用的是间接成像技术，不仅降低了X光的转换效率，而且由于可见光的散射导致成像空间分辨率的降低
- 混合型封装
 - 可更换成不同的探测材料
- 单像素电压阈值控制
 - 通过对阈值电压的控制，可以实现X射线的能量分辨
 - 通过刻度阈值，将微弱的噪声屏蔽掉，提高了探测的动态范围和成像信噪比





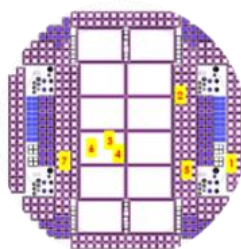
- 背景介绍
- 读出芯片简介
- 探测器系统原型样机
- 模块与样机测试
- 总结与展望

读出芯片简介



BPIX读出芯片基本参数

Pixel Cell Size	150 μm $\times$ 150 μm	Frame rate	100~1kHz
Pixel array	72col $\times$ 104row	Energy range	8keV~20keV
Operation mode	Counting	Counting depth	20bit
ENC	<200e	Thres. Dispersion	<200e
Estimate power	<50 μW /pixel	Total power diss.	400mW



2012.7

初始设计

技术研发

2013.7

Parameters	Specifications	BNL PIN Sensors	ME PIN Sensors
Dark current(DC) @100V, RT	<100pA/mm ²	17.7pA/mm ²	14pA/mm ²
Capacitance(C) (pixel to substrate)	<120fF/pixel	10fF/pixel	10fF/pixel
Capacitance(C) (pixel to pixel)	<120fF/pixel		
Full depletion voltage(FDV)	<50V	<50V	~35V
Breakdown voltage(BV)	>150V	>150V	>150V

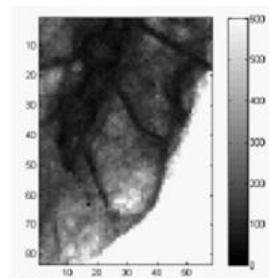
2014.2

参数优化

超过美国
BNL的同类
器件水平

8 $\times$ 104 $\times$ 72
大面阵像素
阵列研制

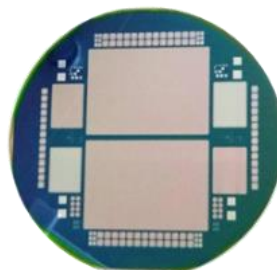
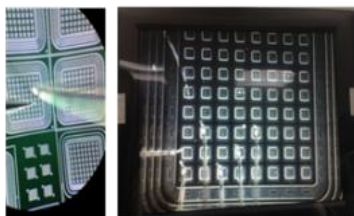
2014.7



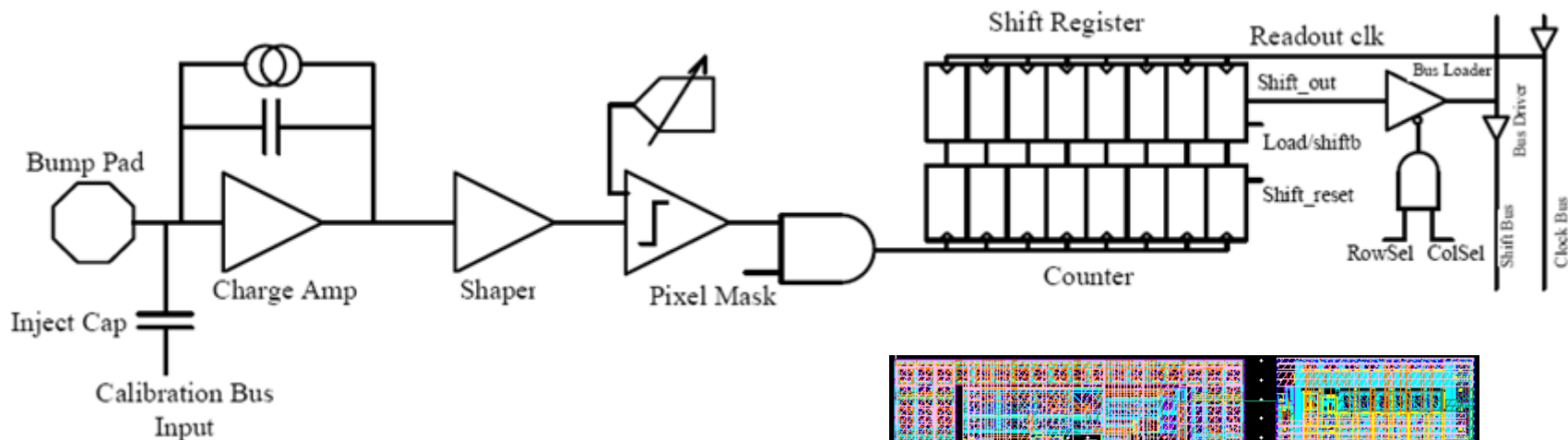
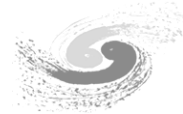
2015.1

上机验证
同步辐射光
源上机实验

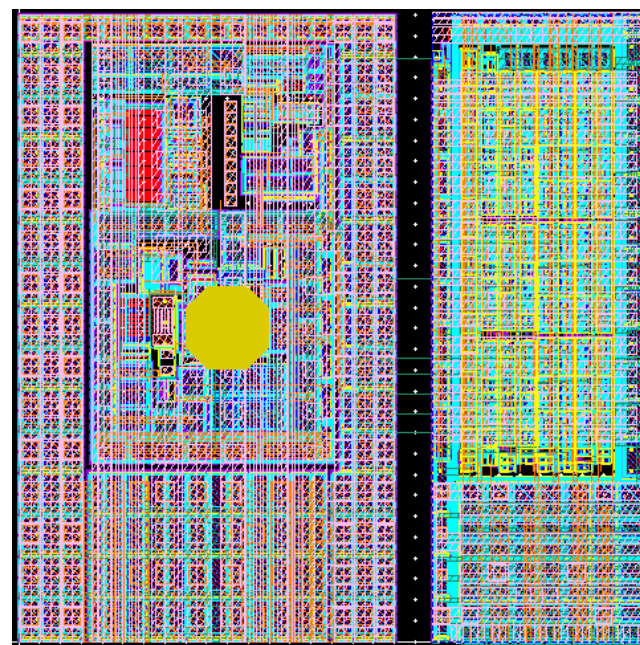
国内自主研发



像素内的处理和变换



- 电荷灵敏前放
 - 高信噪比
- 甄别器
 - “零噪声”探测
- 计数器
 - $\sim 100\text{MHz}$ 累加
- 移位读出
 - $\sim \text{Hz}$ to $\sim \text{kHz}$ 的数据帧

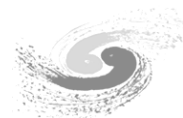


Layout of the Pixel $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$

Process: $0.13\mu\text{m}$, 1P8M, Mixed Signal

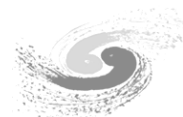
[W. Wei, et al. \(2015\). NSS/MIC](#)
[W. Wei, et al. \(2016\). NIMA 835](#)

Outline

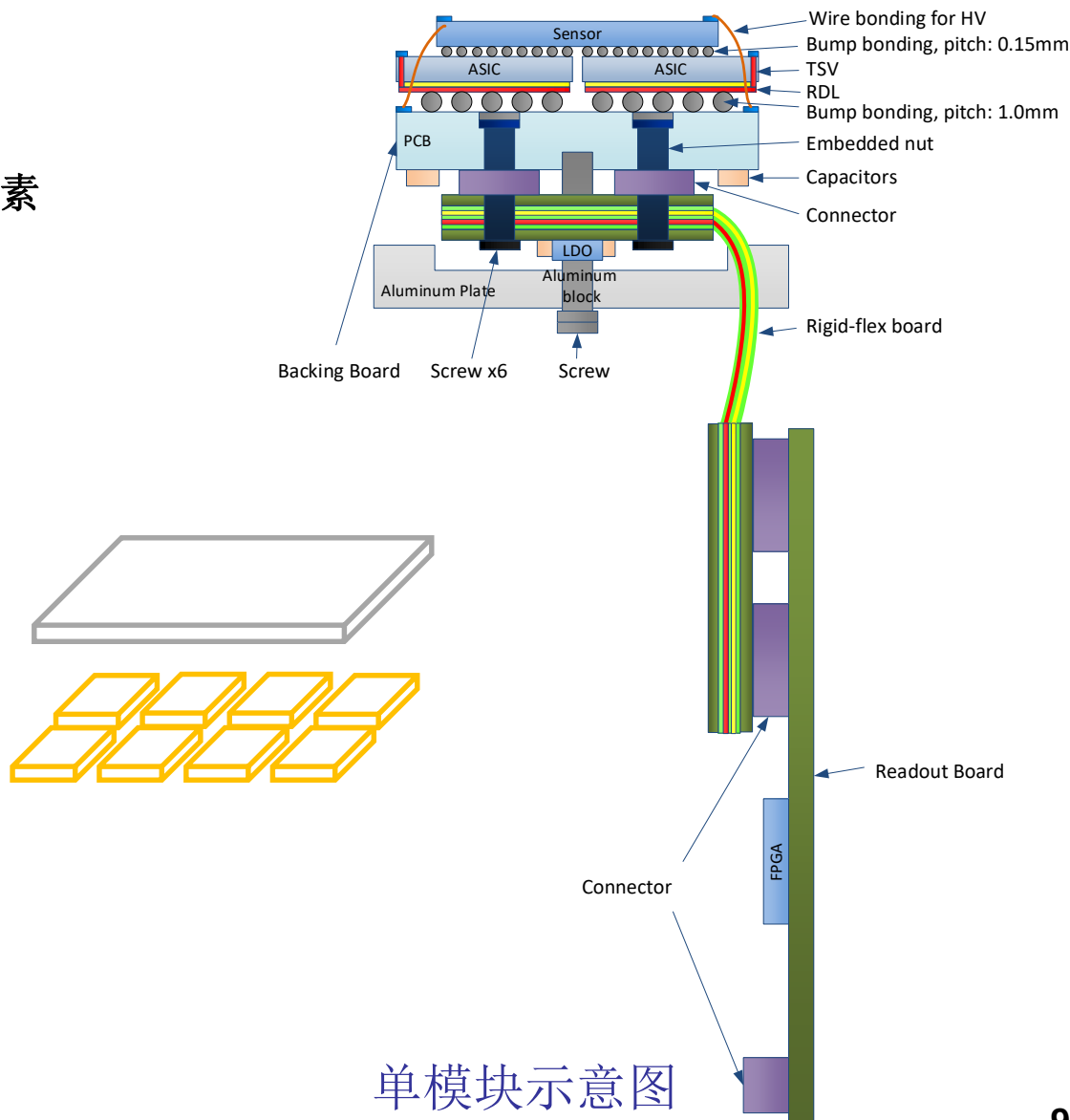


- 背景介绍
- 读出芯片简介
- 探测器系统原型样机
- 模块与样机测试
- 总结与展望

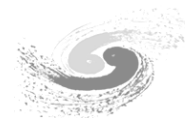
前端模块集成



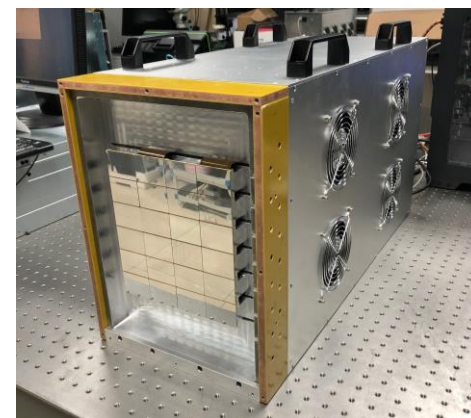
- 单传感器
 - 288列 $\times$ 208行
 - 59904个 $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ 像素
 - 面积: $4.50\text{cm} \times 3.26\text{cm}$
- 单读出芯片
 - 72列 $\times$ 104行
 - 面积: $1.7\text{cm} \times 1.1\text{cm}$
- 单模块组装:
 - 4 x 2 阵列倒装读出芯片
 - 面积: $4.565\text{ cm} \times 3.415\text{ cm}$
- 多模块拼装
 - 4 x 6 模块拼装
 - 1.4M 像素数
 - 面积: $18.08\text{ cm} \times 20.58\text{ cm}$



HEPS二维像素阵列探测器研制

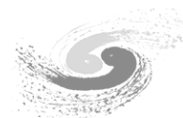


	一代样机 (1) (2015-2016)	二代样机 (2) (2017-2018)	三代样机 (3) (2019-今)
模块数/个	6	16	24
像素/个	360K	约1M	1.4M
模块封装	Wire bonding	Wire bonding	Through Silicon Via (TSV)
死区面积	26.3%	26.3%	11.8%
读出电路	Spartan6 + SFP	Kintex7 + DDR3 + Nano-Pitch I/O™	Kintex7 + DDR3 + Nano-Pitch I/O™ UltraScale Plus Kintex + NVMe SSD
与DAQ接口	1G Ethernet x12	1/10 G Ethernet x4	40G Ethernet
功耗@1.2KHz	100W	370W	~500W

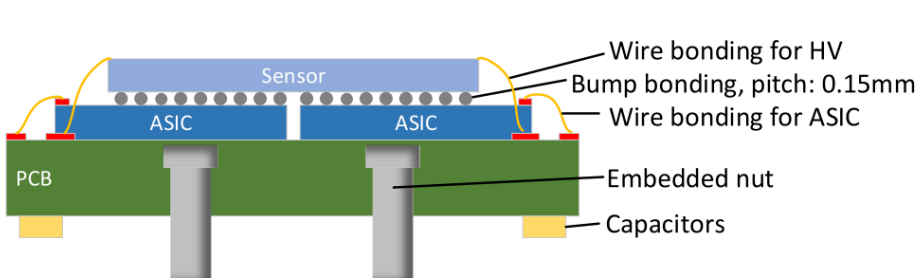


(1) [J. Zhang et al 2017 JINST 12 C01041](#) (2) [J. Zhang et al 2020 NIMA V958](#) (3) [J. Zhang et al 2020 NIMA V980](#)

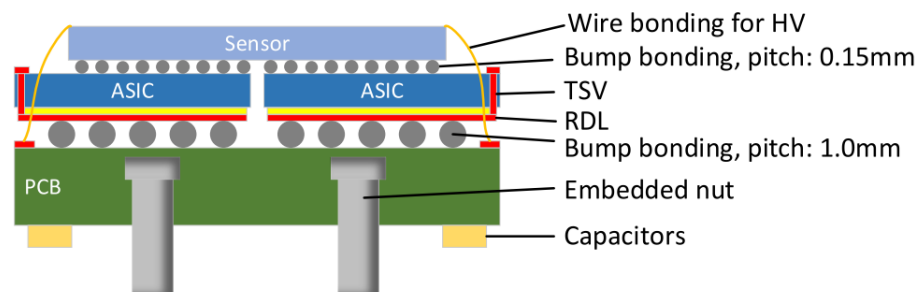
HEPS二维像素阵列探测器研制



	一代样机 (2015-2016)	二代样机 (2017-2018)	三代样机 (2019-今)
模块封装	Wire bonding	Wire bonding	Through Silicon Via (TSV)
死区面积	26.3%	26.3%	11.8%



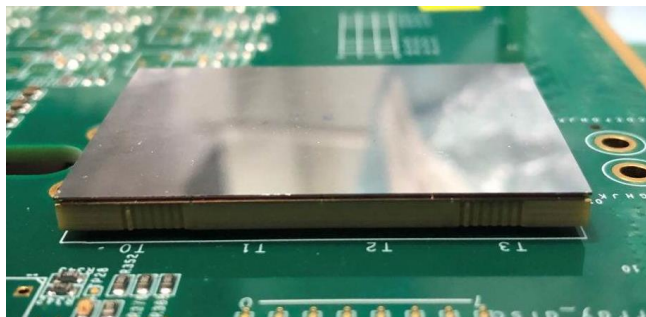
Wire bonding



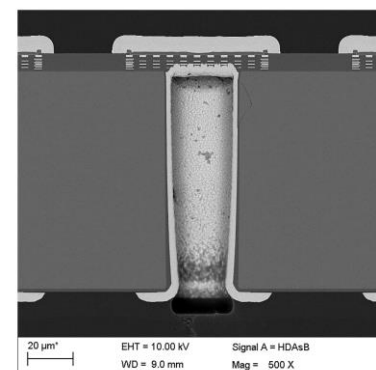
Through Silicon Via (TSV)



Wire bonding模块

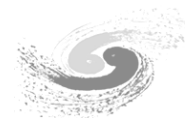


TSV模块

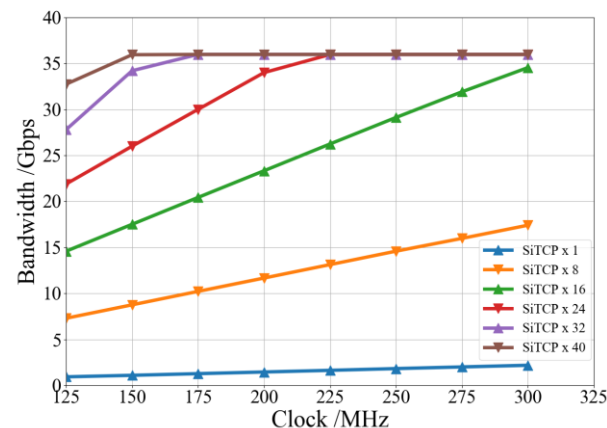
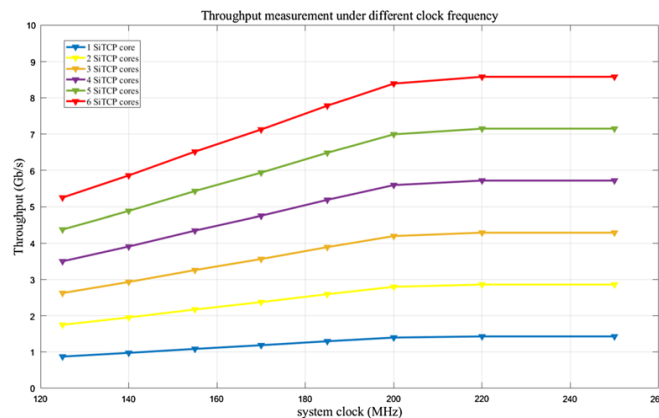
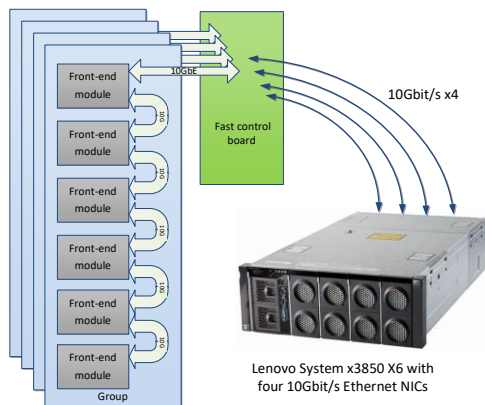


TSV截面图

HEPS二维像素阵列探测器研制



	一代样机 (2015-2016)	二代样机 (2017-2018)	三代样机 (2019-今)
读出电路	Spartan6 + SFP	Kintex7 + DDR3 + Nano-Pitch I/O™	Kintex7 + DDR3 + Nano-Pitch I/O™ UltraScale Plus Kintex + NVMe SSD
与DAQ接口	1G Ethernet x12	1/10 G Ethernet x4 (1)	40G Ethernet (2)
功耗@1.2KHz	100W	370W	<500W

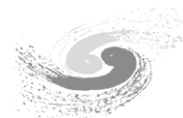


基于FPGA硬件的10G以太网TCP/IP的可靠数据传输研究，完成8.57Gbps的持续传输

(1) H. Li, et al. (2019). RDTM

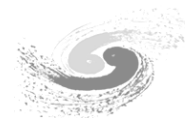
基于FPGA硬件的40G以太网TCP/IP的可靠数据传输研究，完成35.97Gbps的持续传输

(2) Y. Cai, et al. (2021). RDTM



- 背景介绍
- 读出芯片简介
- 探测器系统原型样机
- 模块与样机测试
- 总结与展望

模块测试

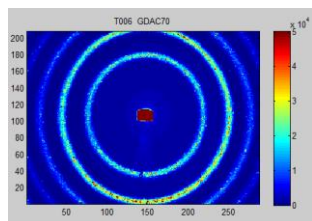


1. 电子学刻度

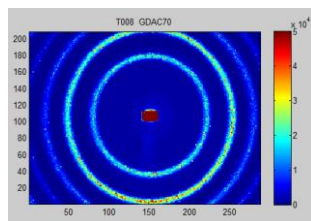
噪声和阈值比较

module	ENC	ENC_std	thres	thres_std
TSV1	17 mV	1 mV	245 mV	5 mV
TSV2	16 mV	2 mV	232 mV	6 mV
Wire-bonding1	18 mV	2 mV	272 mV	4 mV
Wire-bonding2	18 mV	1 mV	266 mV	6 mV

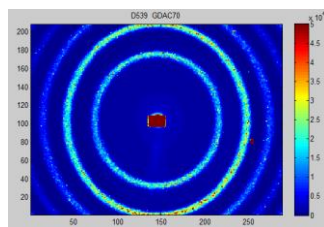
3. 粉末衍射成像



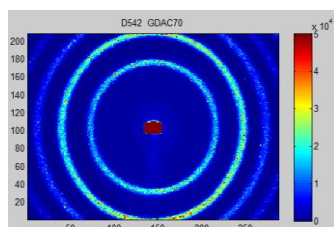
TSV1



TSV2



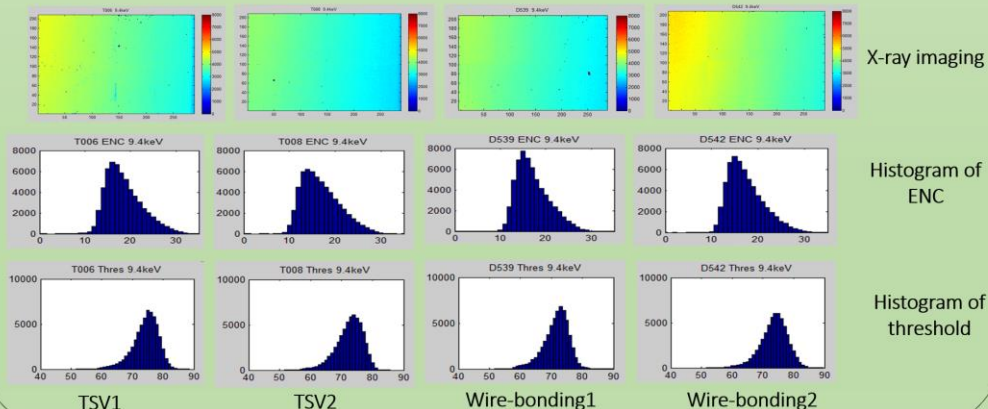
Wire-bonding1



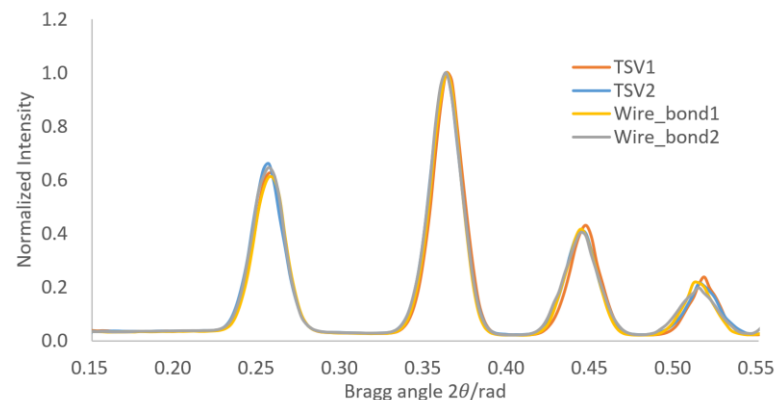
Wire-bonding2

2. X-ray responding

under an Au X-ray tube powered at 9.4 kV



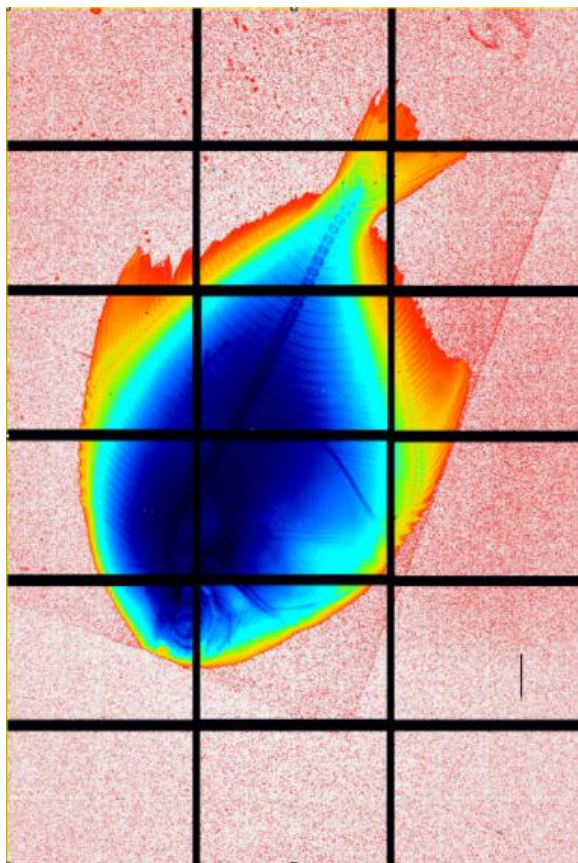
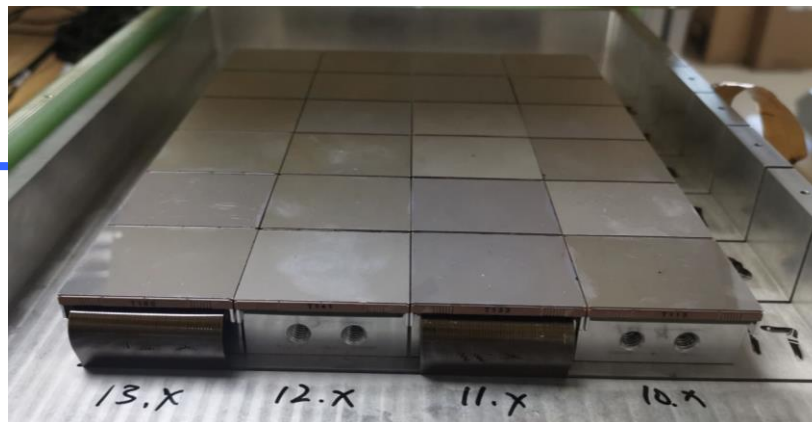
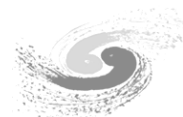
完成了模块的束流测试和刻度工作，与传统打线工艺相比，TSV工艺模块的各项性能指标保持一致。



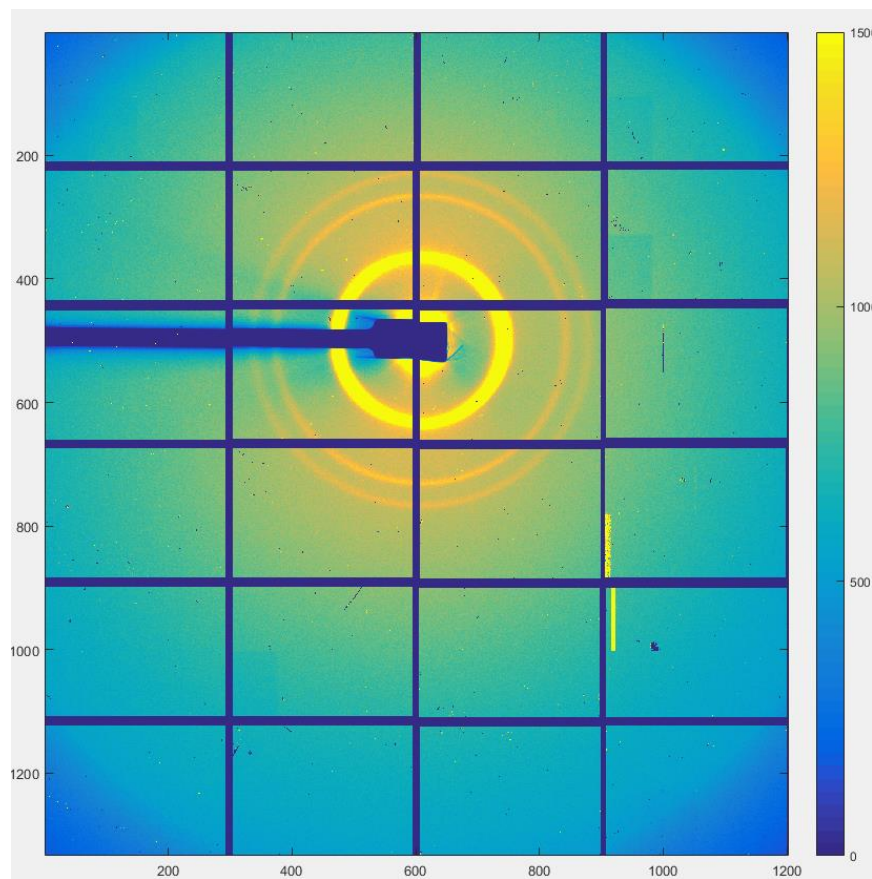
打线模块与TSV模块粉末衍射性能比较

The diffraction rings of the powder sample LaB_6 exposed under the 1W2B beamline of BSRF for 10s at 12keV.

样机测试

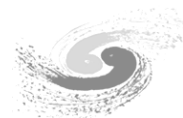


X光成像



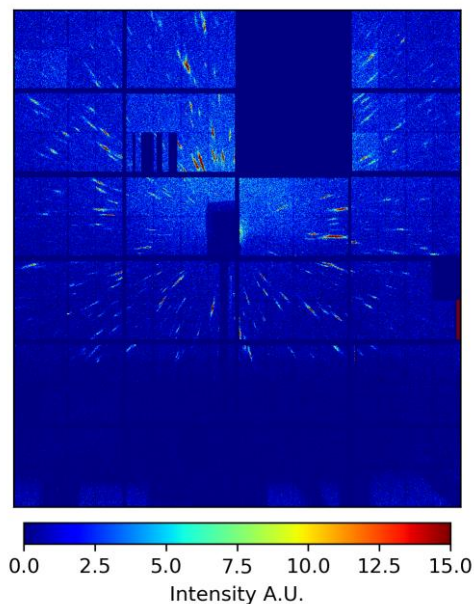
粉末衍射成像

用户实验-3D打印-白光劳厄衍射

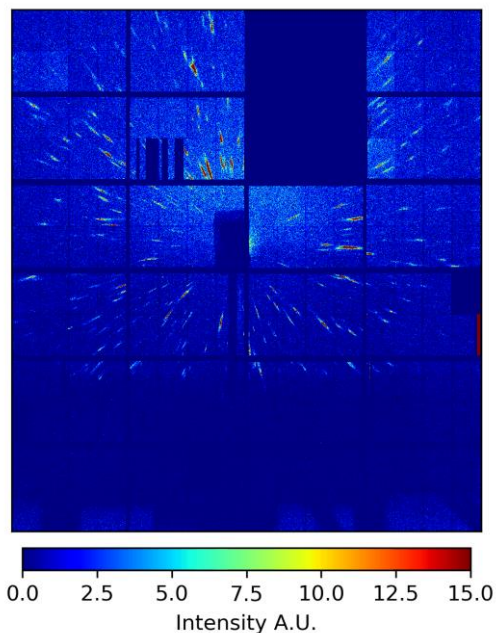


铺粉末 扫描速度为：3 mm/s 激光功率：40%

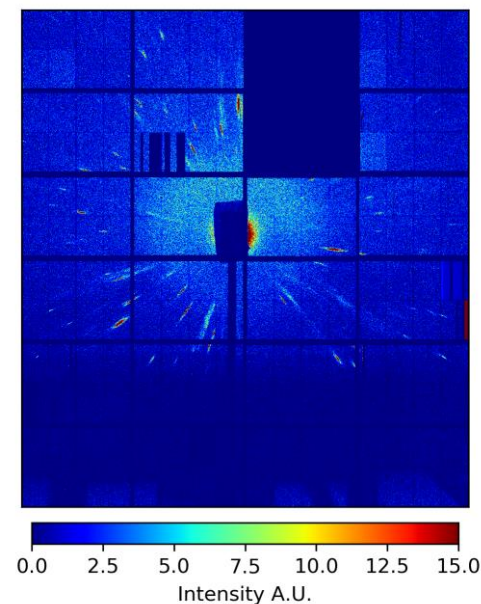
激光开启前：



激光开启过程中：

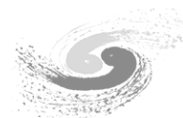


凝固后：



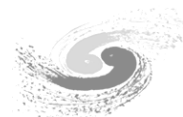
激光加载过程中，衍射斑点无规律的飘动
原因：X射线探测区域内粉末的飞溅

打印结束后，衍射点减少，但依然是多晶



- 背景介绍
- 读出芯片简介
- 探测器系统原型样机
- 模块与样机测试
- 总结与展望

总结与展望



在光子计数型ASIC的基础上

像素单元尺寸	150um
帧刷新率	1kHz
单芯片通道数	7488
计数深度	20bit
等效输入端噪声	116e
探测能量范围	8keV~20keV

工程化



R&D

多阈值
(4个阈值)

高帧频
(高于10kHz
帧刷新率)

积分型

小尺寸
(55um)

解决关键技术问题：

- 多轮探索，优化改进TSV工艺，提升了模块组装良率，大大减少了模块间拼缝和死区
 - 死区 $1.6\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ ，与主流产品水平相同
 - 整机性能全面超过主流产品水平
 - 优化刻度方案，将探测器最低无噪声能量压低至7keV以下
 - 加装前端水冷结构，提高了模块和整机运行的可靠性
- 完成1.4M TSV样机并交付用户（2021.1）
- 正式列入HEPS工程序列
- 目前已明确三台探测器任务
- 硅像素探测器单模块交付线站用户使用，已开始获得用户论文产出
- Yuan Fang et al 2021 J. Phys.: Condens. Matter

已通过光源重点研发计划课题一验收

- 模组灵敏面积： $1.92 \times 1.92\text{cm}^2$
- 2D位置分辨：150um
- 单光子能量分辨： $<20\%$ @8keV~16keV
- 单光子时间分辨： $\sim 20\text{ns}$

专家给予高度评价：

“.....在国际上首次实现了同时测量入射X射线光子的能量、时间和位置信息，为.....等先进实验方法的实现提供了强有力的技术支持。”

已通过光源重点研发计划课题二验收

- 模块面积： $9.68 \times 9.68\text{mm}^2$
- 像素单元尺寸： $55\mu\text{m} \times 55\mu\text{m}$
- 其他性能与工程样机保持一致

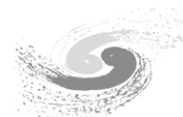
专家给予高度评价：

“填补国内空白，达到国际先进水平”

已列入HEPS工程序列

- 初步明确了两台探测器任务

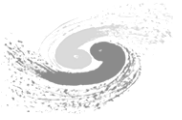
致谢



- 本项目得到了高能同步辐射光源（HEPS），先进光源技术研发与测试平台（PAPS），国家自然科学基金委和核探测与核电子学国家重点实验室的支持。

Thank you !

Backup



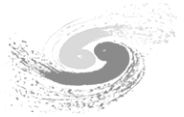


Table 1

Yield measured on all BPIX wafers before and after the TSV process.

Wafer no.	Lot No. D942804							
	03	04	06	07	08	09	11	12
%KGD (Known-Good-Die) before TSV	87.88	84.85	90.91	89.39	87.12	82.58	90.15	91.67
%KGD after TSV	59.09	47.73	56.82	52.27	59.09	57.58	62.12	52.27