



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



中国科学院微电子研究所  
INSTITUTE OF MICROELECTRONICS OF THE CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院  
SIMT 上海微系统与信息技术研究所



上海科技大学  
ShanghaiTech University

# 面向自由电子激光的像素探测器读出芯片 HYLITE200F及其原型前端模块的性能测试

贾西宁<sup>1</sup>, 李木槿<sup>2</sup>, 魏微<sup>2</sup>, 张杰<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 上海科技大学

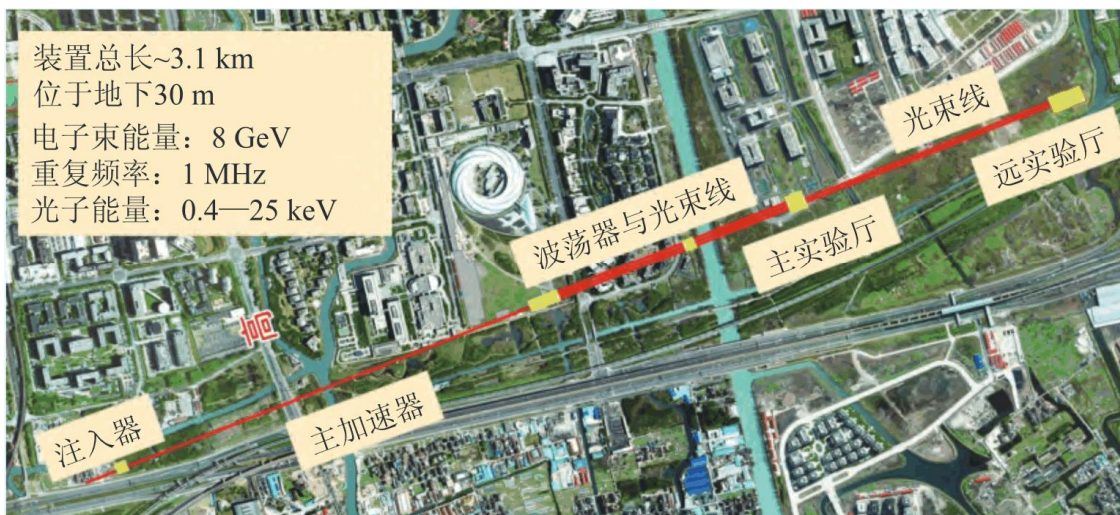
<sup>2</sup> 中国科学院高能物理研究所

# 内容提要



- SHINE与 STARLIGHT探测器
- HYLITE读出芯片概况
- 芯片测试
  - 单芯片测试
  - 原型模块测试
- 总结

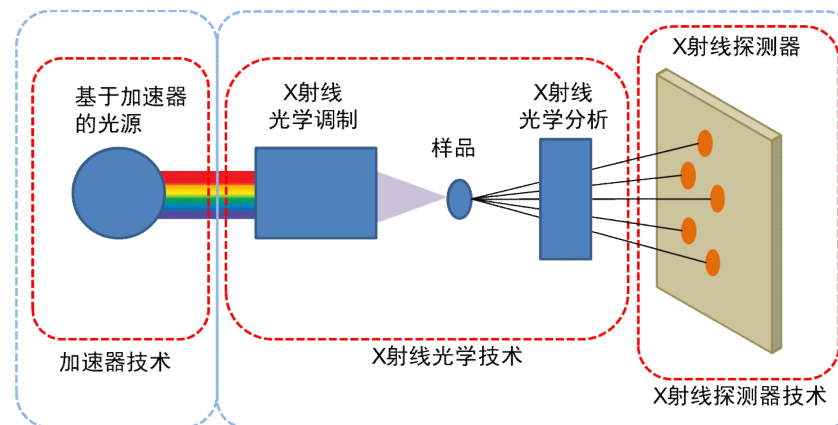
# 上海硬X射线自由电子激光装置SHINE



SHINE俯视图

- 上海硬X射线自由电子激光装置(Shanghai High repetition rate XFEL and Extreme light facility, SHINE)是我国首台工作在硬X射线能区的XFEL装置, 能产生极高质量的光脉冲:

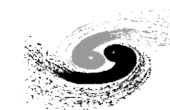
- 高亮度、短脉冲、全相干、高重复频率



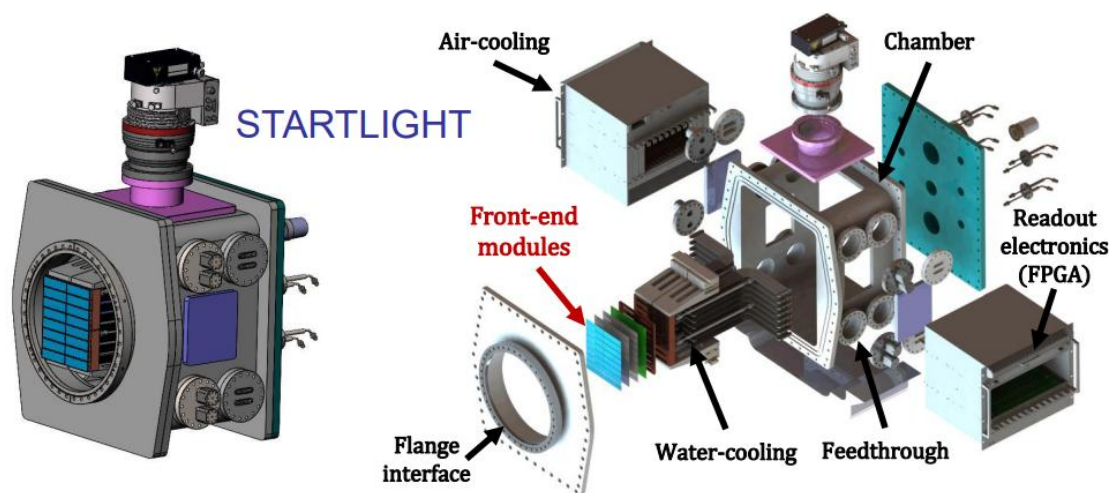
先进光源装置的基本构成

光束线站技术的发展明显滞后于光源加速器技术, 其中尤以探测技术为代表。即使国内外最先进的探测器, 也不能完全匹配光源的高性能指标。SHINE作为新一代先进光源的代表装置之一, 对像素探测器系统提出了更高的要求。

# STARLIGHT像素探测器



- STARLIGHT(SemiconducTor Array detectoR with Large dynamlc ranGe and cHarge inTegrating readout) 是针对SHINE的需求自主研发的一款具有超高帧频、大动态范围的积分型像素探测器
- 探测器基本结构：前端模块、真空腔、后端读出电子学、散热系统
- 前端模块是核心，前端读出芯片（ASIC）又决定了前端模块的大部分性能

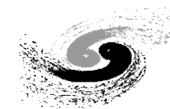


STARLIGHT探测器基本结构

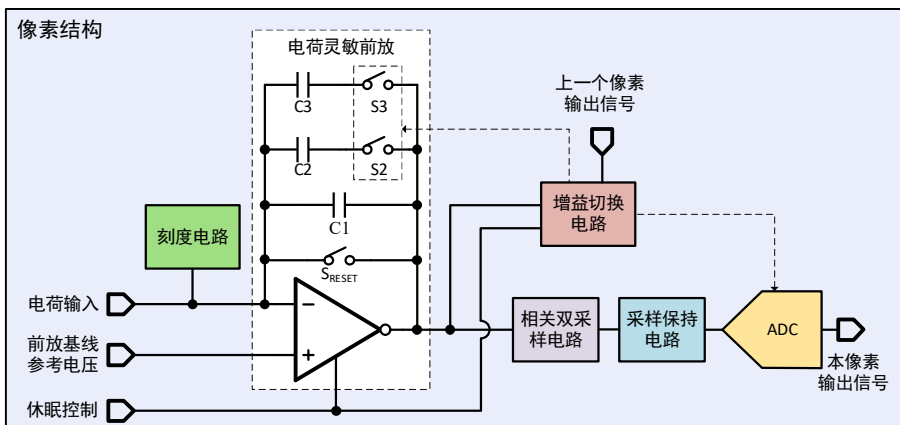
项目	指标	备注
量子效率	90%	7 keV光子能量下
能量范围	5~25 keV	
输入动态范围	1~10 <sup>4</sup> 光子 @12keV	单光子分辨
帧刷新率	10 kHz	连续读出
像素尺寸	200 μm×200 μm	最终目标: 100 μm×100 μm
单芯片阵列规模	64×64	最终目标: 128×128
腔体真空度	10 <sup>-6</sup> mbar	

STARLIGHT探测器设计指标

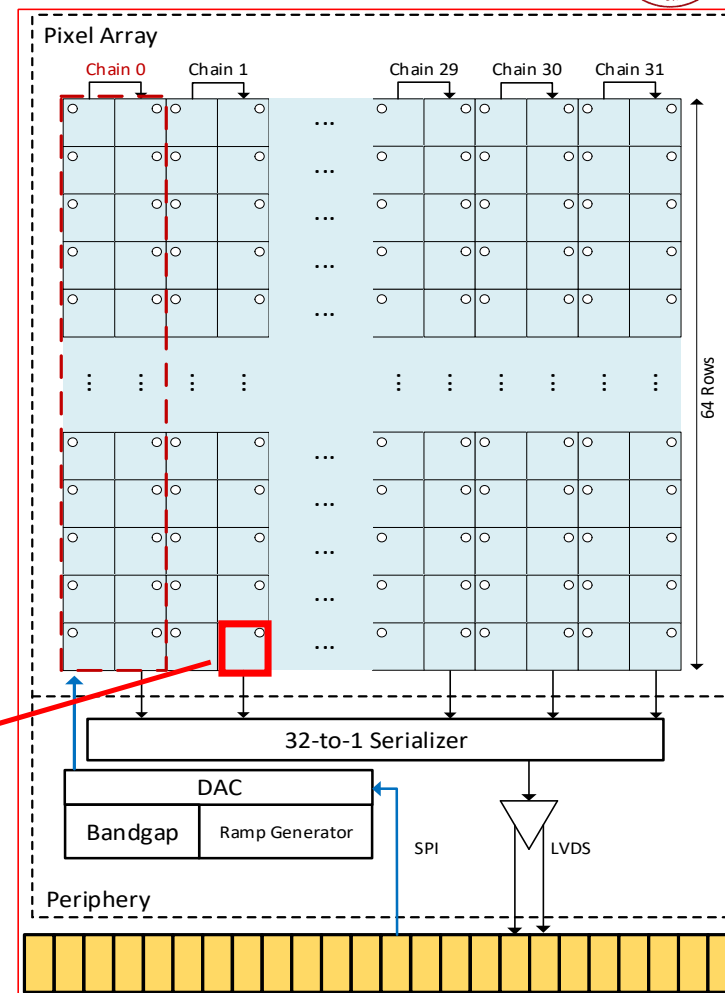
# HYLITE读出芯片概况



- HYLITE (High dYnamic range free electron Laser Imaging deTEctor) 是STARLIGHT探测器的前端读出ASIC
  - 增益自适应, 分为**高中低三档增益**, 解决大动态范围和单光子分辨的矛盾
  - 像素内ADC, 实现信号前端数字化
- HYLITE200F: HYLITE的第一款全尺寸芯片
  - CMOS 130nm工艺
  - 像素尺寸:  $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$  阵列规模:  $64 \times 64$
  - 帧刷新率: 6kHz 动态范围: 1~10000光子/脉冲@12keV



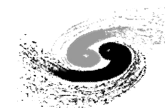
HYLITE像素结构



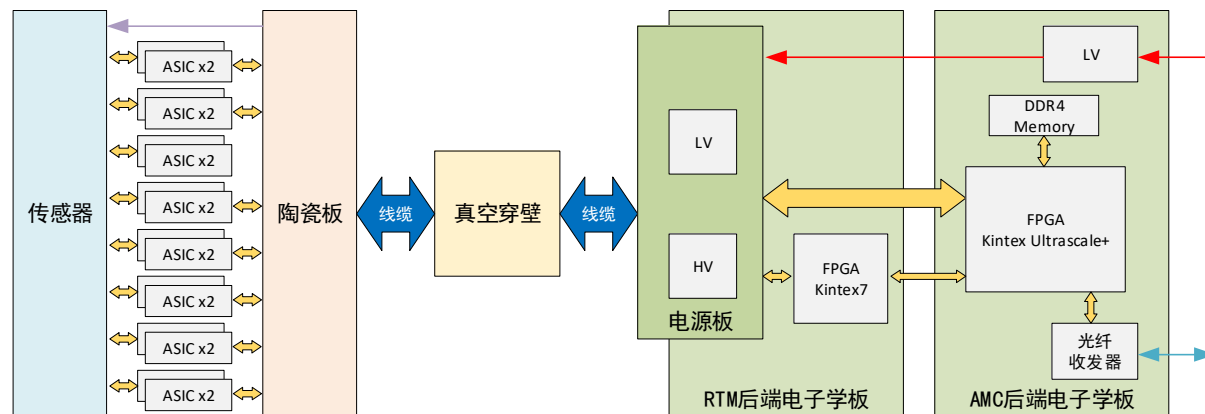
HYLITE200F芯片结构



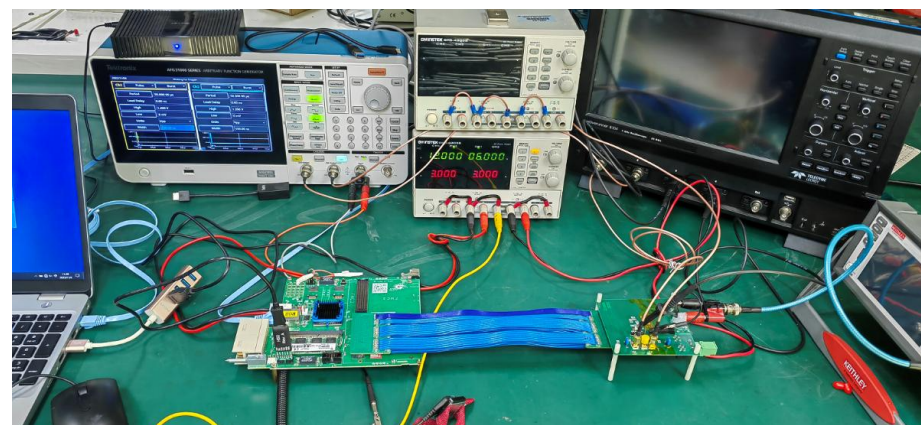
# HYLITE200F芯片测试系统



- 为了对HYLITE200F的整体性能进行准确评估，基于STARLIGHT实际采用的后端电子学读出板对芯片进行测试刻度。
- **测试难点：**像素数量多，动态范围大，刻度时需要扫描的数据量大；两种不同刻度源需要对准。
- **刻度源：**无可用XFEL束线，采用内部刻度电路作为刻度源（电压+电流）。
- **测试目标：**得到全芯片每个像素1~10000光子@12keV（等效）动态范围内的输入输出曲线，进而得到各项性能指标。

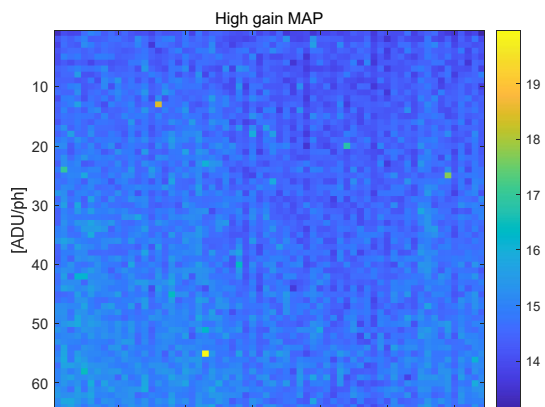
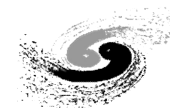


STARLIGHT电子学系统框图

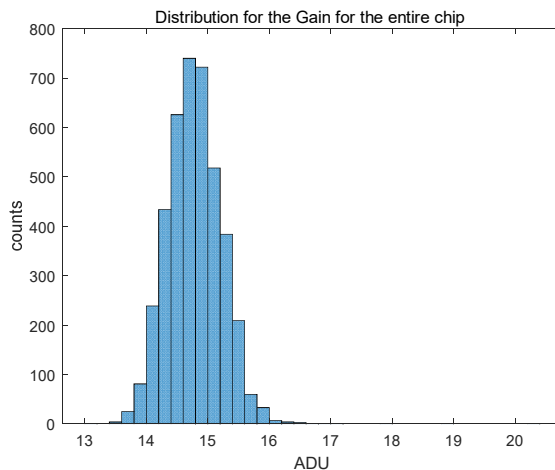


HYLITE200F芯片测试环境

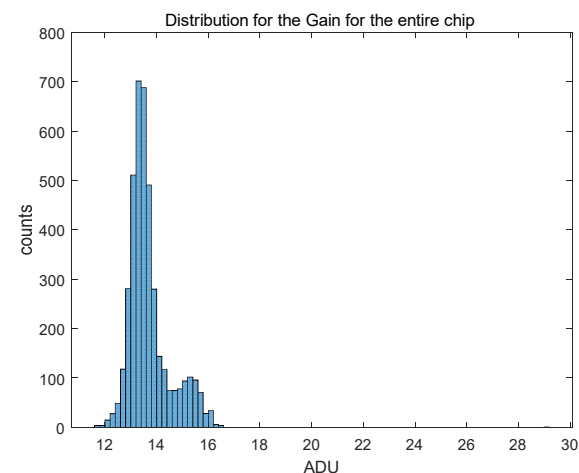
# 增益测试



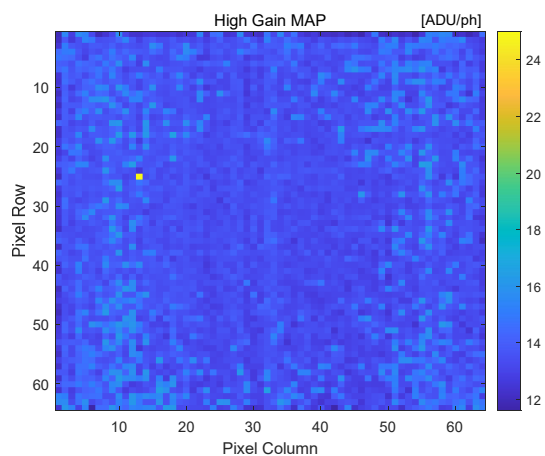
无sensor高增益二维空间分布



无sensor高增益分布统计图



有sensor高增益分布统计图

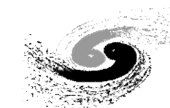


有sensor高增益二维空间分布

	高增益	中增益	低增益
无sensor	14.8 ADU/ph.	0.416 ADU/ph.	0.0413 ADU/ph.
有sensor	13.7 ADU/ph.	0.471 ADU/ph.	0.0440 ADU/ph.

- 增益测试目的：光子数重建和噪声测定的必要参数；表征芯片的性能一致性
- 无sensor的增益分布具有较好的一致性，有sensor的芯片中心部分增益偏低

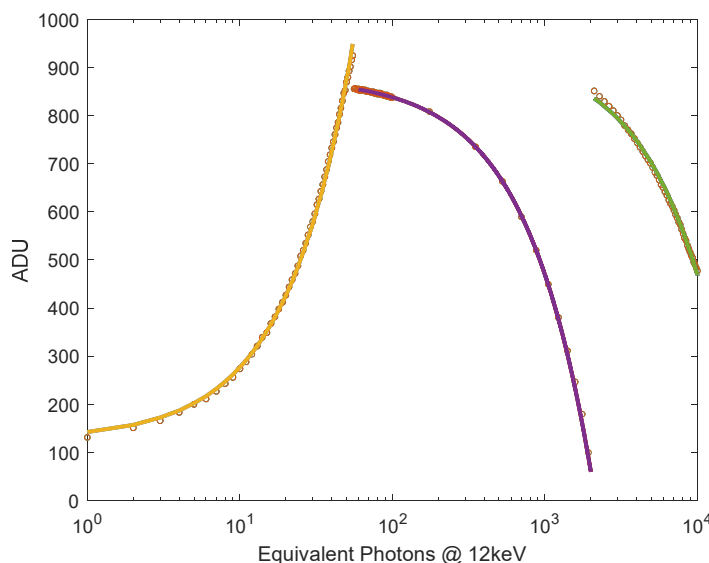
# 动态范围测试



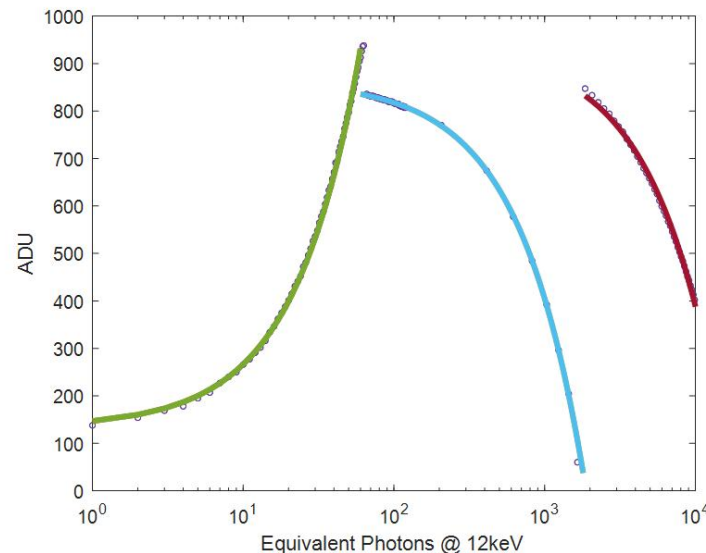
- **测试方法:**

使用电压刻度得到高中增益的拟合曲线，使用电流刻度得到中低增益的拟合曲线，通过中增益重叠部分，对低增益进行光子数重建，最终得到整体的动态范围。

- **HYLITE200F芯片及其原型模块在1万光子处仍未达到饱和状态。满足大动态范围的指标。**



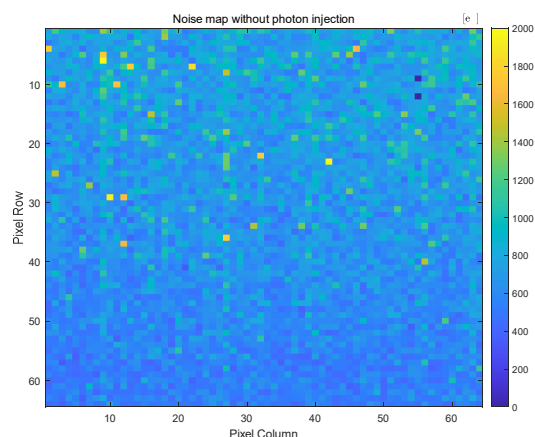
无sensor10000光子动态范围扫描



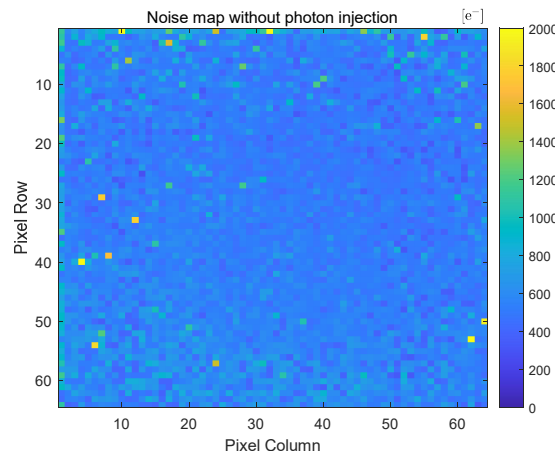
有sensor10000光子动态范围扫描



# 噪声测试



无sensor单光子附近噪声二维空间分布



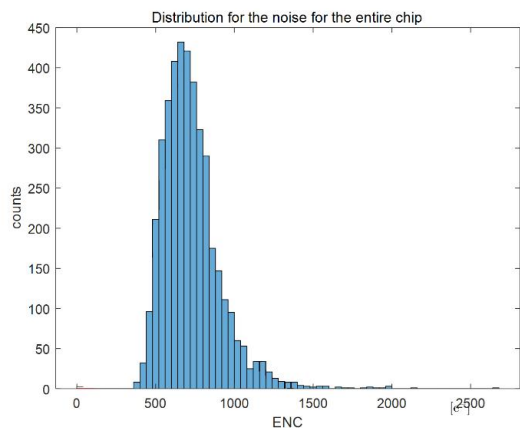
有sensor单光子附近噪声二维空间分布

- 通过公式:

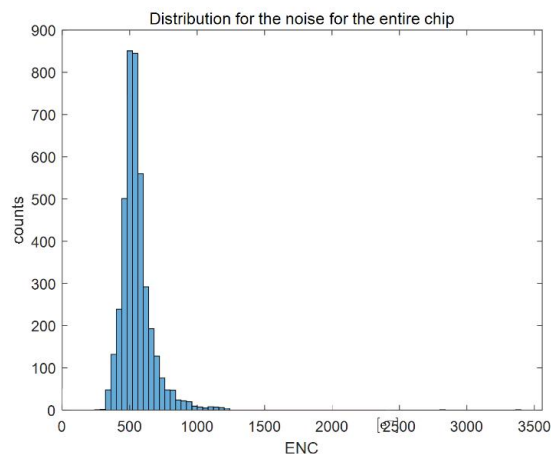
$$ENC = \frac{(\sigma/A) \times 0.533[\text{fC/ph}]}{1.602 \times 10^{-19}} e^-$$

计算得出等效输入噪声。

- 有无sensor下单光子附近的信噪比皆在6.5左右, 满足单光子分辨的要求。



无sensor单光子附近噪声统计分布

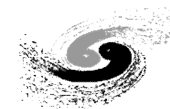


有sensor单光子附近噪声统计分布

24th May 2024

第四届半导体辐射探测器研讨会

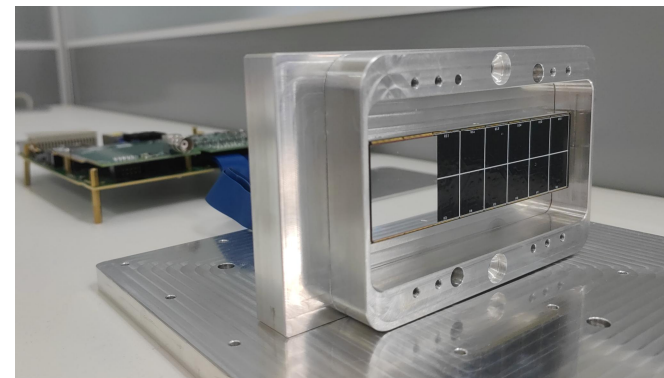
# 初步上光测试



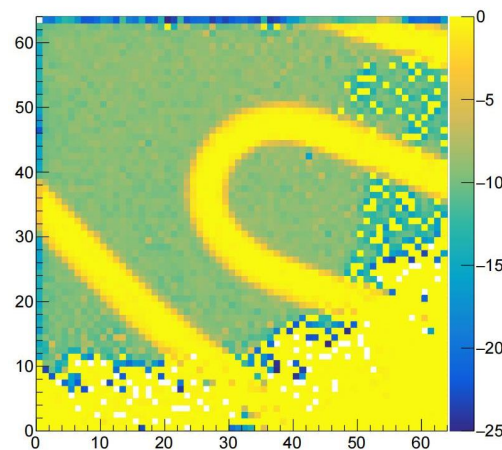
- 完成了初次倒装封装，实现了原型模块，并通过联调测试验证了完整探测器功能；
- 单ASIC模块采用X光管成像，遮挡物为回形针；
- 2×2ASIC模块采用小型X光管无遮挡物方式进行光斑成像；
- 部分像素出现失效，后续将在同步辐射上进行详细的性能测试，并对模块工艺进一步迭代。



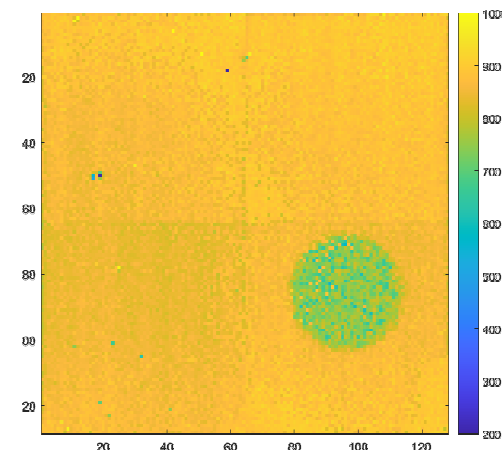
单ASIC原型模块



2×2ASIC原型模块



单ASIC模块回形针遮挡成像图



2×2ASIC模块光斑成像图

# 总结

- HYLITE200F是STARLIGHT探测器的首款全尺寸前端读出芯片。单芯片测试测试结果表明，该芯片可以实现单光子分辨与 $10^4$ 光子的大动态范围的要求，设计满足项目需求。
- 进一步完成了传感器与读出芯片倒装后的原型模块生产和性能测试。测试结果表明，倒装前后芯片的性能差距较小。联调测试验证了完整的探测器功能和读出链路的正确性。
- 后续将对模块做进一步测试，并根据测试结果，对前端模块进行迭代优化。



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



中国科学院微电子研究所  
INSTITUTE OF MICROELECTRONICS OF THE CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院  
上海微系统与信息技术研究所



上海科技大学  
ShanghaiTech University

Thank you!