

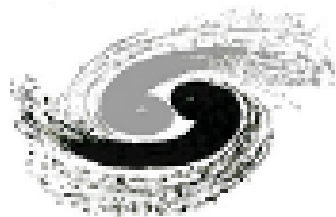
下一代高时间与高位置分辨 AC-LGAD传感器及 专用读出芯片LATRIC 研发与测试

第十二届高能物理全国会议

2026年7月13-19日

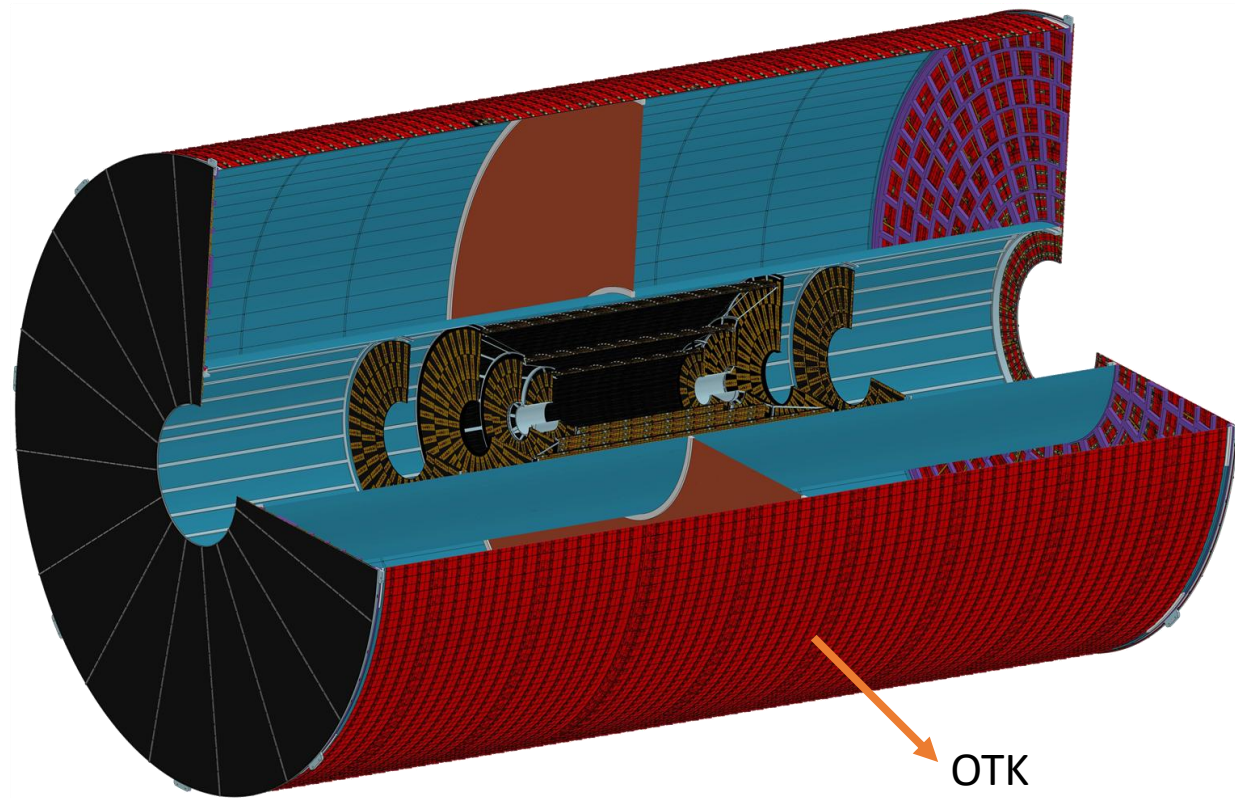
张嘉健 代表 CEPC OTK 项目组.

高能物理研究所



CEPC Outer Tracker (OTK) 探测器

- OTK 是环形正负电子对撞机（CEPC）硅径迹探测器系统的最外层子探测器
- 必须提供：
 - 高精度的空间测量（ $10\ \mu\text{m}$ ）以提升动量分辨率；
 - 精确的时间测量（ $50\ \text{ps}$ ）以用于基于飞行时间（TOF）的粒子鉴别。
- 为此OTK采用AC-coupled Low-Gain Avalanche Detector (AC-LGAD)
 - 配备专用读出芯片LATRIC

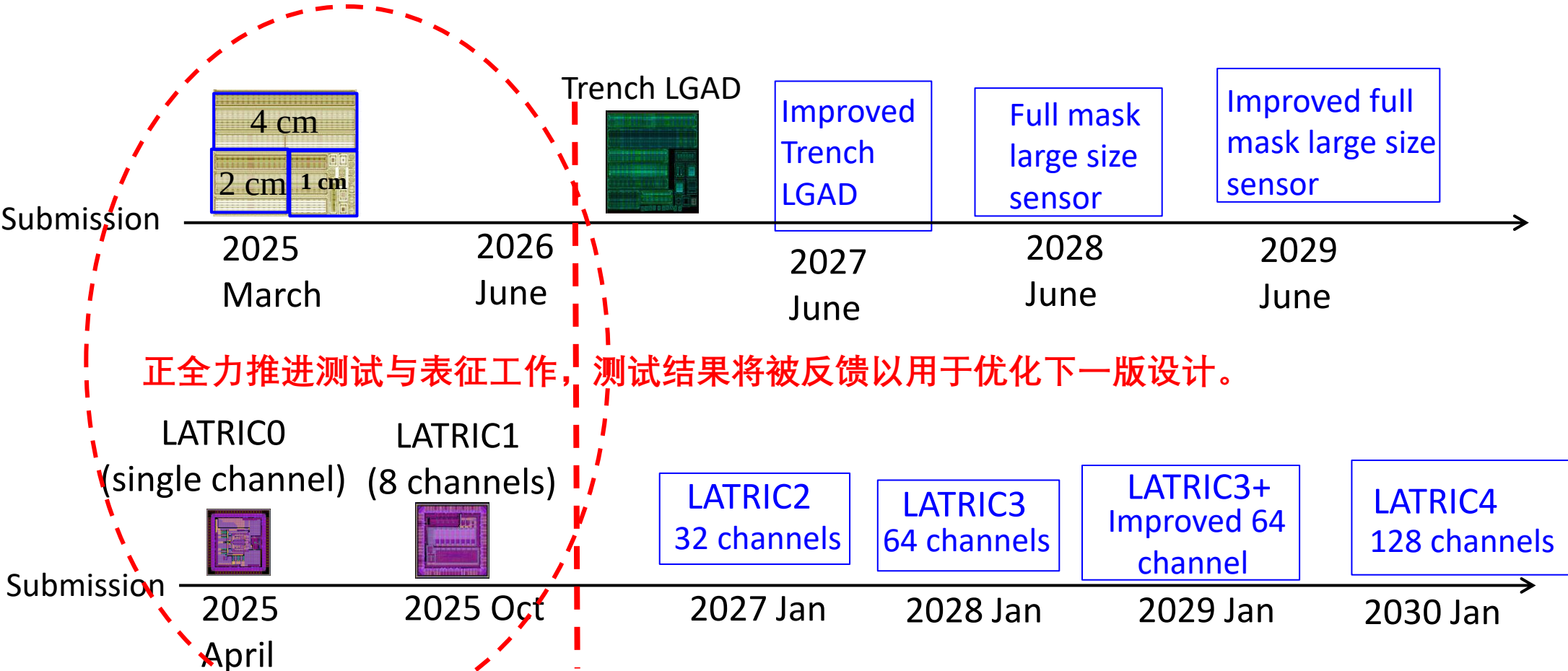


[1] **CEPC Technical Design Report -- Reference Detector**

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.05260>

AC-LGAD与LATRIC的研发计划

■ AC-LGAD传感器正朝着更优工艺、更大尺寸、更高性能的方向发展。

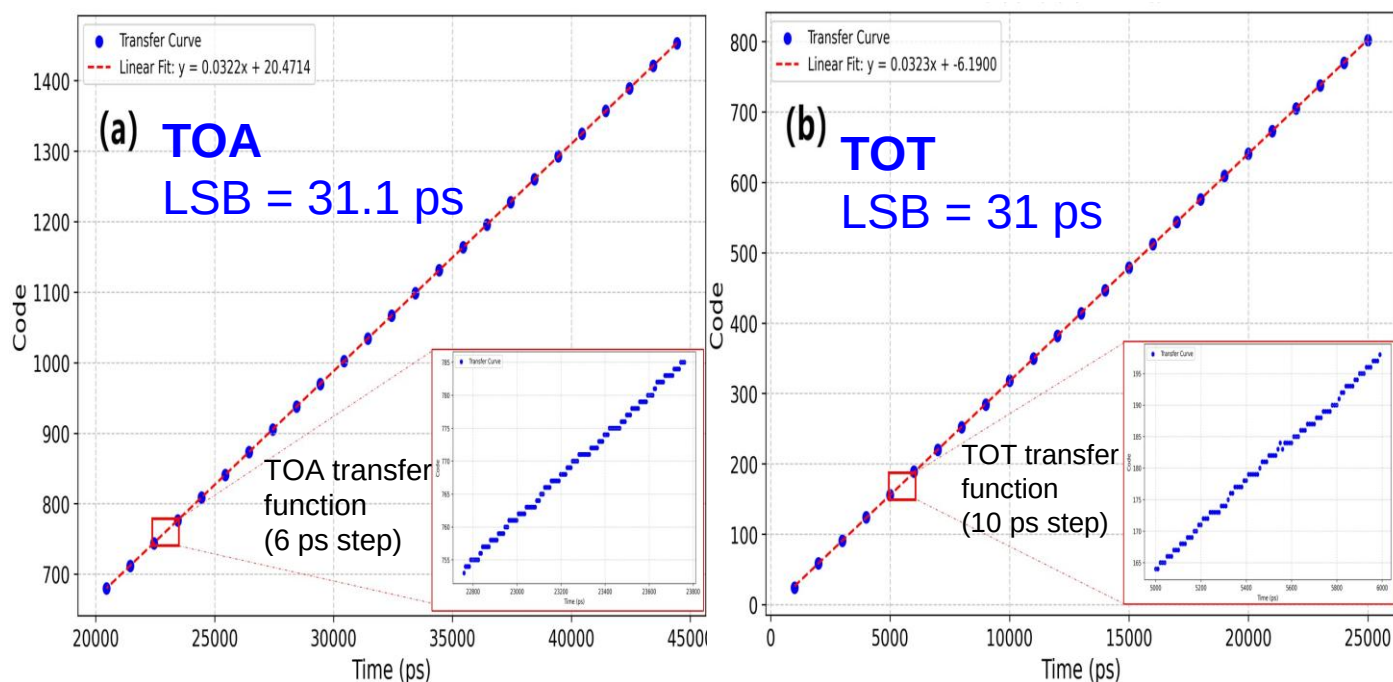


■ AC-LGAD读出ASIC LATRIC的研发正朝着多通道与低功耗方向推进。

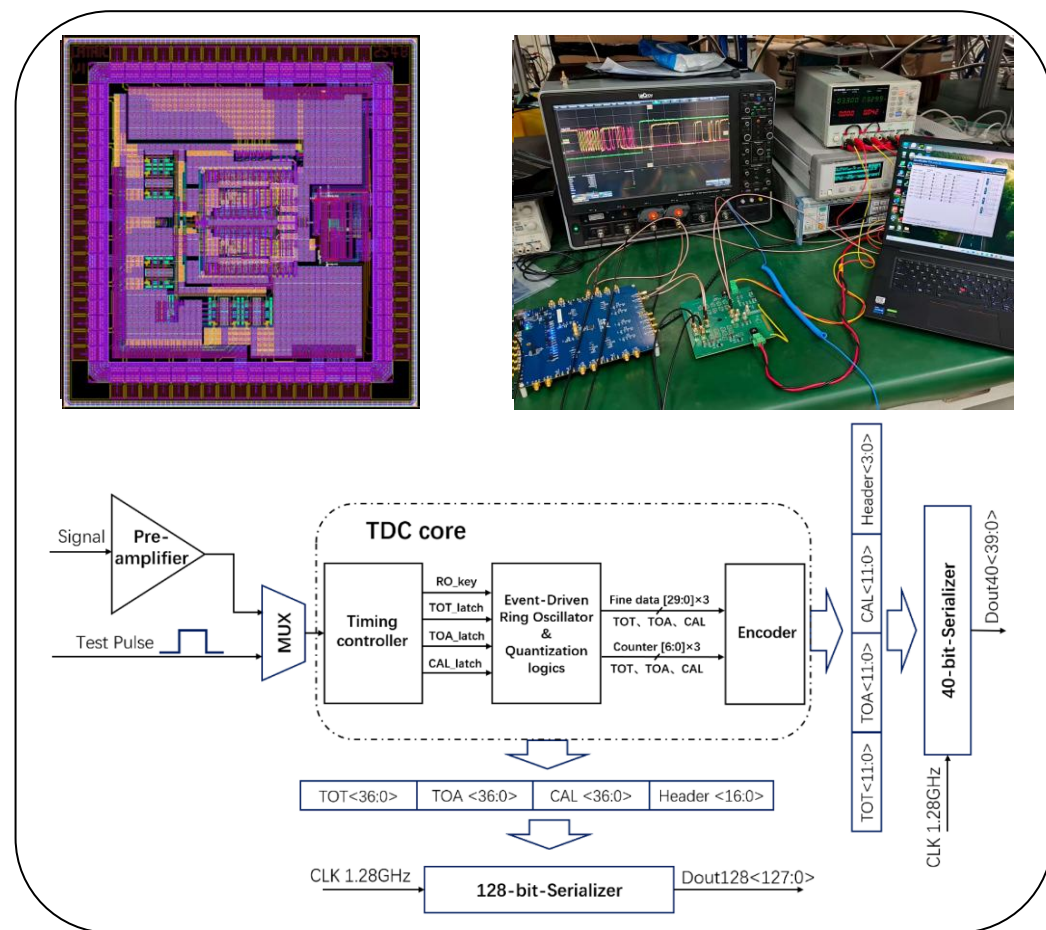
AC-LGAD 读出芯片, LATRIC

首款LATRIC原型芯片LATRIC0 (于2025年4月份完成设计并提交流片) :

- 采用55nm CMOS工艺制造
- 内部集成前置放大器、甄别器、时间数字转换器 (TDC) 以及用于数据输出的串行器。
- 测试表明其LSB约为31ps, 与30 ps的设计目标非常接近
- 实测功耗与设计预期相符
 - 在1 MHz事例率下, 单通道功耗保持在6.24 mW以下, 其中TDC核心功耗为0.36 mW。



[DOI 10.1088/1748-0221/21/04/C04028](https://doi.org/10.1088/1748-0221/21/04/C04028)



LATRIC1（8通道）读出ASIC的最新进展

LATRIC1芯片版图

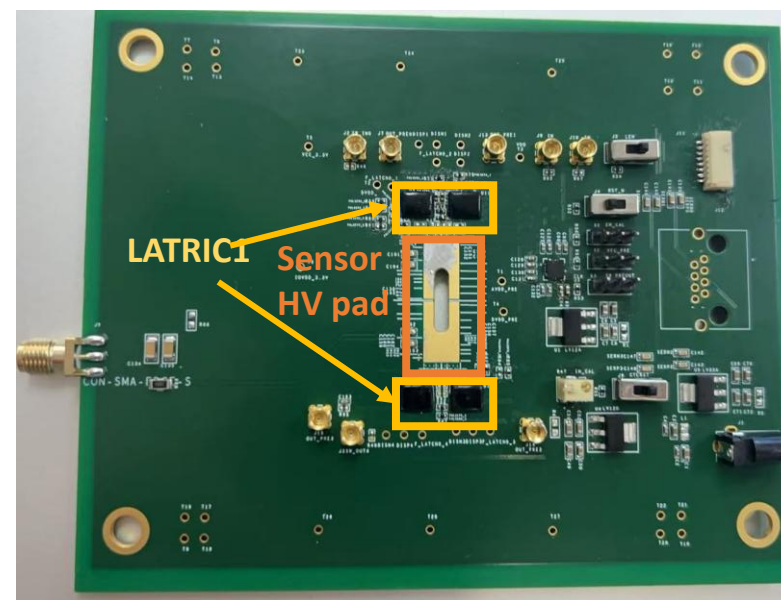
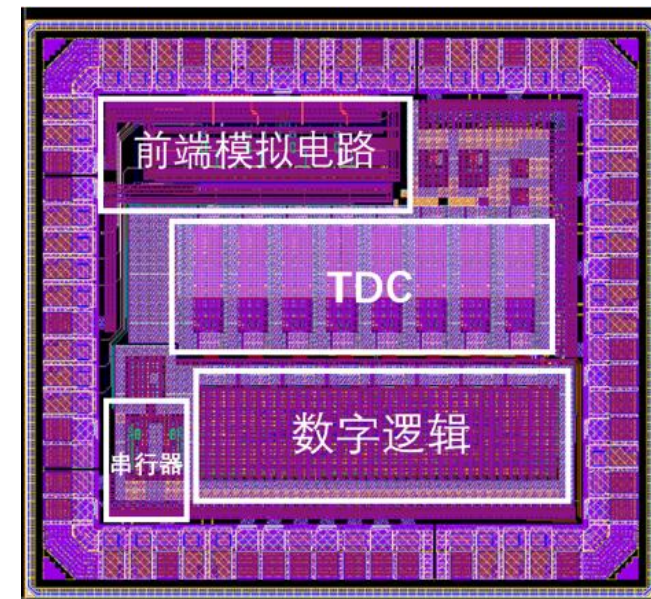
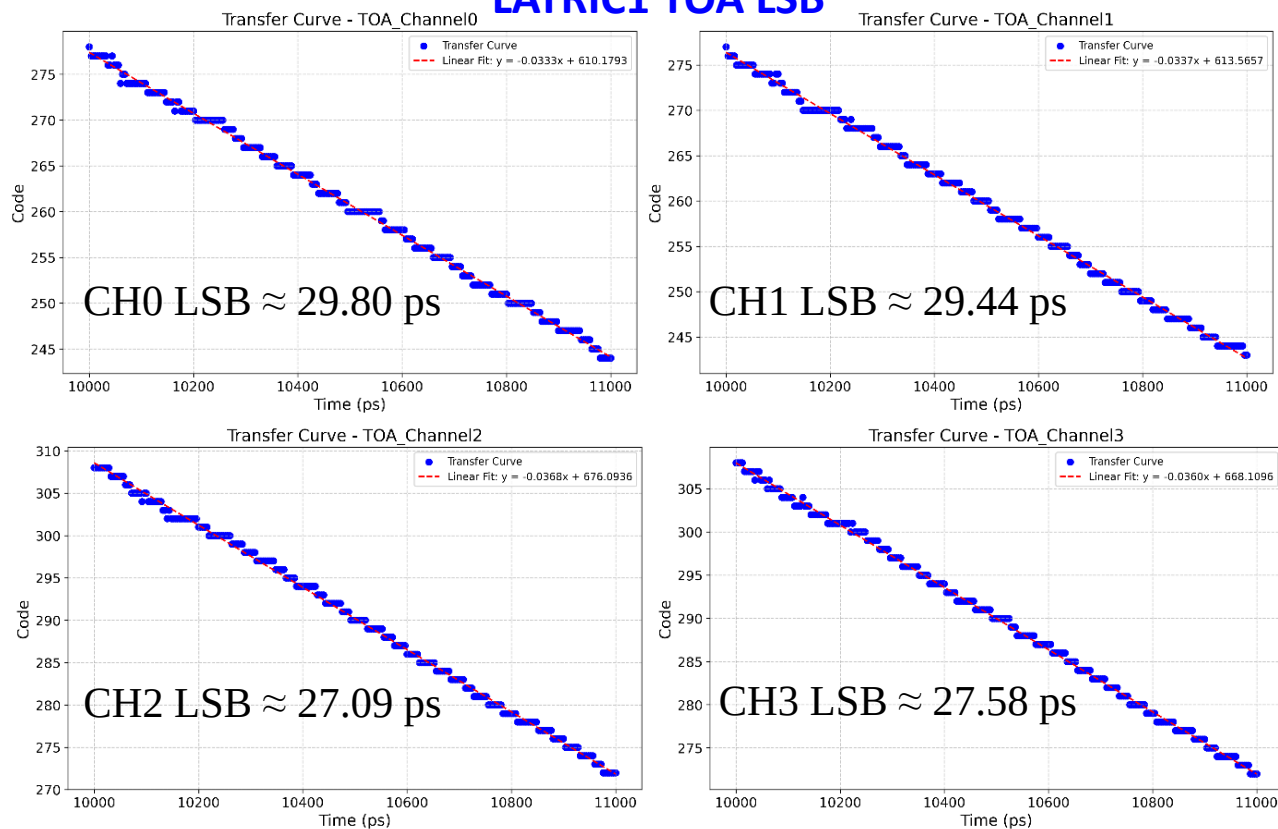
■ 第二版读出ASIC, LATRIC1 (于2025年10月份完成设计并递交流片)

- 包含8个通道：--通道间距为100 μm
 - 其中4个通道集成模拟前端与TDC,
 - 另外4个通道由连接至差分脉冲接收器的TDC组成

■ 性能优化包括:

- 改进前端模拟电路及提高前置放大器增益以改善信噪比。
- 优化编码器逻辑, 并新增event builder与时间戳功能等。

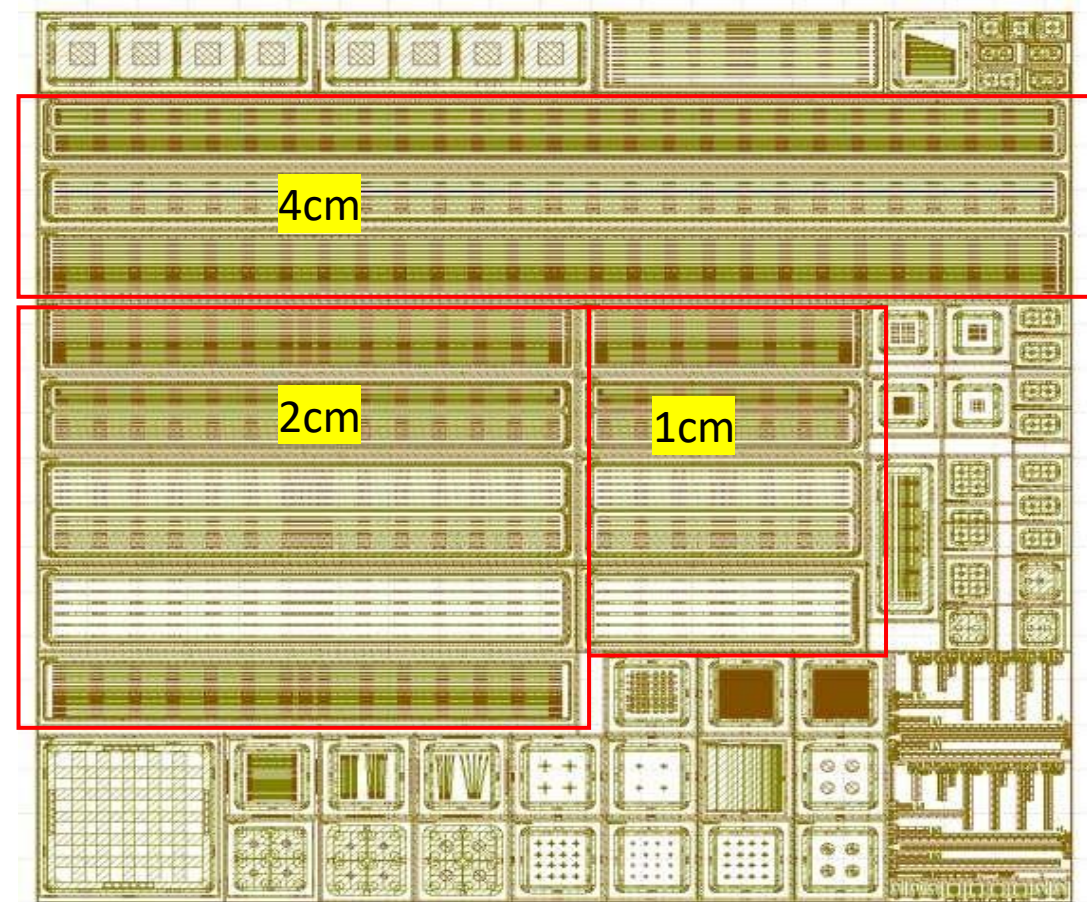
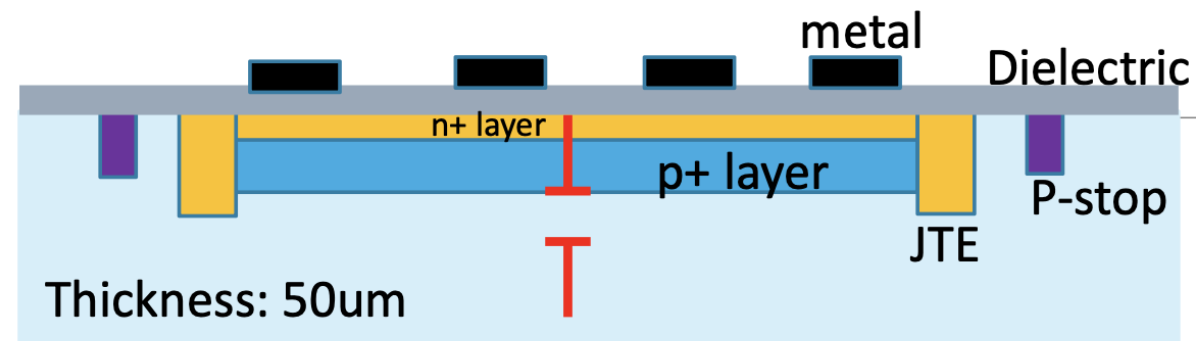
LATRIC1 TOA LSB



最新版LATRIC1-Sensor 集成测试板

长条型AC-LGAD

- 2025年4月提交流片
 - 条长：1 cm、2 cm 和 4 cm
 - 条间距：100 μm 、200 μm 和 500 μm
 - 电极宽度：25 μm 、50 μm 和 100 μm
 - 隔离结构设计
 - 优化外延层（EPI）厚度（50 μm 、80 μm ）以降低电容，从而降低读出功耗
 - 调节N+掺杂浓度以优化位置分辨性能
- 首批5片晶圆于2025年12月交付。
- 2026年5月交付了2片采用较低N+掺杂浓度的晶圆

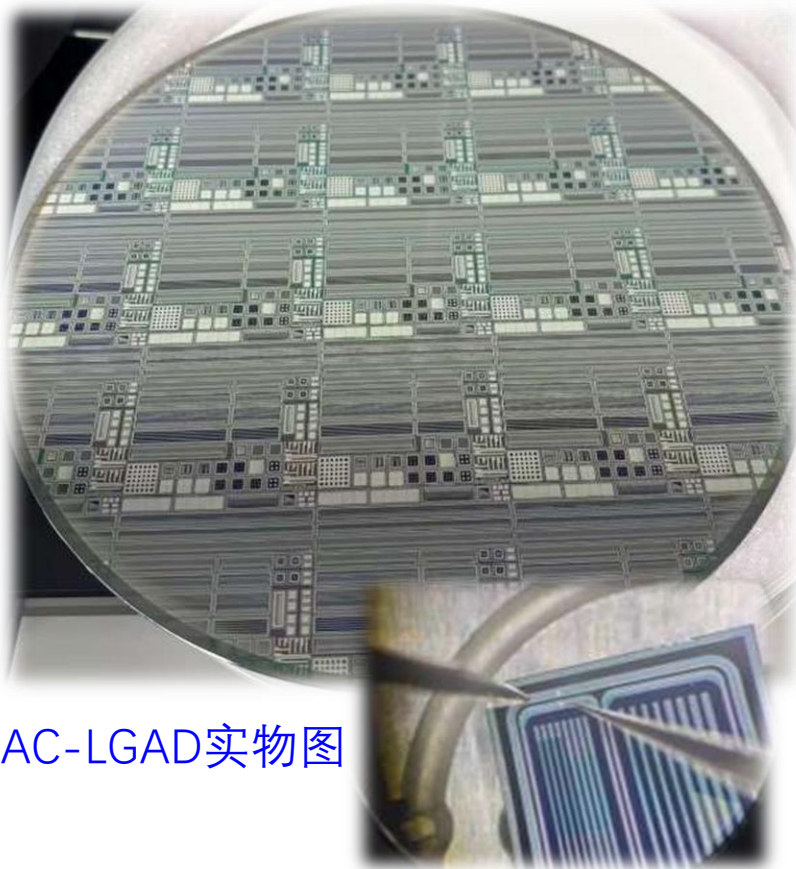


流片AC-LGAD传感器版图

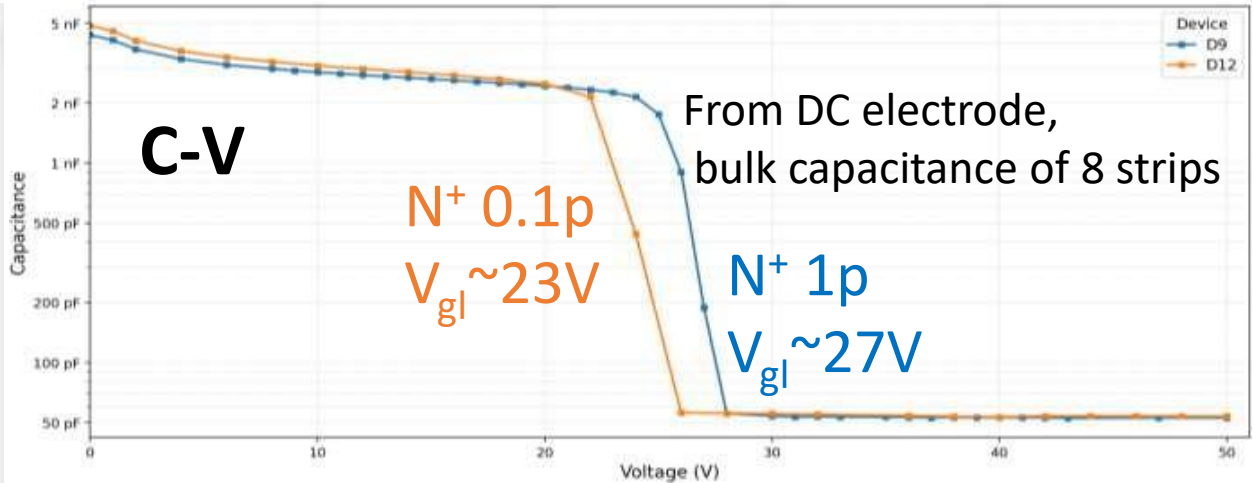
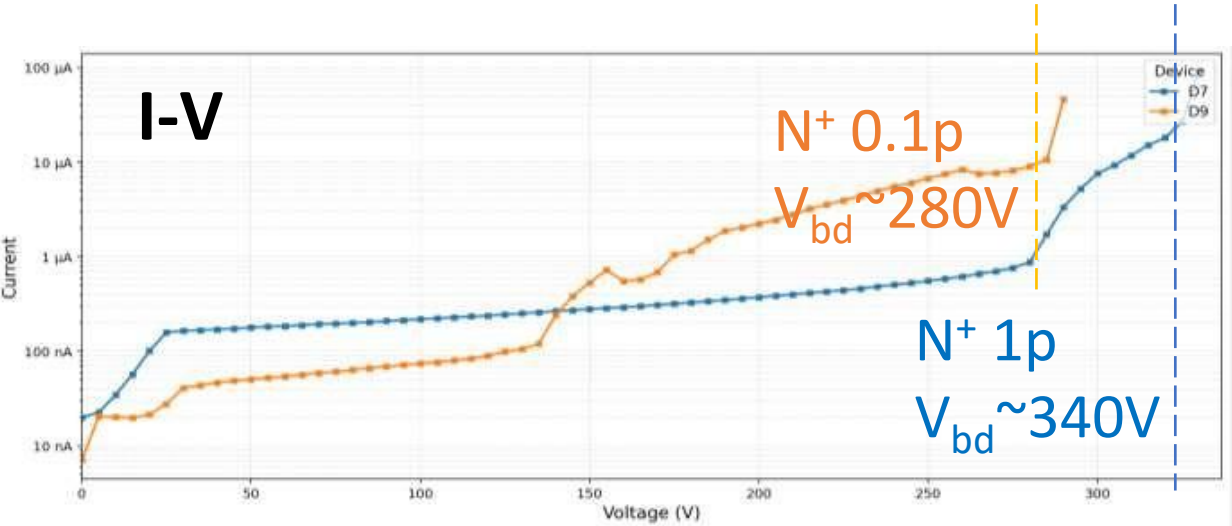
传感器表征

- 已对1号、3号和4号晶圆进行测试。
- 开展了I-V、C-V特性测量
- 利用β源与激光TCT系统,开展空间与时间性能的测量。

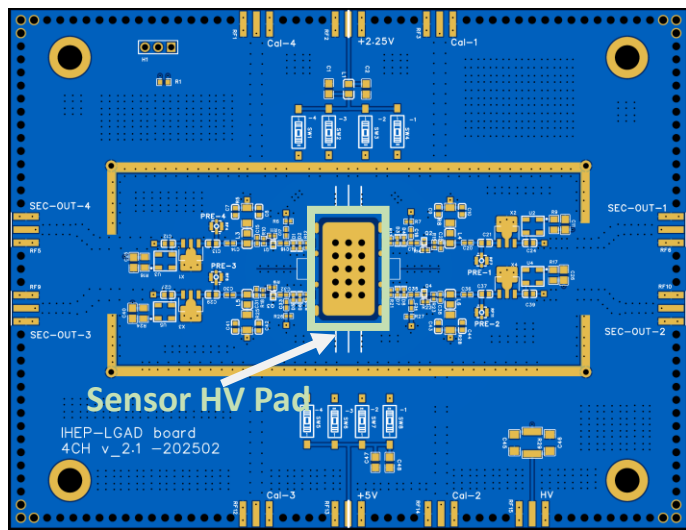
Wafer	EPI Thickness	N ⁺ Dose
1	50μm	10p
2	50μm	10p
3	50μm	0.01p
7	80μm	10p
8	80μm	0.01p
4	50μm	1p, 0.1p
9	80μm	1p, 0.1p



AC-LGAD实物图



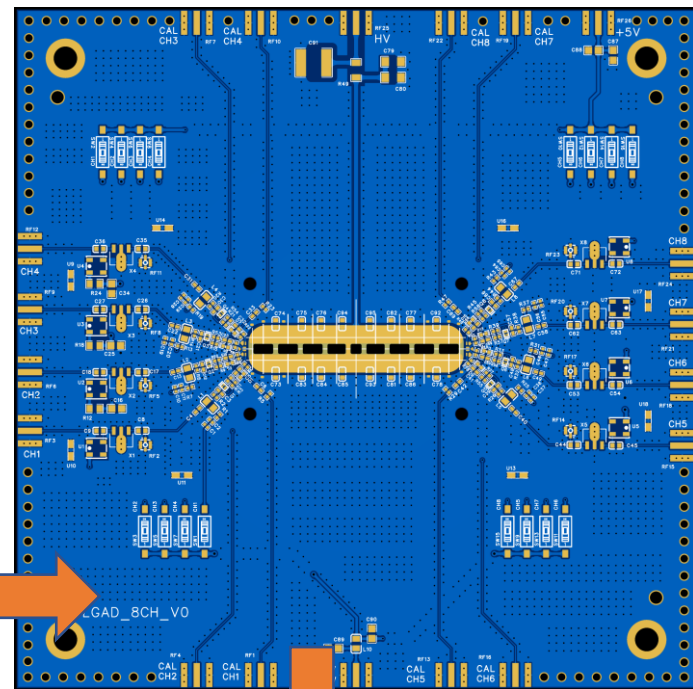
AC-LGAD前置放大板优化



10cm x 13cm

V1: 4通道LGAD前置放大板

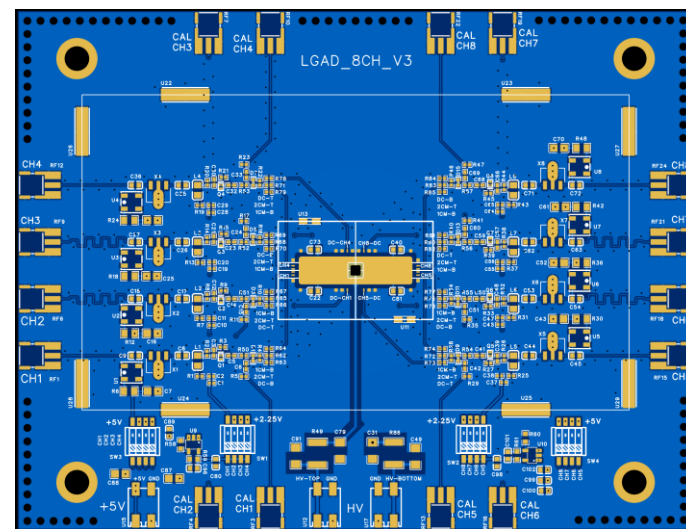
- 为LGAD传感器提供高压偏置。
- 4个信号读出通道
- 每通道约100倍放大



13cm x 13cm

V2: 8通道LGAD前置放大板:

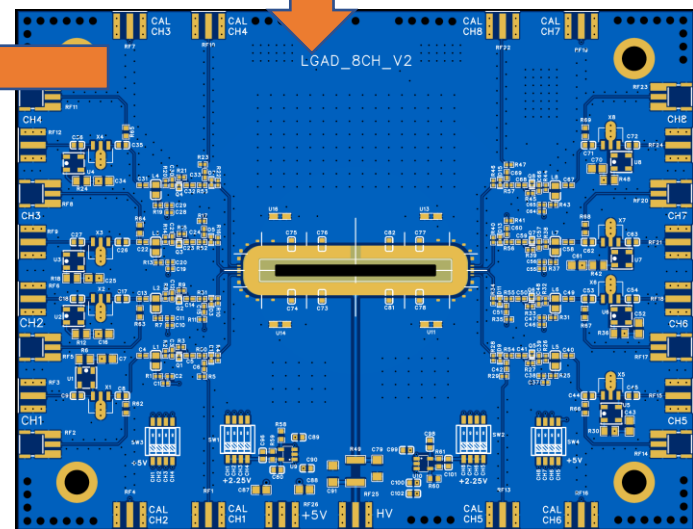
- 增加通道数量
- 扩展高压焊盘以更好兼容条形传感器
- 优化带开槽的高压焊盘几何结构, 以提高粒子探测效率



10cm x 13cm

V4: 8通道双面LGAD前置放大板:

- 采用**双面设计**以支持不同类型的LGAD (像素型和条形)
- 优化走线设计, 所有8个通道采用**等长走线**
- 将电路板厚度减小至约5 mm

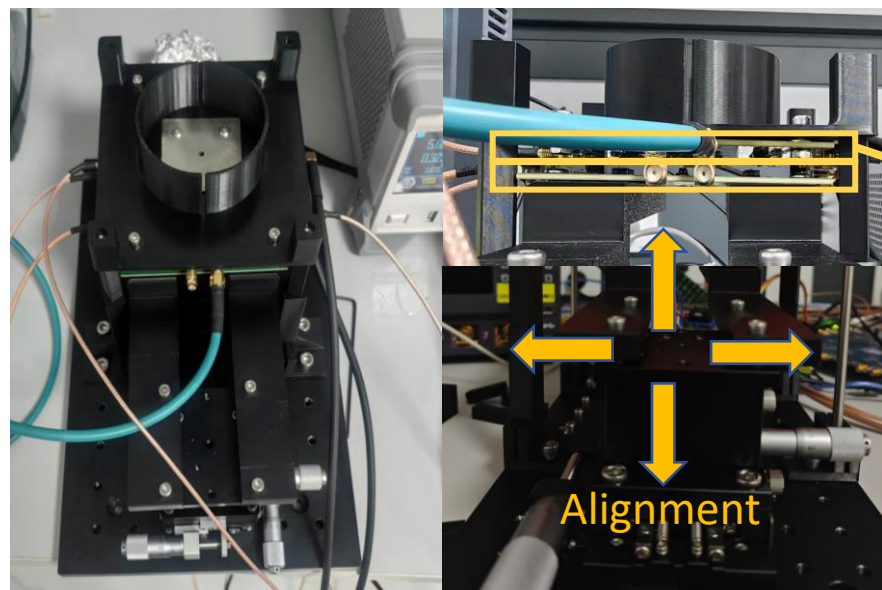
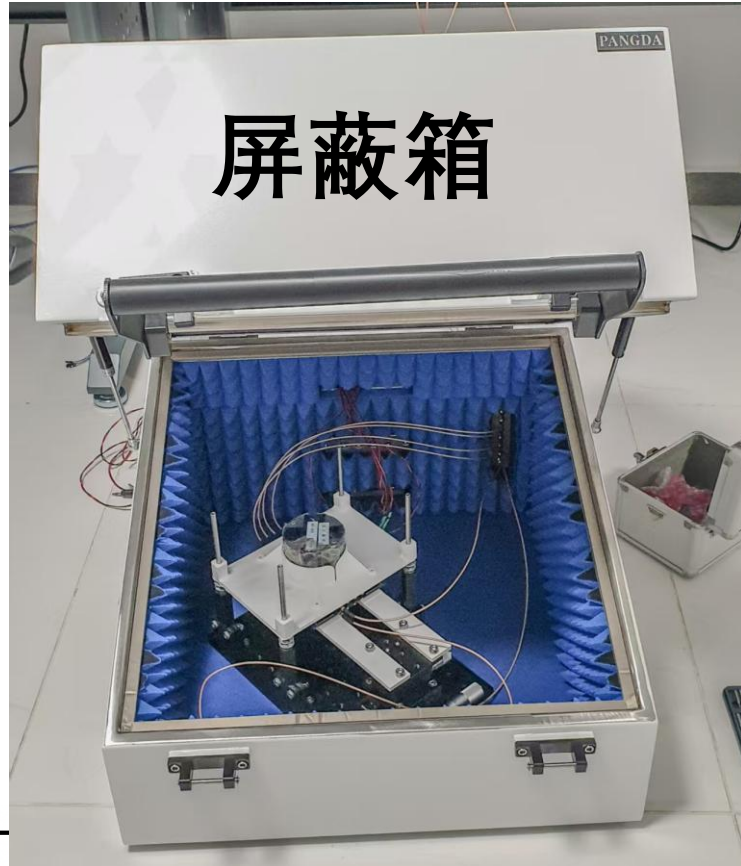
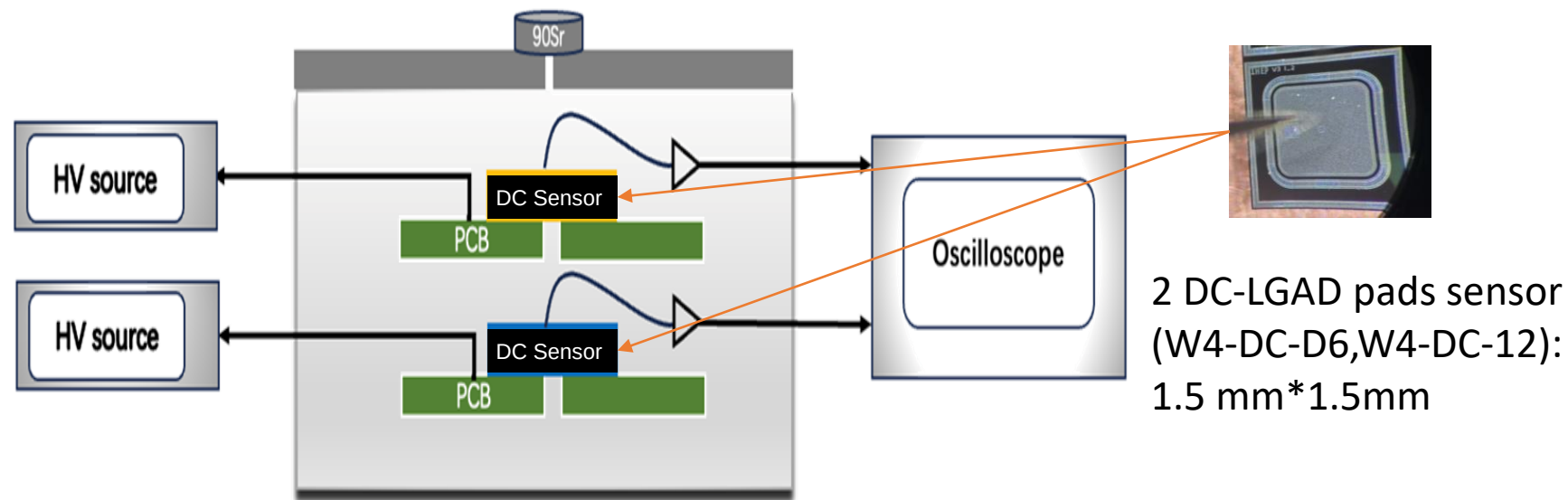


10cm x 13cm

V3: 8通道LGAD前置放大板

- 减小电路板尺寸以利于集成
- 简化电源连接器以方便布线
- 优化高压焊盘开槽几何结构, 进一步提升粒子探测效率

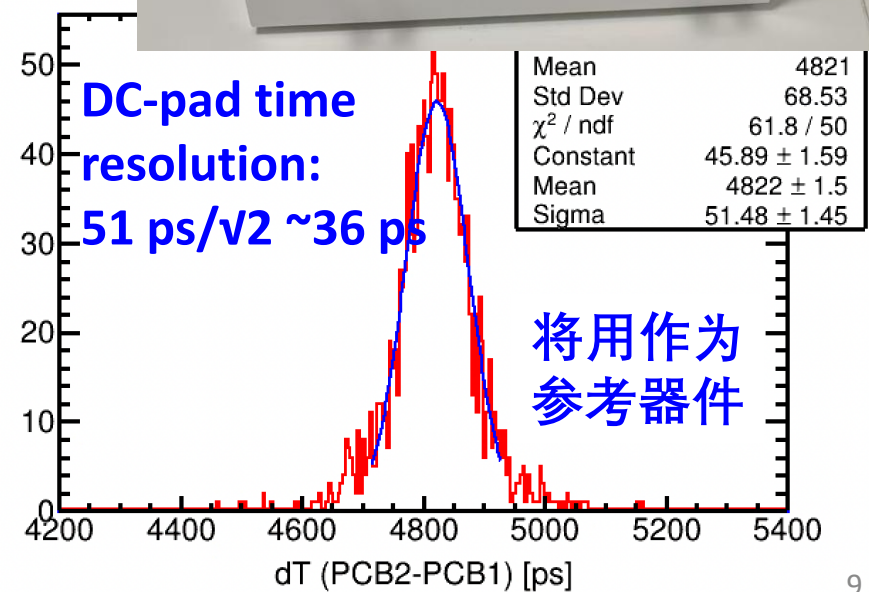
Sr-90 β 源测试装置



机械载台



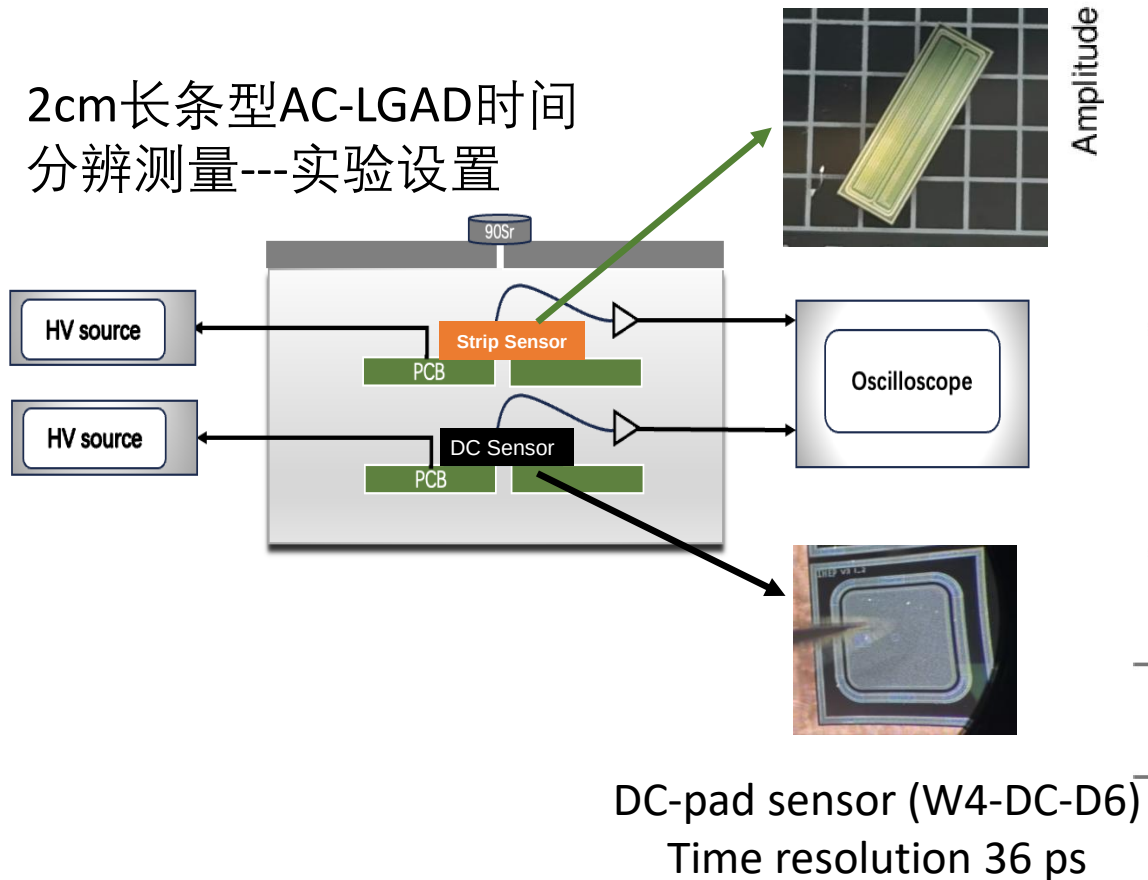
前置放大板



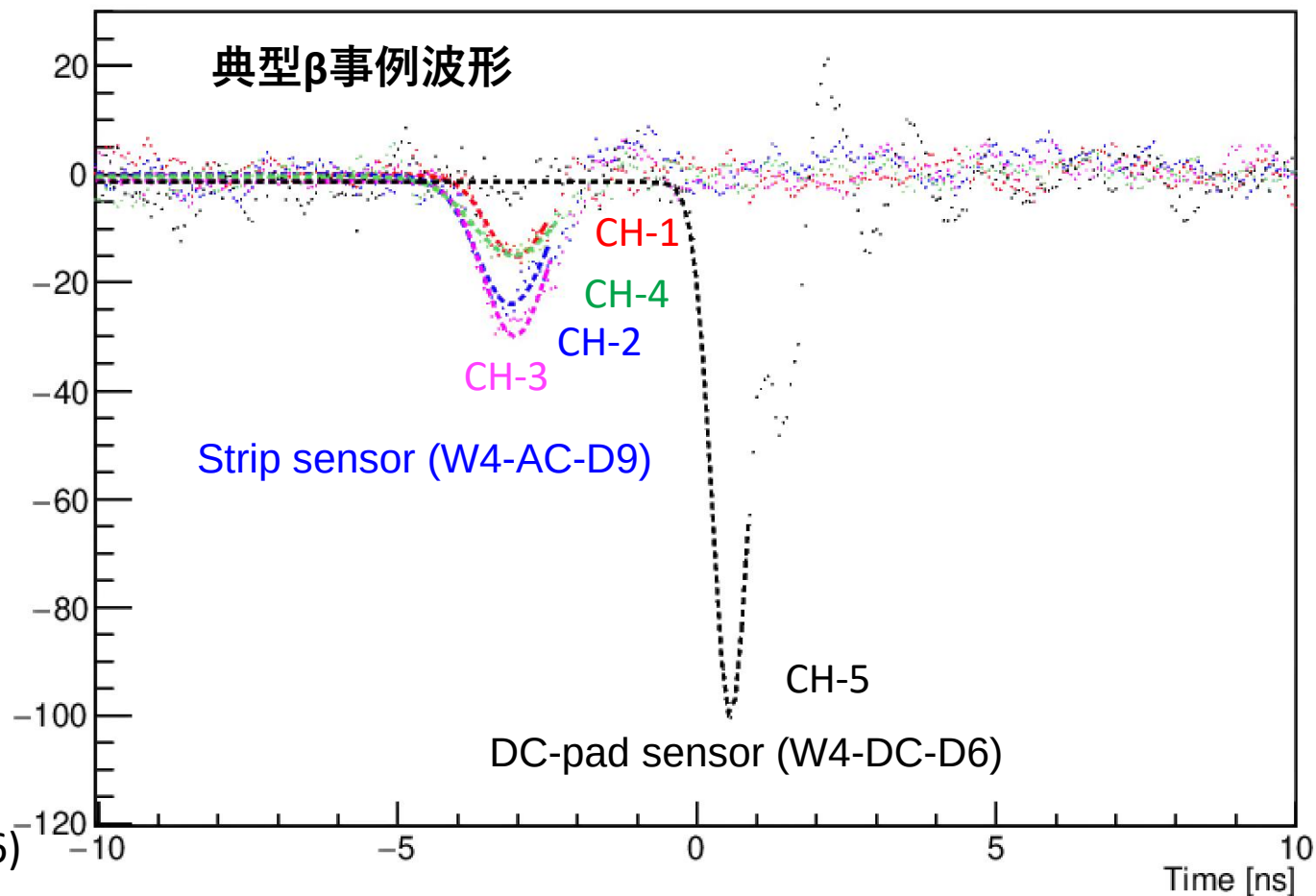
基于 ^{90}Sr β 源的传感器性能测量

DUT Strip sensor (W4-AC-D9, 2 cm)

2cm长条型AC-LGAD时间
分辨测量---实验设置



Amplitude [mV]

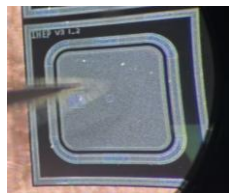


2cm微条传感器时间分辨率(β -Source Test)

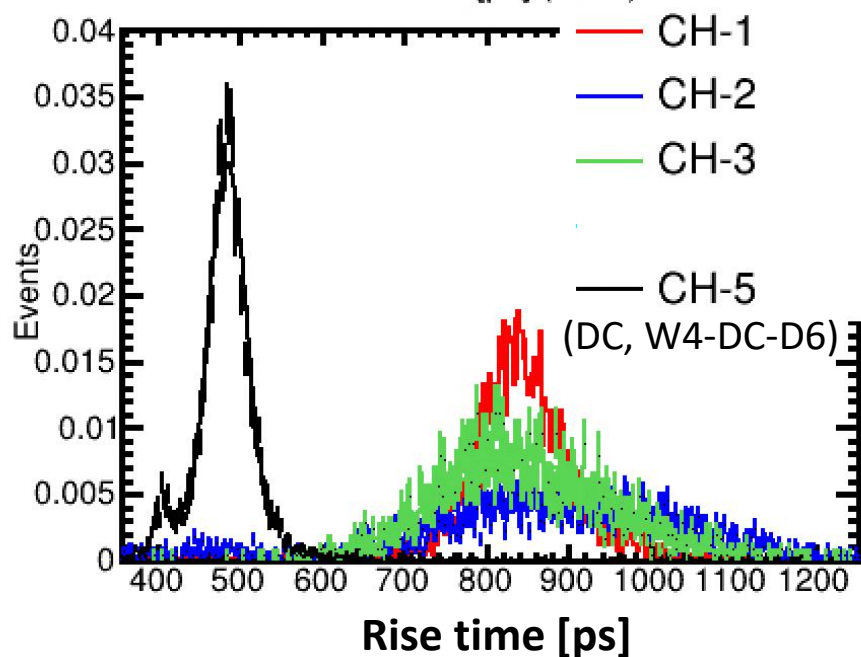
DUT sensor (AC-LGAD)

Ref sensor (DC)

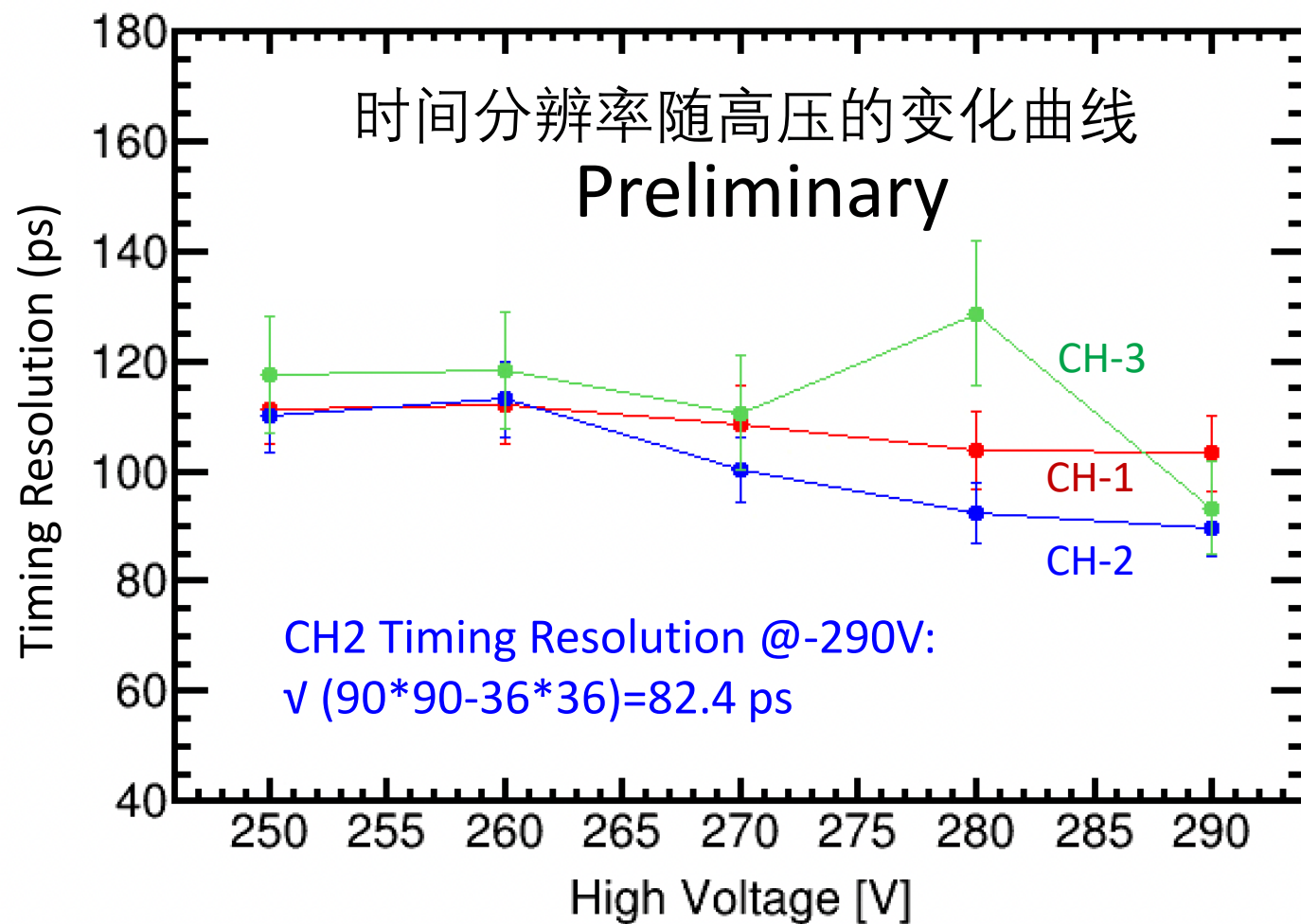
CH-1
CH-2
CH-3
CH-4



CH-5



W4-AC-D9, 条长2 cm, 条间距 100 μ m, 电极宽度50 μ m



- 2cm长条传感器的信号上升时间显著大于pad型传感器。
- @-290V, 时间分辨率约为80 ps。

激光输入口

高精度位置与时间测量 皮秒红外激光TCT测试装置

1064nm红外激光，可实现硅深层穿透。

脉冲宽度约8 ps，

可调脉冲频率（24kHz – 24MHz）

扩束镜

聚焦透镜

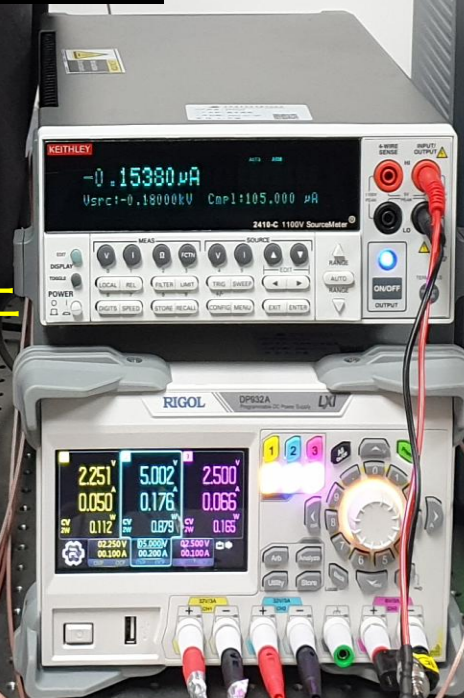
高精度3D位移平台
由可编程三轴电机控制

滤光片

待测器件

红外CMOS
相机

高精度压电平台
（步长10 nm，重复定位
精度100 nm），
可对传感器阵列
进行精确扫描



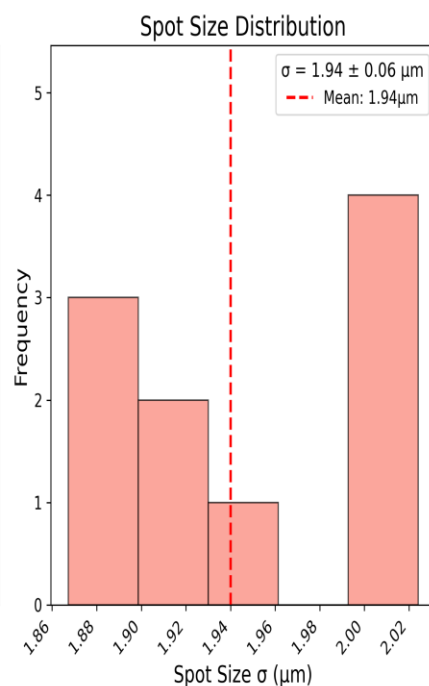
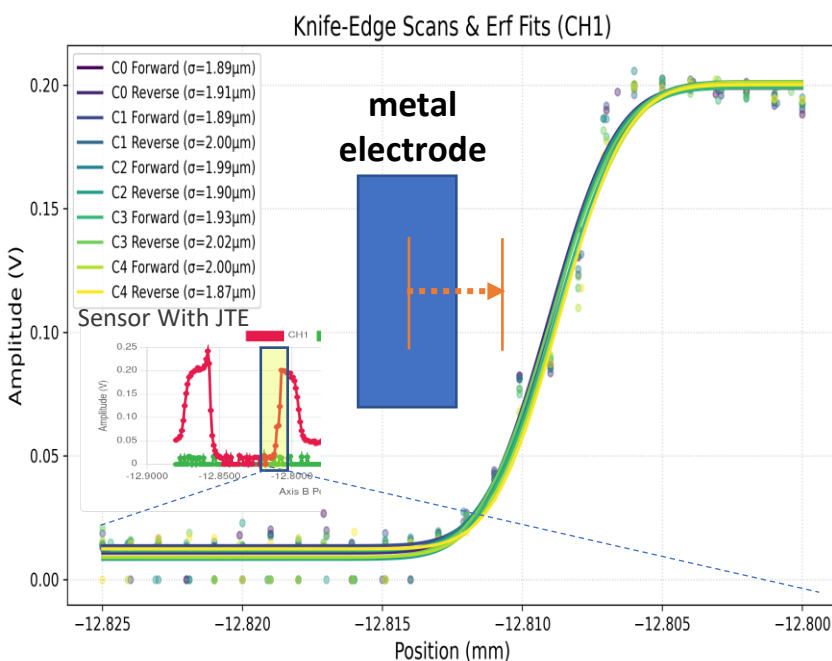
高带宽示波器
Keysight EXR608B

光斑尺寸最小化

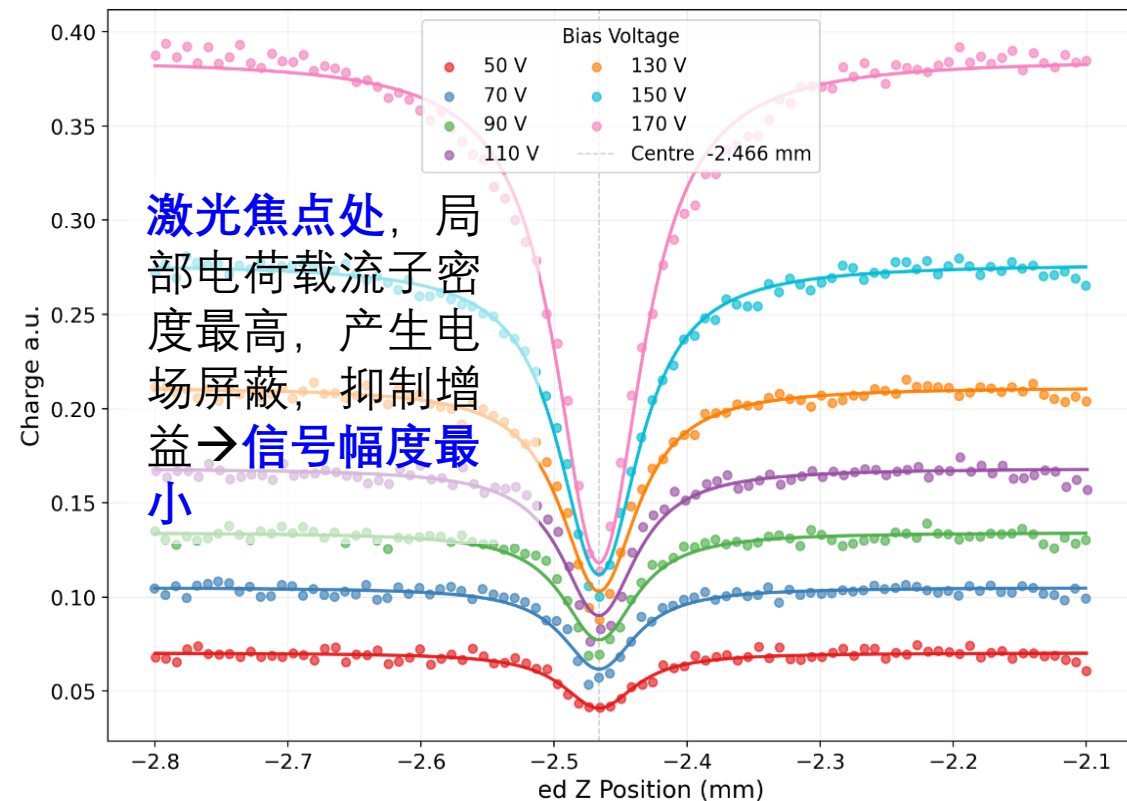
[10.1016/j.nima.2025.170844](https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170844)

• 采用两种独立方法进行交叉验证:

1. 增益抑制效应→扫描Z轴位置
2. 刀刃法→在每个Z位置沿电极边缘进行扫描



Gain suppression effect



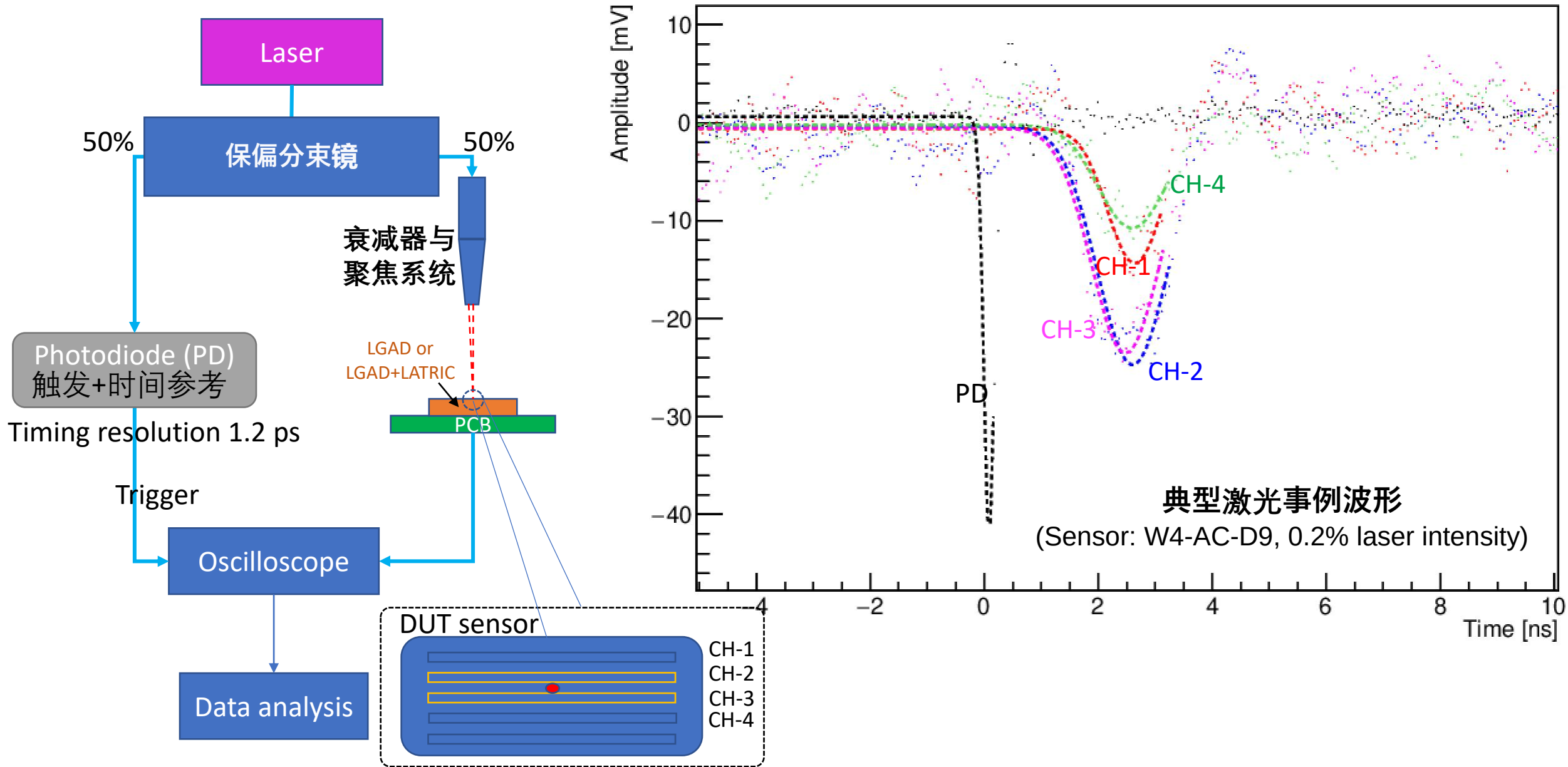
激光焦点处，局部电荷载流子密度最高，产生电场屏蔽，抑制增益→信号幅度最小

$$S(z) = S_{max} \exp \left(- \frac{A}{w_0^2 \left[1 + \left(\frac{z - z_0}{z_R} \right)^2 \right]} \right)$$

- w_0 : The beam waist (minimum radius).
- z_0 : The focal point position.
- z_R : The Rayleigh length.

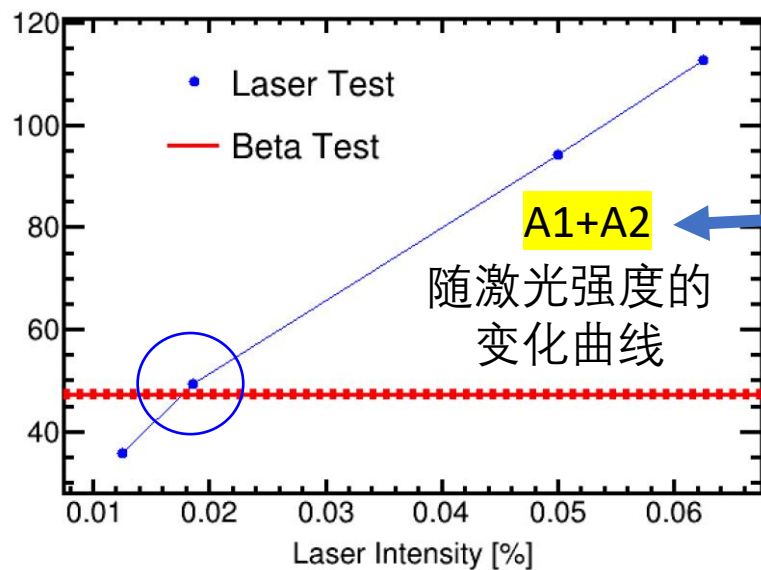
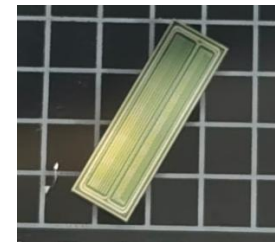
确认可调式出光斑半径: $< 3\mu\text{m}$

基于红外激光的传感器性能测量

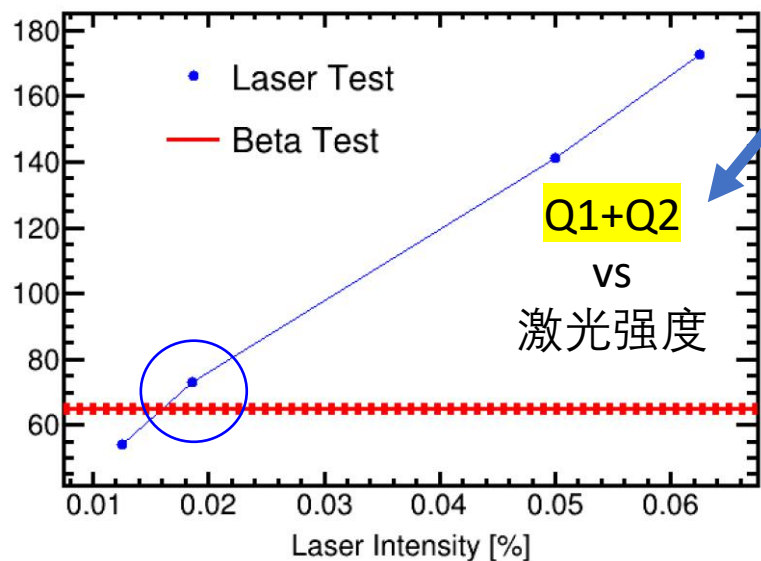


β -激光等效调试

Strip sensor (W4-AC-D9, 2 cm)

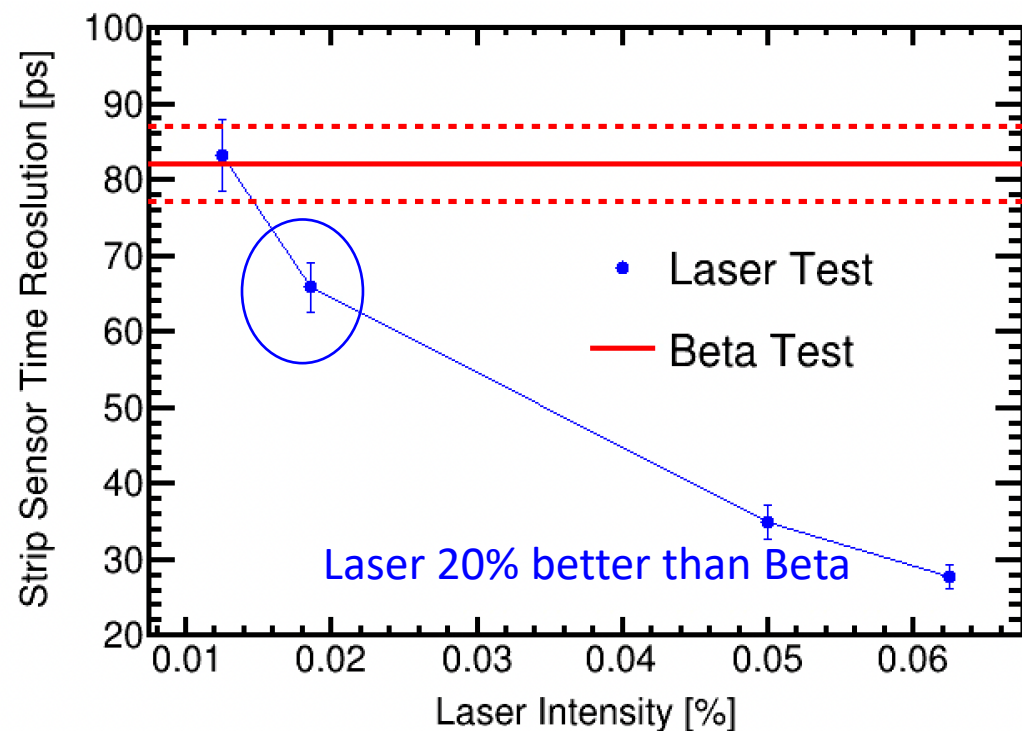


A1和A2分别为seed strip（最大幅值）和第二大幅值的微条的波形幅值。



Q1和Q2为对应波形的积分电荷（负极性）

0.02%的激光强度在幅值和积分电荷上均与 β 或MIP等效。

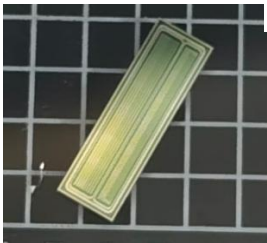
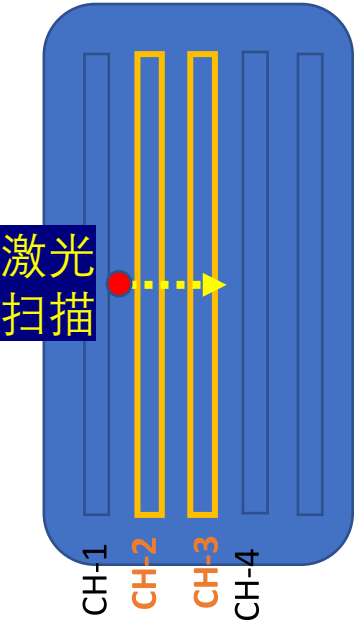


0.02%激光强度下，时间分辨率约为65 ps，比 β 源测试（约80 ps）好20%，这是由于激光测量中不存在dE/dx的朗道涨落

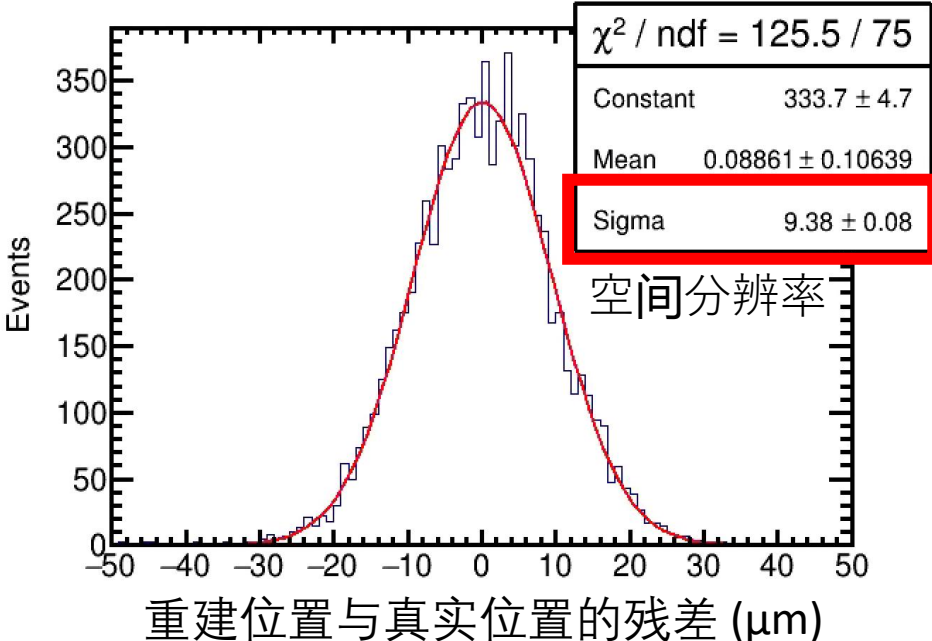
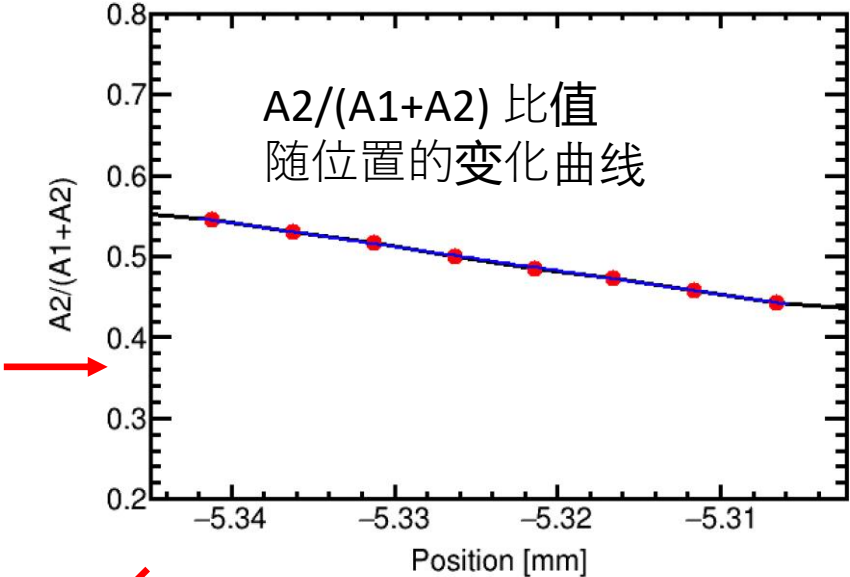
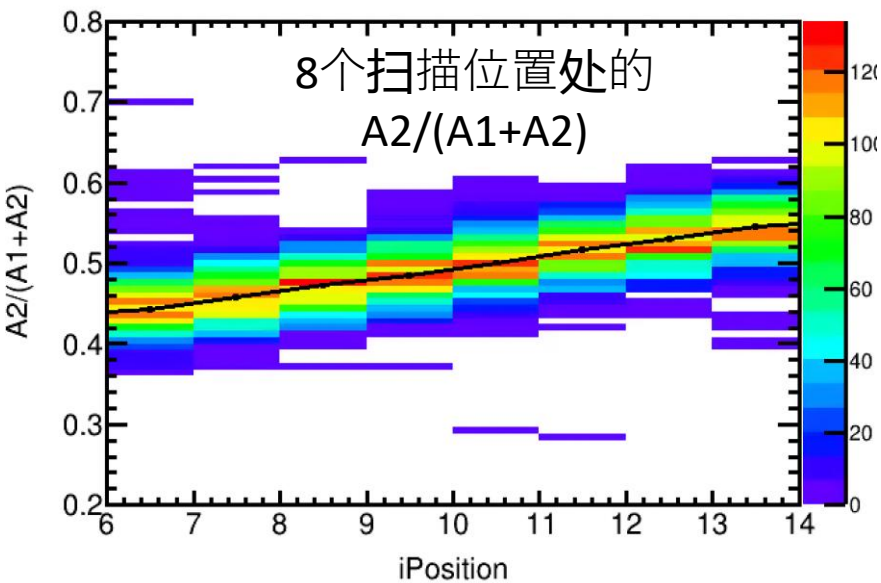
MIP等效激光强度(0.02%) 下长条型传感器的空间分辨率

A1和A2分别为最大幅值微条和第二大幅值微条的波形幅值。

扫描步长为5 μm
每步采集1000个波形



W4-AC-D9:
长2 cm, 间距100 μm ,
电极宽度50 μm ,
 n^+ 注入剂量为0.1 p

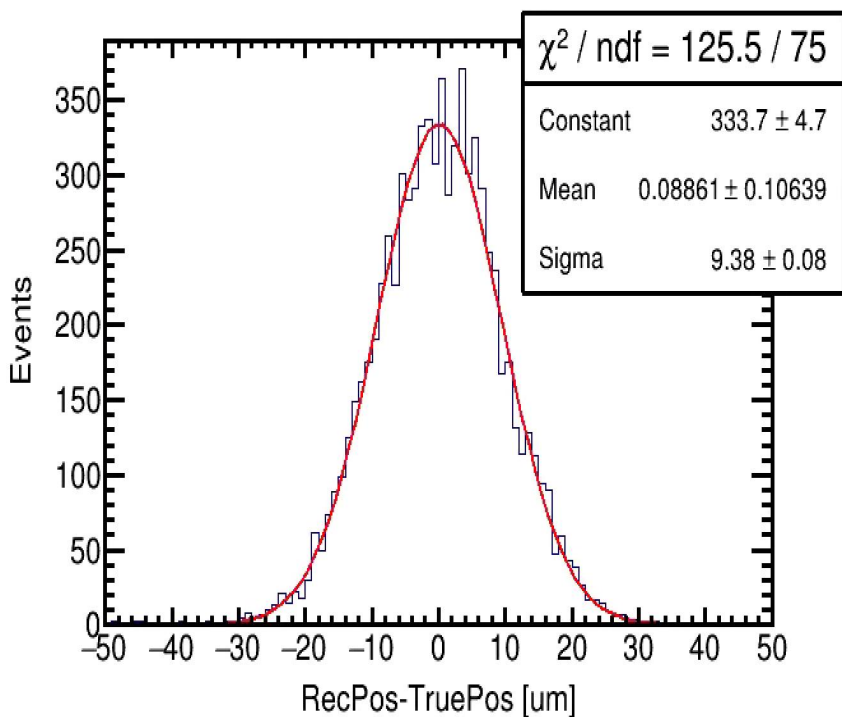


位置重建

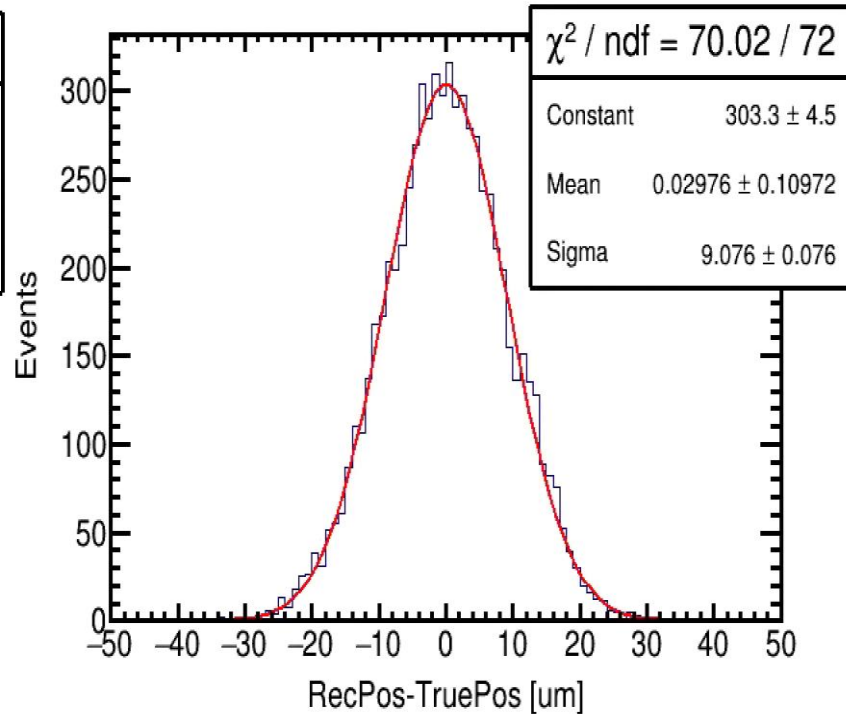
最新流片优化的长条型传感器
实现了9.4 μm 的空间分辨率。

不同estimator的传感器空间分辨率

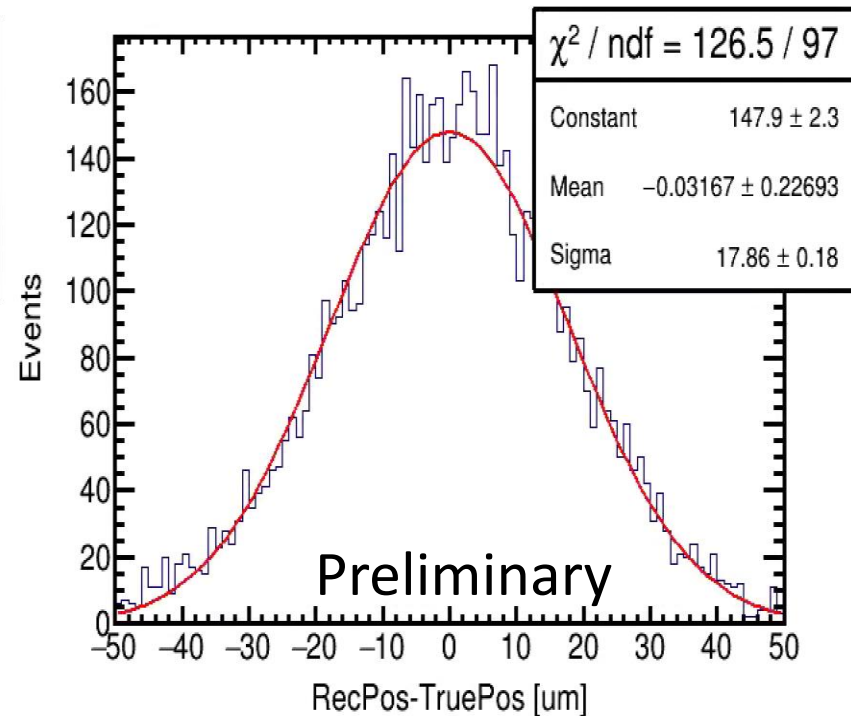
1) 最大幅值



2) 积分电荷



3) 过阈时间 (TOT)



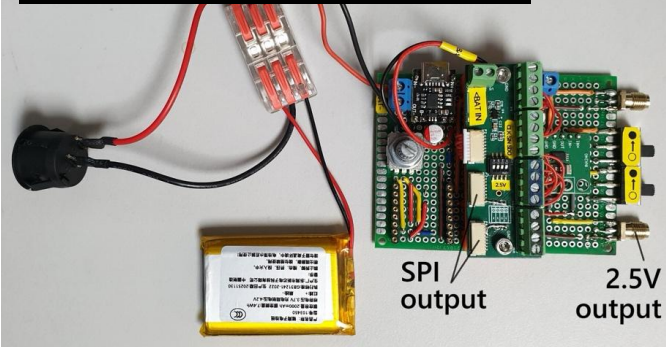
在100 μm 条间距下，仅利用LATRIC的TOT信息来实现优于10 μm 的空间分辨率有较大挑战。

LATRIC0 (单通道) 与AC-LGAD 的联合测试

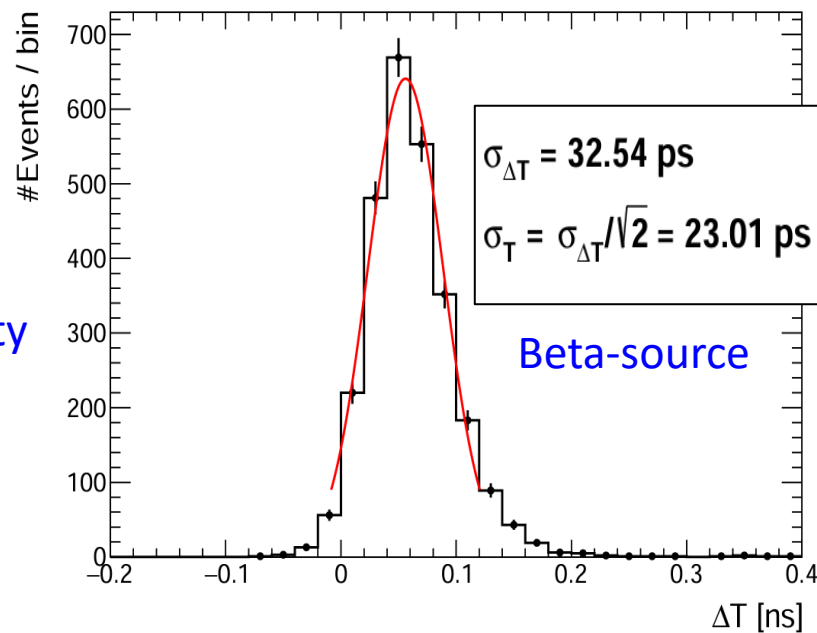
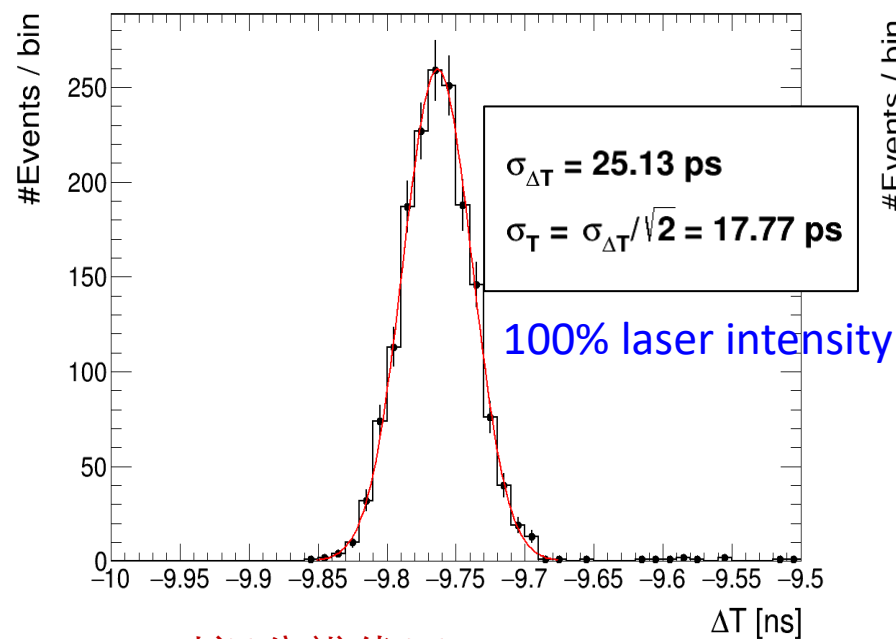
LATRIC读出芯片研制目标: 时间分辨优于30 ps, 匹配10 μm 位置分辨, 实现64通道及以上的集成



用于DAC控制的远程 SPI隔离模块 (RSM)

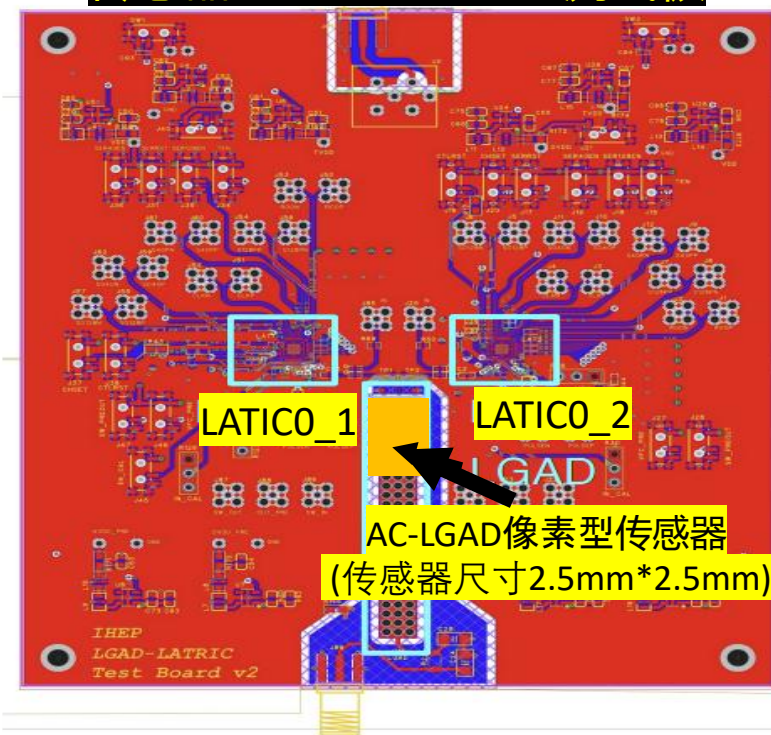


同一传感器; 两片LATRIC0芯片之间的时间差, ΔT 分布



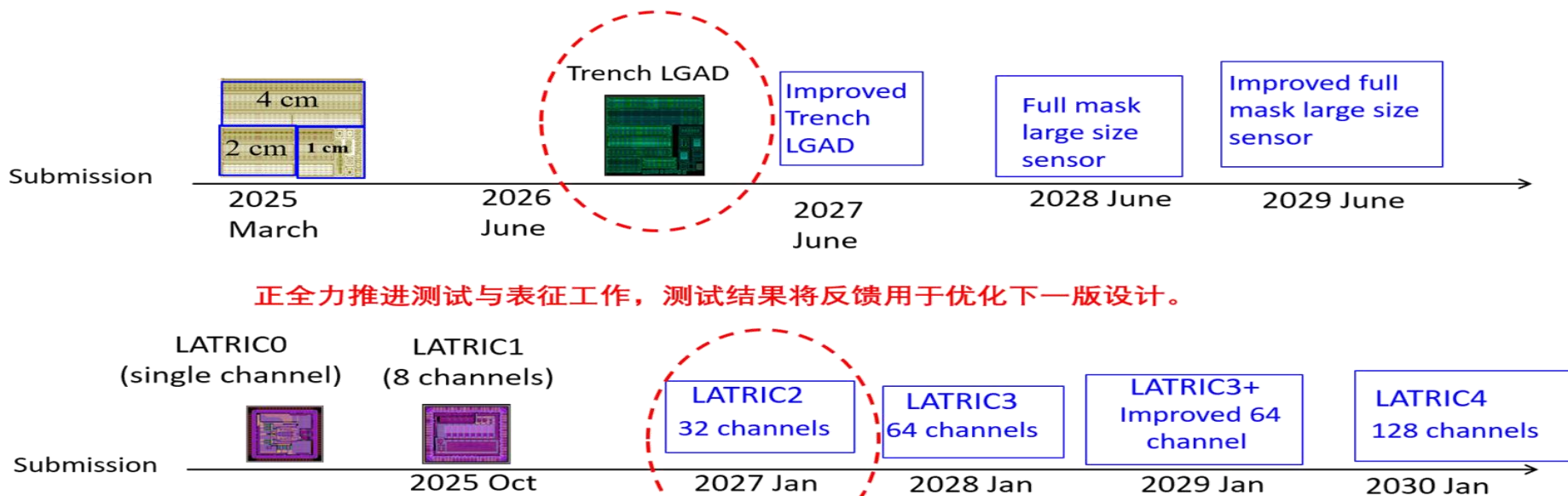
- 时间分辨优于30 ps
- 正在进行中的工作: - β -激光等效调试,
- 最新流片的8通道LATRIC1芯片的测试

传感器-LATRIC0 集成测试板



总结

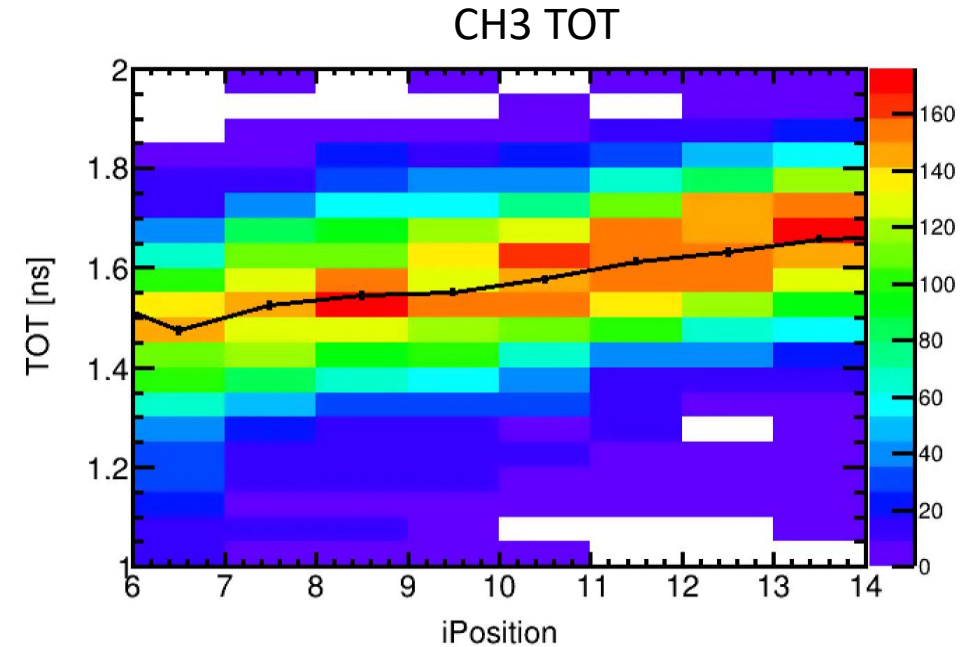
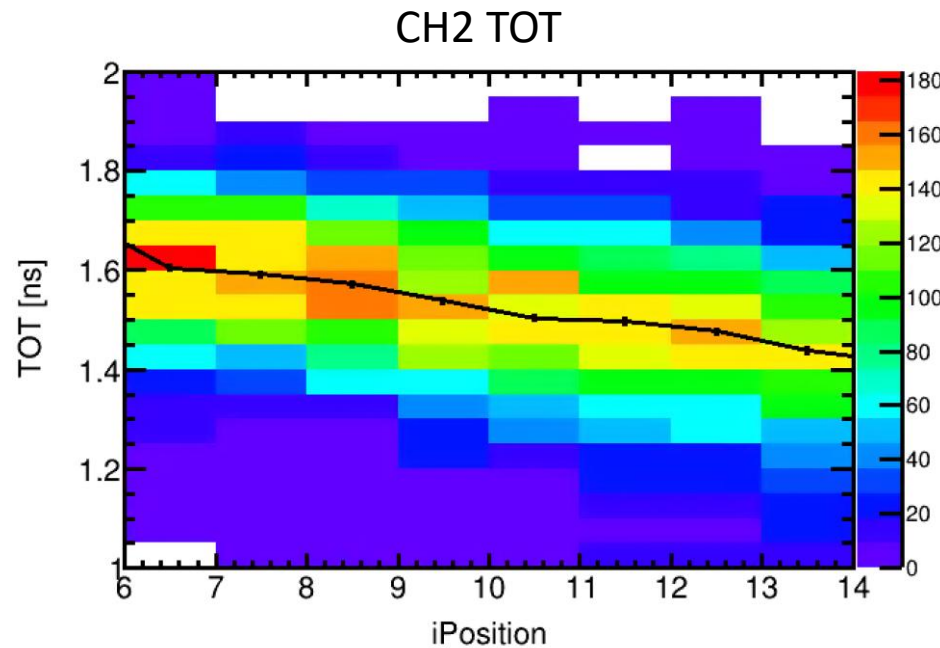
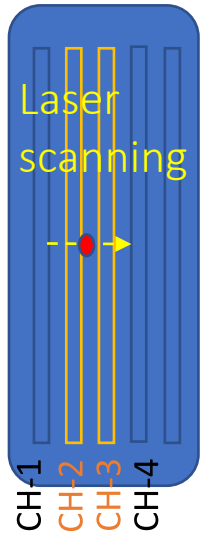
- 正全力推进AC-LGAD及其专用读出芯片LATRIC的研发工作。
- 利用激光与 β 源对2026年最新迭代流片的2 cm大尺寸硅基LGAD传感器开展了时间与空间分辨率研究。
 - 将激光强度调节至等效 β 粒子（MIP）信号。
 - 激光测试测得的时间分辨率为65 ps，与 β 源测试结果相近，验证了基于激光测试结果的可靠性。
 - 位置测量精度9.4 μm
 - LATRIC0芯片时间分辨优于30 ps，最新流片的8通道LATRIC1芯片的测试工作正在进行
- 2026年计划：隔离版硅基AC-LGAD流片、读出芯片LATRIC2（32通道）流片等



Additional Slides

Sensor Spatial Resolution Measured Using TOT (0.02% laser intensity)

Scanning at 8 positions within the 50 μm open window between CH2 and CH3.

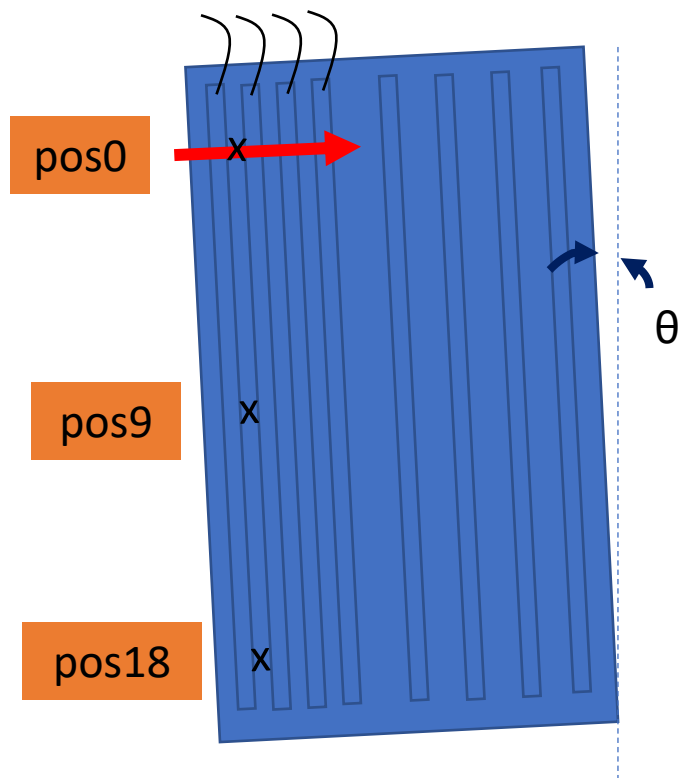


Achieving a spatial resolution below 10 μm using Time Over Threshold (TOT) information (LATRIC) with a 100 μm strip pitch appears to be challenging and may offer limited flexibility.

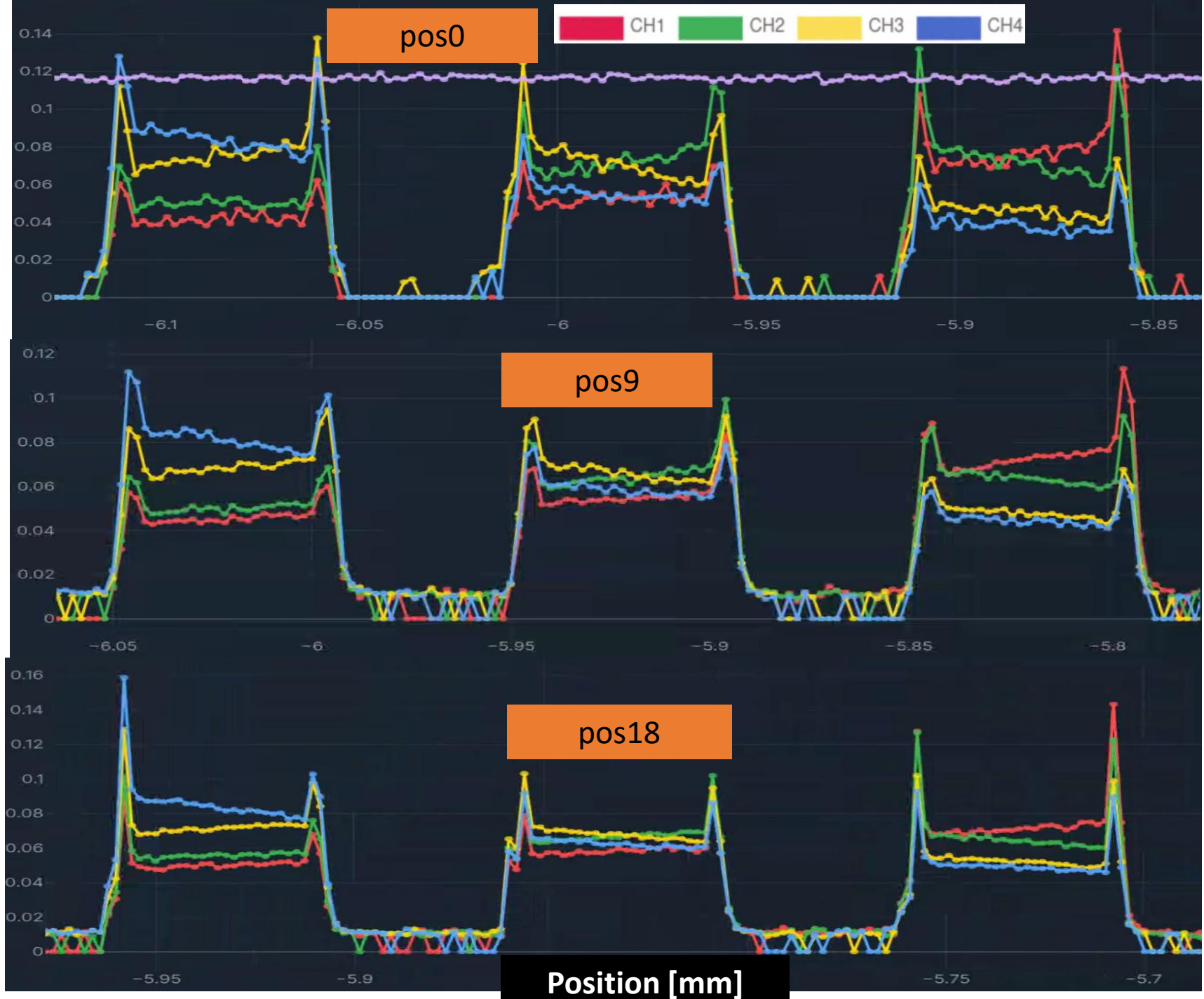
W4-AC-D7-2-1 (n⁺ =1P)

→ Lateral scan (0.005/step)

x Longitudinal scan (3 points)



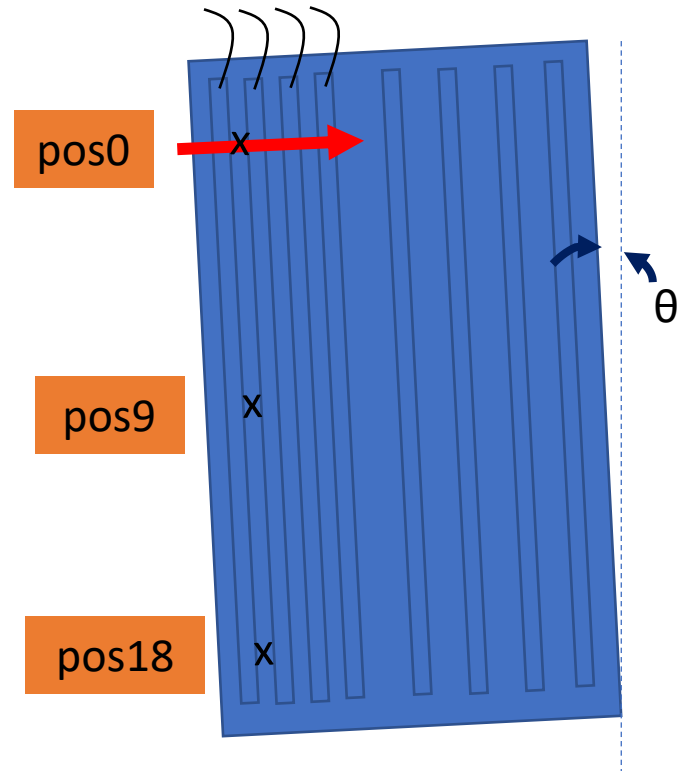
EPI thickness: 50 μm
Strip length: 2cm
Pitch: 100 μm
Gap :50 μm



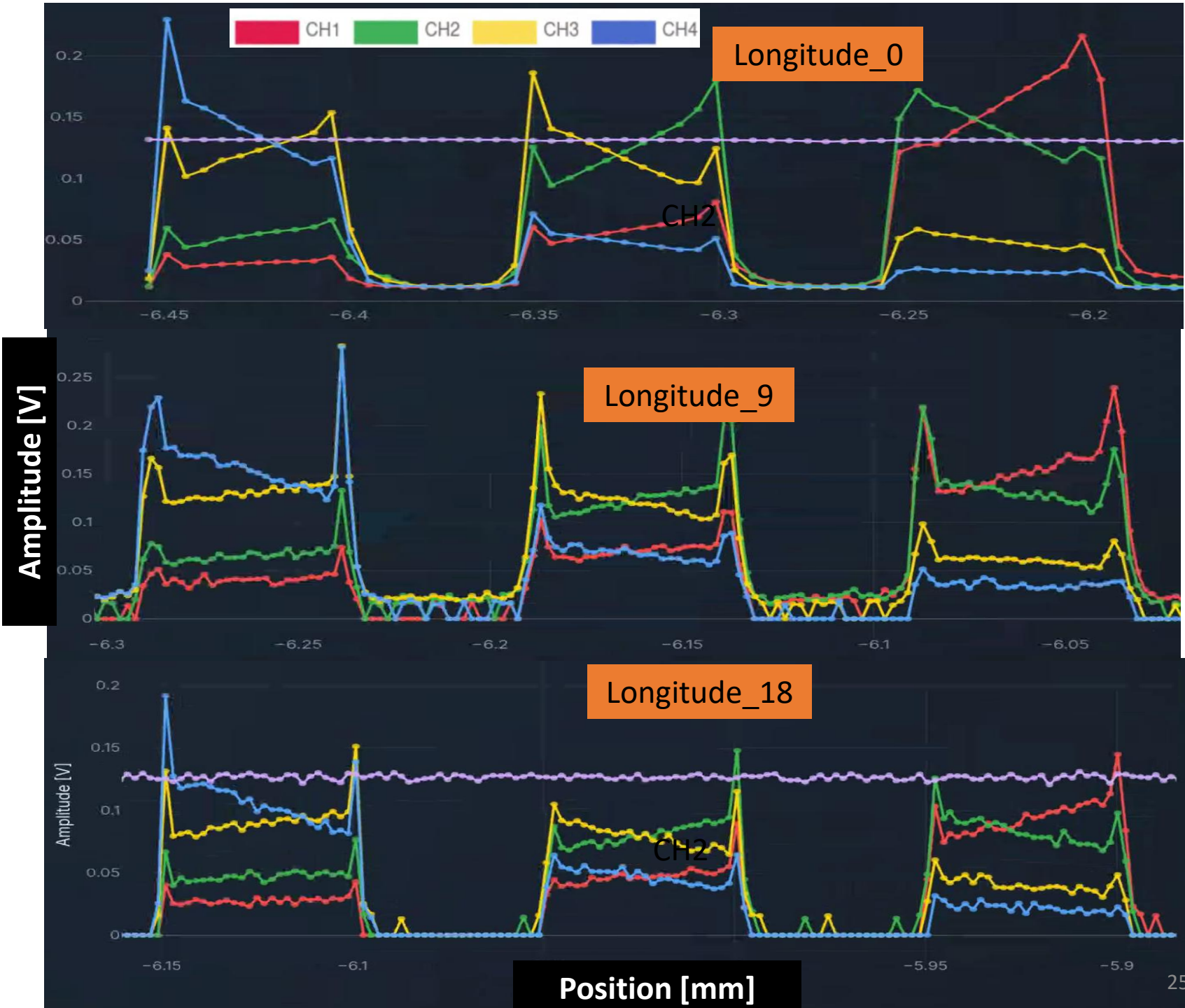
W4-AC-D9-2-1 ($n^+ = 0.1P$)

→ Lateral scan (0.005/step)

x Longitudinal scan (3 points)



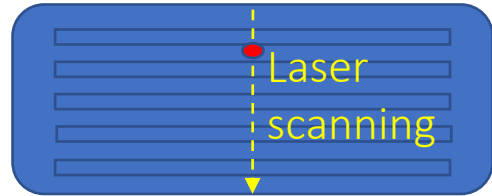
EPI thickness: 50 μ m
Strip length: 2cm
Pitch: 100 μ m
Gap :50 μ m



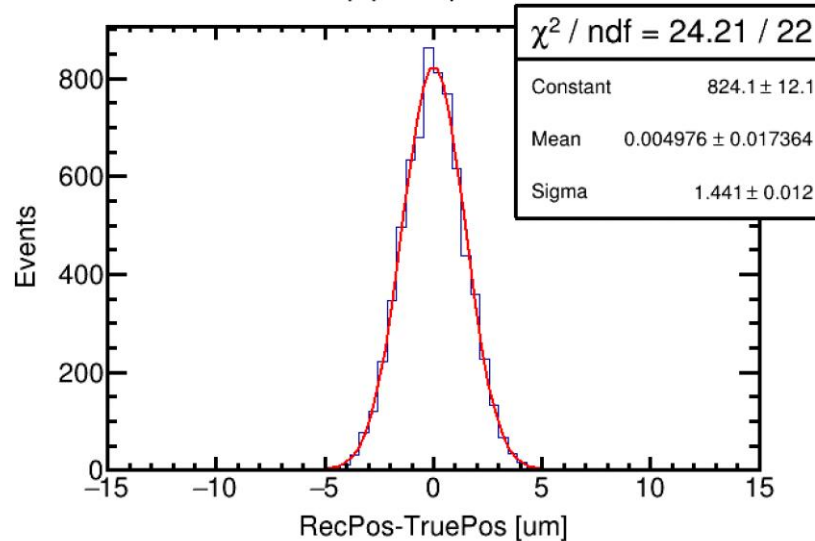
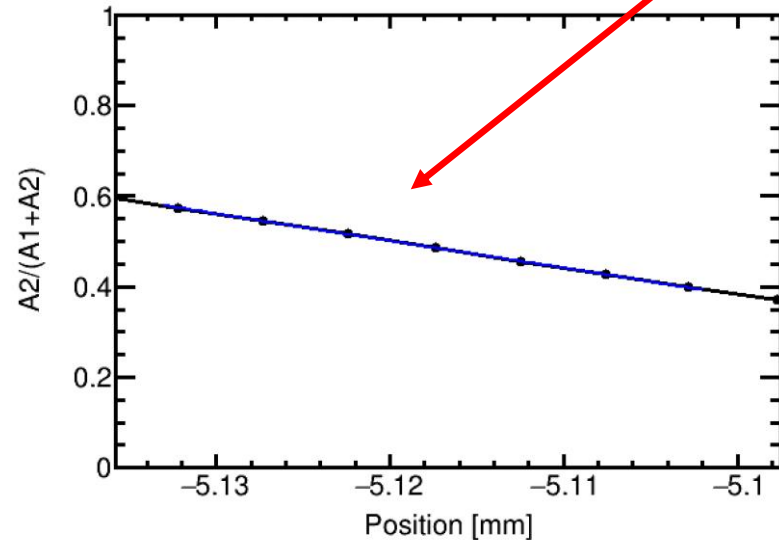
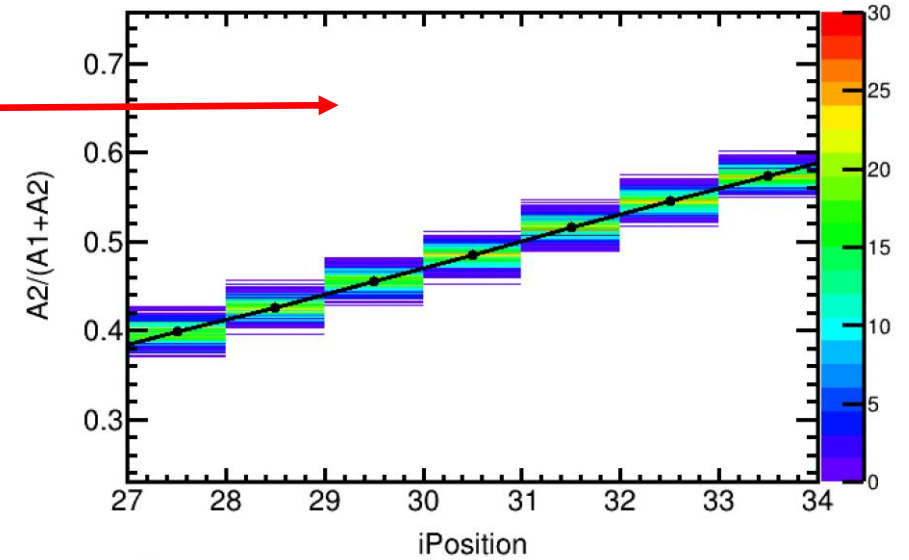
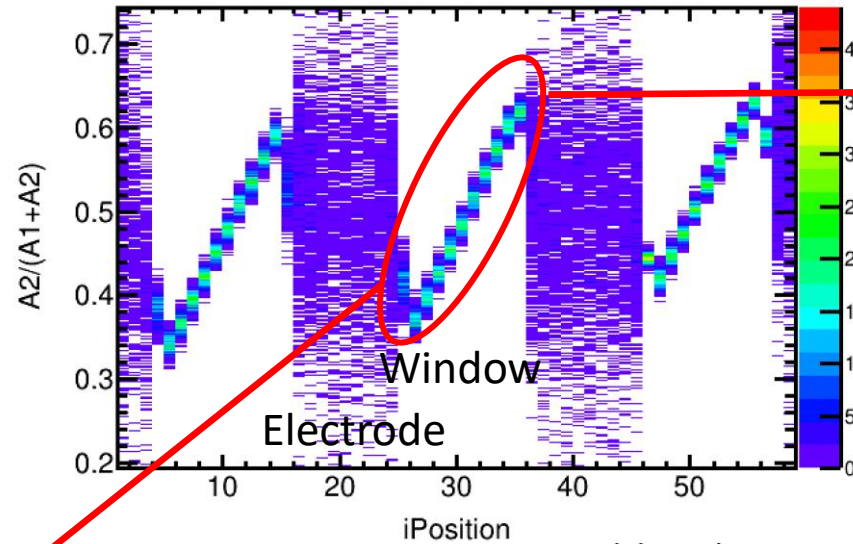
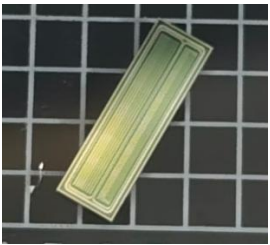
Strip Sensor Spatial Resolution (0.2% Laser)

A_2 and A_1 are the waveform amplitudes of the seed (maximum amplitude) strip and the second strip, respectively.

DUT sensor

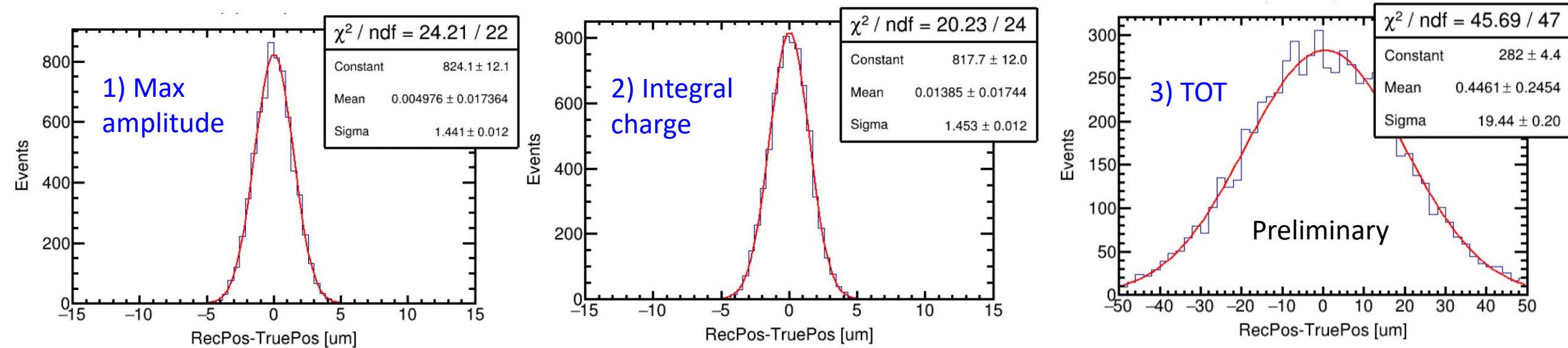


CH-1
CH-2
CH-3
CH-4



The latest tape-out optimized n^+ strip sensor (W4-AC-D9, 2 cm, n^+ dose = 0.1 p) achieved a spatial resolution of $\sim 1.4 \mu\text{m}$.

Sensor Spatial Resolution Using Different Amplitude Estimators (0.2% Laser)



Achieving a spatial resolution below 10 μm using LATRIC's Time-Over-Threshold (TOT) information with a 100 μm strip pitch appears to be challenging and may offer limited flexibility.