

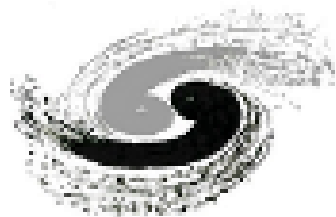
下一代高时间与高位置分辨 AC-LGAD传感器及 专用读出芯片LATRIC 研发与测试

第二十三届全国核电子学与核探测技术学术年会

2026年8月12日

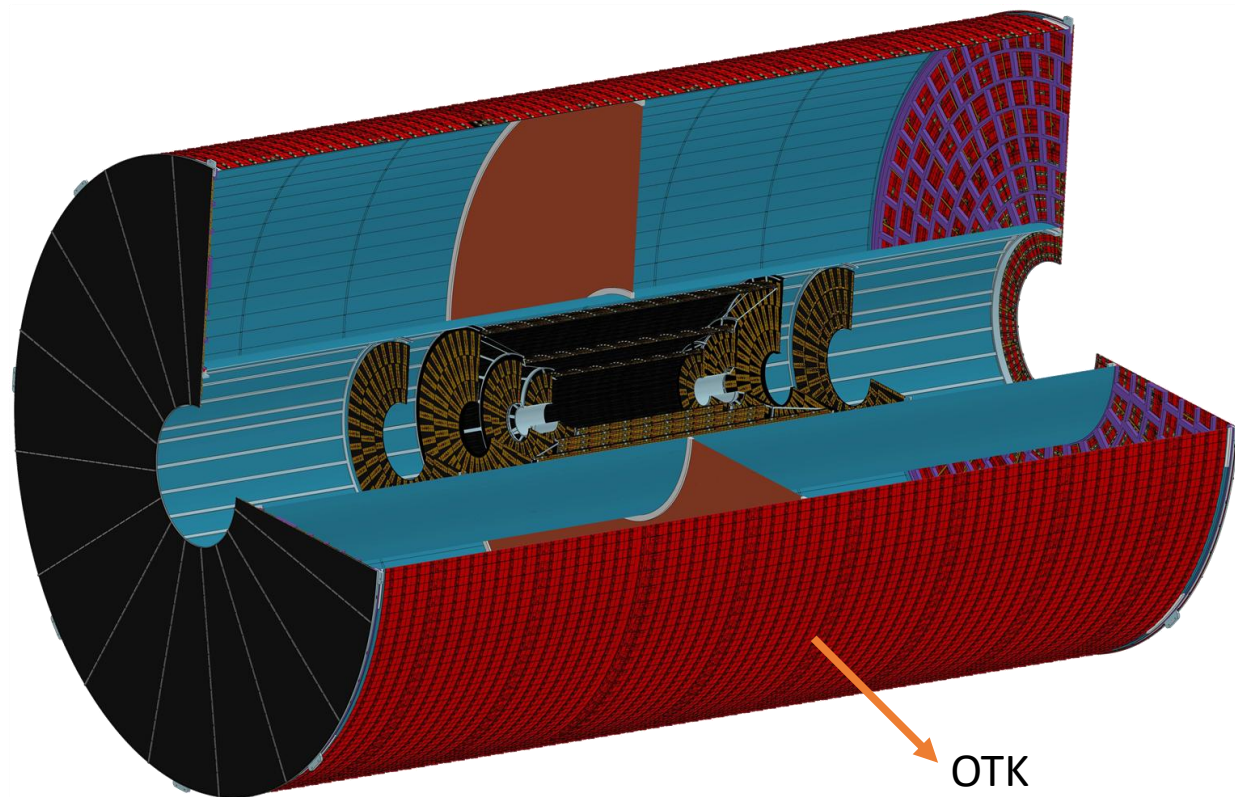
常正则、陈娇龙、陈思雨、崔宇鑫、胡坤、骆首栋、贾文韬、荆小平、李刚、
李筱婷、刘泊璇、刘磊、钱小辉、史欣、王传烨、王聪聪、汪凯宁、严雄波、
叶竞波、张理凯、张希媛、张奕晗、张志航、赵梅、赵展鸿、严琪、**张嘉健**

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

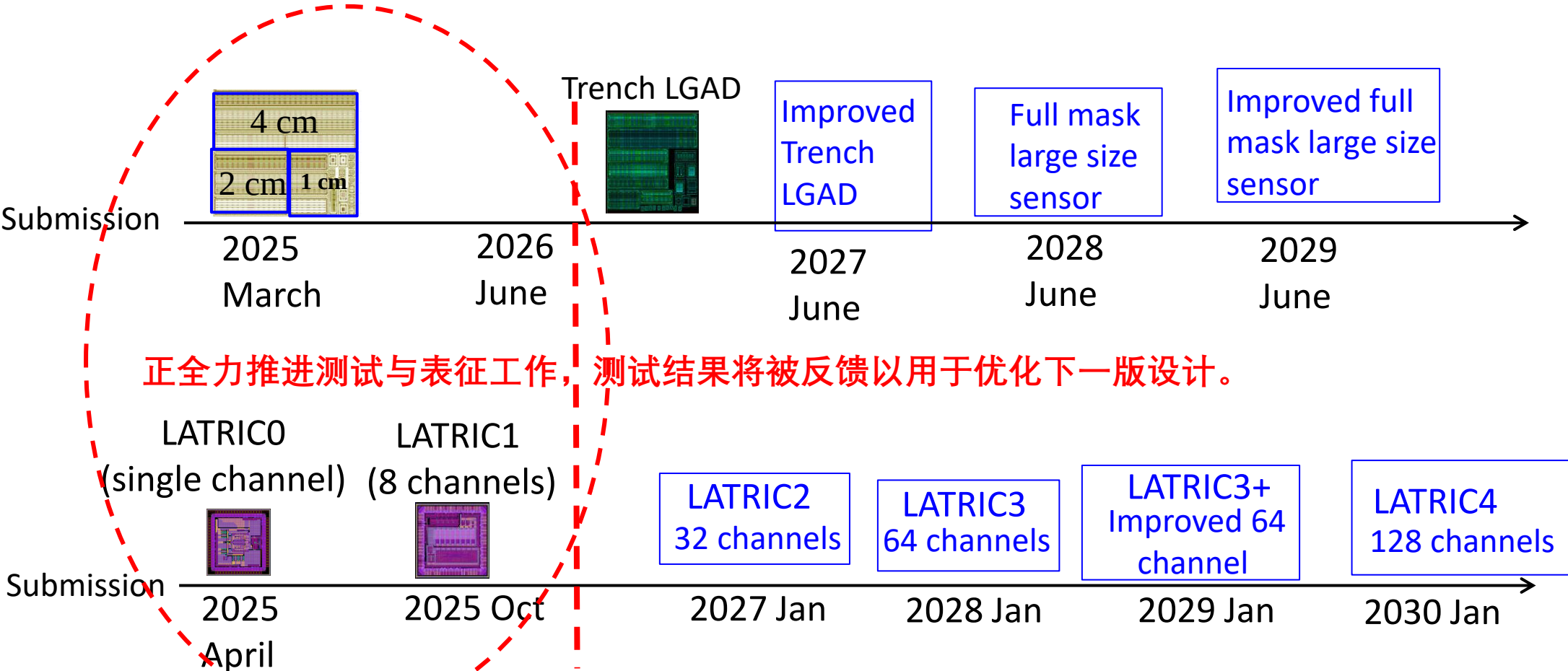


[1] **CEPC Technical Design Report -- Reference Detector**

<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。

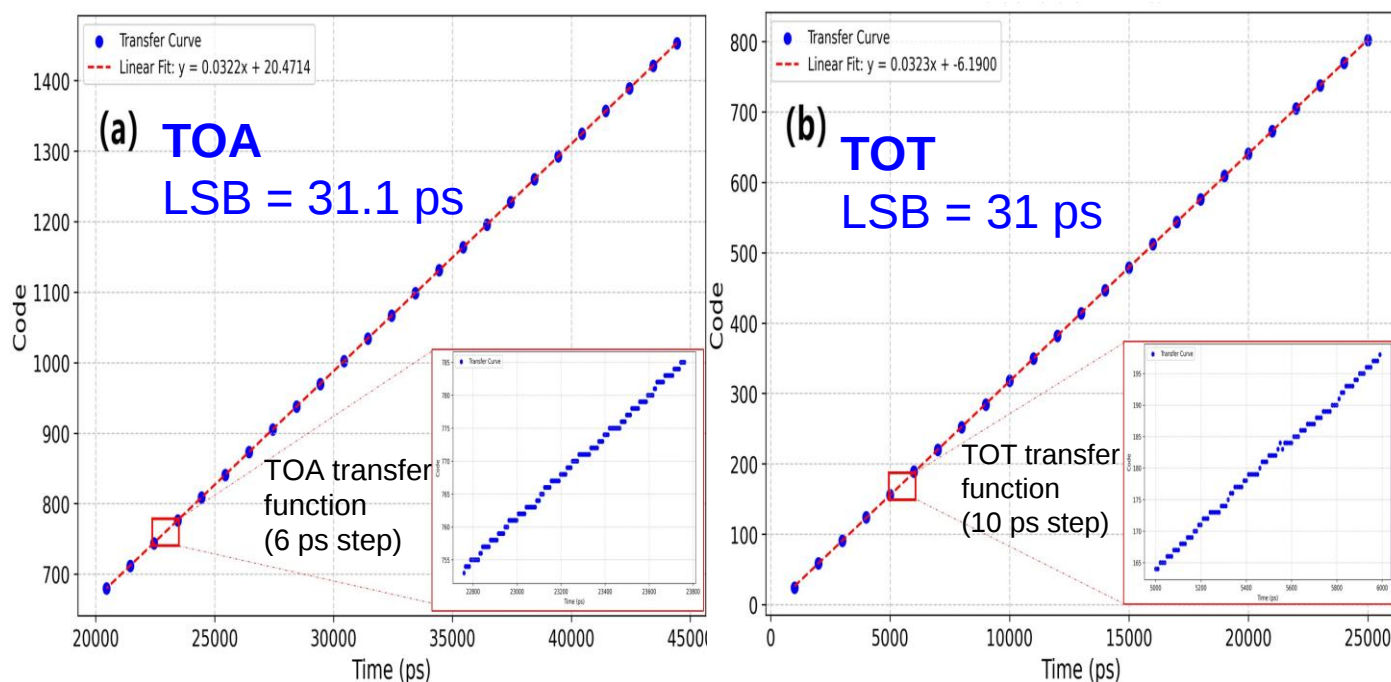
AC-LGAD 读出芯片, LATRIC

详见王传烨报告: [LATRIC1—时间测量ASIC的精度分析与测试结果](#)

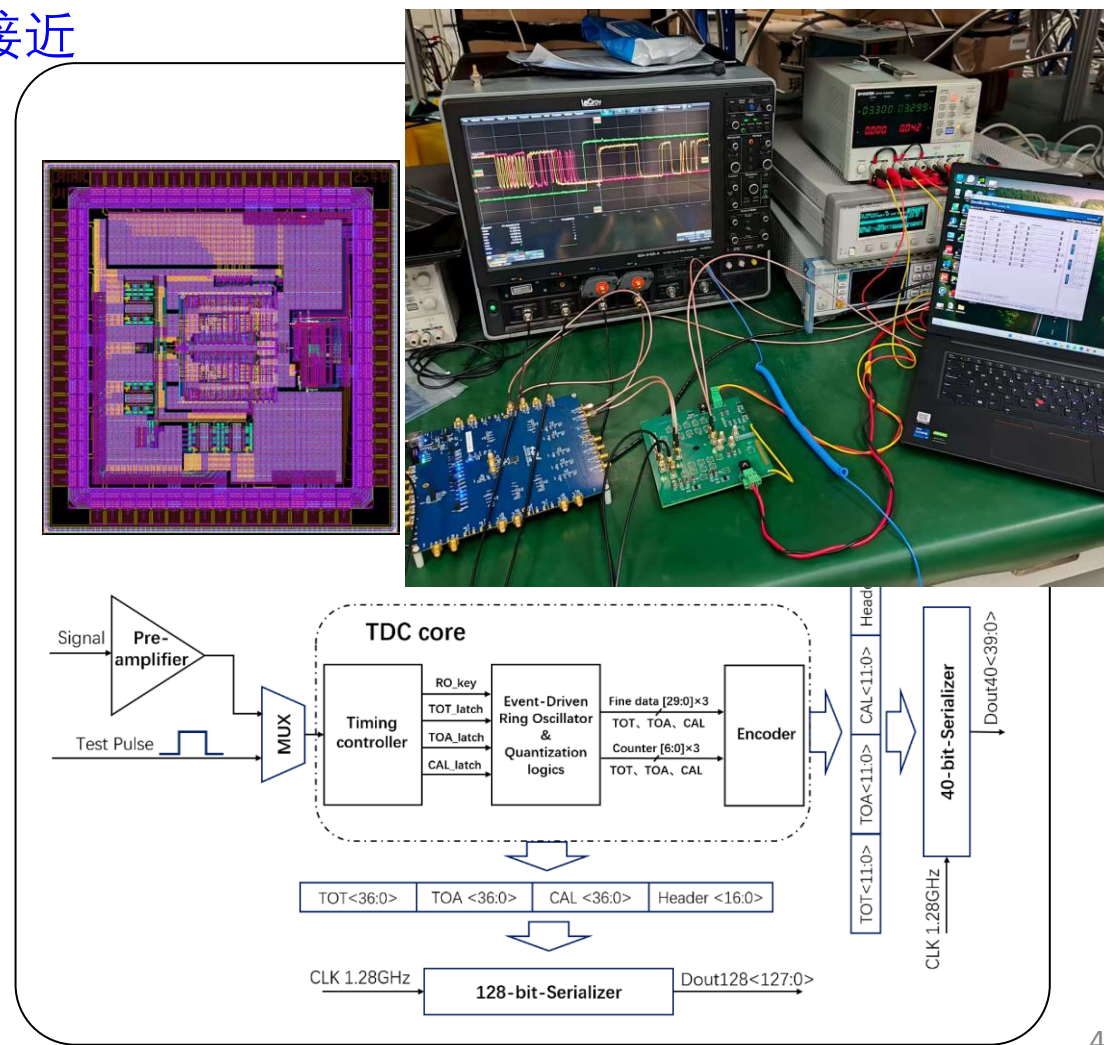
设计目标值:
时间测量精度: <30 ps
位置测量精度: <10 μm
单通道功耗: <20mW
通道数与通道间距: 128; 100 μm

首款单通道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
- 实测功耗满足设计目标值:
 - 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

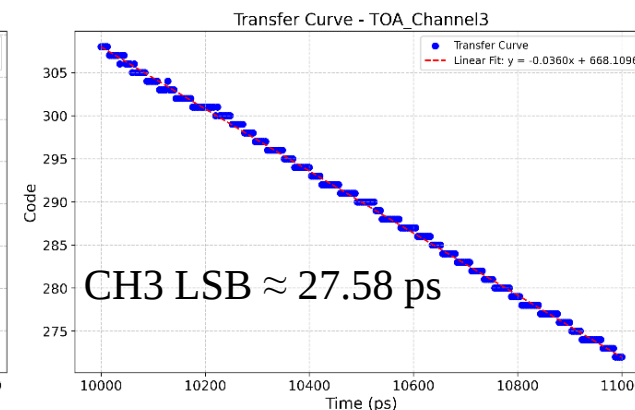
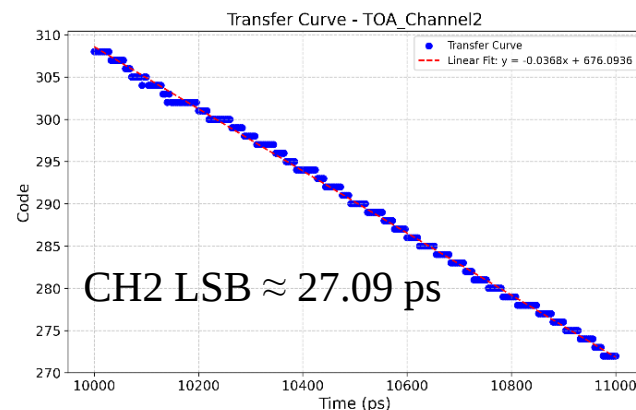
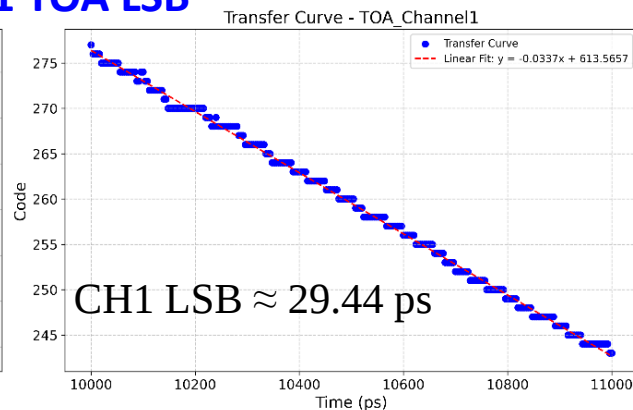
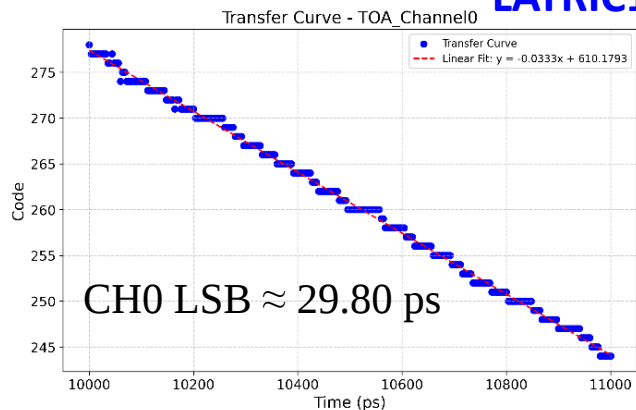
■ 第二版读出ASIC, LATRIC1 (于2025年10月份完成设计并递交流片)

- 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

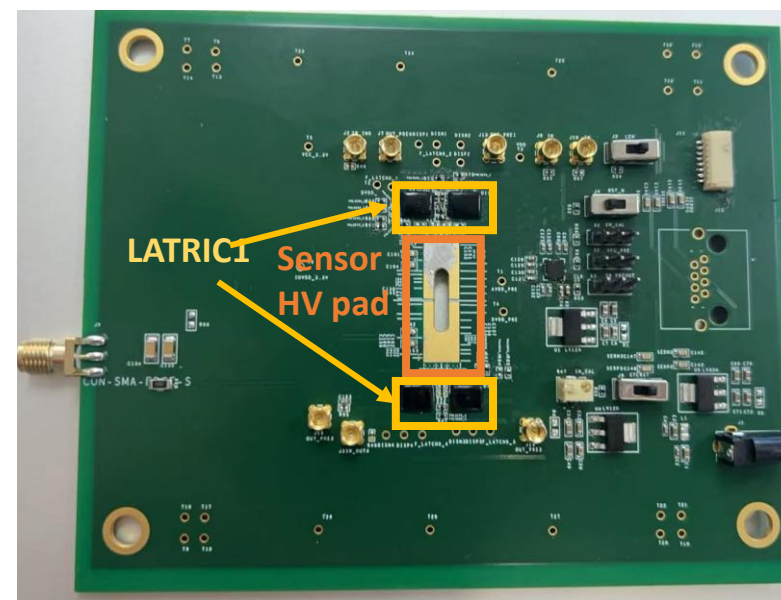
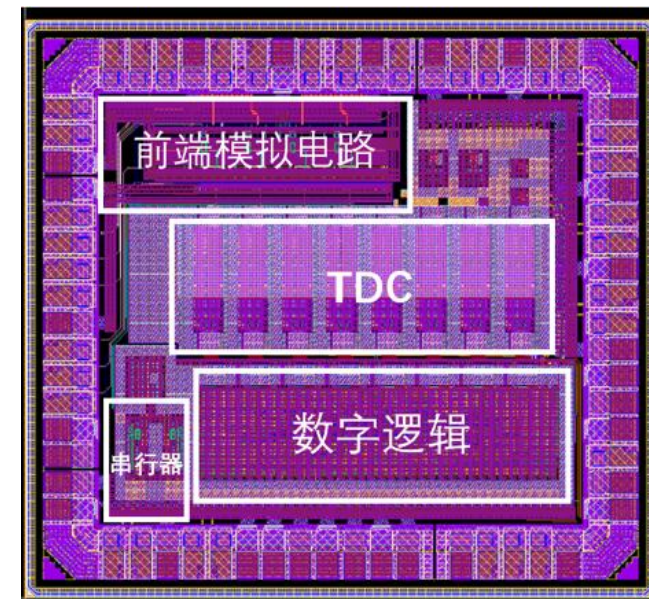
■ 性能优化包括:

- 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



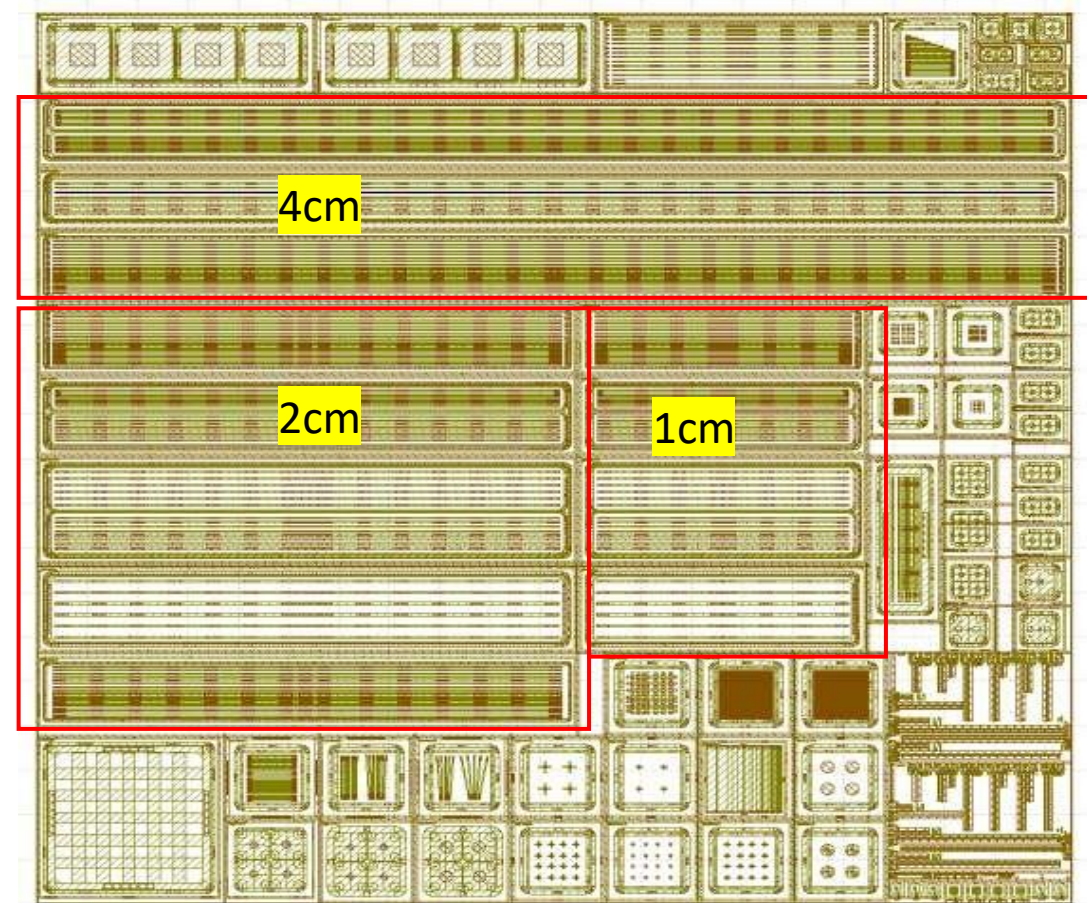
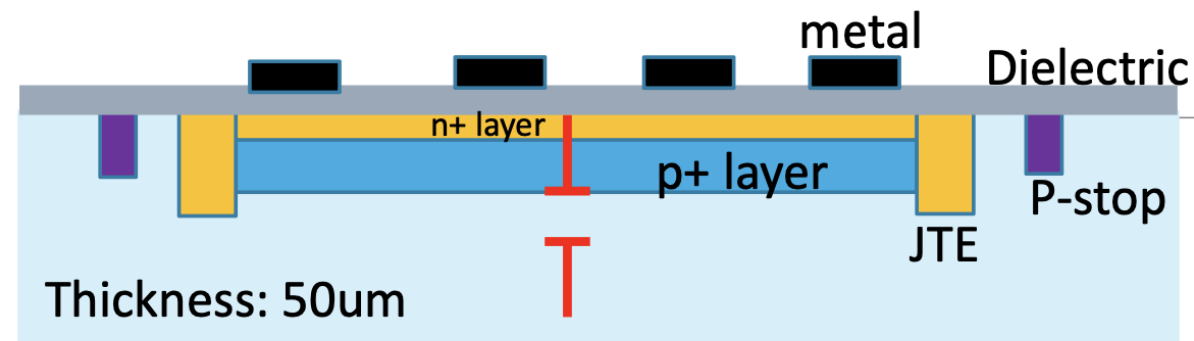
详见王传烨报告:
LATRIC1—时间测量ASIC
的精度分析与测试结果



最新版LATRIC1—传感器集成测试板

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

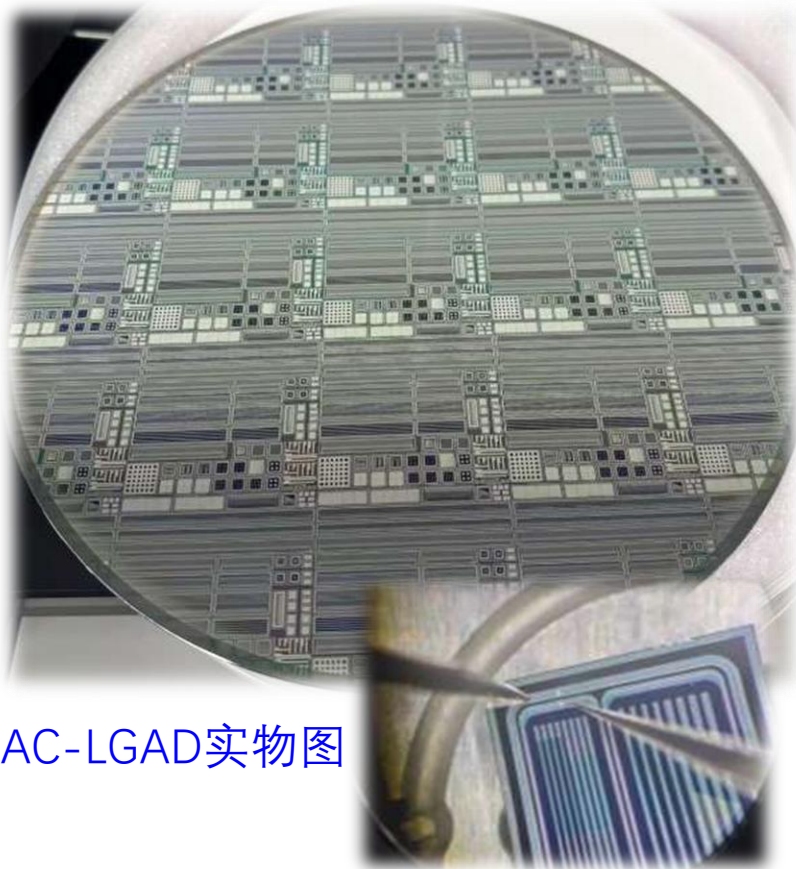


AC-LGAD传感器流片版图

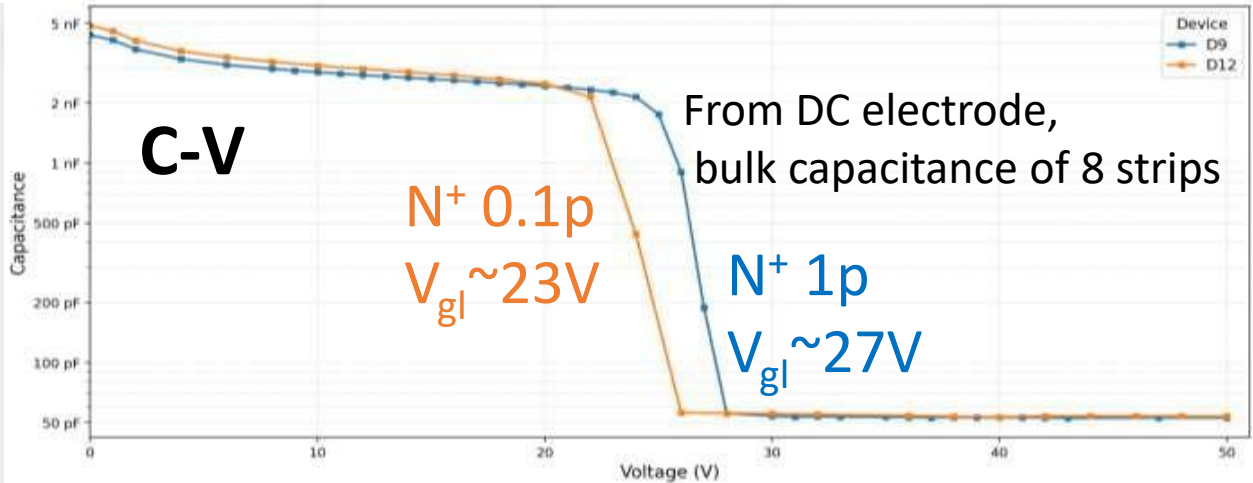
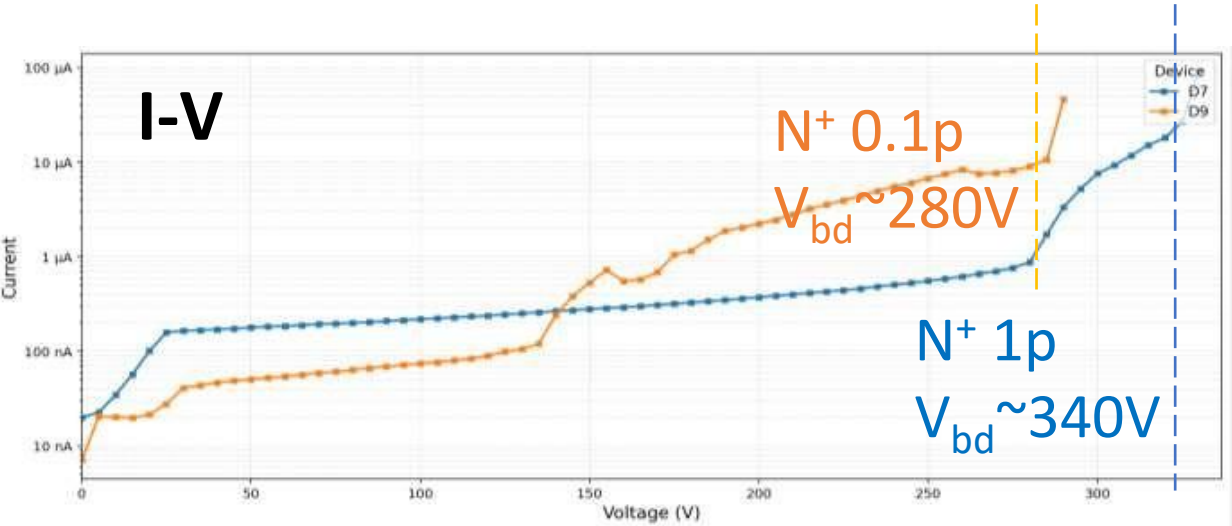
传感器表征

- 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。

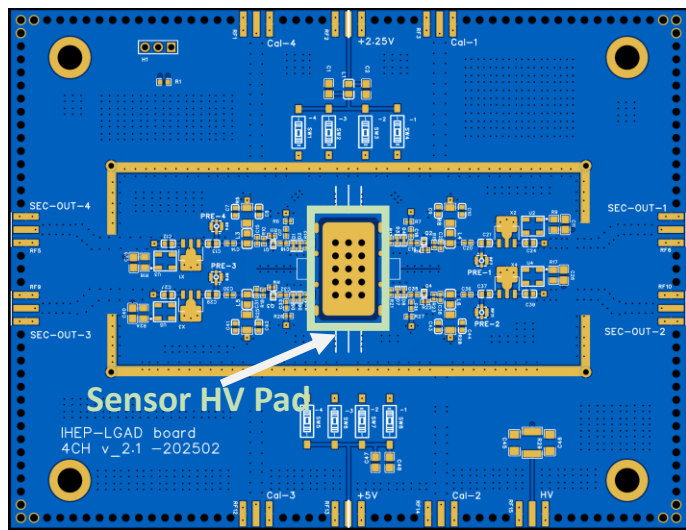
Wafer	EPI Thickness	N ⁺ Dose
1	50μm	10p
2	50μm	10p
3	50μm	0.01p
7	80μm	10p
8	80μm	0.01p
4	50μm	1p, 0.1p
9	80μm	1p, 0.1p



AC-LGAD实物图



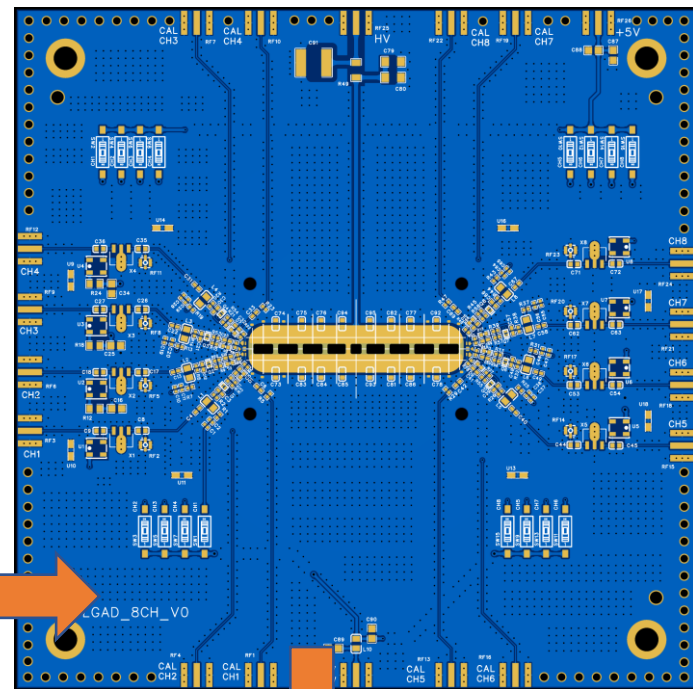
AC-LGAD前置放大板优化



10cm x 13cm

V1: 4通道LGAD前置放大板

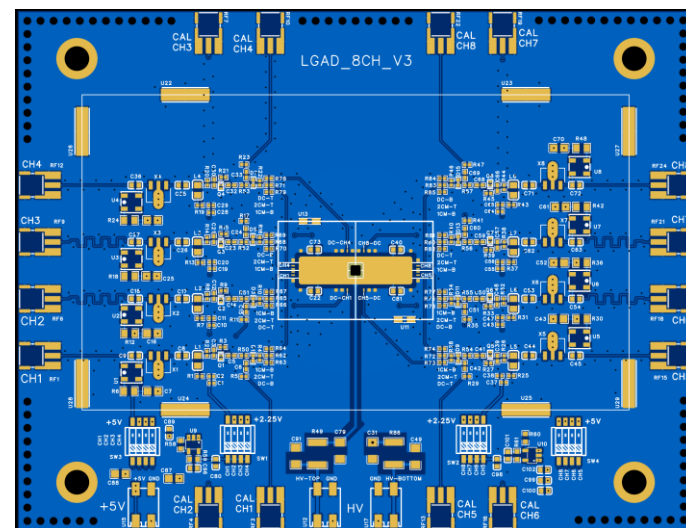
- 为LGAD传感器提供高压偏置。
- 4个信号读出通道
- 每通道约100倍放大



13cm x 13cm

V2: 8通道LGAD前置放大板:

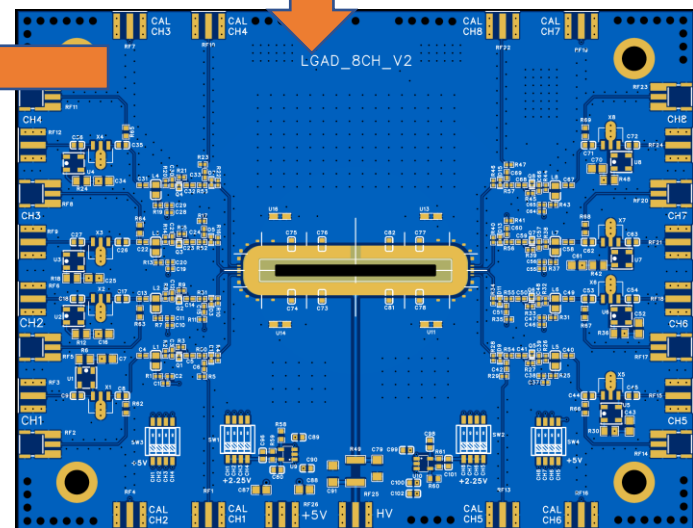
- 增加通道数量
- 扩展高压焊盘以更好兼容条形传感器
- 优化带开槽的高压焊盘几何结构, 以提高粒子探测效率



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

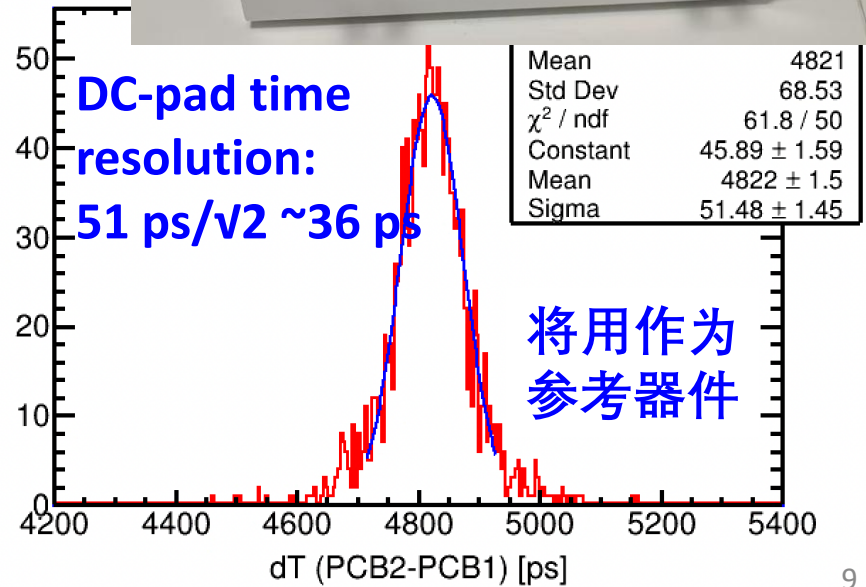
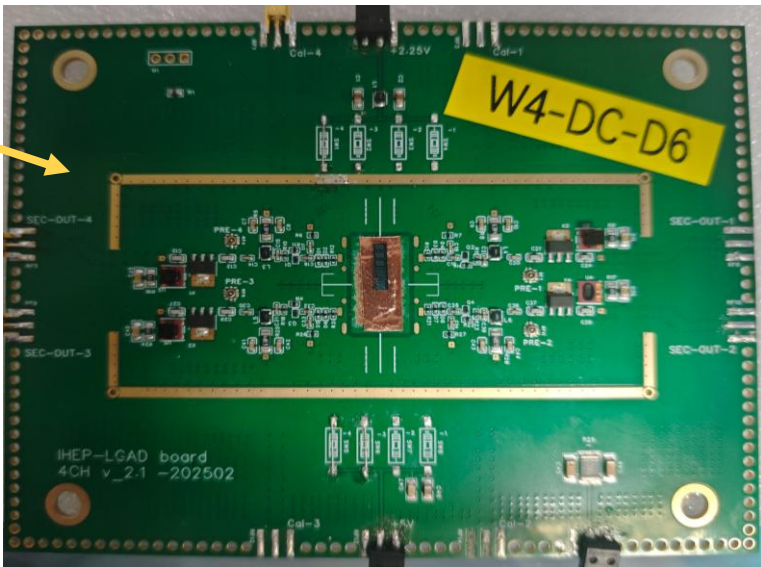
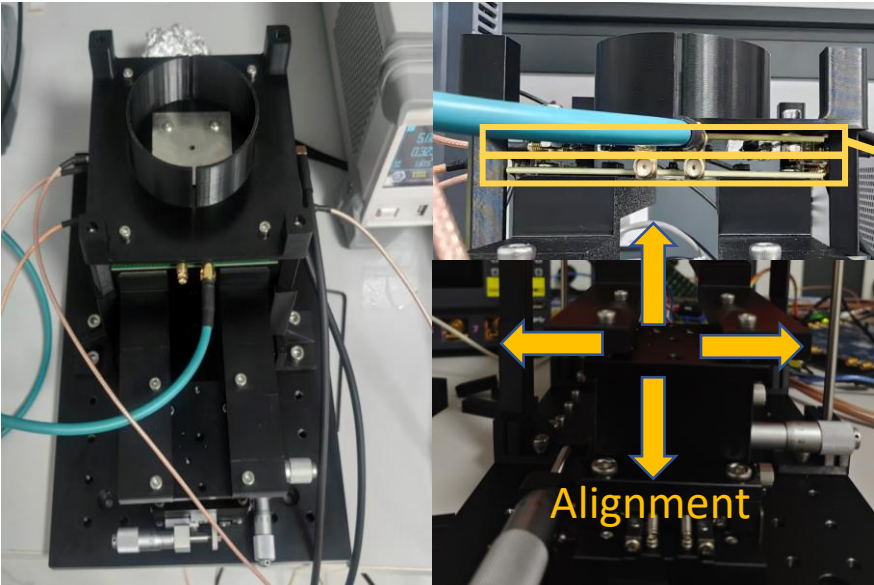
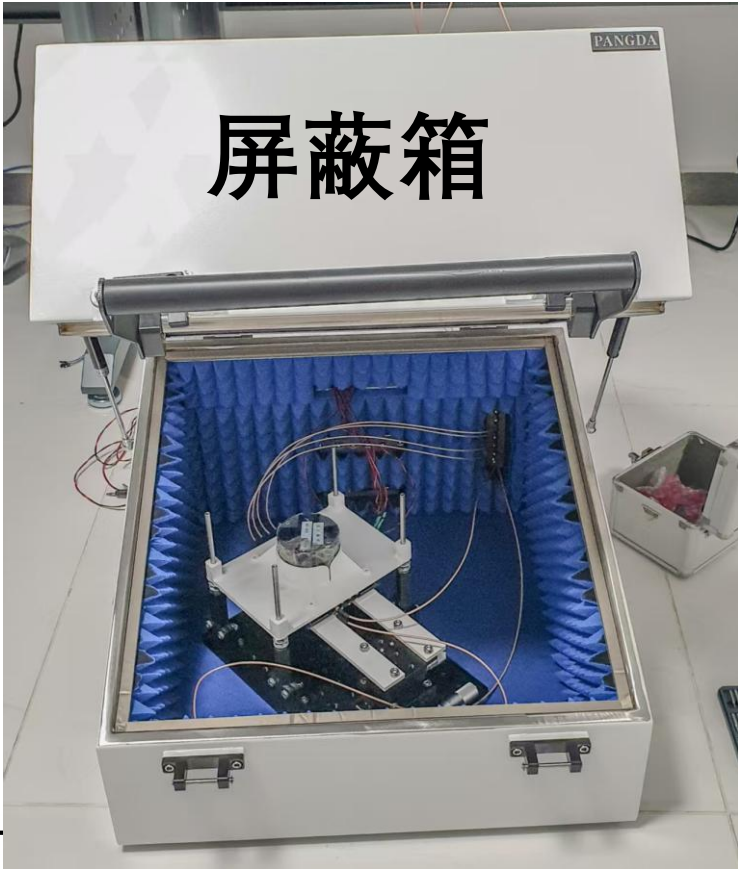
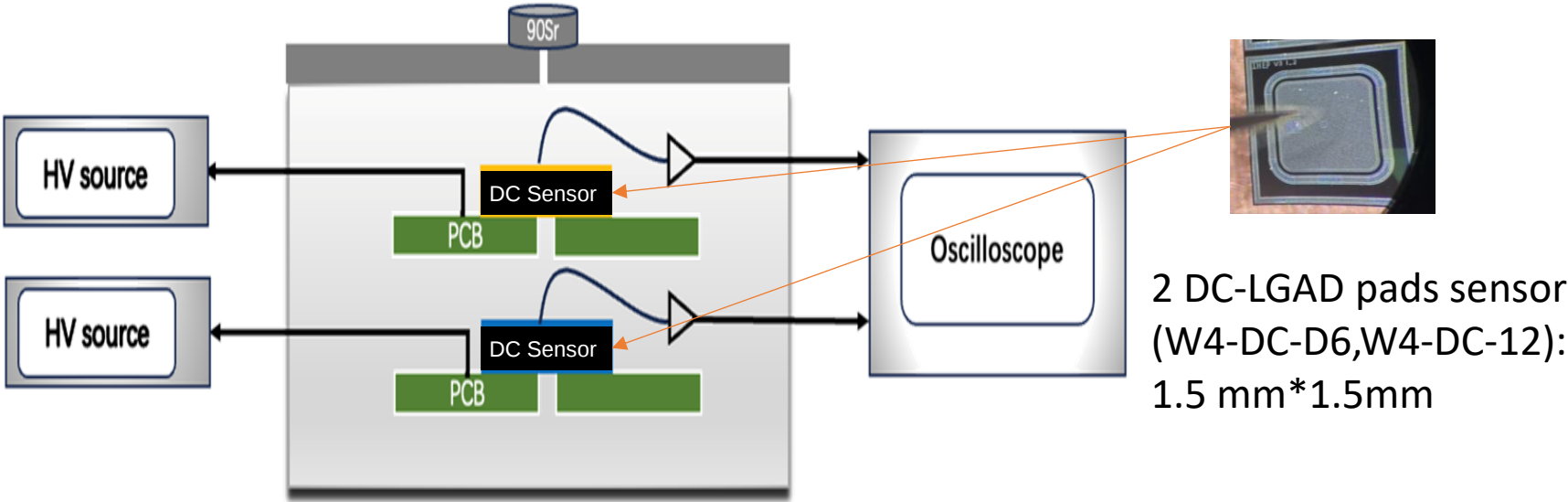


10cm x 13cm

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

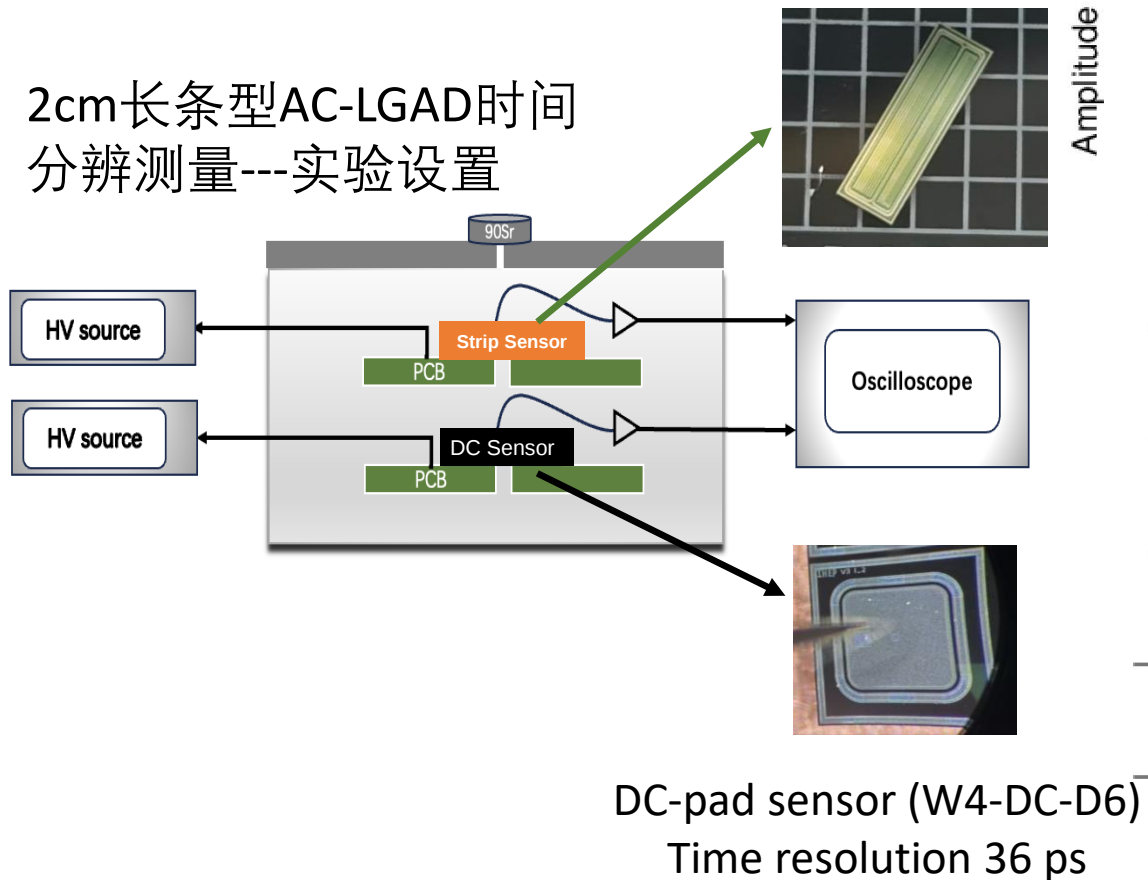
Sr-90 β 源测试装置



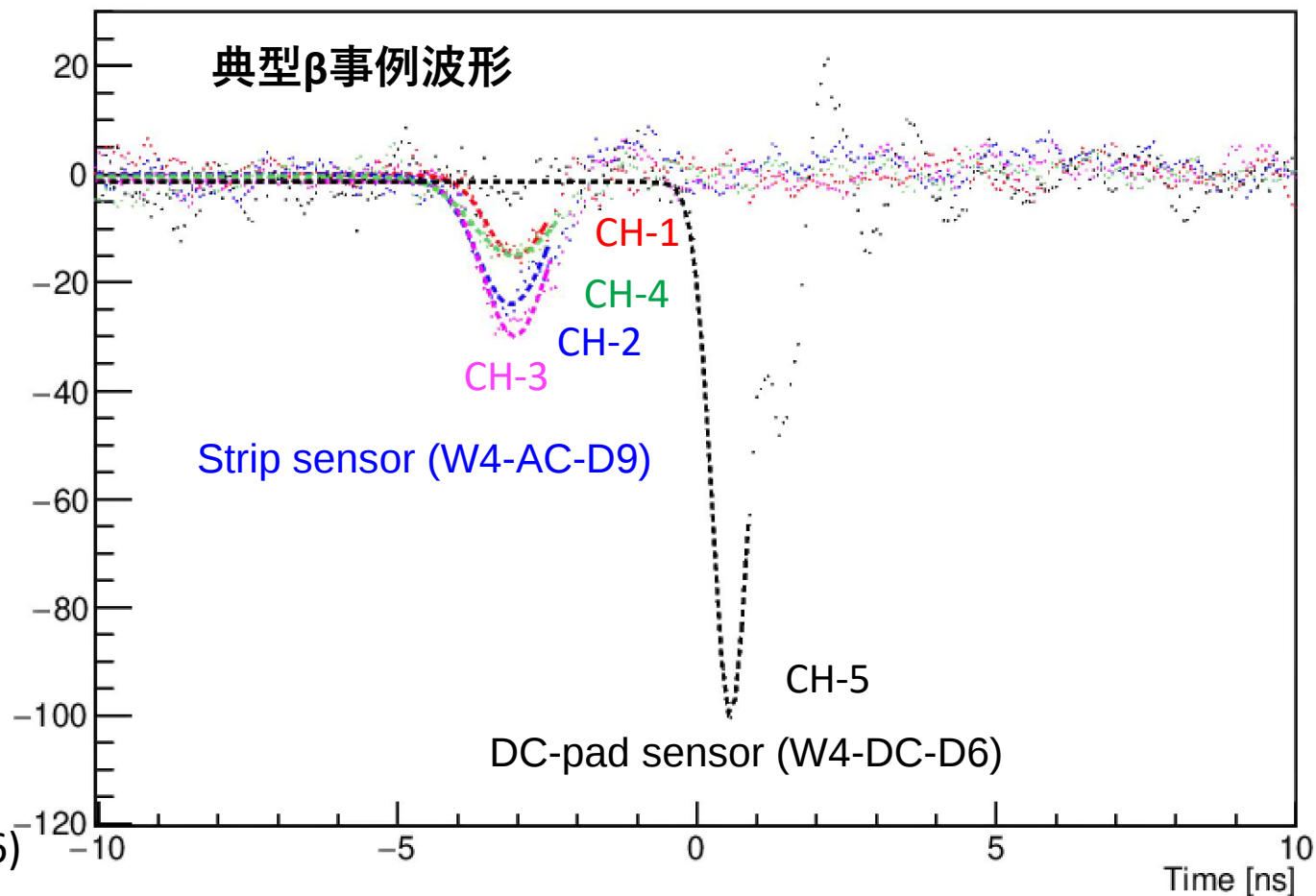
基于 ^{90}Sr β 源的传感器性能测量

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]

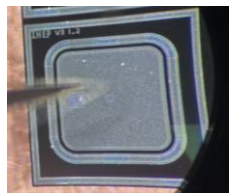


2cm长条传感器时间分辨率(β -Source Test)

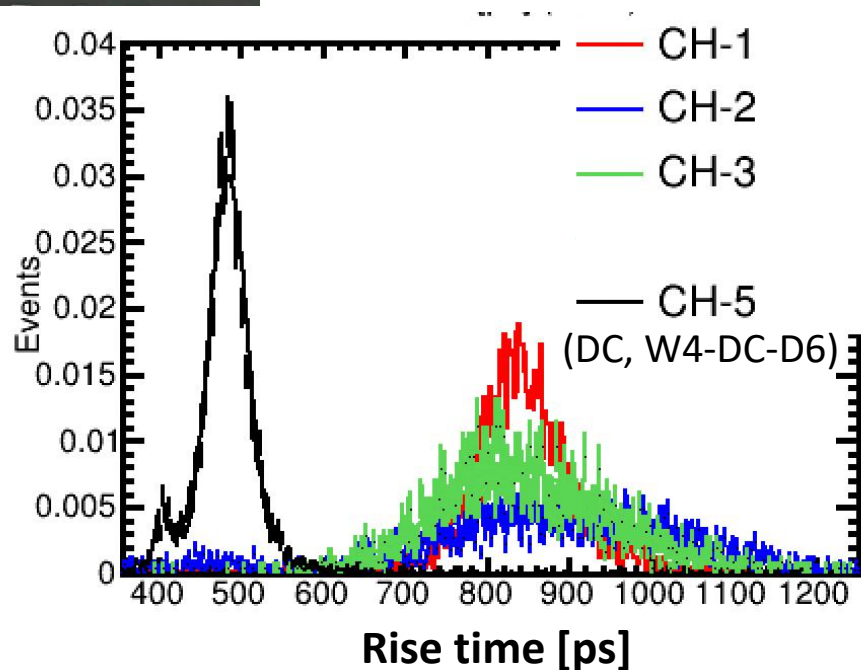
DUT sensor (AC-LGAD)

Ref sensor (DC)

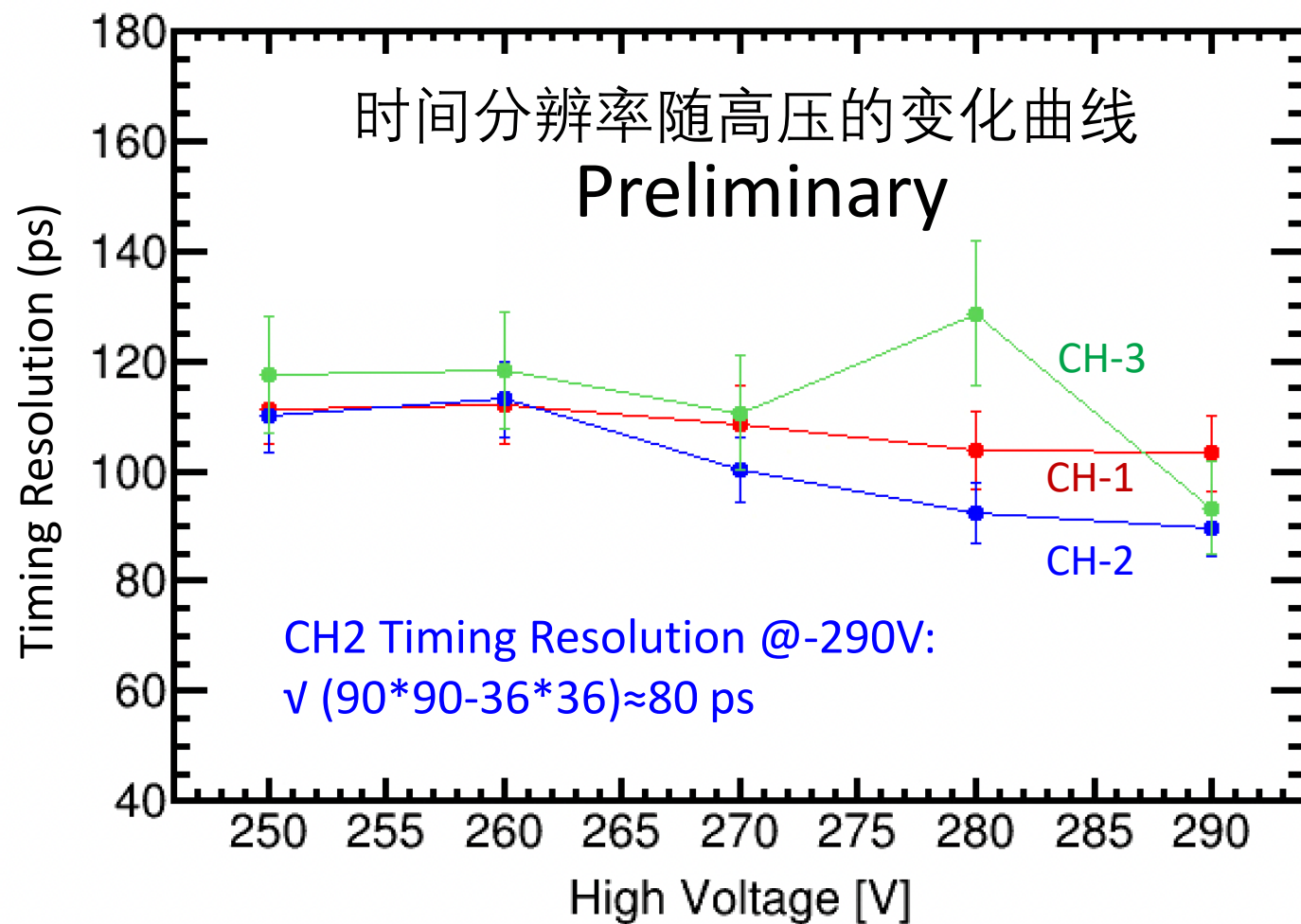
CH-1
CH-2
CH-3
CH-4



CH-5



W4-AC-D9, 条长2 cm, 条间距 100um, 电极宽度50um



- 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

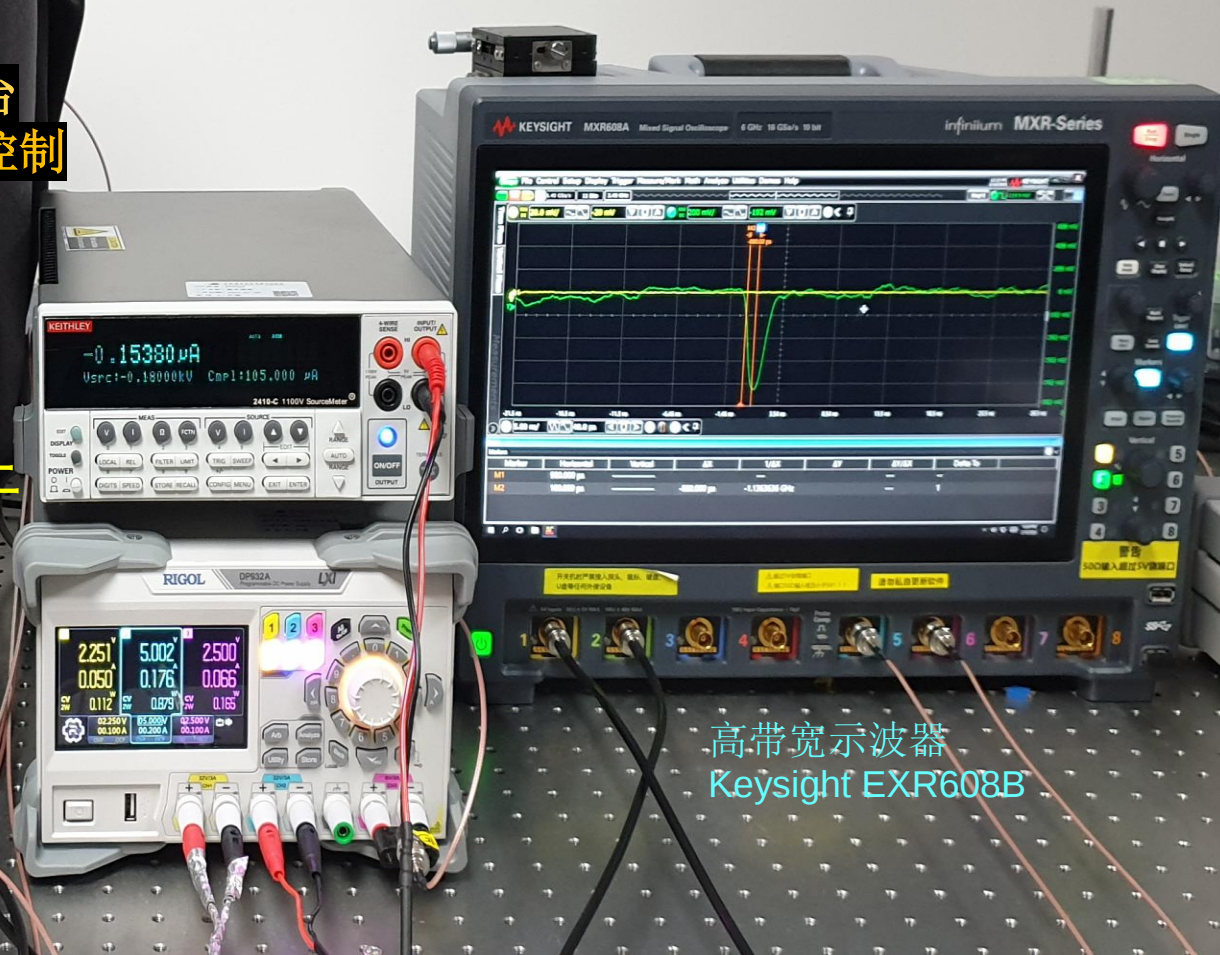
高精度位移平台
由可编程电机控制

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



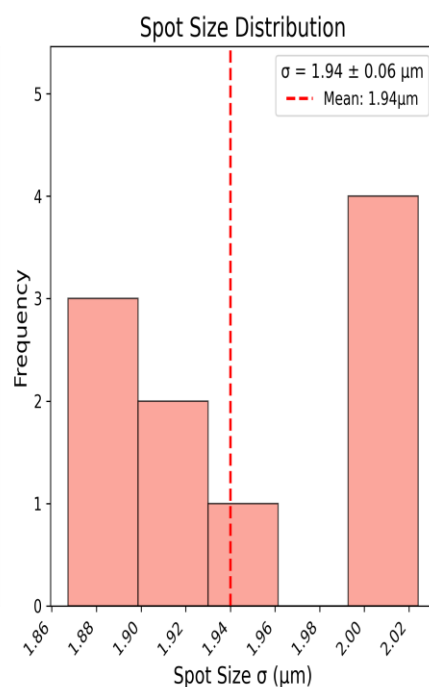
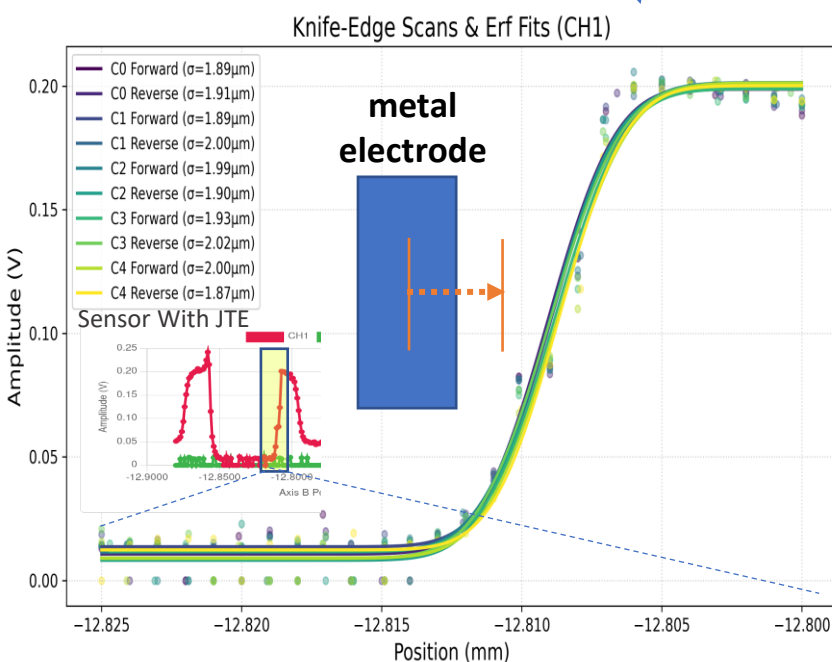
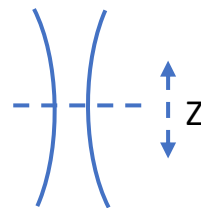
高带宽示波器
Keysight EXR608B

光斑尺寸最小化

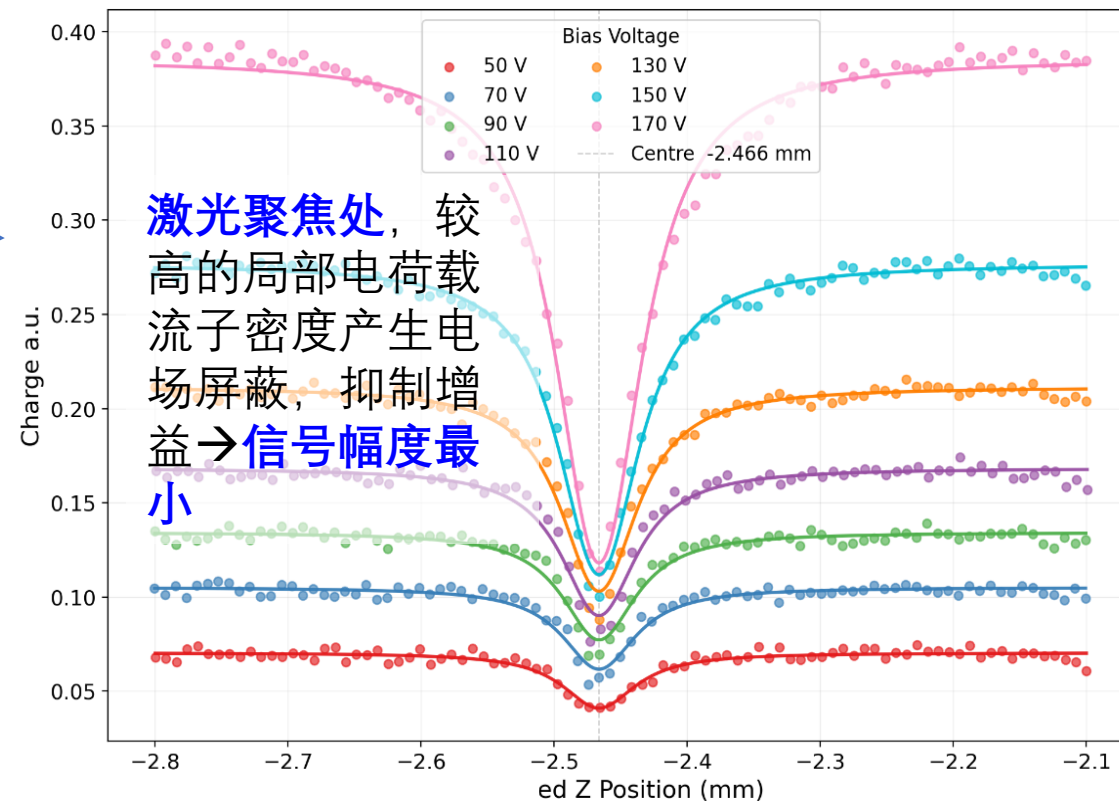
[10.1016/j.nima.2025.170844](https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170844)

采用两种独立方法进行交叉验证:

1. 增益抑制效应 → 调整Z轴位置
2. 刀刃法 → 在每个Z位置横跨电极边缘进行扫描



Gain suppression effect



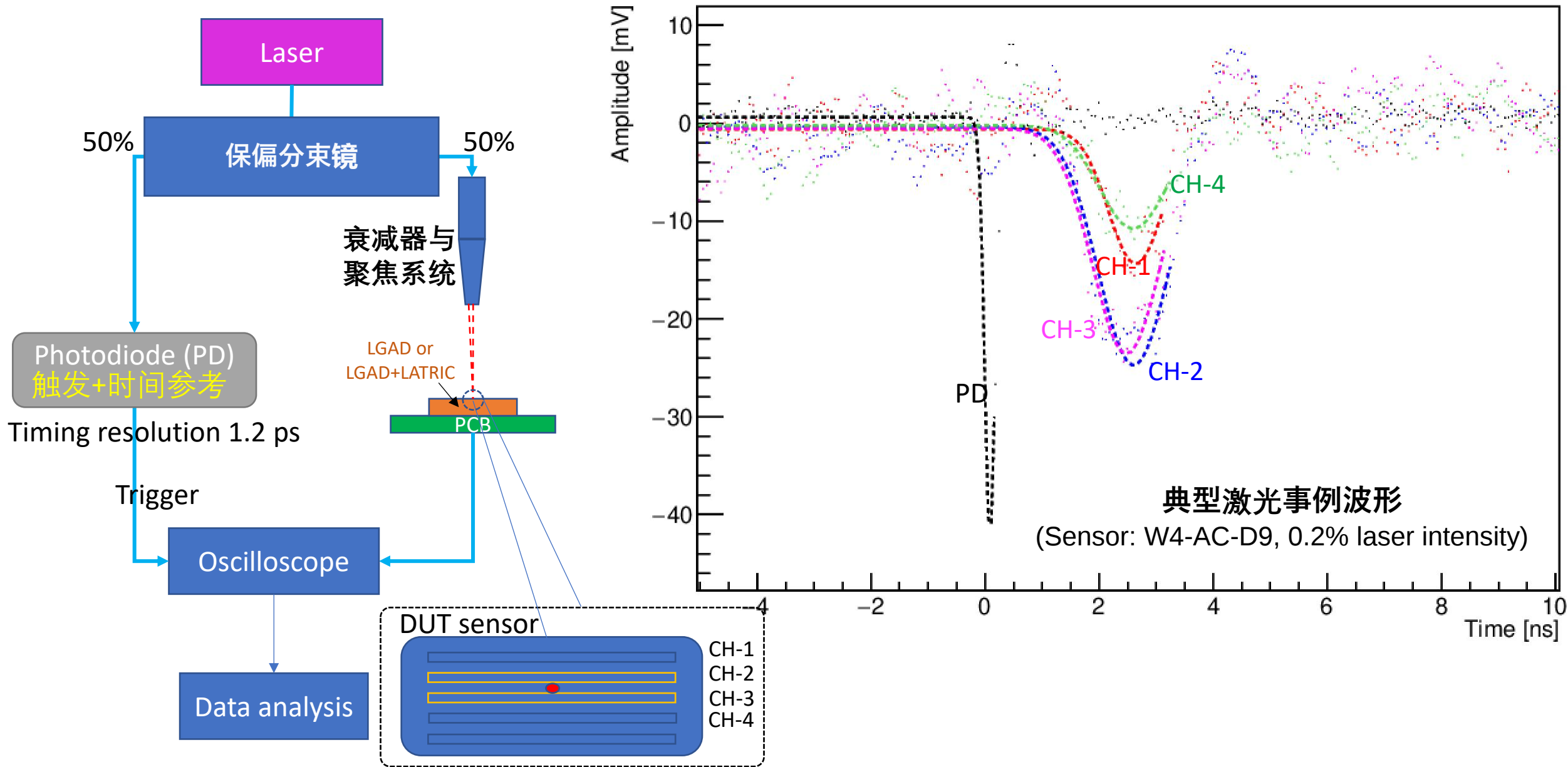
激光聚焦处，较高的局部电荷载流子密度产生电场屏蔽，抑制增益 → 信号幅度最小

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

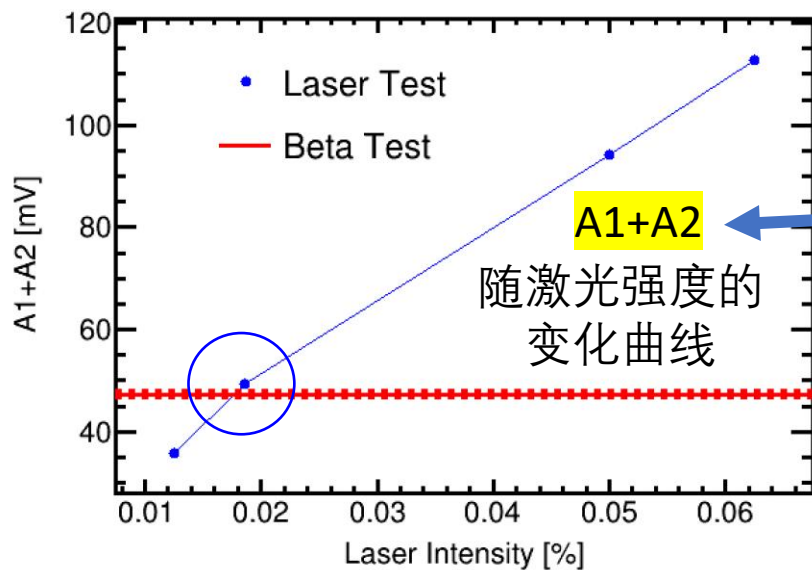
- w_0 : The beam waist (minimum radius).
- z_0 : The focal point position.
- z_R : The Rayleigh length.

确认可调式出光斑半径: $< 3\mu\text{m}$

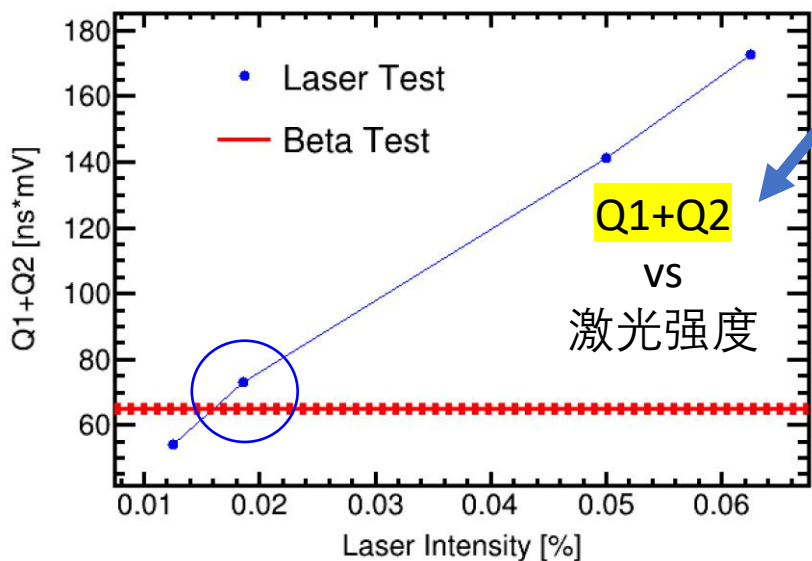
基于红外激光的传感器性能测量



β -激光等效调试



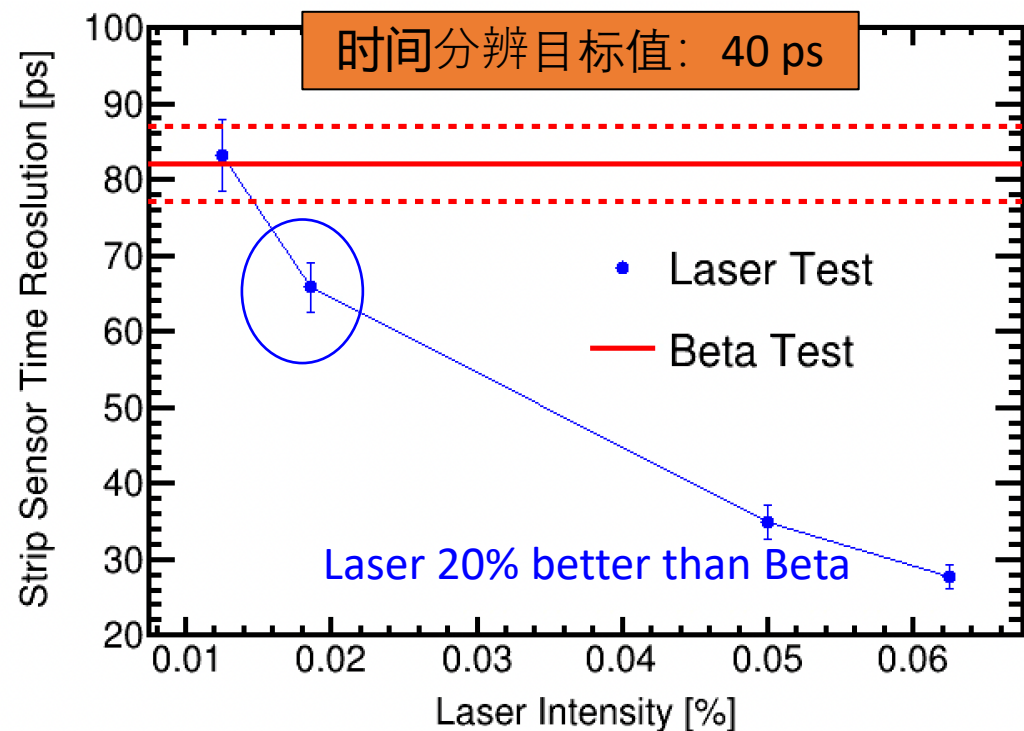
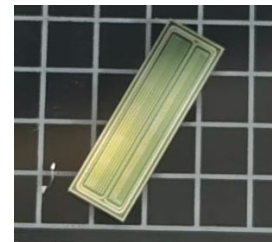
A1和A2分别为seed strip（最大幅值）和第二大幅值的微条的波形幅值。



Q1和Q2为对应通道波形的积分电荷（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。

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



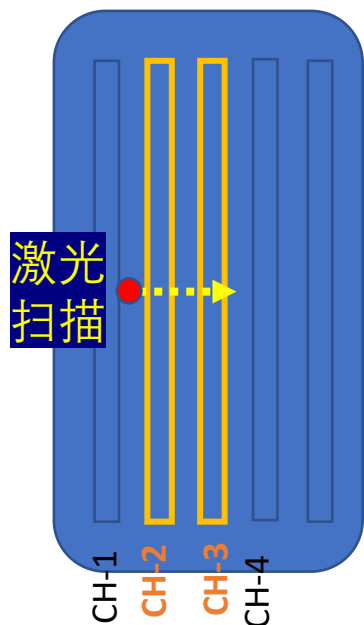
0.02%激光强度下，时间分辨率约为65 ps，比 β 源测试（约80 ps）好20%，这是由于激光测量中不存在 dE/dx 的朗道涨落

MIP等效激光强度(0.02%) 下长条型传感器的空间分辨率

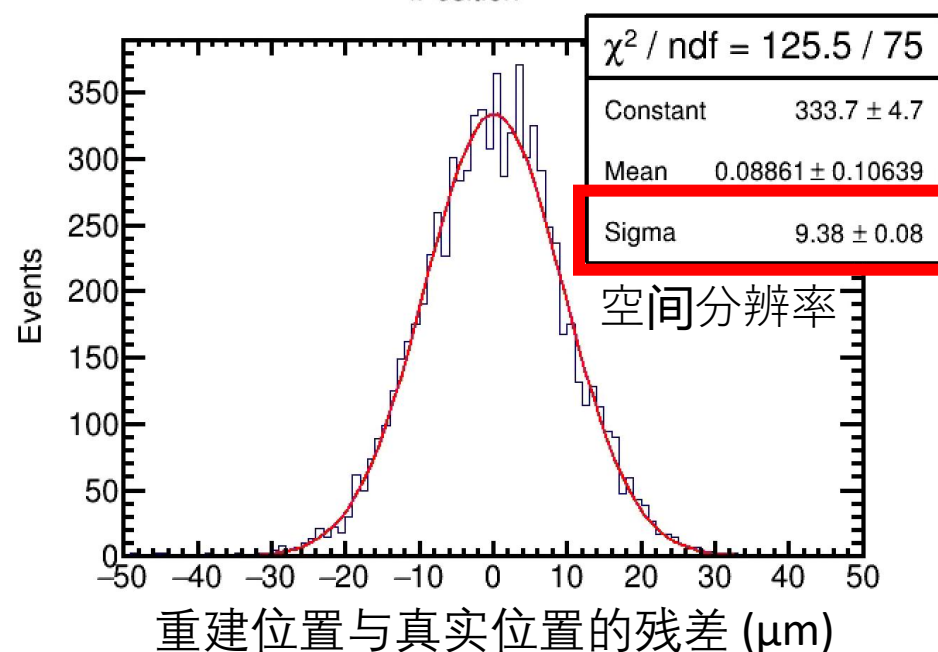
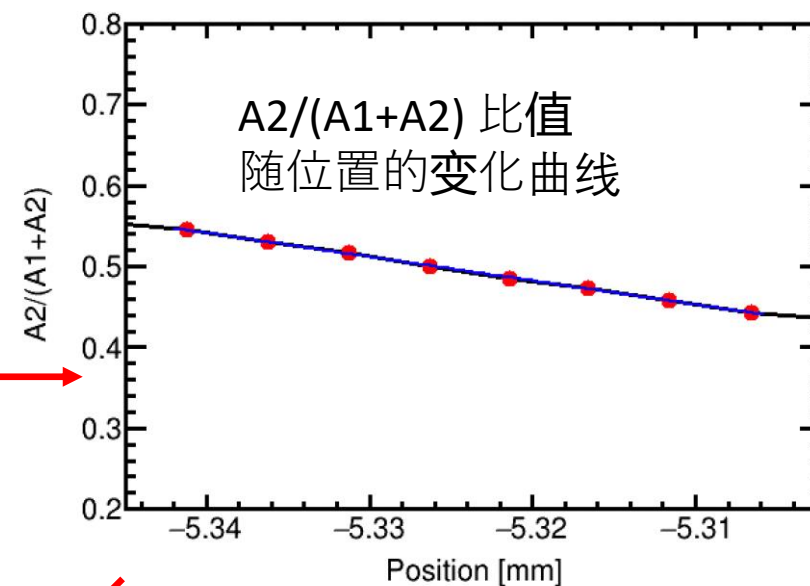
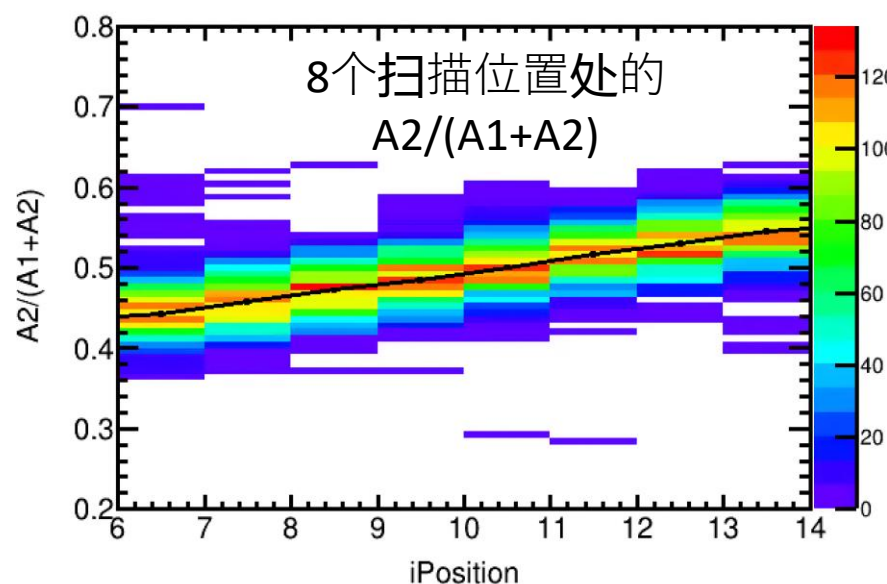
位置分辨目标值: $10\mu\text{m}$

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 $5\mu\text{m}$
每步采集1000个波形



W4-AC-D9:
长2 cm, 间距 $100\mu\text{m}$,
电极宽度 $50\mu\text{m}$,
 n^+ 注入剂量为0.1 p

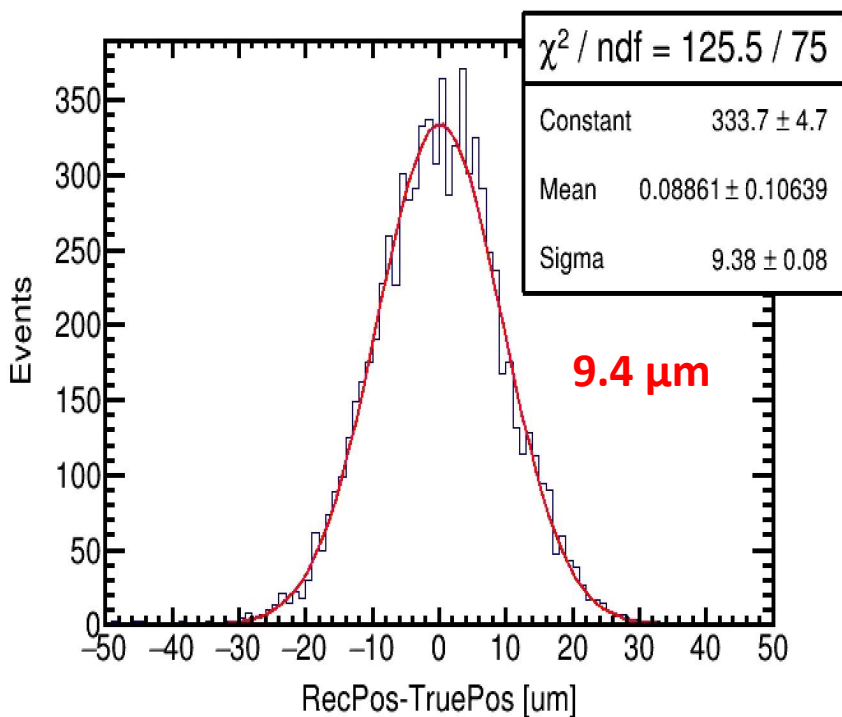


位置重建

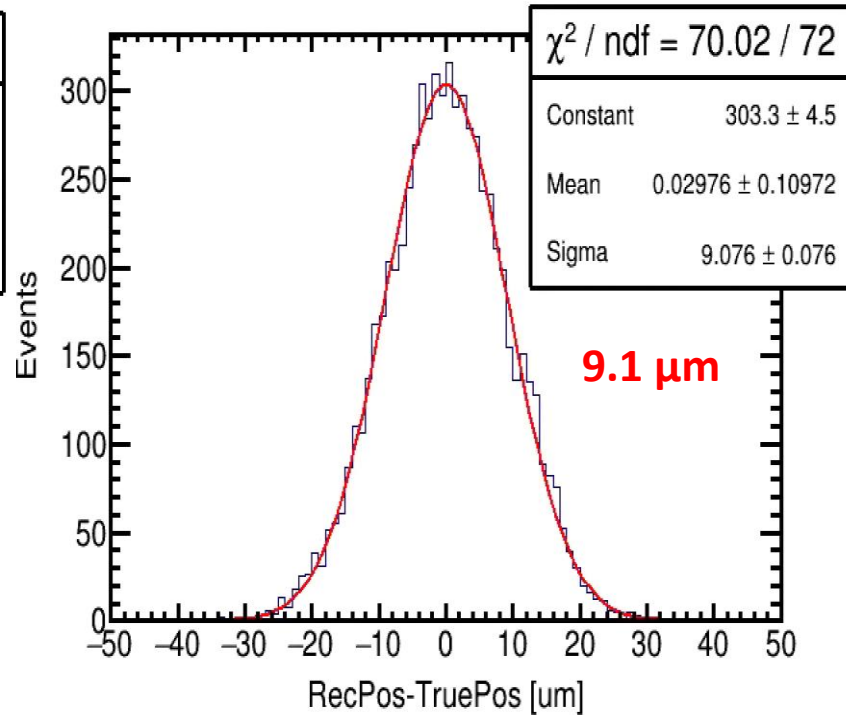
n^+ 注入剂量为0.1 p的长条型传感器的空间分辨率为 $9.4\mu\text{m}$ 。

不同estimator的传感器空间分辨率

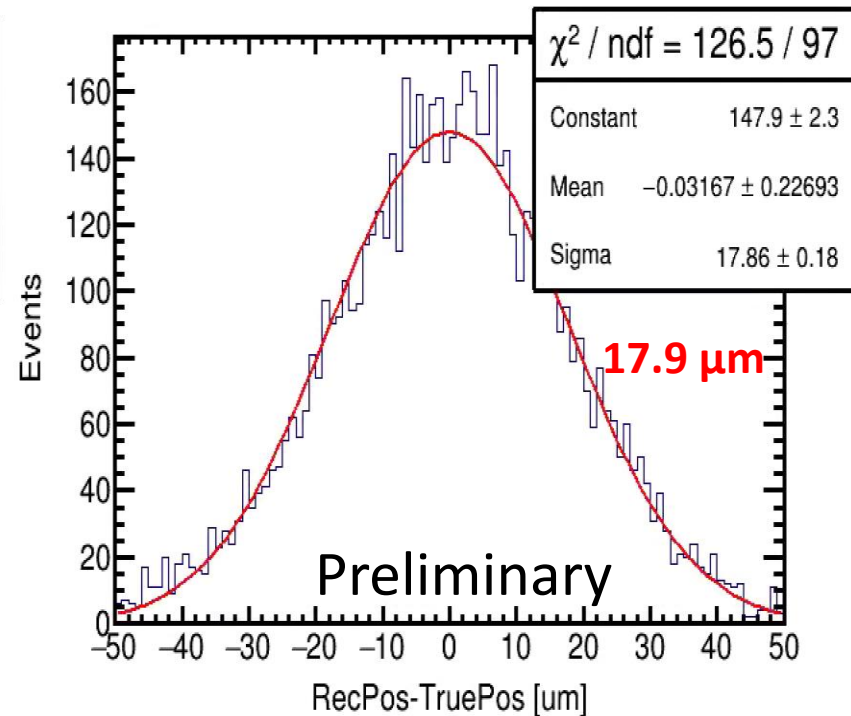
1) 最大幅值



2) 积分电荷



3) 过阈时间 (TOT)



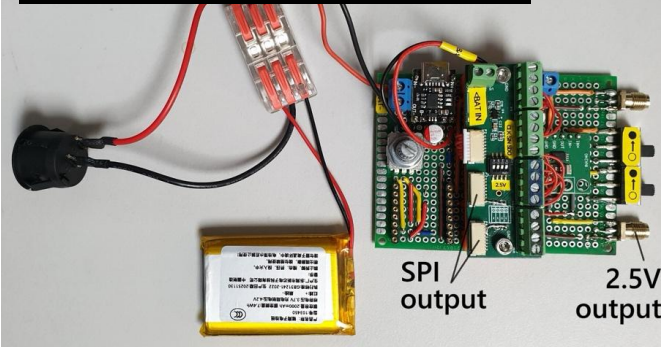
在100 μm 条间距下，仅利用LATRIC的TOT信息来实现优于10 μm 的空间分辨率有较大挑战。

LATRIC0 (单通道) 与AC-LGAD 的联合测试

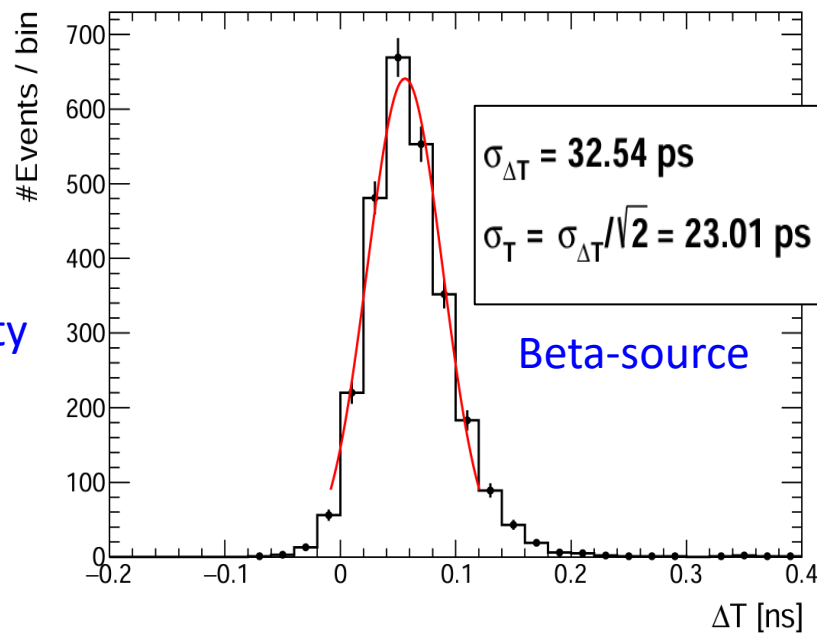
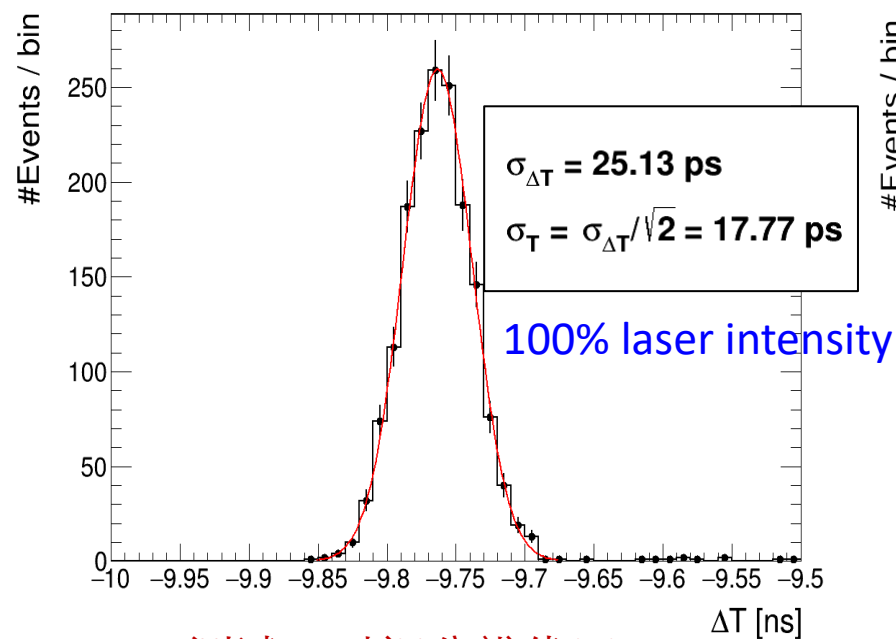
LATRIC读出芯片研制目标: 时间分辨优于30 ps, 匹配10 μm 位置分辨, 实现64通道及以上的集成



用于DAC控制的远程 SPI隔离模块 (RSM)

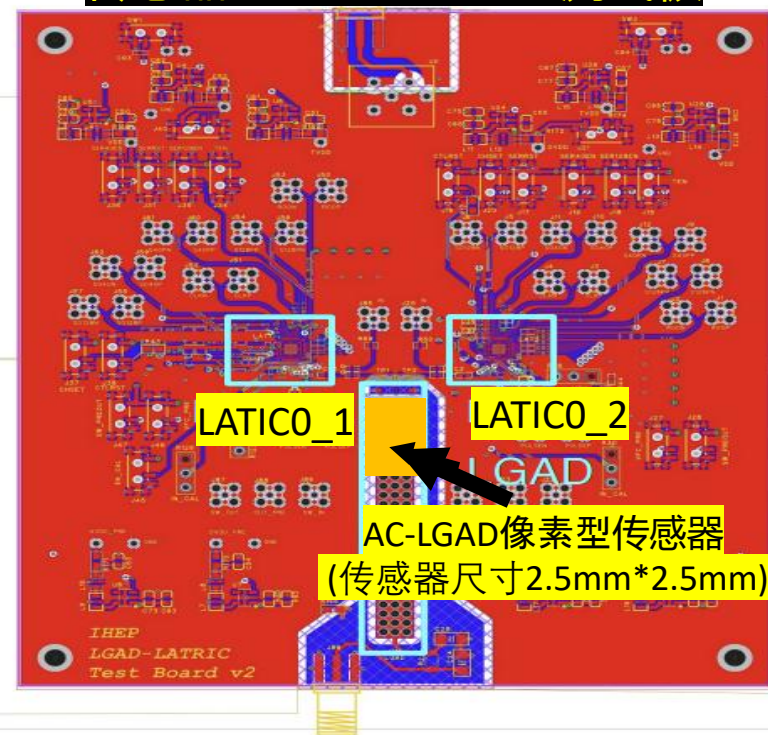


同一传感器; 两片LATRIC0芯片之间的时间差, ΔT 分布



- β测试: 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

