



# 应用于束流亮度监测的 LGAD探测器研究进展

---

赵梅

中科院高能所

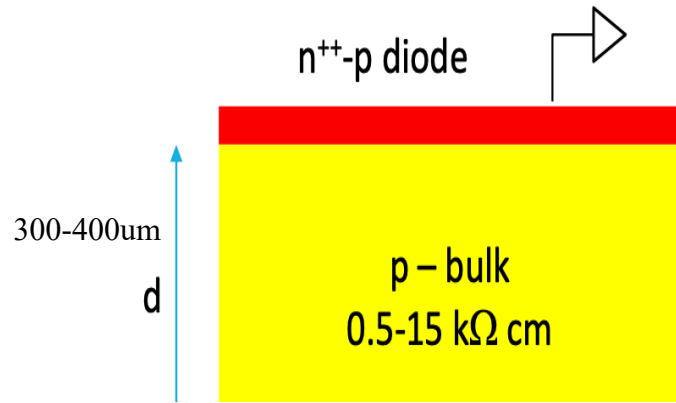
2026-4-18



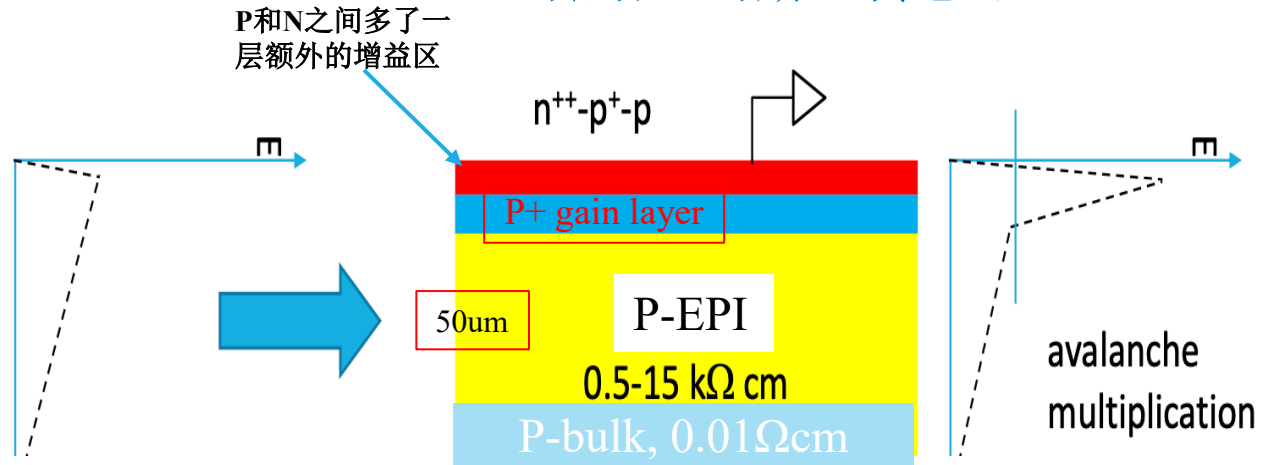
# LGAD探测器

➤ Low Gain avalanche detector: 低增益雪崩二极管/探测器

一般的PIN结传感器



低增益雪崩硅传感器



- 与PIN相比，增加了p+增益层，增益10-50，信号大→信噪比变大
- 同时减薄了耗尽层(漂移区) → 上升时间变短
- 与SiPM比较，工作在线性区域，无自触发

$$\sigma_{jitter}^2 = \left( \frac{t_{rise}}{S/N} \right)^2$$

带增益的PIN

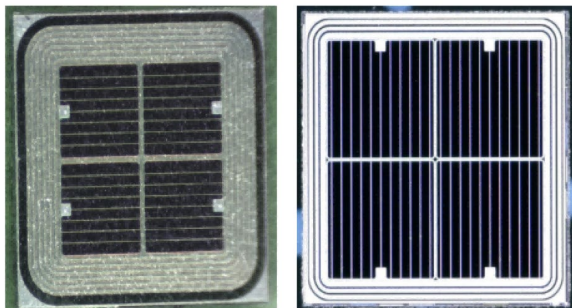
低增益的APD

## 时间分辨率可达30ps以下

# 高能所LGAD探测器研发历程

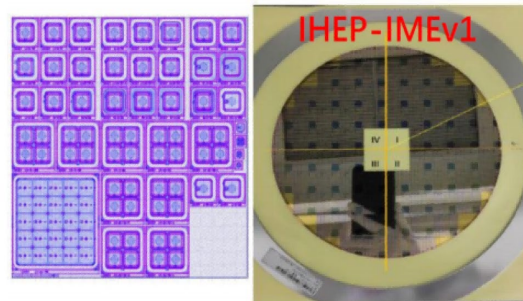


IHEP-NDL(2019)

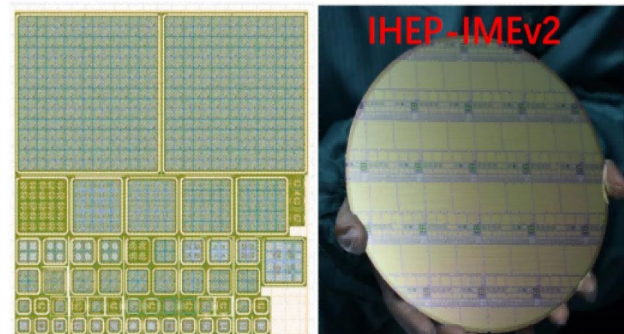


器件时间分辨性能<50ps

IHEP-IMEv1(2020.9)

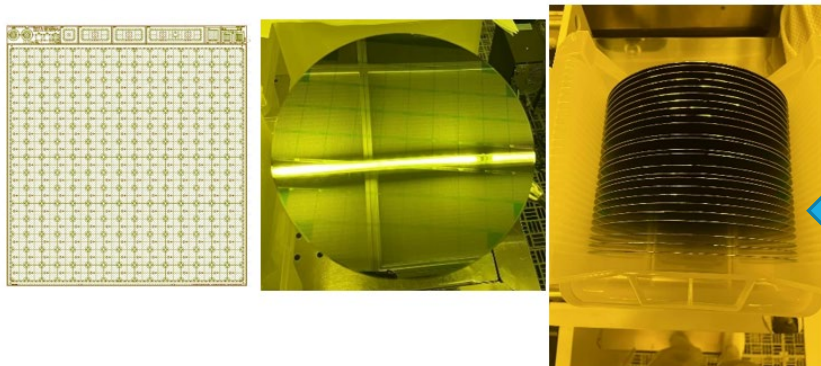


IHEP-IMEv2(2021.6)



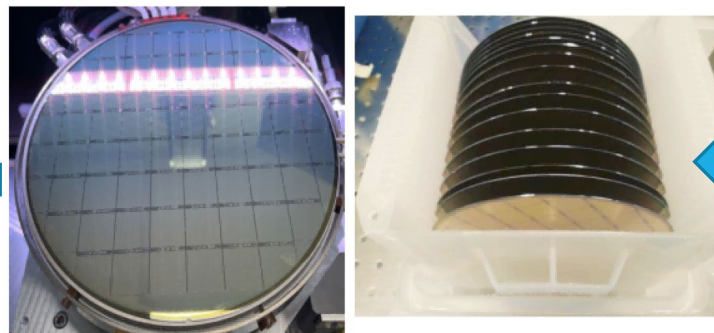
掺碳工艺优化器件抗辐照性能，15x15阵列器件抗辐照性能优于HPK，FBK，CNM等国外单位

Mass production for ATLAS(2024.6) ongoing



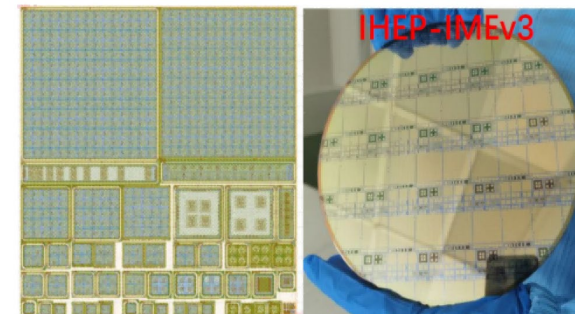
2024年至今，已量产-6000多颗2cm x 2cm的器件（像素尺寸1.3mmx1.3mm）

Pre-production for ATLAS (2023.7)



因抗辐照性能优良，获得CERN采购订单开始ATLAS HGTD项目LGAD器件批量预生产

IHEP-IMEv3(2022.5)



工艺重复性验证  
优化大阵列器件设计



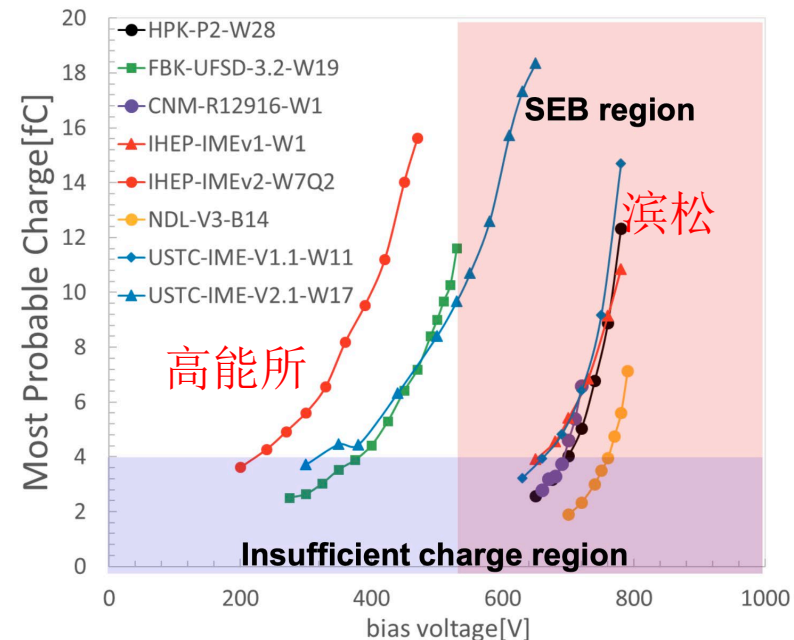
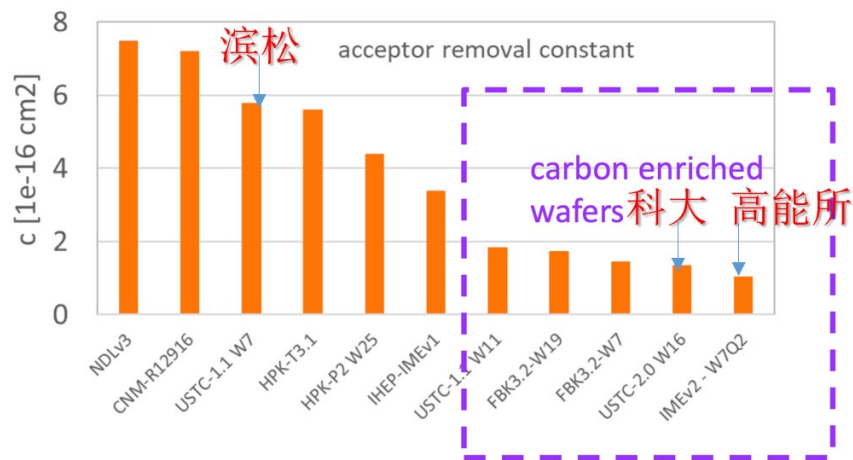
# 应用1-ATLAS HGTD探测器

## CERN大型强子对撞机升级: ATLAS HGTD探测器

- 通过在前向区加入时间信息来进行更好的位置重建，解决LHC亮度升级后的pile-up问题。
- LGAD器件是该探测器中的核心传感器，需求21800颗
- **主要性能指标是抗辐照性能**

采用增益区掺杂碳的方法，实现了受主移除率的降低，使得器件可在低于400V即可实现足够电荷收集，避免了单粒子击穿现象发生。

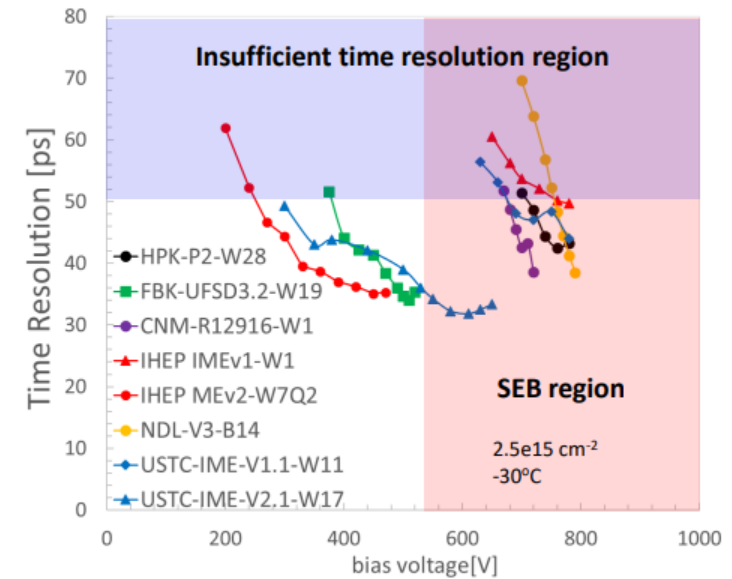
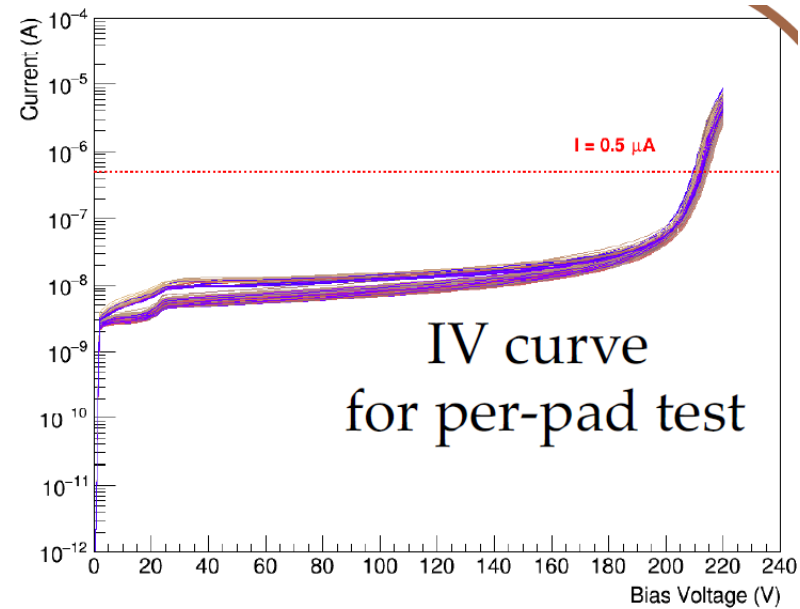
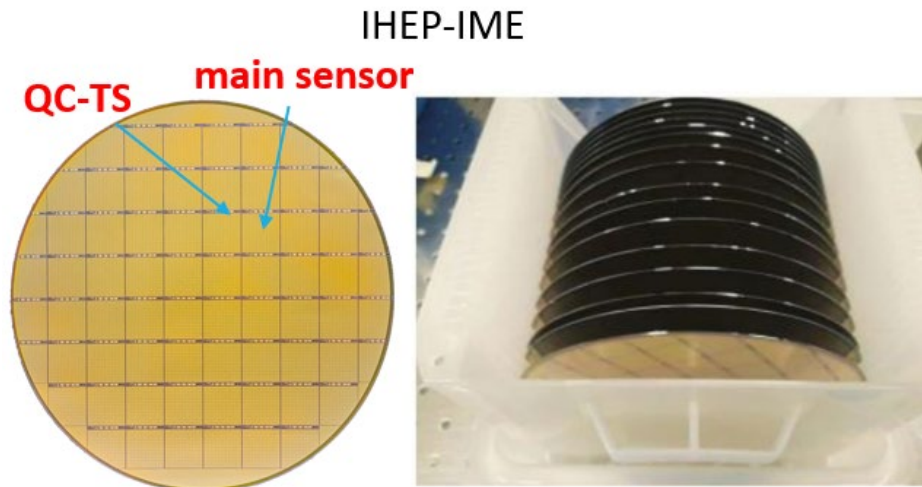
参数	指标
衬底材料厚度	50um EPI/725um silicon
像素尺寸	1.3mmX1.3mm
像素阵列	15X15
时间分辨率	<35ps(辐照前), <70ps(辐照后)
收集电荷	>15fC(辐照前), >4fC(辐照后)
辐照剂量	2.5e15 n <sub>eq</sub> /cm <sup>2</sup> , 2MGy
工作电压	< 550V



# 应用1-ATLAS HGTD探测器



- 高能所设计微电子所制备的LGAD器件因抗辐照性能优良，获得CERN HGTD项目订单，提供HGTD项目90%器件。~1.9万颗
- 目前已量产-6000多颗2cm x 2cm的器件（像素尺寸1.3mm x 1.3mm）
- 高能所、CERN、JSI、USP等国际合作组进行质量监控测试，器件各项性能满足项目要求。



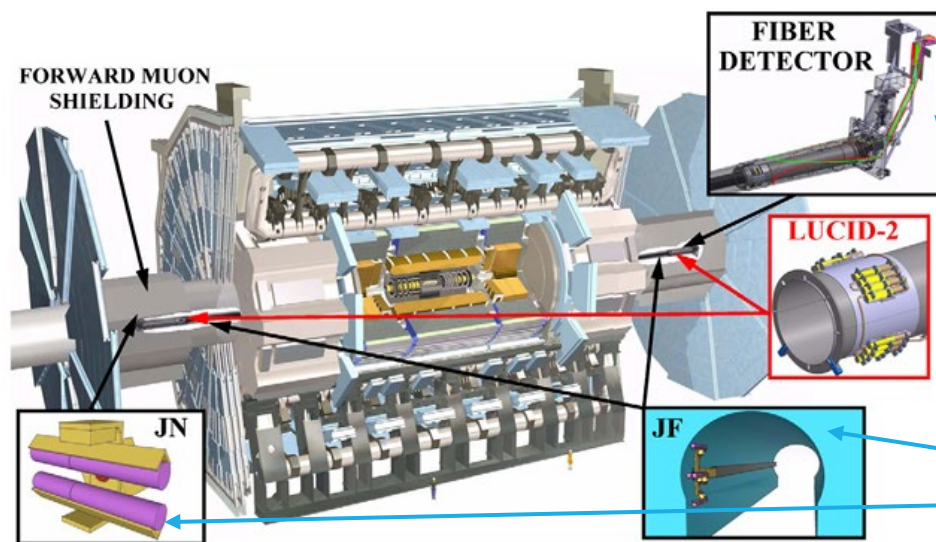
具体参见张田园海报

# 应用2-ATLAS实验亮度测量



▶亮度测量是所有物理分析的基础，因为其不确定度会对关键物理量的整体系统误差产生影响，例如顶夸克对 ( $t\bar{t}$ ) 以及 W 玻色子和 Z 玻色子产生截面的测量

▶ATLAS实验 run 2: ATLAS monitors(LUCID2)



LHC Run 2 亮度不确定性~0.83%

## Run 3

为将不确定度控制在 1% 以下，为 Run 3设计至少三台独立的亮度探测器，其中包括 BMA 探测器 (JF)。

## ▶对于LHC升级: 挑战

高亮度大型强子对撞机 (HL-LHC)：亮度为目前大型强子对撞机 (LHC) 的 5 至 7.5 倍 ( $\mu_b \approx 200$  and  $L= 4000 \text{ fb}^{-1}$ )

◆亮度探测器饱和

◆强的辐照环境



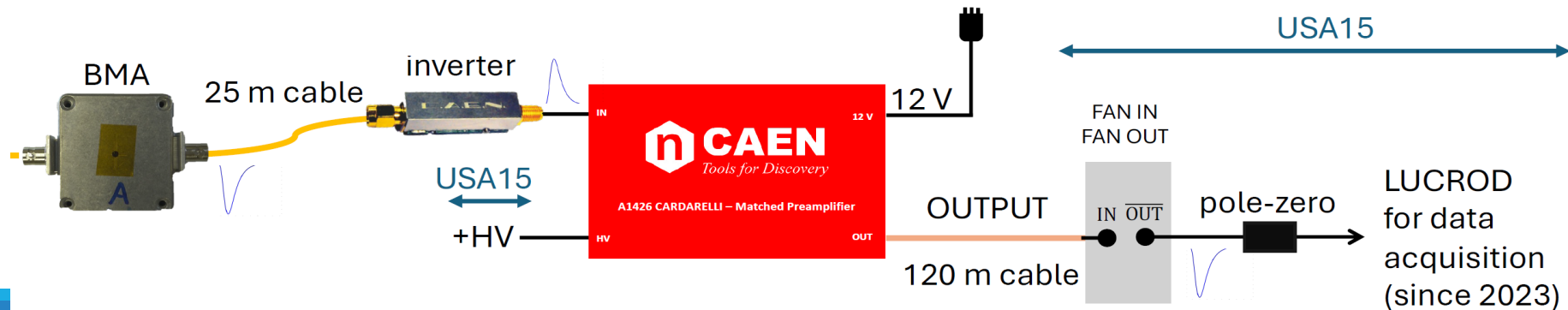
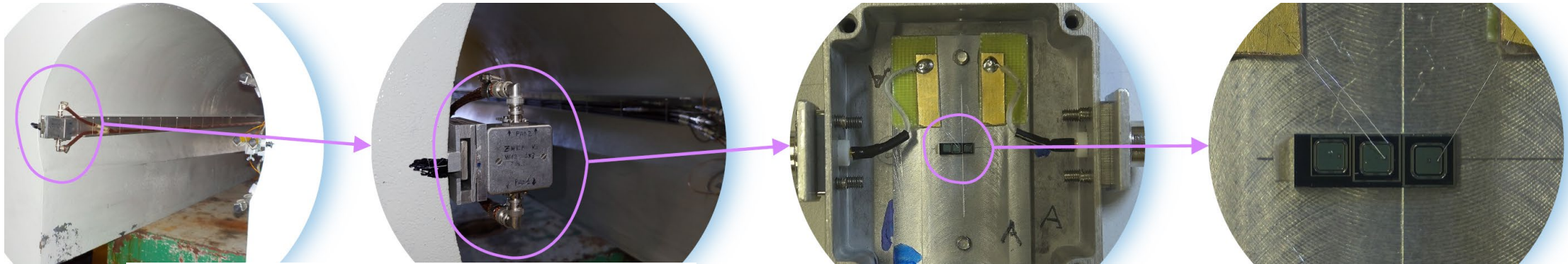
# 2、ATLAS BMA探测器

## 束流监测探测器 BMA detector: Beam Monitor for ATLAS detector

它可为逐束团标定提供数据，并在物理运行的全量程范围内保持良好的线性度。

- 其安装位置可降低由非线性效应带来的系统误差
- 几何接收度低，辐射损伤小
- 每年更换一次

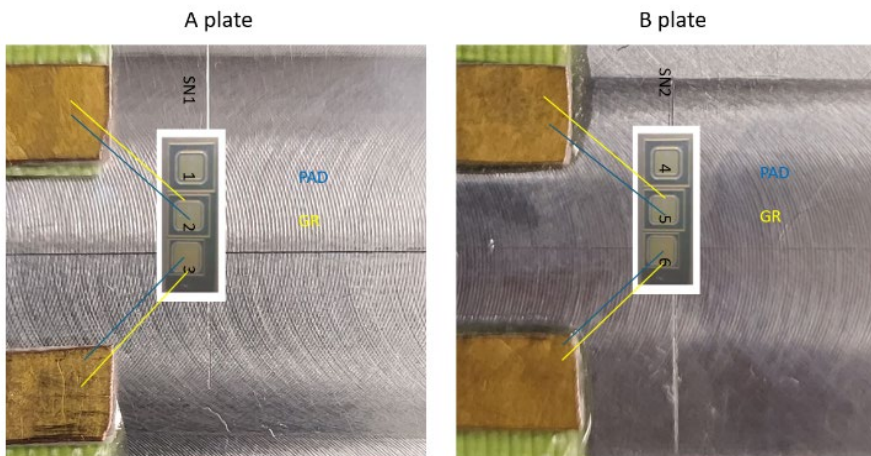
- BMA 由两个低增益雪崩二极管（LGAD）组成。
- LGAD 传感器通过引线键合连接至读出板，并连至电荷放大器
- 信号读出系统由 LUCROD 数据获取系统控制，确保高效的数据记录与处理。



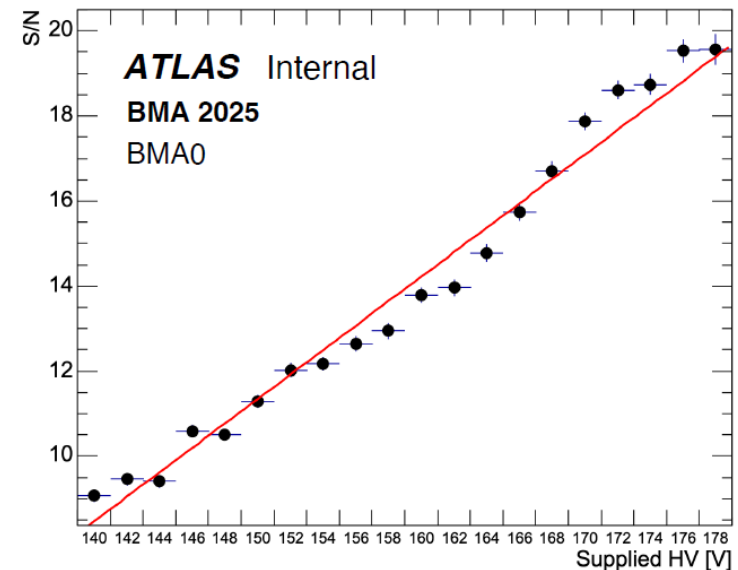
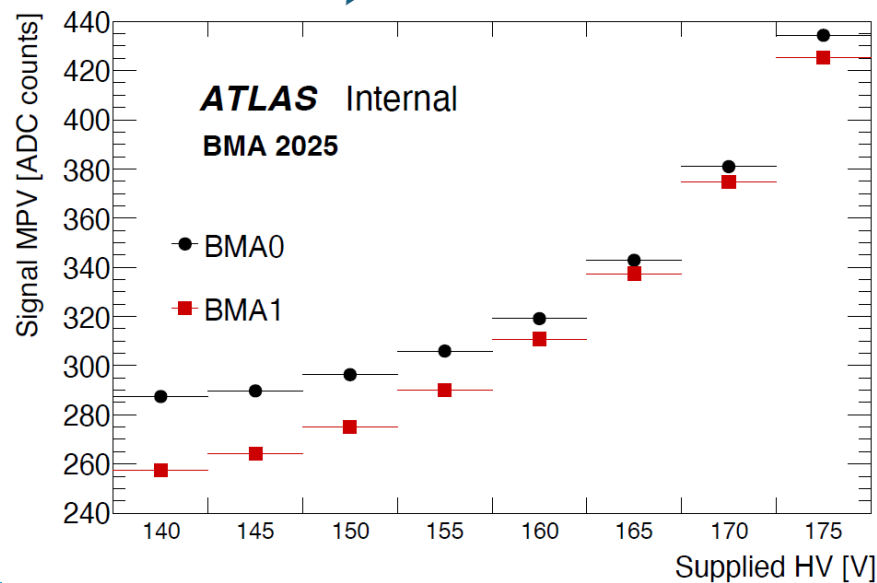
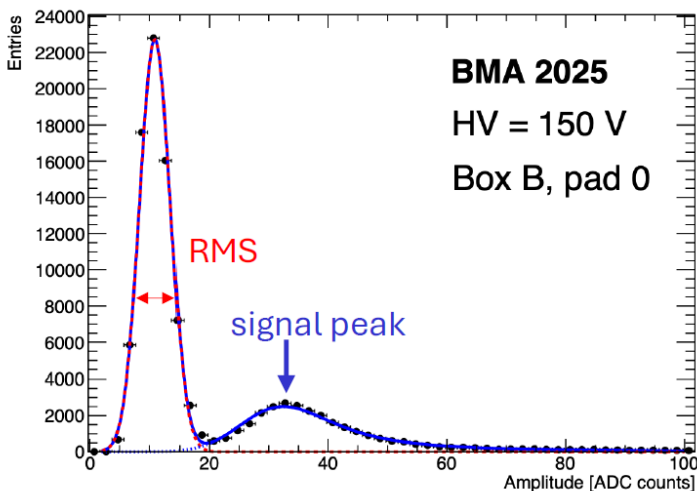
# 2、ATLAS BMA探测器



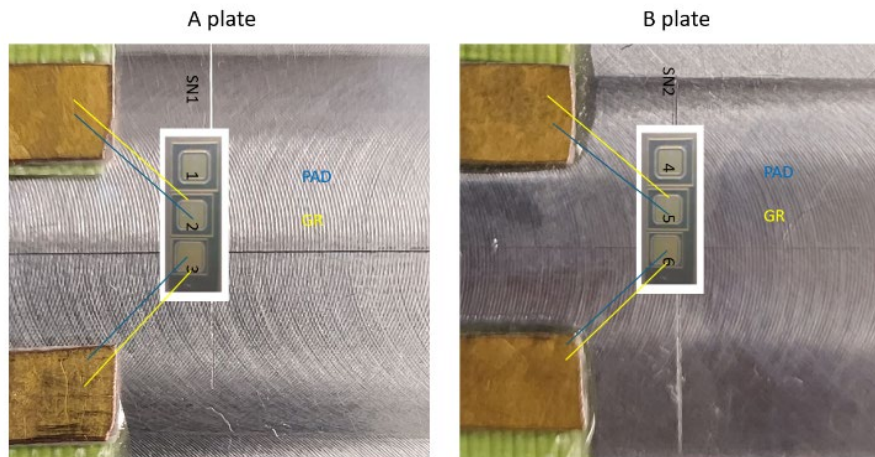
中科院高能所与微电子所联合研制的 LGAD 探测器于 2024 年、2025 年应用于 ATLAS BMA 探测器。



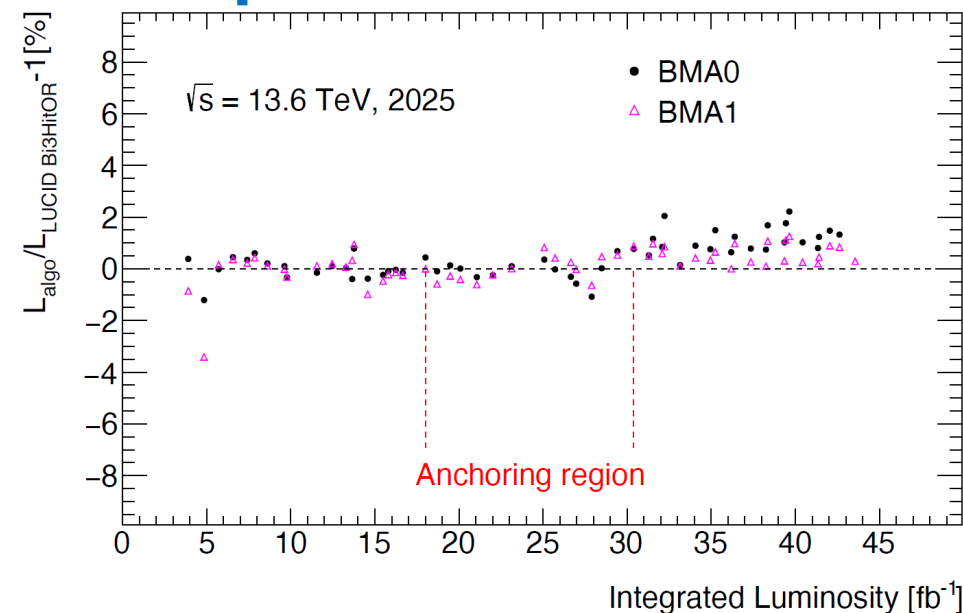
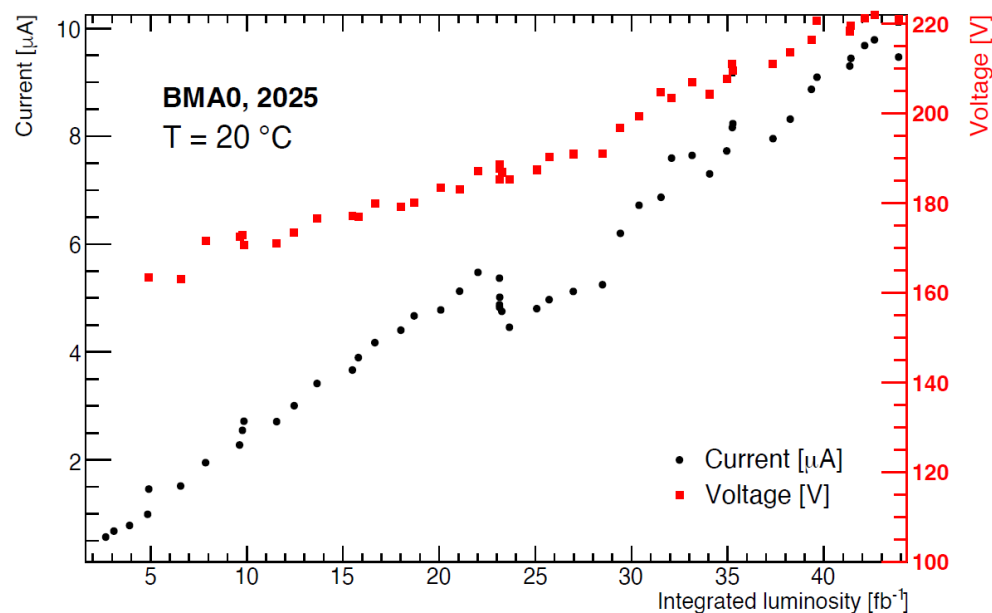
- IHEP-IME V3单像素器件
- 像素尺寸1.3mm x1.3mm
- 器件在辐照前击穿电压~183V
- 信噪比10-20



## 2、ATLAS BMA探测器



- 运行中进行数据驱动校准：随辐照剂量增加，器件工作电压进行调整，保持信号幅度不变
- 偏置电压大概每kGy增加了1.4V
- 截至 2025 年 8 月，对应积分亮度达到  $45 \text{ fb}^{-1}$
- 2025 年 BMA 探测器的测量结果与 LUCID 探测器高度吻合。



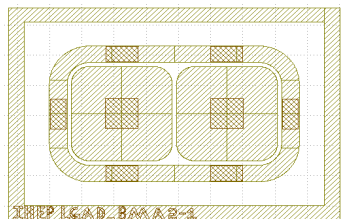


# 2、ATLAS BMA探测器

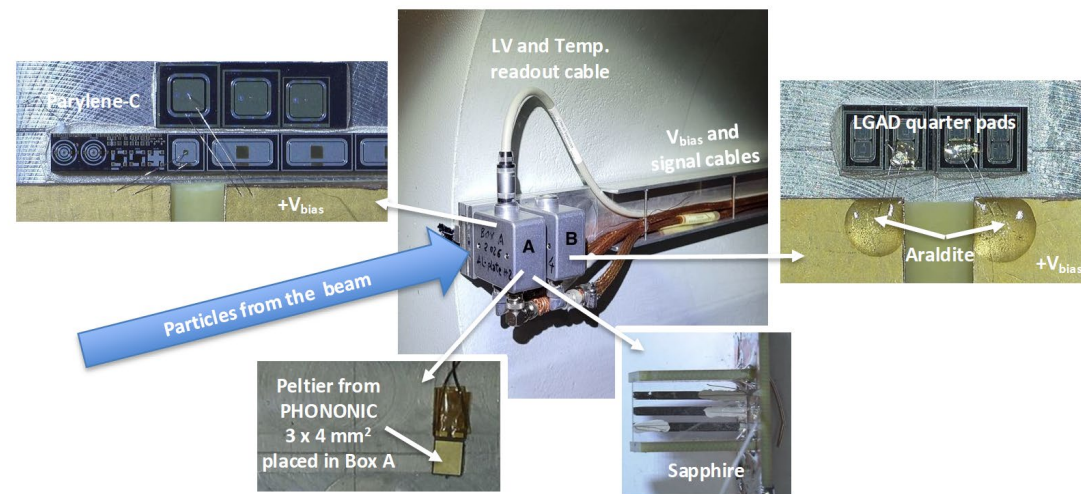
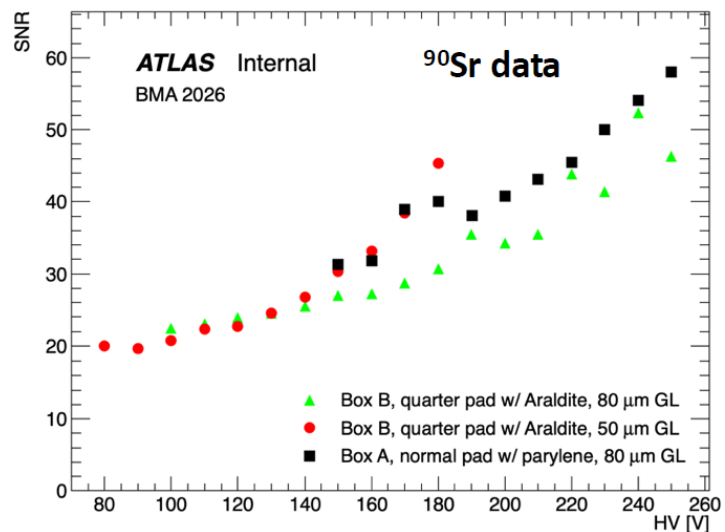
## 新LGAD器件: IHEP LGAD\_BMA

- ◆ 更小像素尺寸—减小电容, 优化信噪比
- ◆ 具有厚外延层—增大信号【50微米→80um】
- ◆ 增益层掺碳工艺—优化器件抗辐照性能

- 数据驱动校准
- 采用束团间隙退火方式, 以缓解辐射损伤效应。



Signal-to-noise ratio increases up to  $\sim V_{BD}$



IHEP LGAD-BMA: 1x2阵列  
0.65 x 0.65 mm<sup>2</sup>

新LGAD器件的信噪比情况

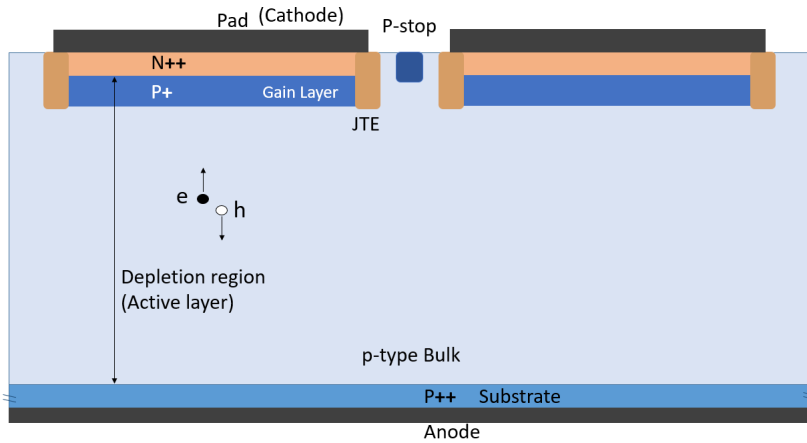
目前运行良好, 可实时监测束流亮度情况



# 应用3-4D 径迹探测器

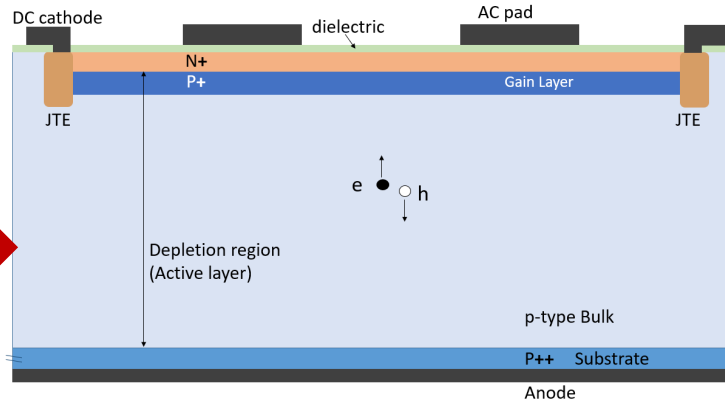
交流耦合低压增益雪崩二极管（AC-LGAD）作为可同时实现50 ps级时间分辨与10 μm以下位置分辨的4维传感器，在未来对撞机径迹探测器、飞行时间探测器等装置中具有重要应用需求。

## DC-LGAD

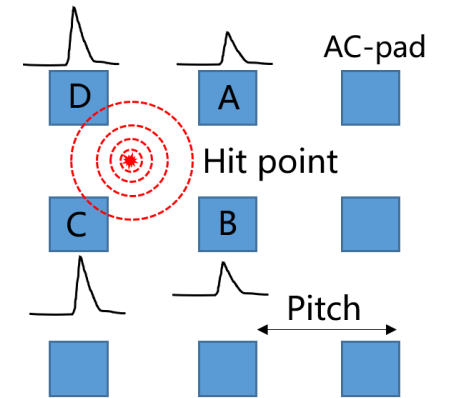


- 读出电极直接做在N++层上
- 像素间具有JTE, Pstop等结构
- 位置分辨依赖于像素尺寸

## AC-LGAD (AC-coupled LGAD)



- 在N+层和电极间添加了交流耦合介质层
- 电荷共享实现位置分辨
- 几乎无死去
- 具有良好的位置分辨能力
- 国内外研究单位有：FBK, HPK, INFN, BNL, CNM, USTC, IHEP...



# 3、条形 AC-LGAD 研究进展

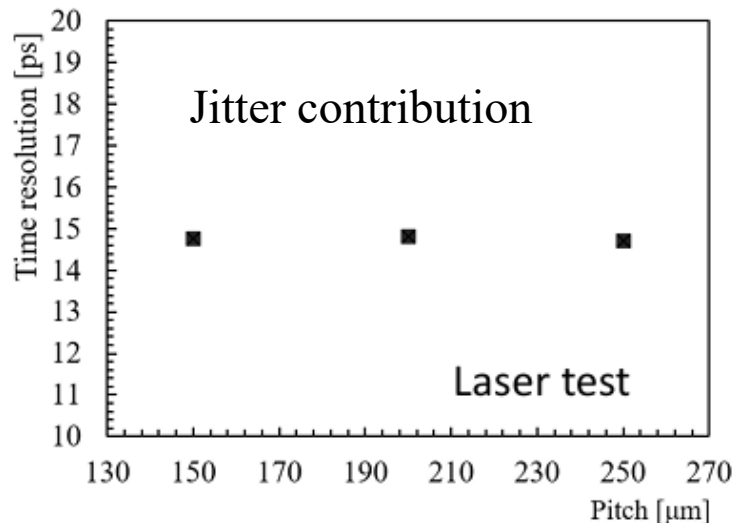
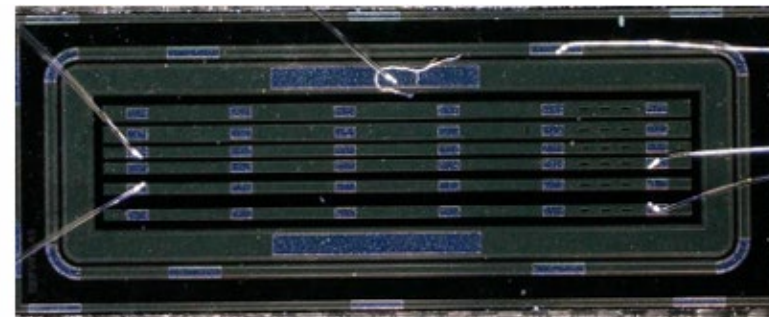


条形 AC-LGAD: 长度:5.65mm

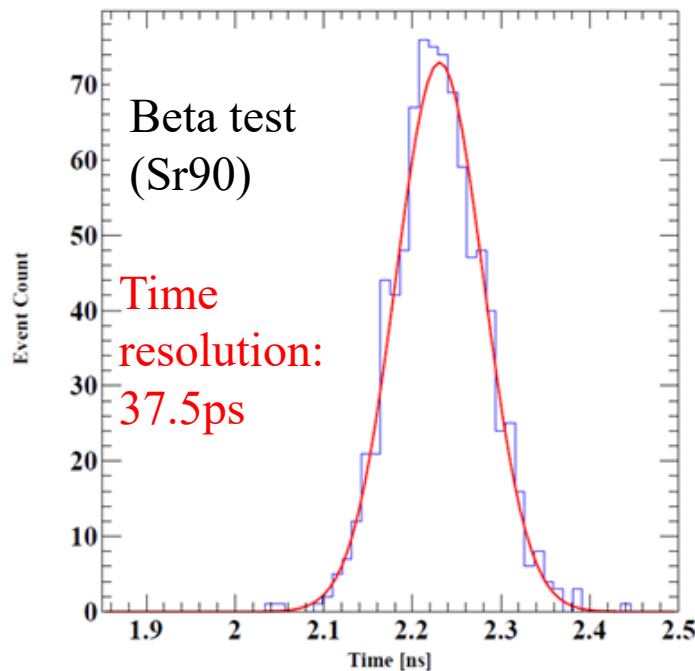
金属-间距尺寸: 100-250um, 100-200um, 100-150um

$$\sigma_t^2 = \sigma_{TimeWalk}^2 + \sigma_{Landau}^2 + \sigma_{Jitter}^2$$

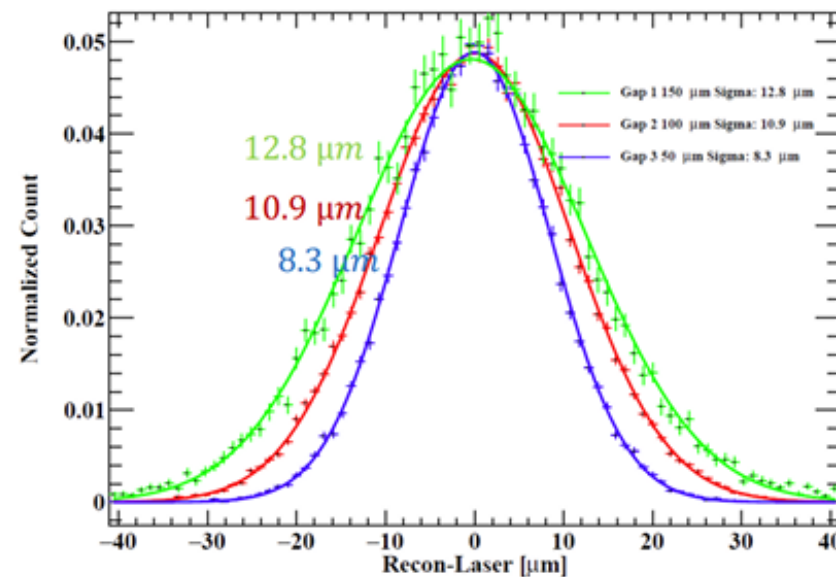
恒比定时



The timing resolution: 15~17ps



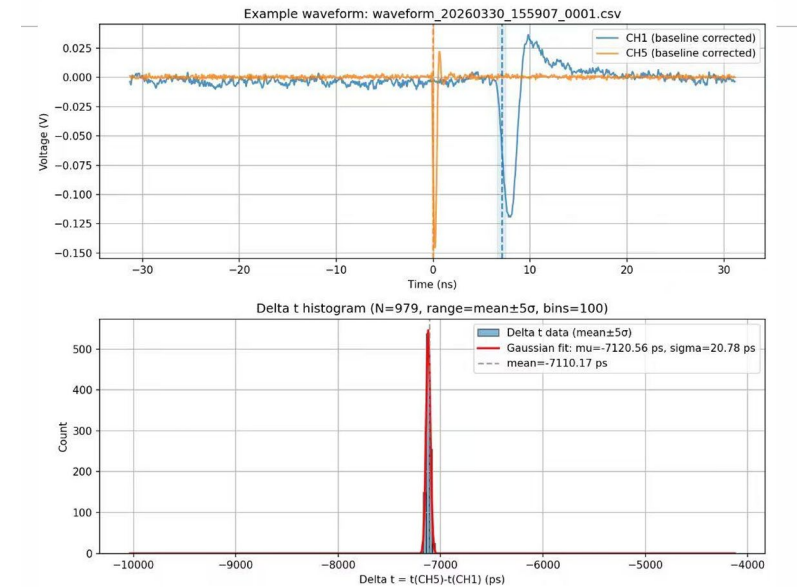
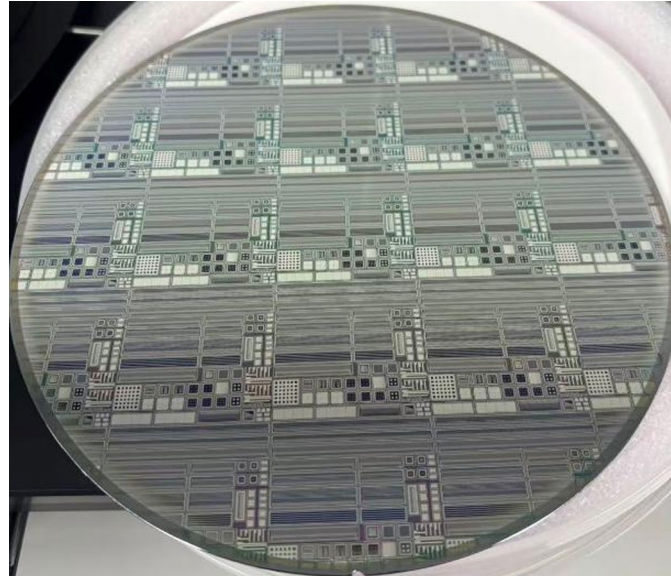
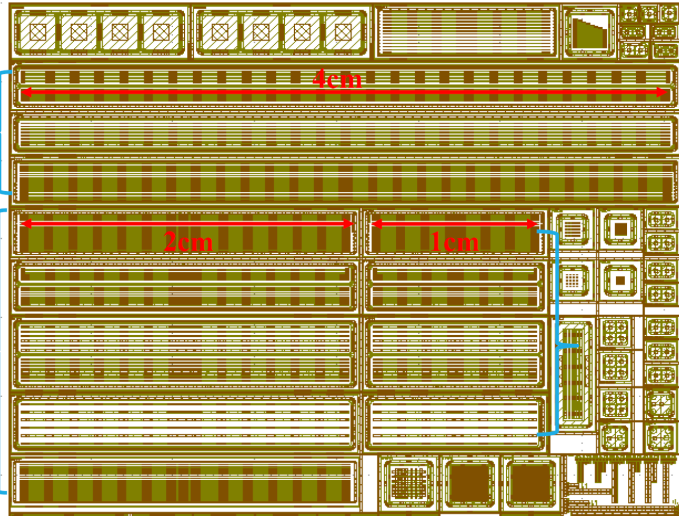
Jitter and Landau contribution



Best result: 8.3um  
[Pitch size:150um]

# 3、条形 AC-LGAD 研究进展

- 针对CEPC OTK系统需求(85m<sup>2</sup>), 设计了具有新的长条形AC-LGAD。
- 在中科院微电子所流片, 并于2025.12完成
- 初步测试结果4cm条长AC-LGAD的时间分辨可达~20ps



初步测试结果: 时间分辨率~20ps  
1064nm激光测试结果

设计了4cm, 2cm, 1cm等不同条长的器件

2025.12拿到晶圆

具体见柯超逸海报



# 应用4-X射线探测

➤ LGAD 传感器提供的增益能够提升探测器系统的信噪比，有效降低X射线探测器的能量阈值。

➤ LGAD良好的时间分辨率特性

对于核共振散射具有很好的探测能力 [高能同步辐射光源：高分辨谱学线站ID33]

仅需更换探测器系统的传感器元件，即可改进用于软 X 射线探测的混合像素探测器。

➤ 研究机构：保罗谢勒研究所（PSI）、钻石光源（Diamond）、中科院高能所（IHEP）、圣保罗大学（USP）、加州大学圣克鲁兹分校（UCSC）、斯坦福直线加速器中心（SLAC）等。

PSI: 浅入射窗设计的LGAD器件，低能可到~452eV, ZHANG J, et al. Journal of Instrumentation, 2022, 17:C11011.

USP: 常规LGAD器件在不同能量的X光源进行了测试：

	HPK PIN	HPK3.1		HPK3.2		BNL 20um	
Bias V	200 V	150 V	230 V	80 V	130 V	50 V	100 V
Energy Resolution	14 %	6 %	17 %	10 %	20 %	6 %	16 %
Energy Response	19 mV	75 mV	185 mV	68 mV	211 mV	66 mV	147 mV
$\sigma_t$ CFD	78 ps	141 ps	123 ps	371 ps	171 ps	69 ps	65 ps

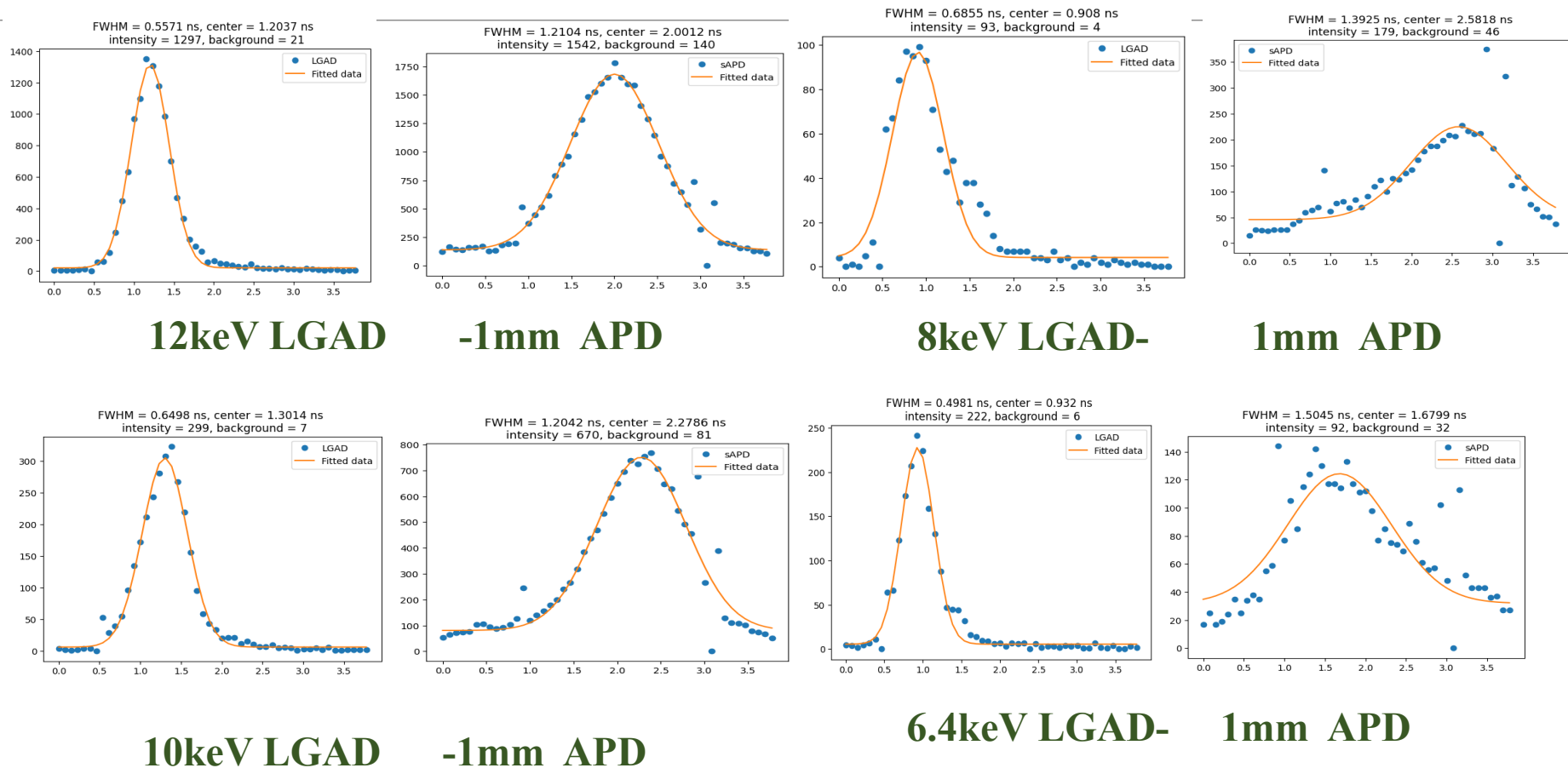
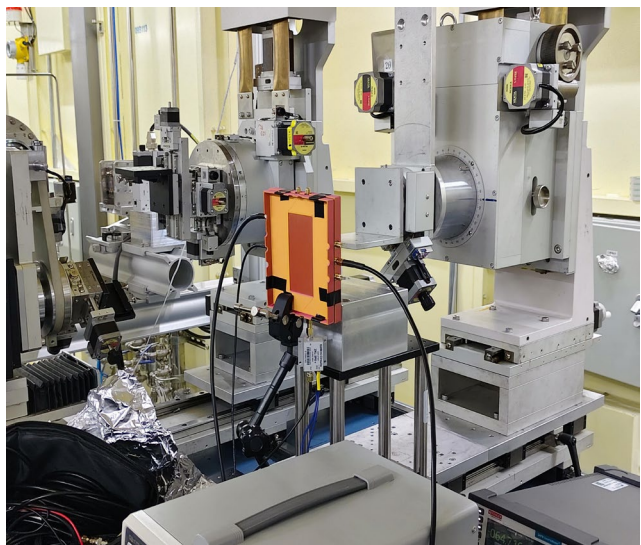
S.M. Mazza et al 2023  
JINST 18 P10006



# 4、LGAD器件在光源的初步测试结果

在HEPS上进行了LGAD器件的初步测试。

使用自研的LGAD传感器，测得的束团结构与加速器束团一致，初步验证了其亚纳秒级别的时间分辨能力。

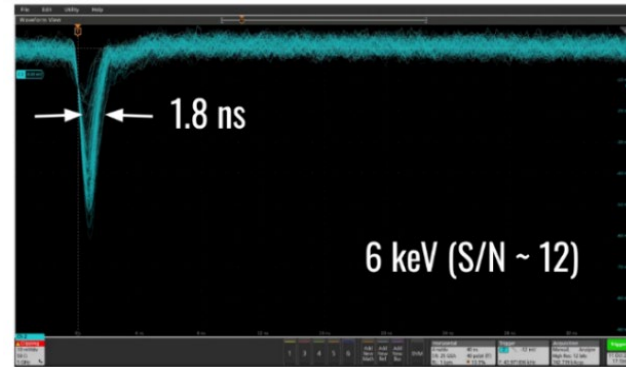
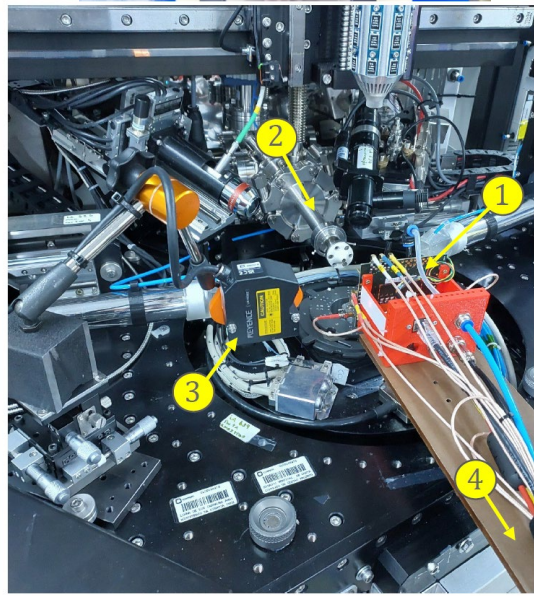
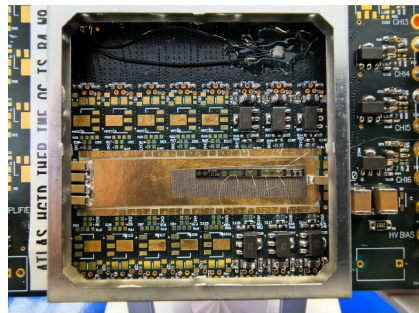
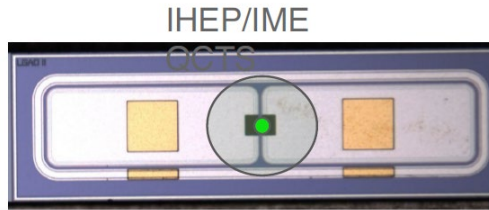


HEPS-B5流强100mA, Gap=10.24mm,  
Si(111) DCM能量14.411keV,束团填充模  
式为18ns间隔

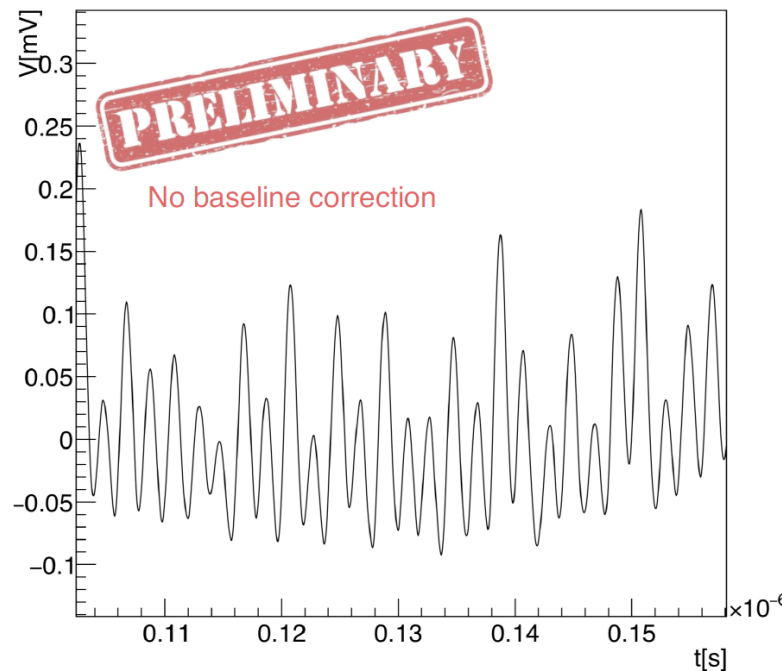


# 4、LGAD器件在光源的初步测试结果

## 巴西光源



- 速率 500 MHz，逐束团均可记录信号
- 尝试将传感器“极限辐照至损坏”，但它扛住了.....
- 最大通量： $10^9$  光子 / 秒，光斑尺寸  $350 \mu\text{m}$ ，能量 6 keV
- 传感器电流  $18 \mu\text{A}$ ，连续运行约 10 分钟电流无上升
- 下一步开展时间分辨分析、2KeV以下器件性能测试，AC-LGAD性能测试等



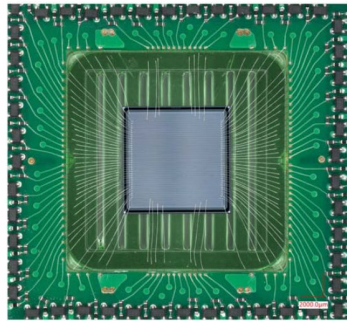
Marco Aurelio Lisboa Leite, et al., Exploring the response of LGADs for time resolved synchrotron applications, The 14th international "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD-14), Taipei, 2025-11-16 to 21.

<https://indico.phys.sinica.edu.tw/event/174/contributions/1949/>

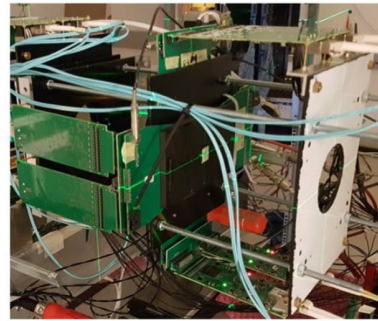


# 其它应用

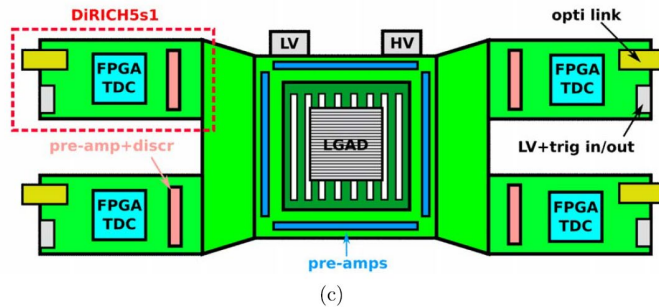
## ➤ TOF-iCT



(a)



(b)



(c)

Figure 1. Components of the LGAD-based 4D-tracking module. (a)  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  LGAD strip sensor with 86 channels wire-bonded to the discrete front-end electronics. (b) Two single-sided LGAD strip sensor modules were mounted perpendicular to each other to form a full 4D-tracking layer. (c) Schematic of a single-sided LGAD strip sensor module.

➤ Proton Therapy , 质子治疗, 质子束流监测等

- A. Vignati et al., “A new detector for the beam energy measurement in proton therapy: A feasibility study,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 65, no. 21, Nov. 2020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6560/abab58>
- V. Monaco et al., “Performance of LGAD strip detectors for particle counting of therapeutic proton beams,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 68, no. 23, Dec. 2023. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6560/ad02d5>
- O. Marti Villarreal et al., “Characterization of thin LGAD sensors designed for beam monitoring in proton therapy,” *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, Accelerators, Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 1046, Jan. 2023. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900222009147>
- F. Ulrich-Pur et al., “Feasibility study of a proton CT system based on 4D-tracking and residual energy determination via time-of-flight,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 67, no. 9, May 2022. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6560/ac628b>

Felix Ulrich-Pur et al 2024 *Phys. Med. Biol.* 69 075031



# 谢谢！

期待与大家携手合作，进一步开拓 LGAD 的应用领域！

联系方式：赵梅

[zhaomei@ihep.ac.cn](mailto:zhaomei@ihep.ac.cn)