



LGAD 探测器在 ATLAS HGTD 及束流亮度监测方面 研究进展

赵梅

中国科学院高能物理研究所

2026-8-11

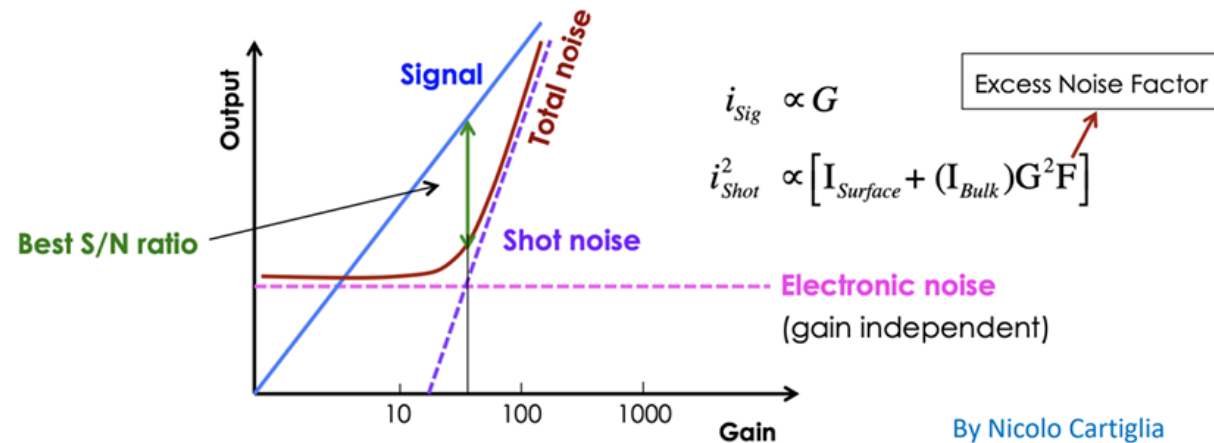
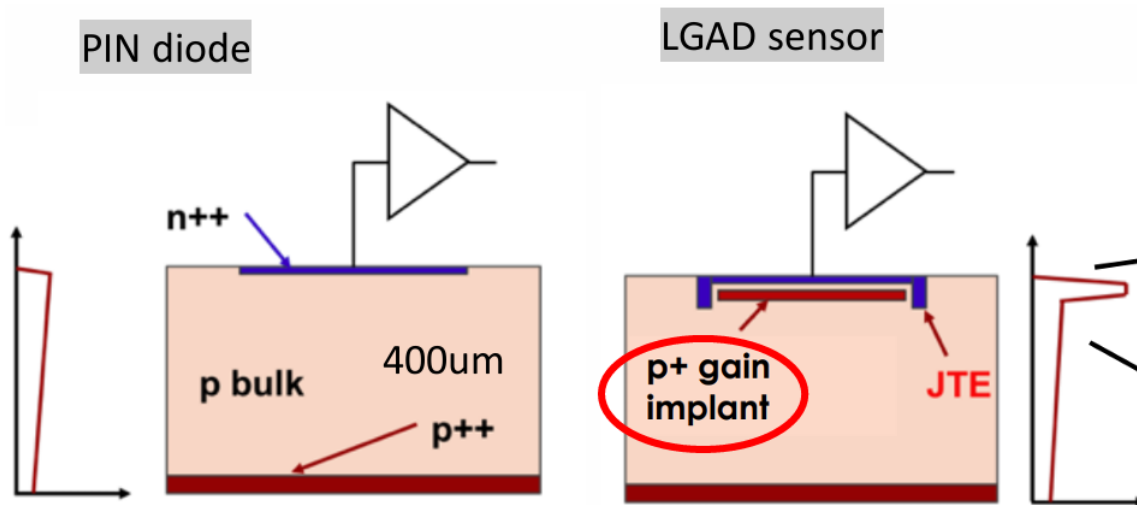
LGAD 探测器



➤ Low Gain Avalanche Detectors (LGAD)：低增益雪崩二极管

- 雪崩二极管, 相比于传统的PIN, 在n++和p衬底间具有P型的增益层
- 工作在线性区
- 增益: 10~50, higher signal as compared with PIN
- 薄耗尽层(~50um) to decrease trise (fast ramping time)

时间分辨率优于35ps



By Nicolò Cartiglia

Noise increases faster than then signal

→ the ratio S/N becomes worse at higher gain

<https://doi.org/10.1201/9781003131946>

Koji Nakamura (KEK), <https://indico.ijclab.in2p3.fr/event/9730/>



ATLAS HGTD高颗粒度时间探测器

➤欧洲核子中心，大型强子对撞机高亮度升级

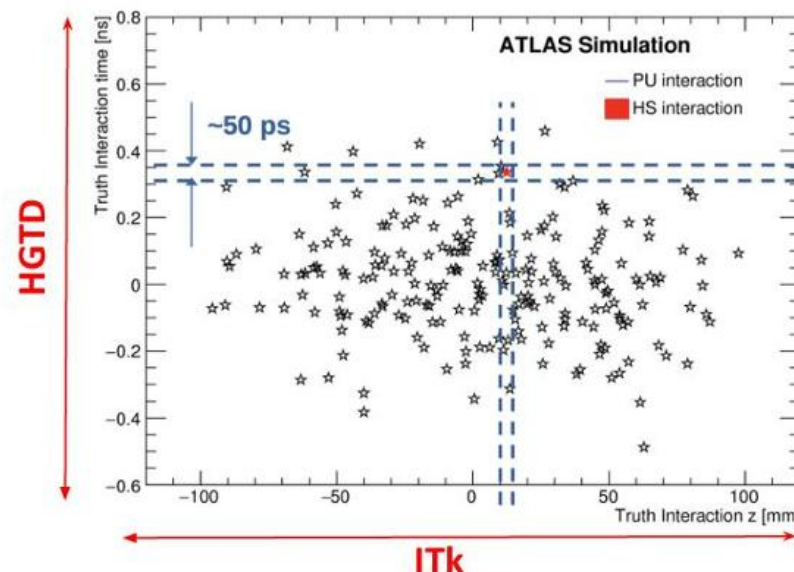
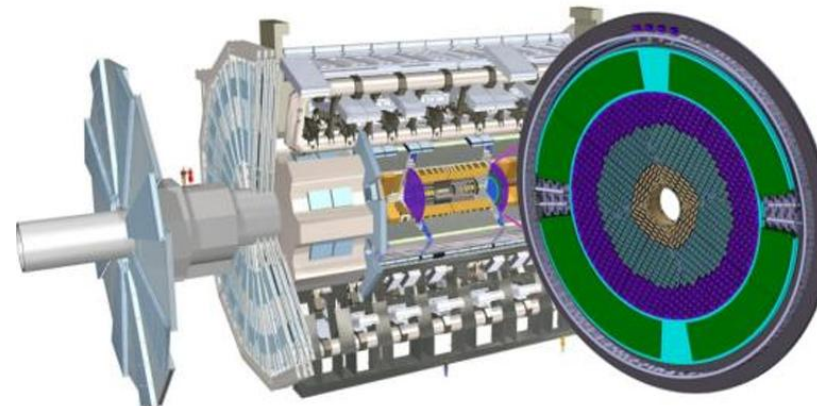
- 瞬时亮度将提升约 4 倍，达到 $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 事例堆积效应加剧($\langle \mu \rangle = 60$ 增至 200)，辐射损伤程度上升
- 探测器升级改造工作将在 2026–2030 年长期停机维护期开展

➤HGTD探测器

- ATLAS 高粒度定时探测器（HGTD）可提供高精度时间信息，结合内径迹探测器（ITK）的位置数据，能够提升事例堆积抑制能力。

- 6.4m²的硅探测器
- 30ps-50ps的时间分辨
- 毫米级的颗粒度
- 超过三百万个读出通道
- 能承受 $2.5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 的等效中子通量的辐照

HGTD 需求LGAD探测器：>2万颗



ATLAS HGTD LGAD探测器性能要求

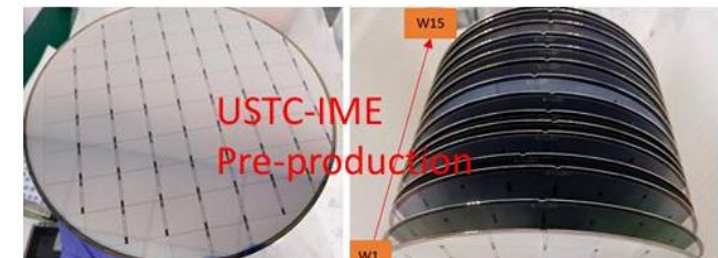
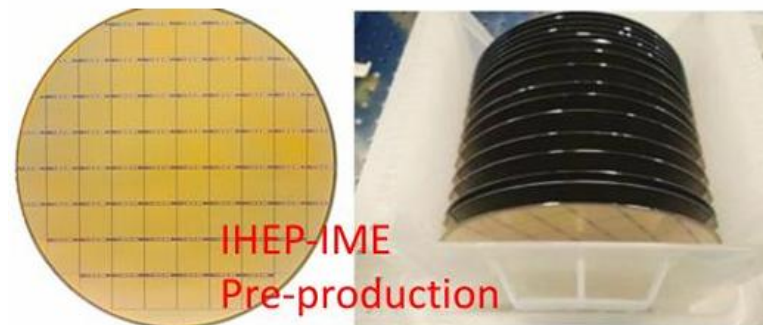


➤HGTD项目LGAD探测器： 21700颗

参数	指标
衬底材料厚度	50μm EPI /250μm 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 _{eq} /cm ² , 2MGy
工作电压	<800V

➤ATLAS HGTD项目LGAD传感器量产工作持续推进中：

- 采用两套设计方案：
IHEP-IME（90%）、USTC-IME（10%）
- 中科院高能所设计 - 微电子所流片：已完成约 400 片晶圆制备，产出超 10000 颗传感器芯片
- 中科大设计- 微电子所流片：已完成约 100 片晶圆制备，产出超 2000 颗传感器芯片



ATLAS HGTD 项目LGAD传感器



➤ 根据测试结果，器件的击穿电压，漏电流及其均匀性，将其分为三类：A,B,C

➤ **A:** sensor passes all the acceptance criteria.

Break down current:

at 20°C

$I_{bd,15\text{ pad}} = 15 \cdot I_{pad,bd} \rightarrow V_{bd,15\text{ pad}}$ is defined at $I_{15\text{ pad}} > 7500\text{ nA}$, where $I_{pad,bd}$ is the pad current breakdown threshold.

- **Sensor break down voltage:**

$V_{bd} = \text{Min}(V_{bd,15\text{ pad}}) \rightarrow 165\text{V} < V_{bd} < 195\text{V}$

- **Break down spread:**

$\text{RMS}(V_{bd,15\text{ pad}})/\text{AVERAGE}(V_{bd,15\text{ pad}}) < 0.05$

- **Current spread:**

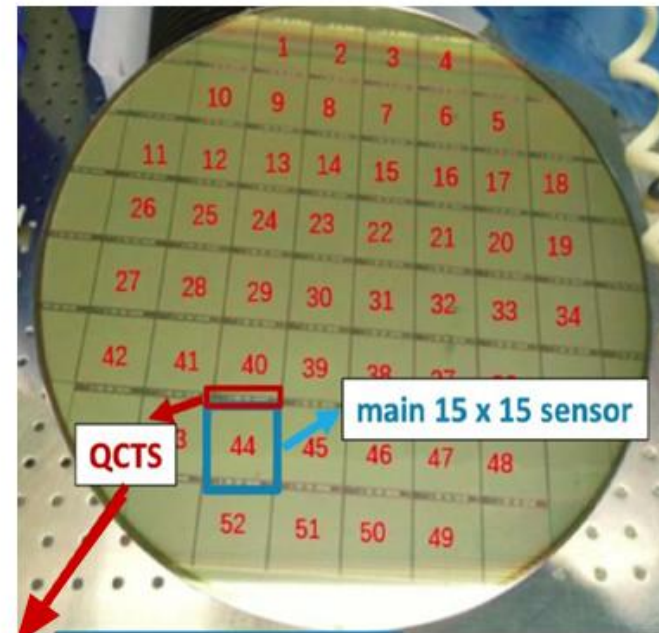
$\text{Max}(I_{15\text{ pad}} \text{ at } 0.8 \cdot V_{bd})/\text{Min}(I_{15\text{ pad}} \text{ at } 0.8 \cdot V_{bd}) \leq 2.5$ (3 for per-pad test)

➤ **B1:** sensor with $150\text{V} < V_{bd} < 165\text{V}$, fills the leakage current requirement

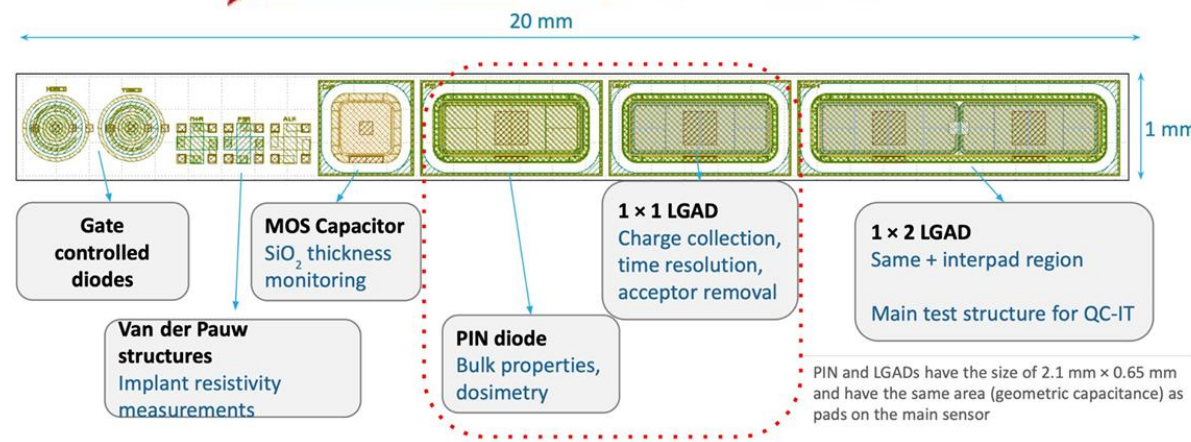
➤ **B2:** sensor fill Current spread criteria with

$2.5 < \text{Max}(I_{15\text{ pad}} \text{ at } 0.8 \cdot V_{bd})/\text{Min}(I_{15\text{ pad}} \text{ at } 0.8 \cdot V_{bd}) < 10.$

➤ **C:** sensor fills any of the tests and are not of category B.



每个8寸晶圆52个LGAD芯片
每个芯片旁有一个测试单元：QC-TS



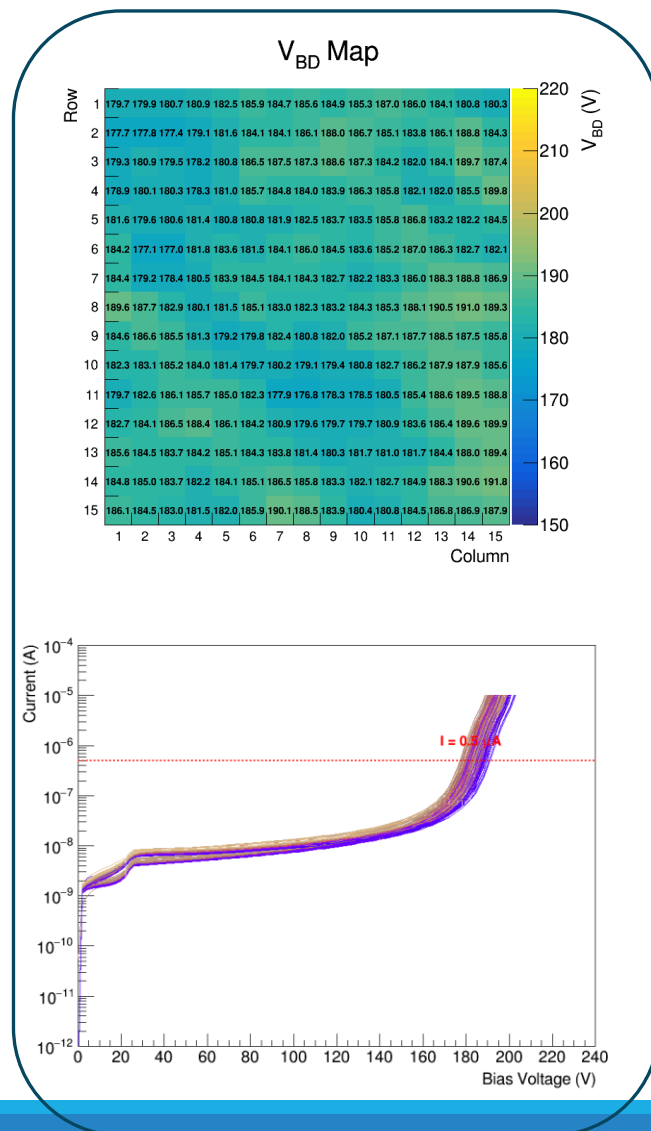
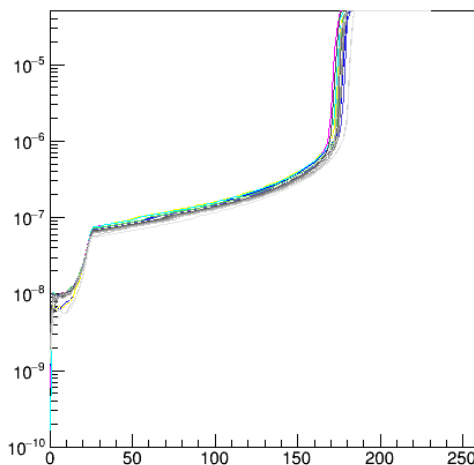
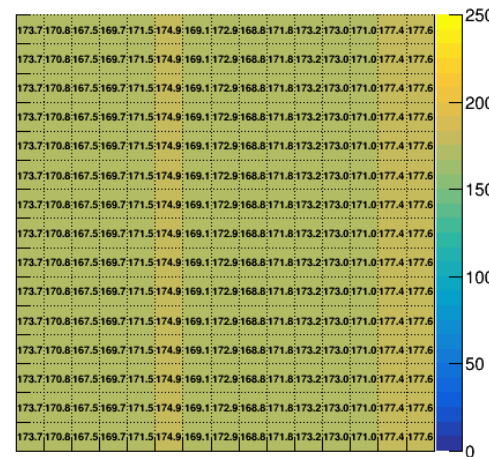
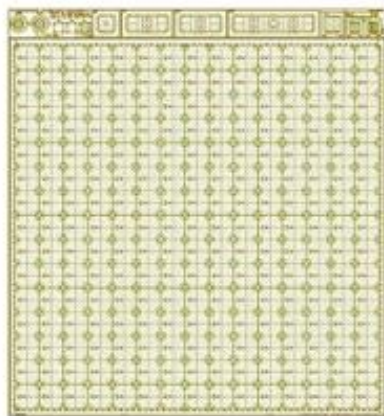
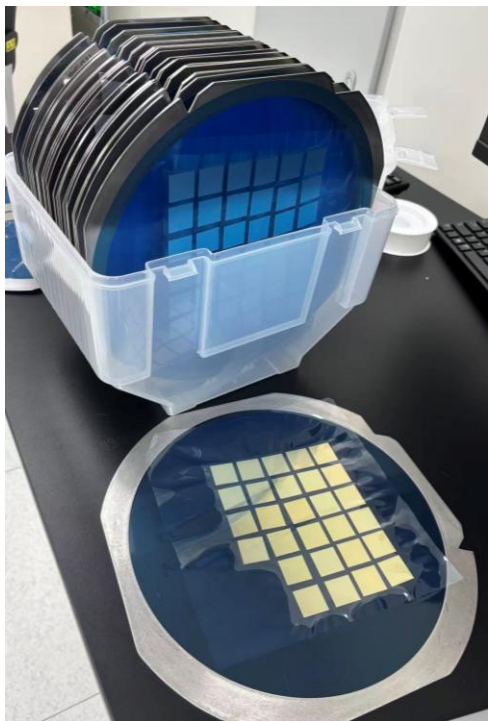
ATLAS HGTD 项目LGAD传感器



➤主芯片质量监控, **sensor quality check, SQC**

探针卡结果

IHEP单探针结果



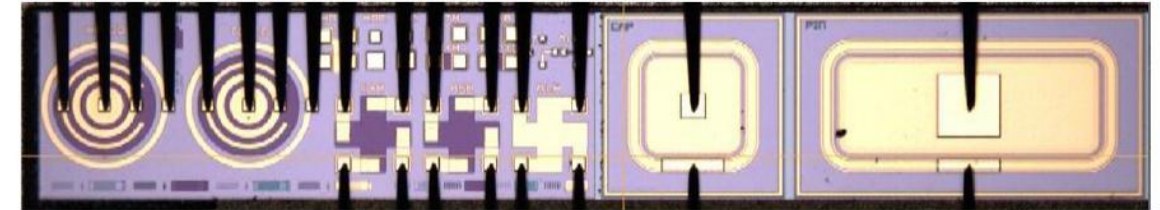
每个晶圆, 抽检一个, 进行15x15阵列器件的每个像素的I-V测试
测试结果与vendor探针卡结果对比

ATLAS HGTD项目LGAD传感器

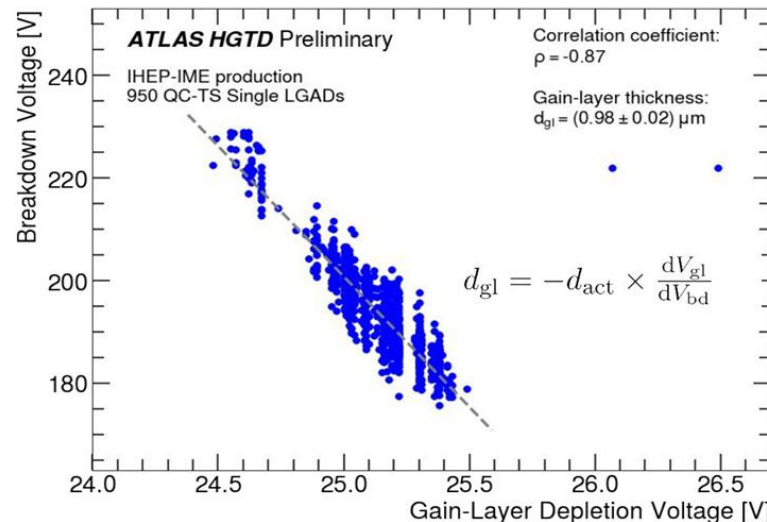
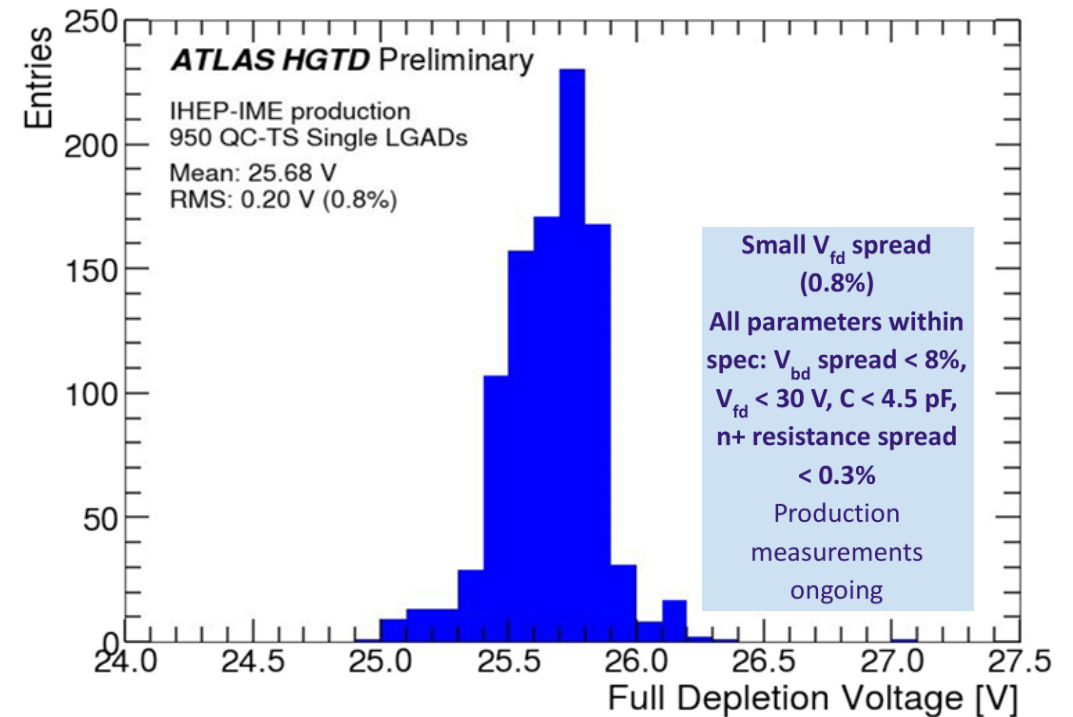
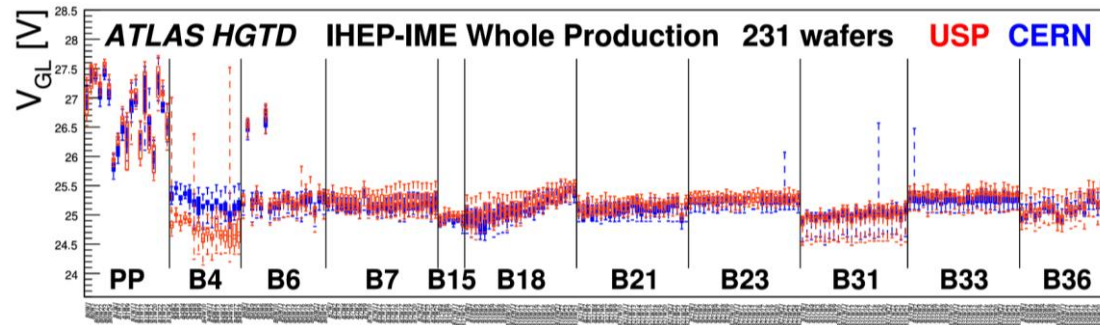


► 工艺监控, process quality check, PQC

CERN及USP: 每个晶圆上会对20个质量监控测试单元进行测试 (GCD, VDP, MOS, PIN, LGAD)



QC-TS test structure



Small V_{gl} spread
(RMS/Mean < 2%)
Strong $V_{bd} - V_{gl}$
correlation ($\rho =$
-0.87) $\rightarrow$
consistent shallow
gain layer design



ATLAS HGTD项目LGAD传感器

抗辐照性能监控, **irradiation test**, **IT**

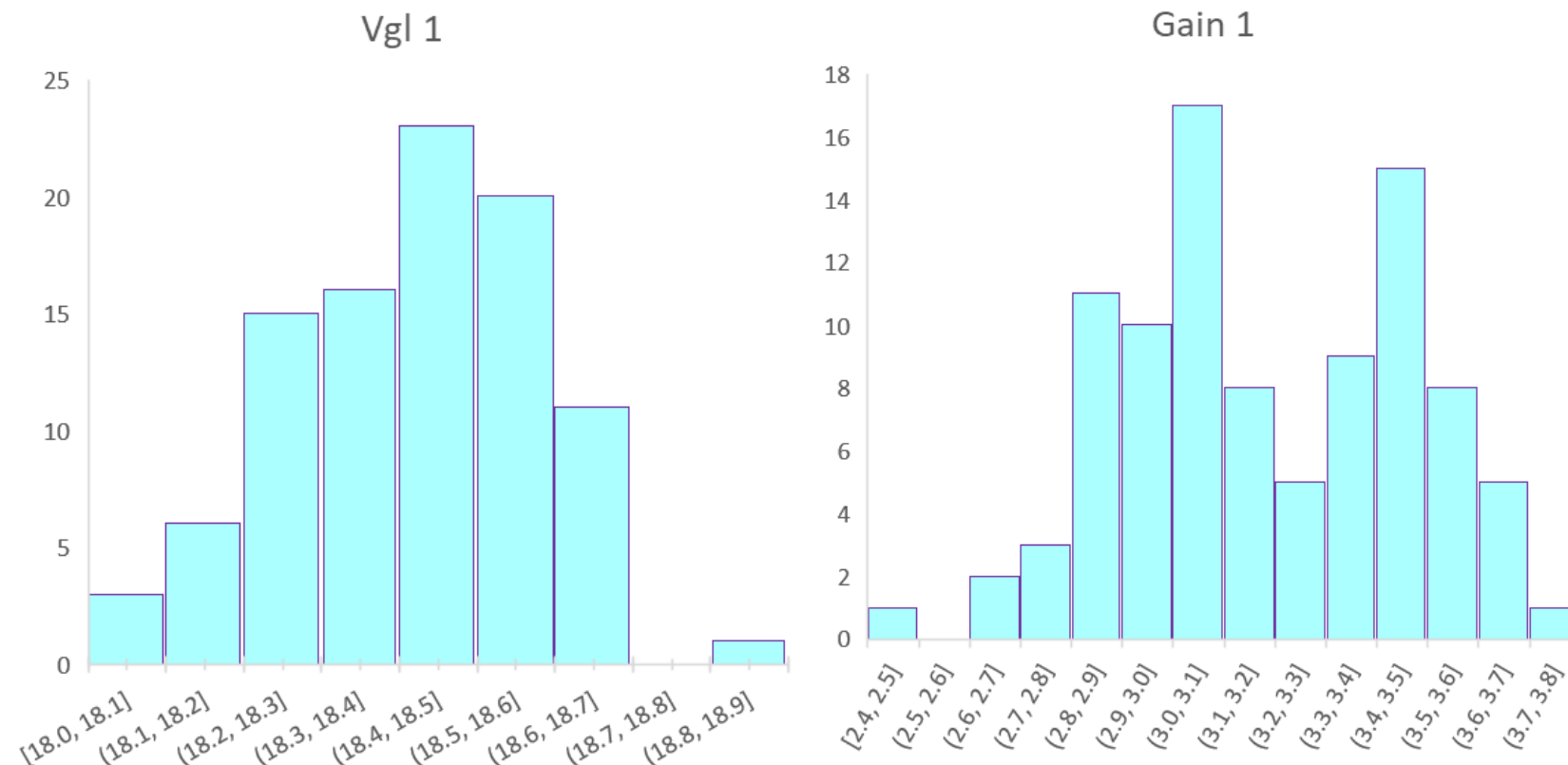
JSI: 采用激光TCT系统, 测试QC-TS结构里的1x2 LGAD器件
辐照后, 增益层耗尽电压 V_{gl} 和增益(-100V)均满足要求



接收标准:

$V_{gl} > 16.9V$

Gain > 2.7

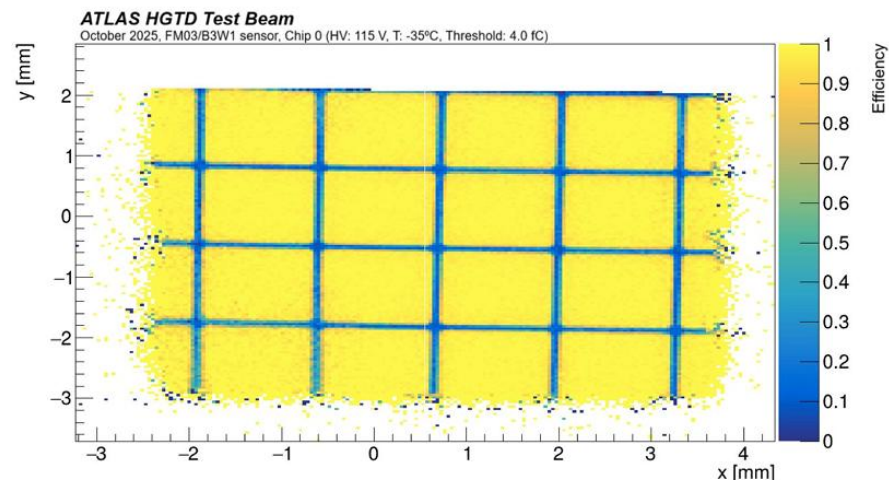
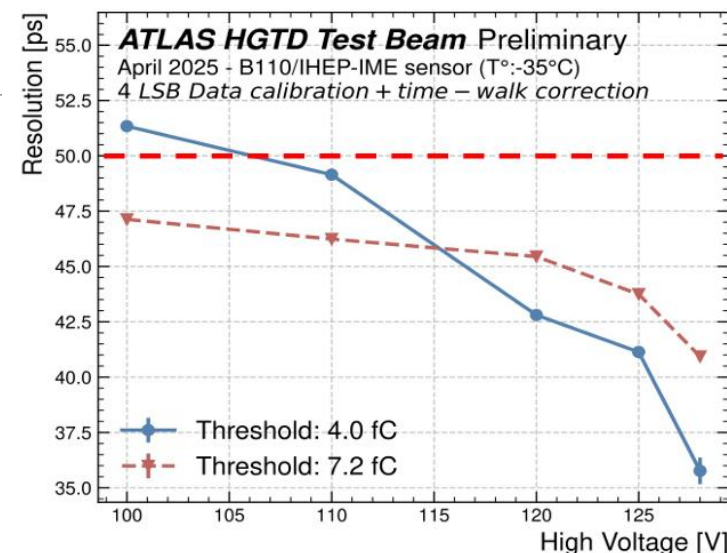
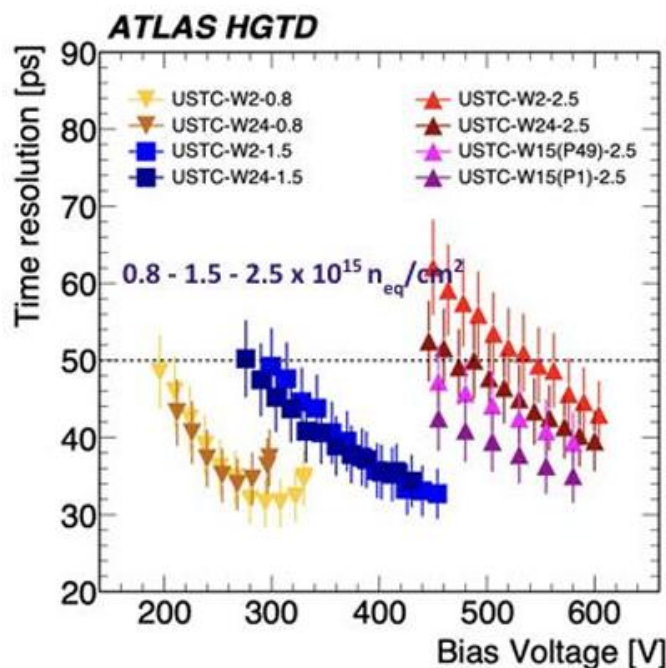
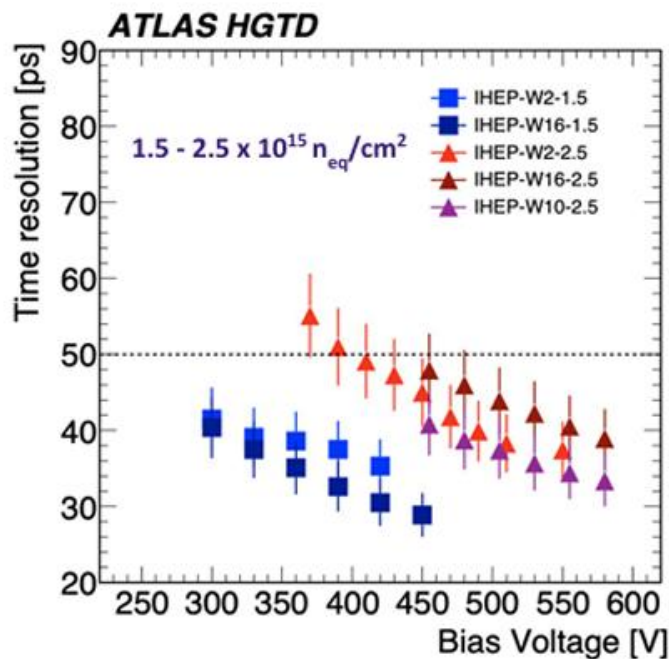


ATLAS HGTD项目LGAD传感器



➤束流结果: CERN SPS(120GeV pions), DESY(5GeV electrons)

辐照前, LGAD+ASIC时间分辨可达50ps以下



October 2025 test beam results

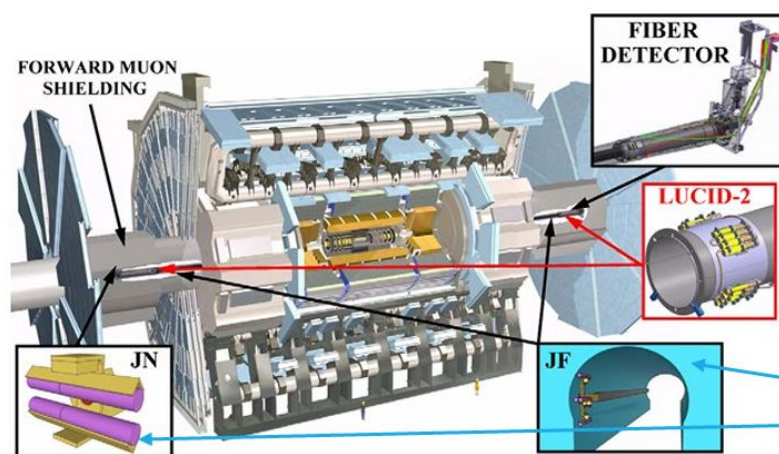
辐照前后, LGAD传感器时间分辨可达50ps以下



ATLAS BMA项目：束流亮度监测

► **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

ATLAS BMA: LGAD探测器

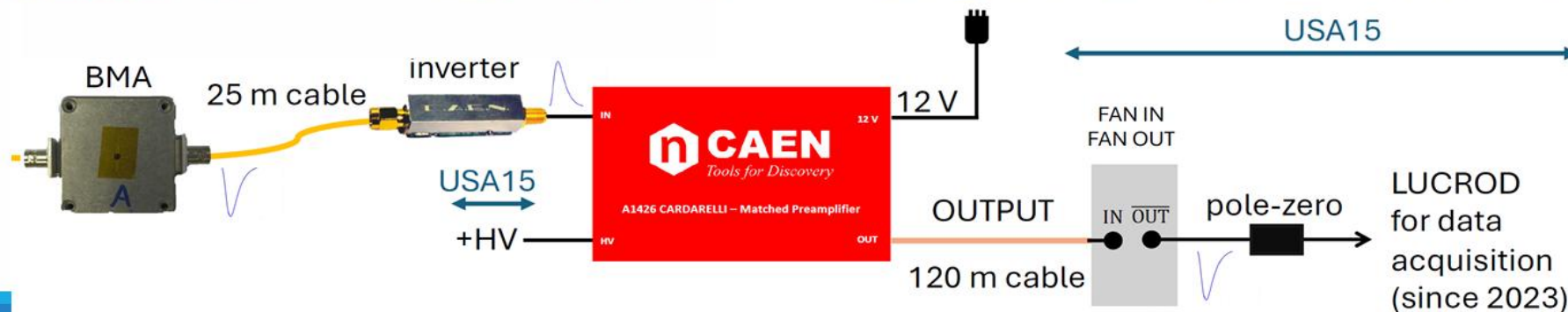
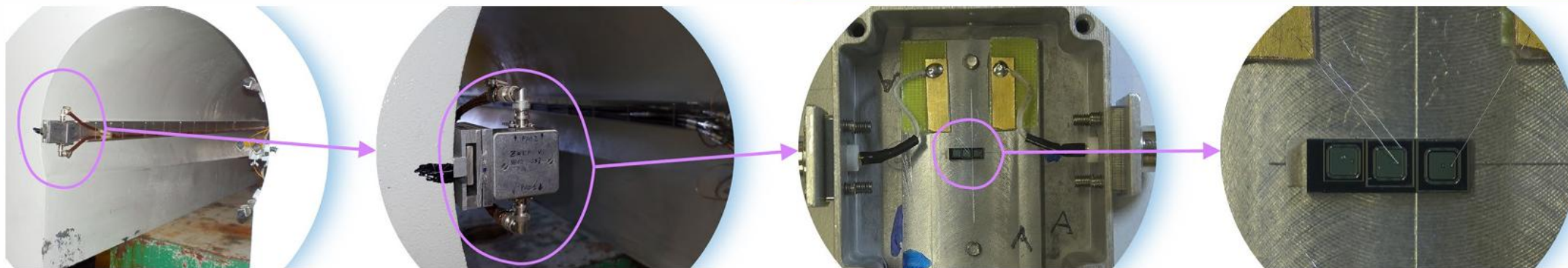


束流监测探测器 BMA detector: Beam Monitor for ATLAS detector

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

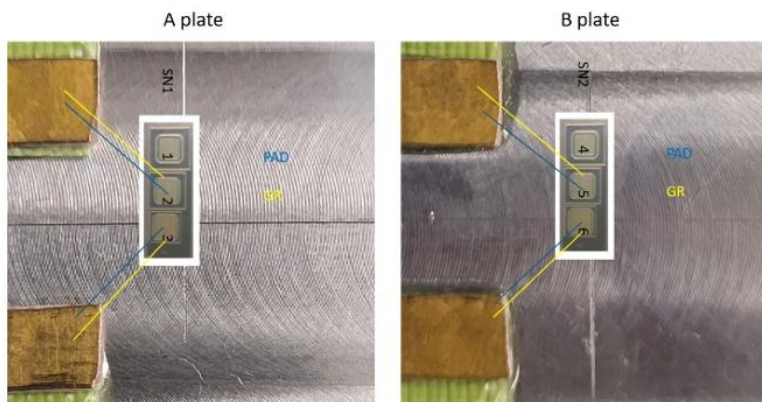
- BMA 由两个低增益雪崩二极管（LGAD）组成。
- LGAD 传感器通过引线键合连接至读出板，并连至电荷放大器
- 信号读出系统由 LUCROD 数据获取系统控制，确保高效的数据记录与处理。



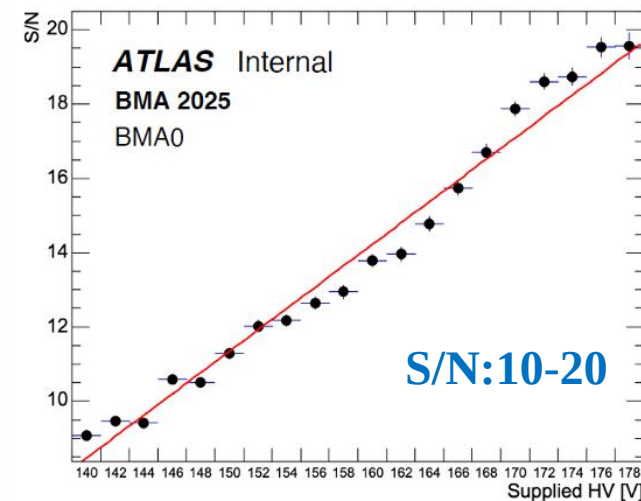
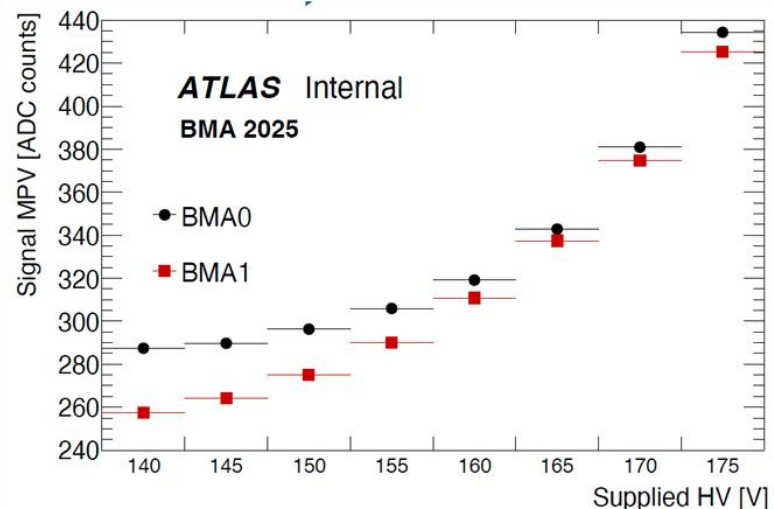
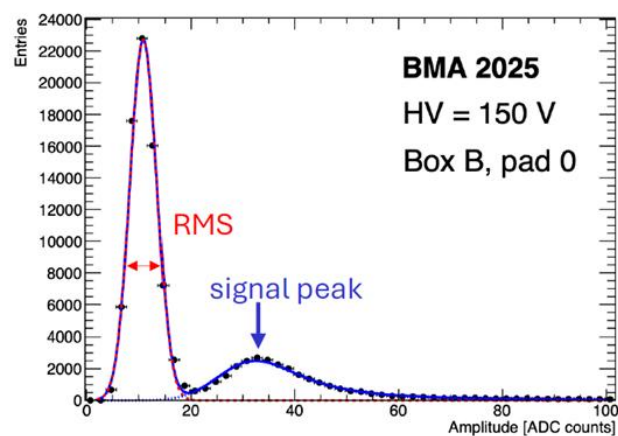


ATLAS BMA: LGAD探测器

中科院高能所与微电子所联合研制的LGAD探测器于2025年、2026年应用于ATLAS BMA探测器。



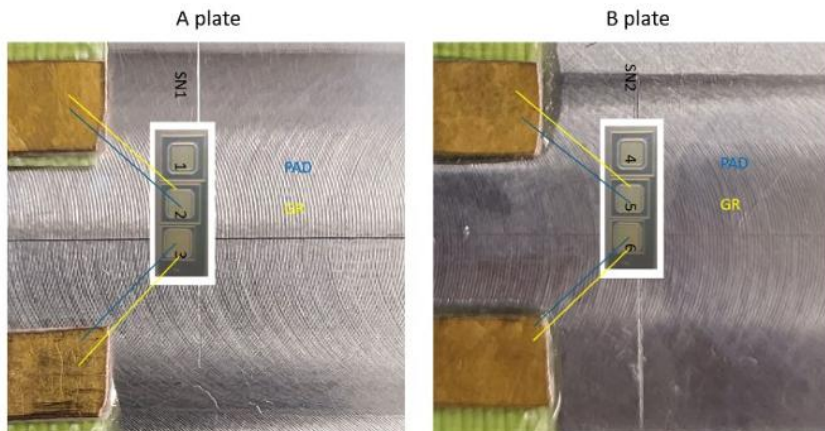
- IHEP-IME V3单像素器件
- 像素尺寸1.3mm x1.3mm
- 器件在辐照前击穿电压~183V
- 信噪比10-20



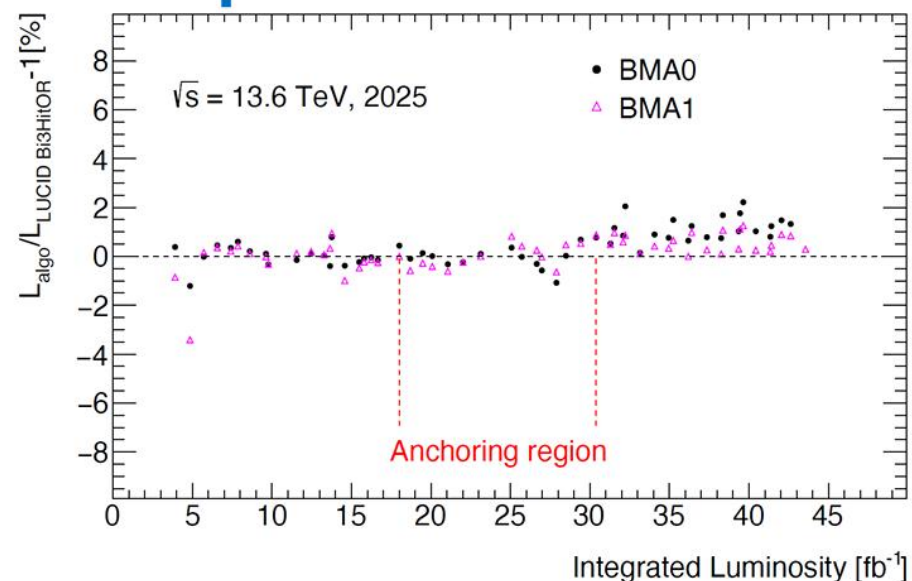
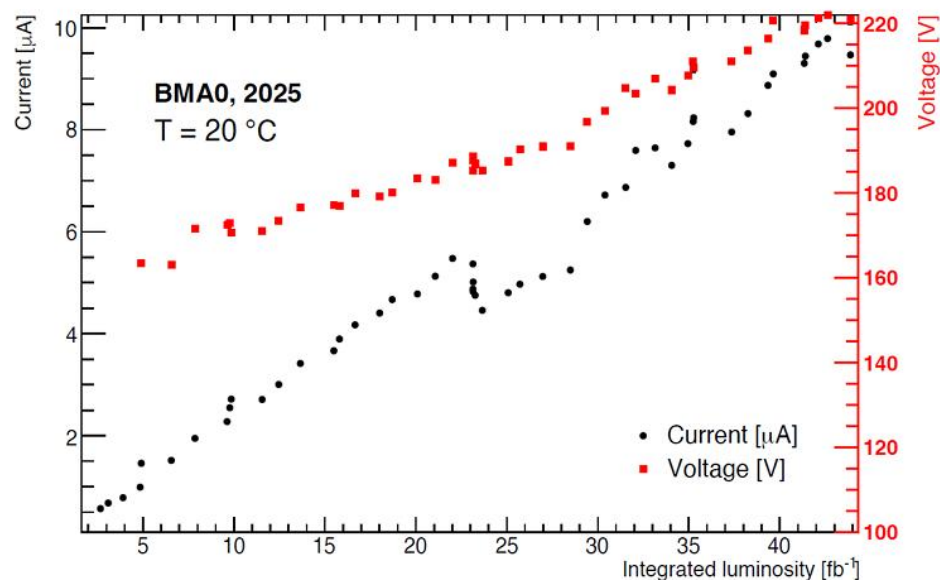


ATLAS BMA: LGAD探测器

2025年结果:



- 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 fb⁻¹**
- 2025 年 BMA 探测器的测量结果与 LUCID 探测器高度吻合。



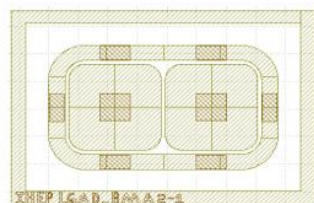


ATLAS BMA: LGAD探测器

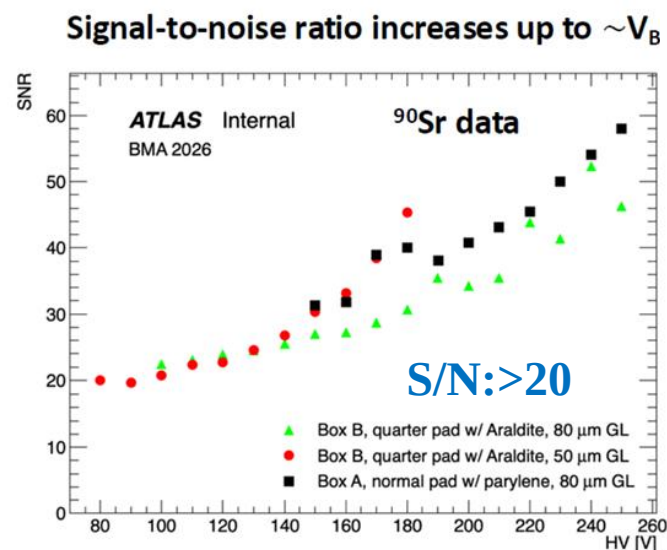
2026年结果:

新传感器: IHEP LGAD_BMA

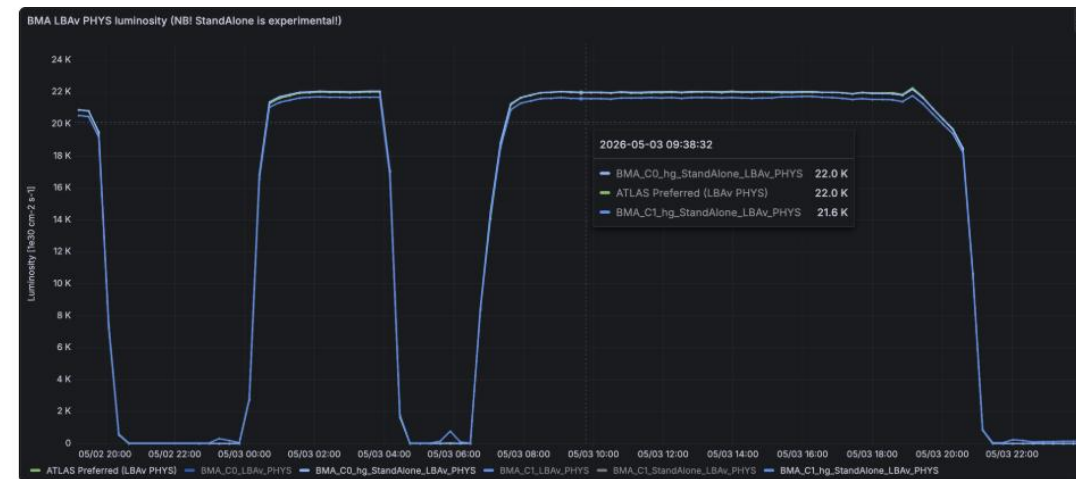
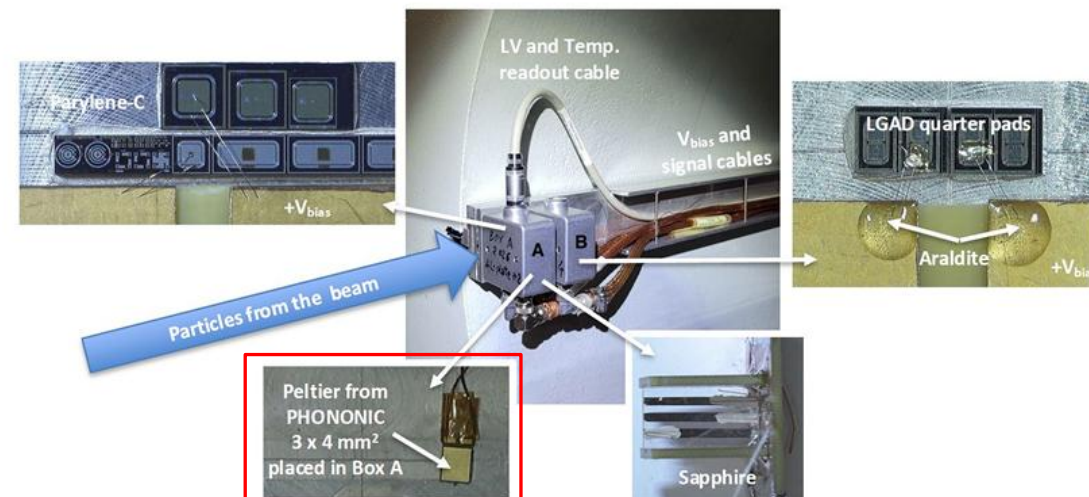
- 1种 ◆ 更小像素尺寸—减小电容, 优化信噪比
- 1种 ◆ 具有厚外延层—增大信号【50微米→80um】
- ◆ 增益层掺碳工艺—优化器件抗辐照性能



IHEP LGAD-BMA: 1x2阵列
0.65 x 0.65 mm²



新LGAD器件的信噪比情况



运行良好, 可实时监测束流亮度情况

LGAD探测器应用

➤ ATLAS HGTD探测器

➤ ATLAS BMA束流亮度监测实验

LGAD在BNCT中子束流测量中的应用研究—李梦朝等

基于LGAD的高强度脉冲 μ SR 谱仪探测技术研究—冯美婵、李强等

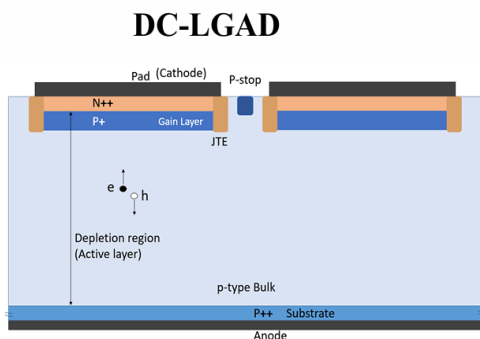
面向宽能区X射线探测的高时间分辨LGAD传感器的设计与性能研究—常紫静、李秋菊、Marco等

欢迎一起进行LGAD探测器应用拓展！

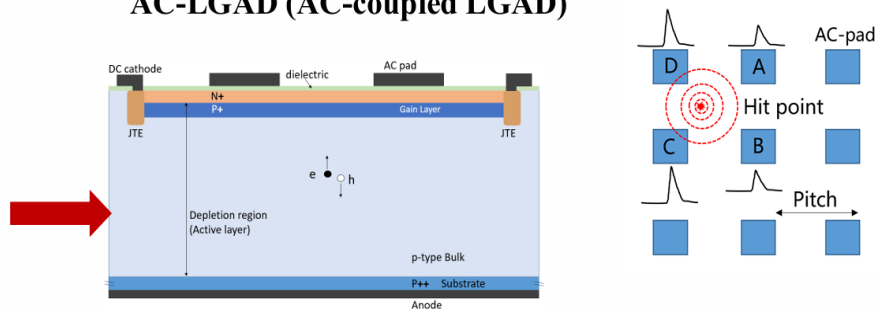


交流耦合AC-LGAD探测器

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。



AC-LGAD (AC-coupled 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

- 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...

CERN DRD3项目：AC-LGAD传感器研制、性能研究、应用拓展

➤ LGAD based timing tracker development for future collider

<https://cds.cern.ch/record/2918306>

负责人：赵梅

zhaomei@ihep.ac.cn

半导体径迹探测体系与关键技术研发—严琪

—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—张嘉健

已发表的关于AC-LGAD的论文：

- Total Ionizing Dose (TID) effect on the IHEP-IME strip-typed AC-LGAD sensor, NIMA, 2026
- KNN-based position reconstruction algorithm for AC-Coupled Low Gain Avalanche Diodes, NIMA, 2026
- Capacitance optimization of AC-LGAD sensors through isolation structure design and TCAD simulation, JINST, 2026
- Development of high-precision time detector based on strip LGAD for collider experiments, Nuclear Science and Techniques, 2025
- Performance of AC-LGAD strip sensors designed for the Dark SHINE experiment, Nuclear Science and Techniques, 2024
- The performance of AC-coupled Strip LGAD developed by IHEP, NIMA, 2024
- The Performance of Large-Pitch AC-LGAD With Different N+ Dose, IEEE Transactions on Nuclear Science, 2023
- Design of AC-coupled low gain avalanche diodes (AC-LGADs): a 2D TCAD simulation study, JINST, 2022



backup

