

# Researches of irradiation-resistant LGAD detector for ATLAS HGTD

## ATLAS HGTD 抗辐照 LGAD 探测器研究

赵梅

中国科学院高能物理研究所

2024-7-16



# 报告内容

- LGAD探测器介绍与研究背景
- 高能所LGAD探测器R&D
- 预生产情况与测试结果
- LGAD发展前景与应用
- 总结



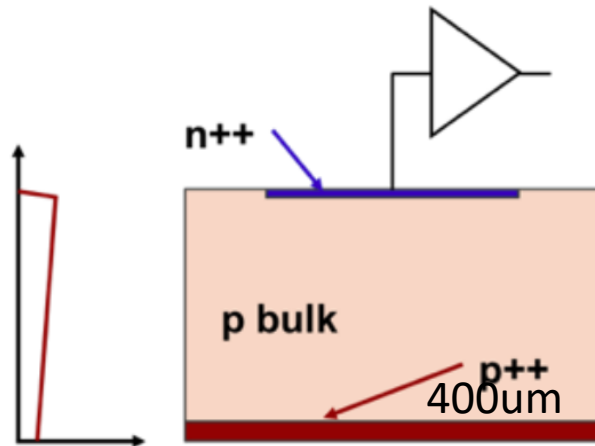
# LGAD sensor

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

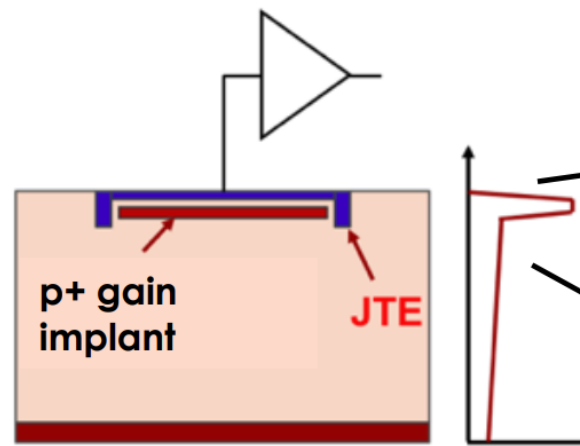
- 雪崩二极管, gain layer between n+ layer and p sub (高电场区), 工作在线性区
- 增益: 10~50, **higher signal** as compared with PIN
- 薄耗尽层(~50um) to decrease  $t_{rise}$  (**fast ramping time**)
- **Good Signal/Noise ratio**, no self triggering as compared with SiPM
- 应用: ATLAS HGTD and CMS project for timing information

→ **good timing resolution(<30ps)**

PIN diode



LGAD sensor



$$\sigma_j = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{S}{t_r} \right|} = \frac{t_r}{\left| \frac{S}{\sigma_n} \right|}$$

Size of noise

Slope of vol.

Size of signal

Ramping time

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

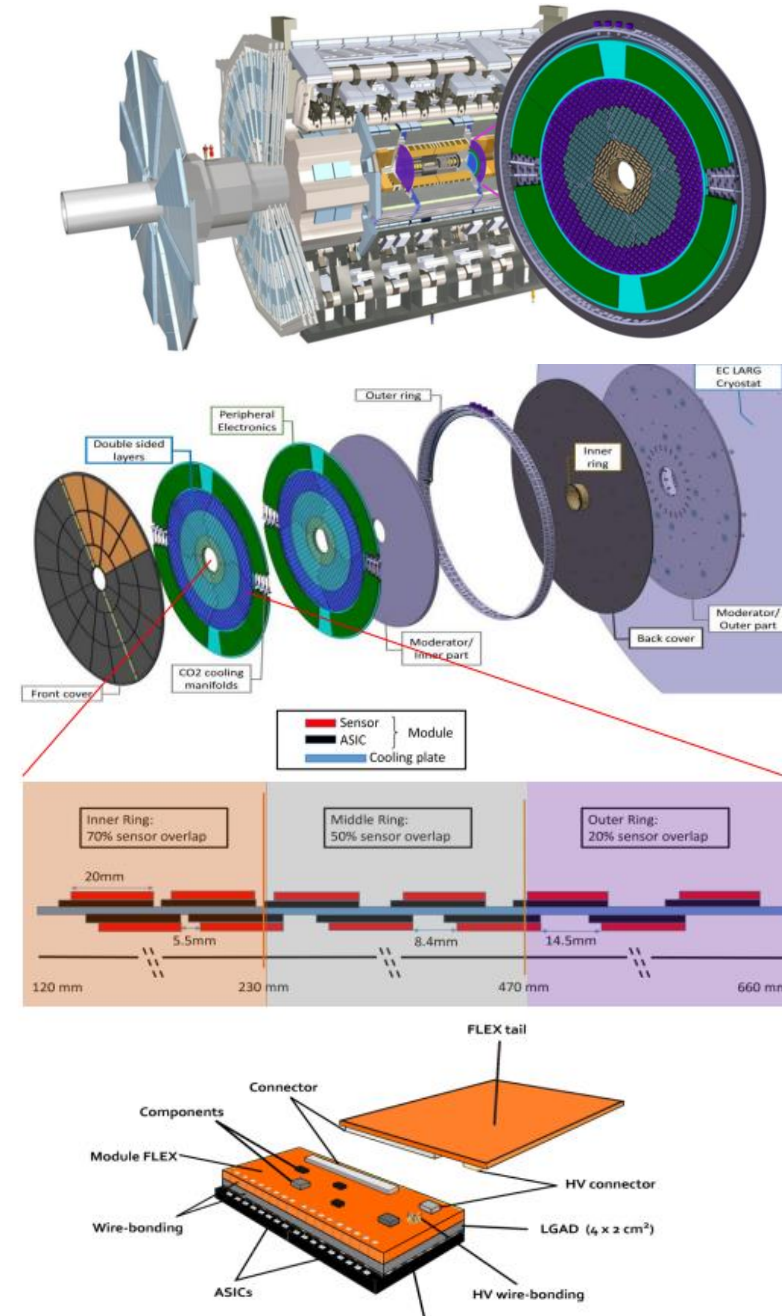
# LGAD探测器研究背景

- 欧洲大型强子对撞机高亮度II期升级:高颗粒的时间探测器项目  
**ATLAS High Granularity Timing Detector (HGTD)**
  - 粒子到达时间的测量精度提高2个数量级(30ps), 以解决高亮度LHC对撞事例堆积问题
    - 6.4m<sup>2</sup>的硅探测器, 30ps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 $2.5 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$ 的等效中子通量的辐照

➤ HGTD探测器研制关键是LGAD探测器。时间分辨率可达30-50ps, 从而提高区分堆积的能力, 改进前向区域的粒子重建。

➤ HGTD 需求LGAD探测器: 21000颗

参数	指标
衬底材料厚度	50 $\mu$ m EPI /250 $\mu$ m 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

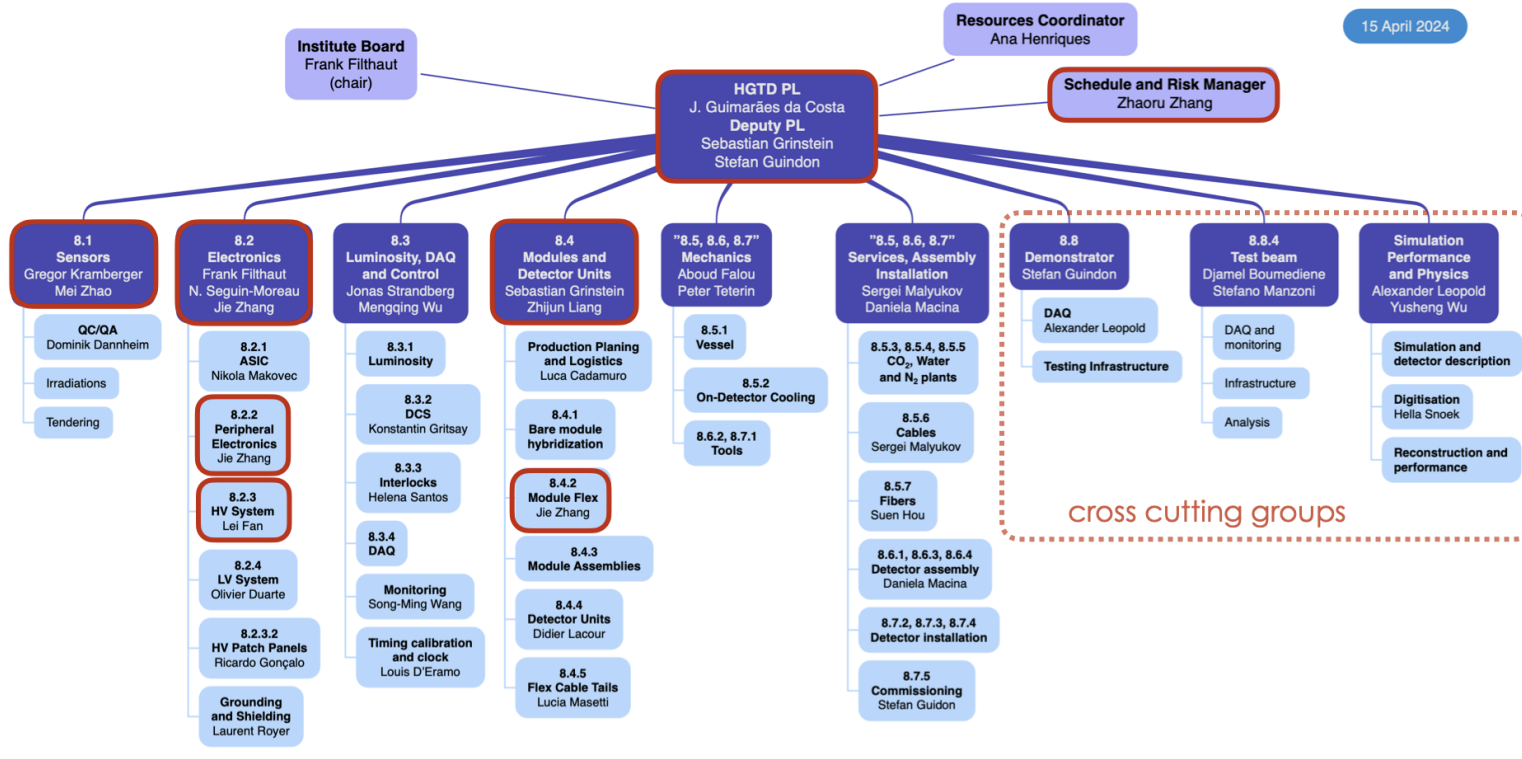




# ATLAS HGTD探测器

## • HGTD项目管理架构

- 高能所Joao担任HGTD项目经理
- 4人担任探测器各部分Level-2协调人（赵梅：LGAD探测器；张杰：电子学；梁志均：module and Detector units；吴雨生(科大):simulation）
- 3人担任探测器Level-3协调人（张杰:PEB, module flex;樊磊:HV）



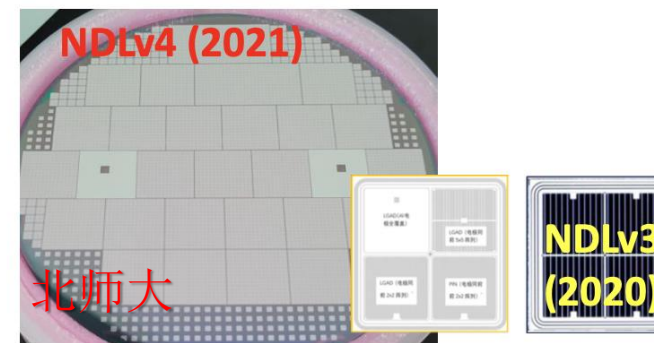
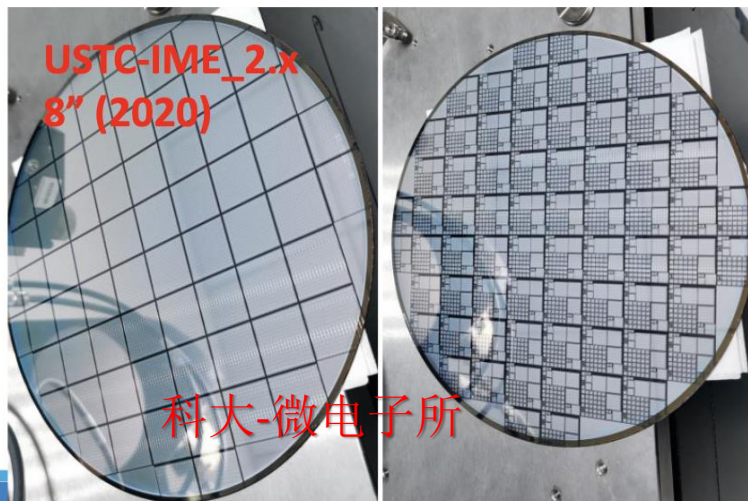
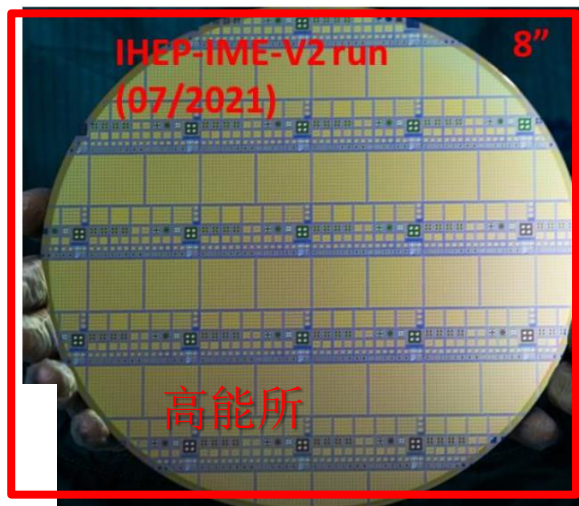
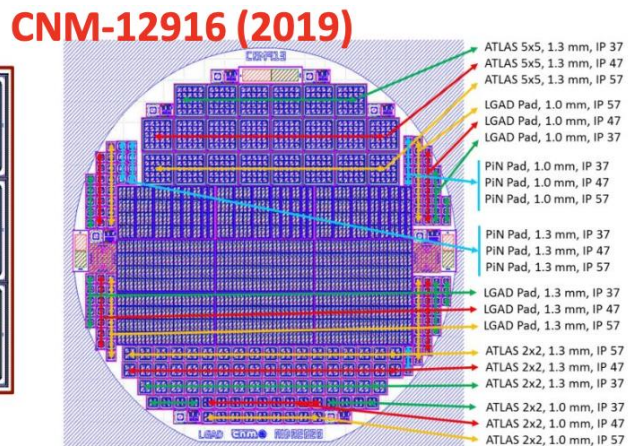
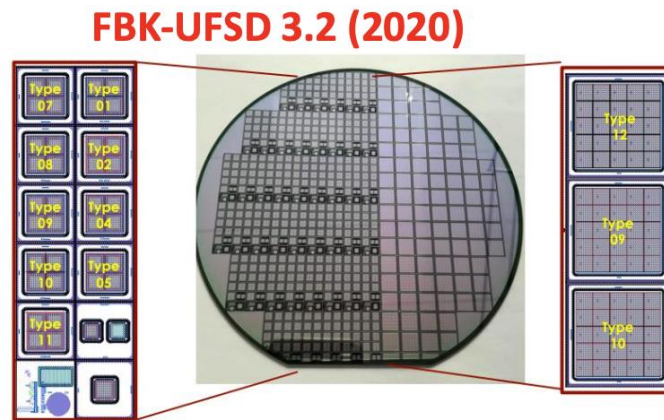
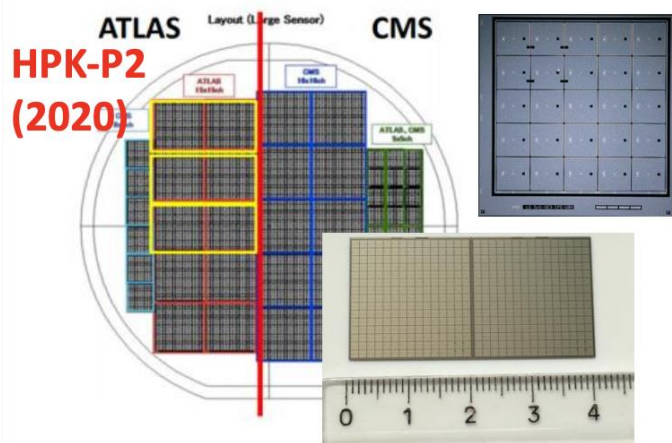
15 April 2024





# LGAD探测器：国内外研究单位

- 国内：IHEP-IME (高能所-微电子所), USTC-IME (科大-微电子所), NDL(北师大)
- 国际：滨松HPK (日本), FBK (意大利), CNM (西班牙), BNL(美国)...
- 高能所自主设计LGAD探测器版图和工艺，在微电子所8寸工艺线流片



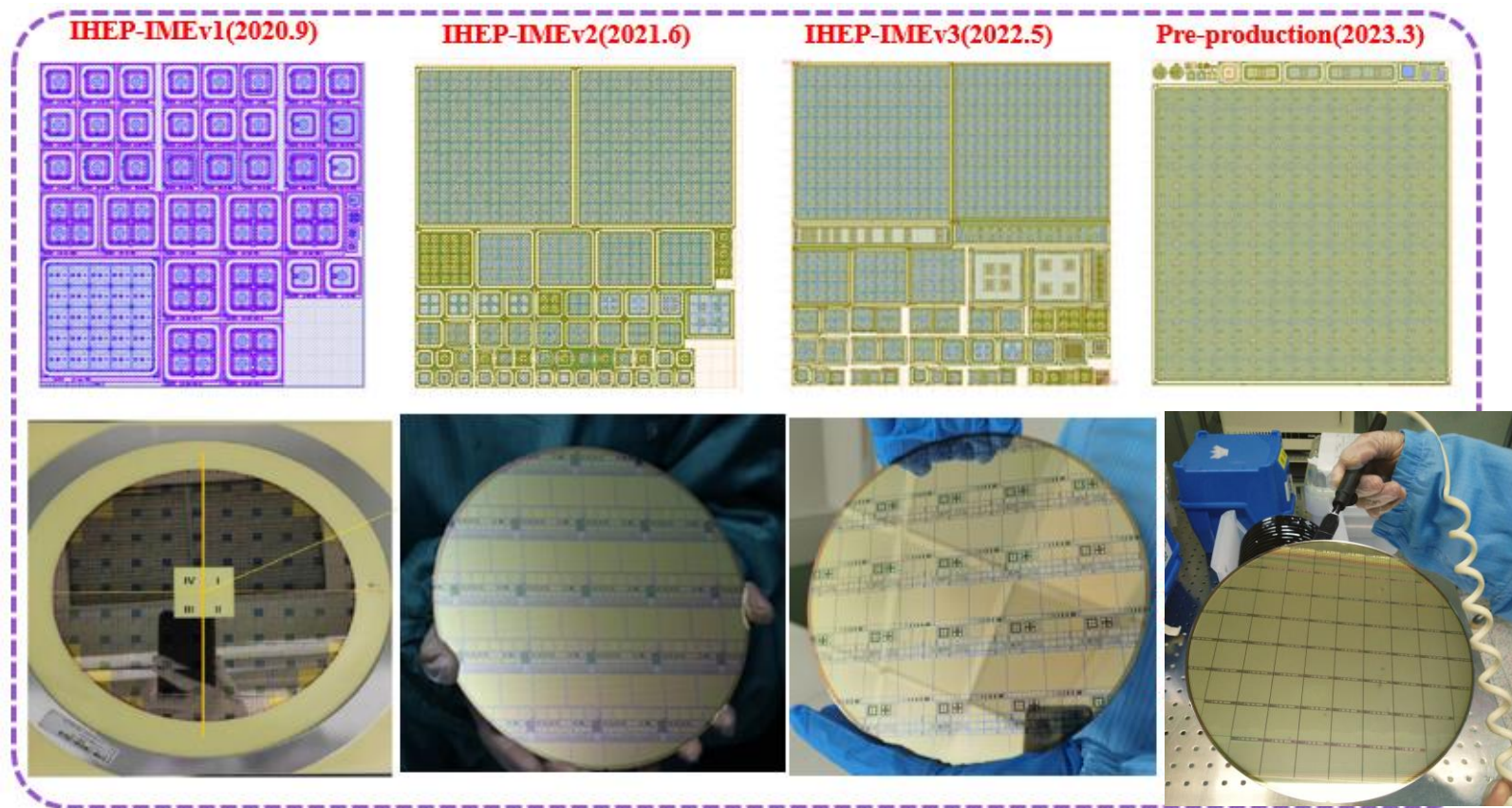
PLANAR TECHNOLOGY – more vendors (e2V, BNL, Micron ...)



# 高能所LGAD探测器研发进展

从2018年起致力于LGAD探测器的研发，自主设计版图与工艺参数，并基于微电子所8寸工艺线多次流片迭代，成功研制出了具有良好时间分辨与抗辐照性能的国产LGAD探测器。

- IHEP-IMEv1(2020.9)，性能满足HGTD项目要求
- IHEP-IMEv2(2021.6)，掺碳工艺优化器件抗辐照性能，大阵列器件性能验证
- IHEP-IMEv3(2022.5)，工艺重复性验证，优化大阵列器件设计减少死区
- 2023年开始预生产



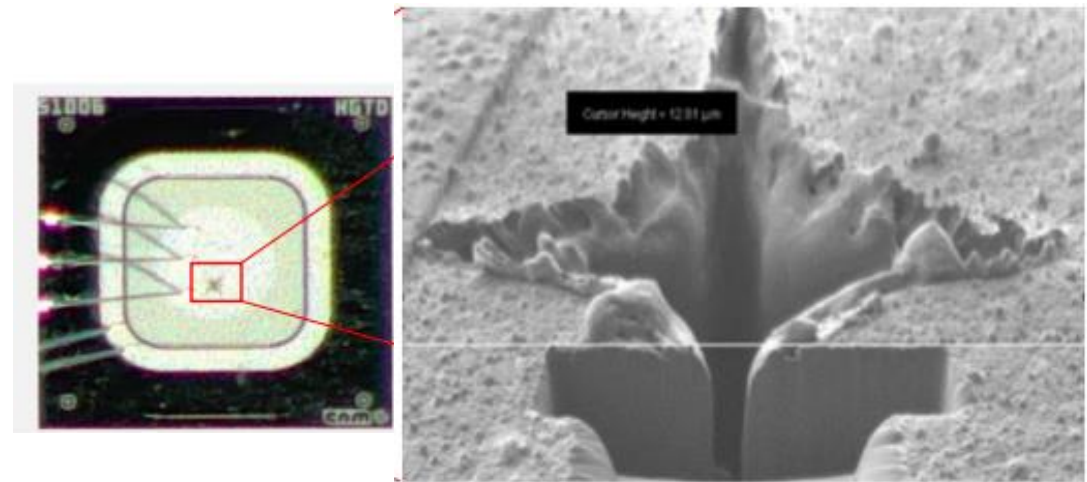
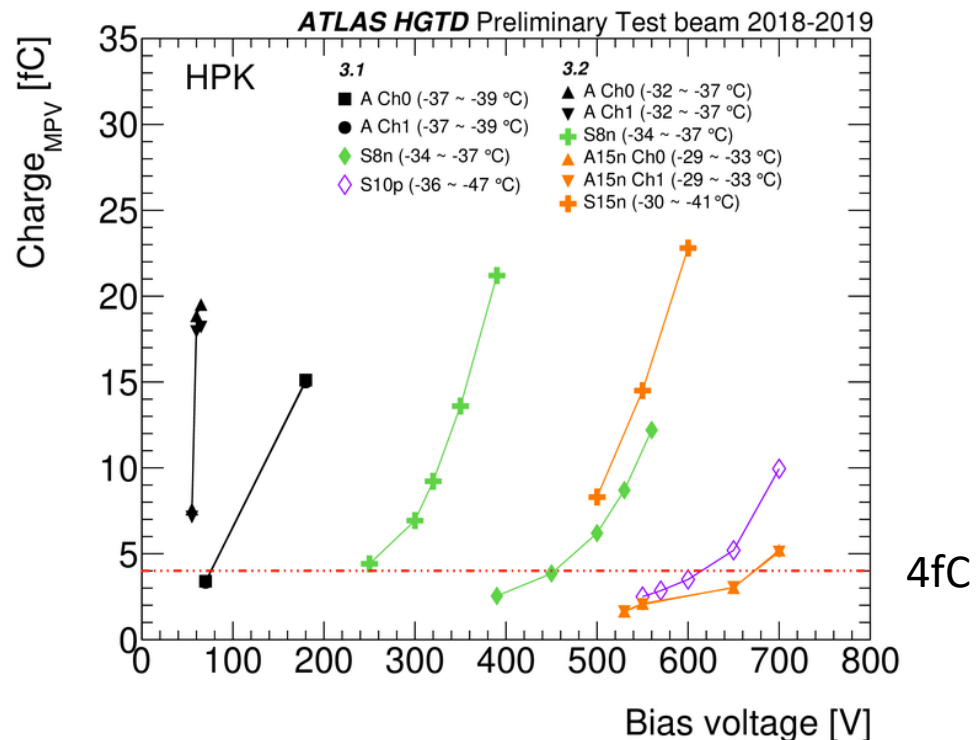


# LGAD探测器抗辐照性能

➤辐照后，受主移除效应（增益区有效浓度降低，受主移除）

➤增大工作电压后，在束流测试时出现单粒子烧毁的情况

➤增益下降，收集电荷变少，时间分辨特性变差



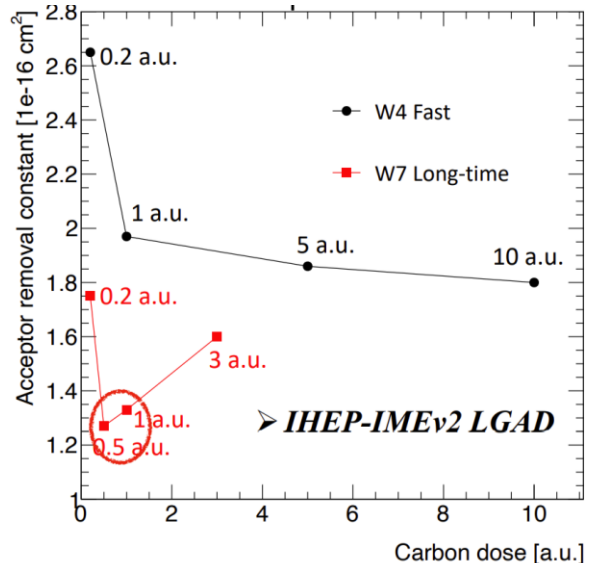
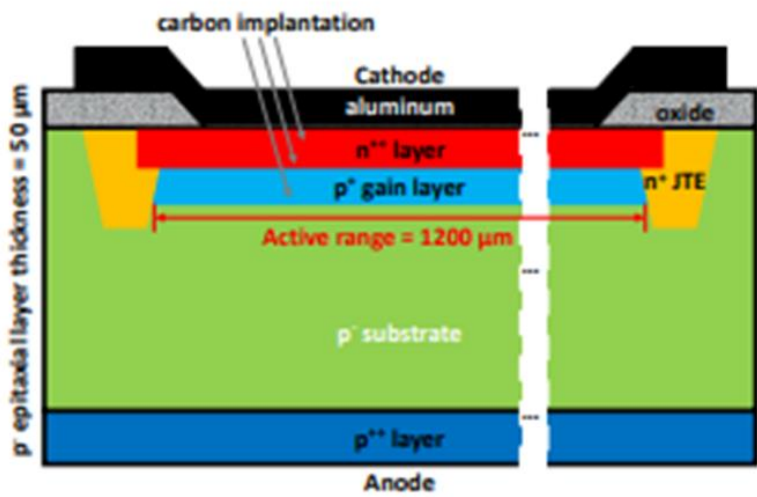
• SEB现象： CMS/ATLAS/RD50 均有报告

研究发现：高电压与高电场导致烧毁，工作电压要控制到<550 V（50微米的硅传感器），电场<12V/um, 可收集到足够的电荷



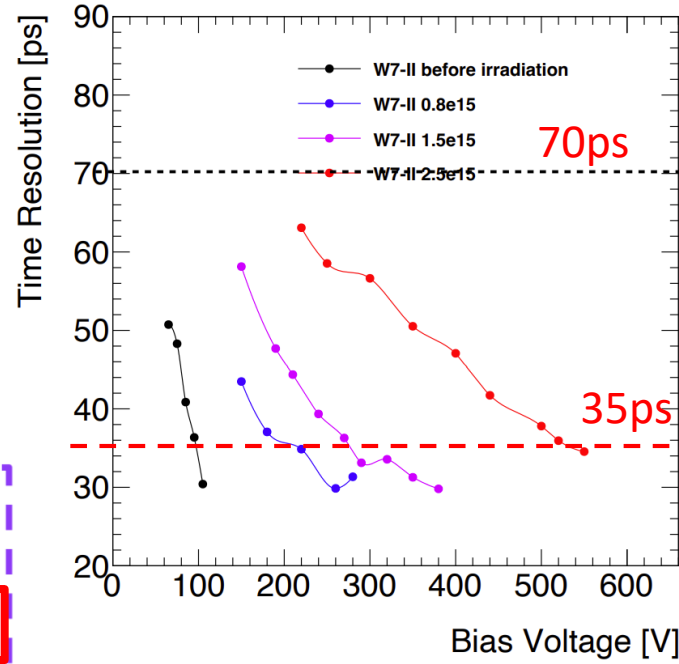


# 高能所LGAD探测器：工艺优化与抗辐照性能

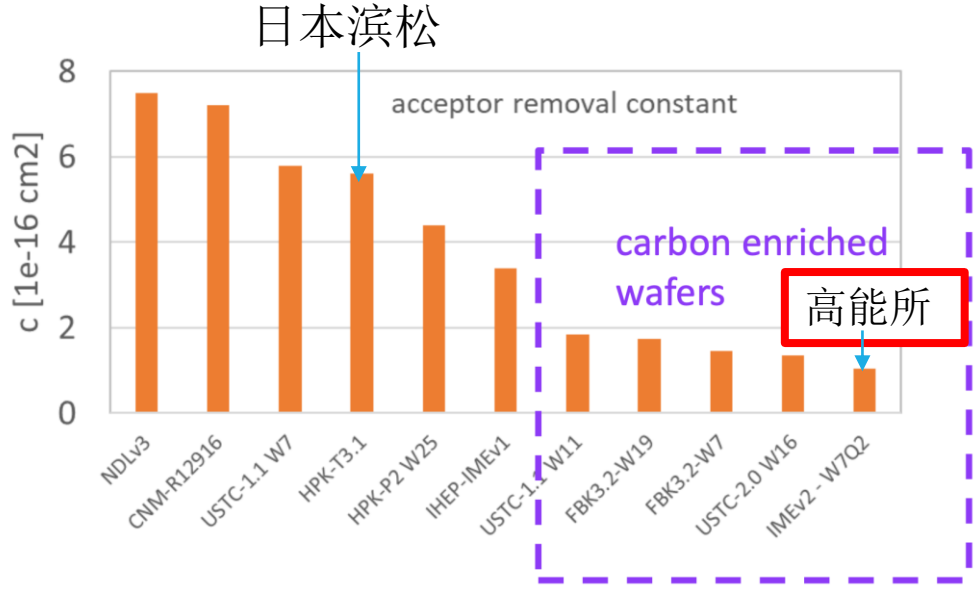


辐照前后，时间分辨率均 <35ps

时间分辨率 vs 偏置电压



- 掺碳LGAD器件性能研究：不同的碳注入剂量和热处理条件
- 在不同的条件里，找到一个最优的碳注入剂量与退火条件。这个情况下，辐照后的器件具有最小的受主移除率（反映了器件的抗辐照性能）

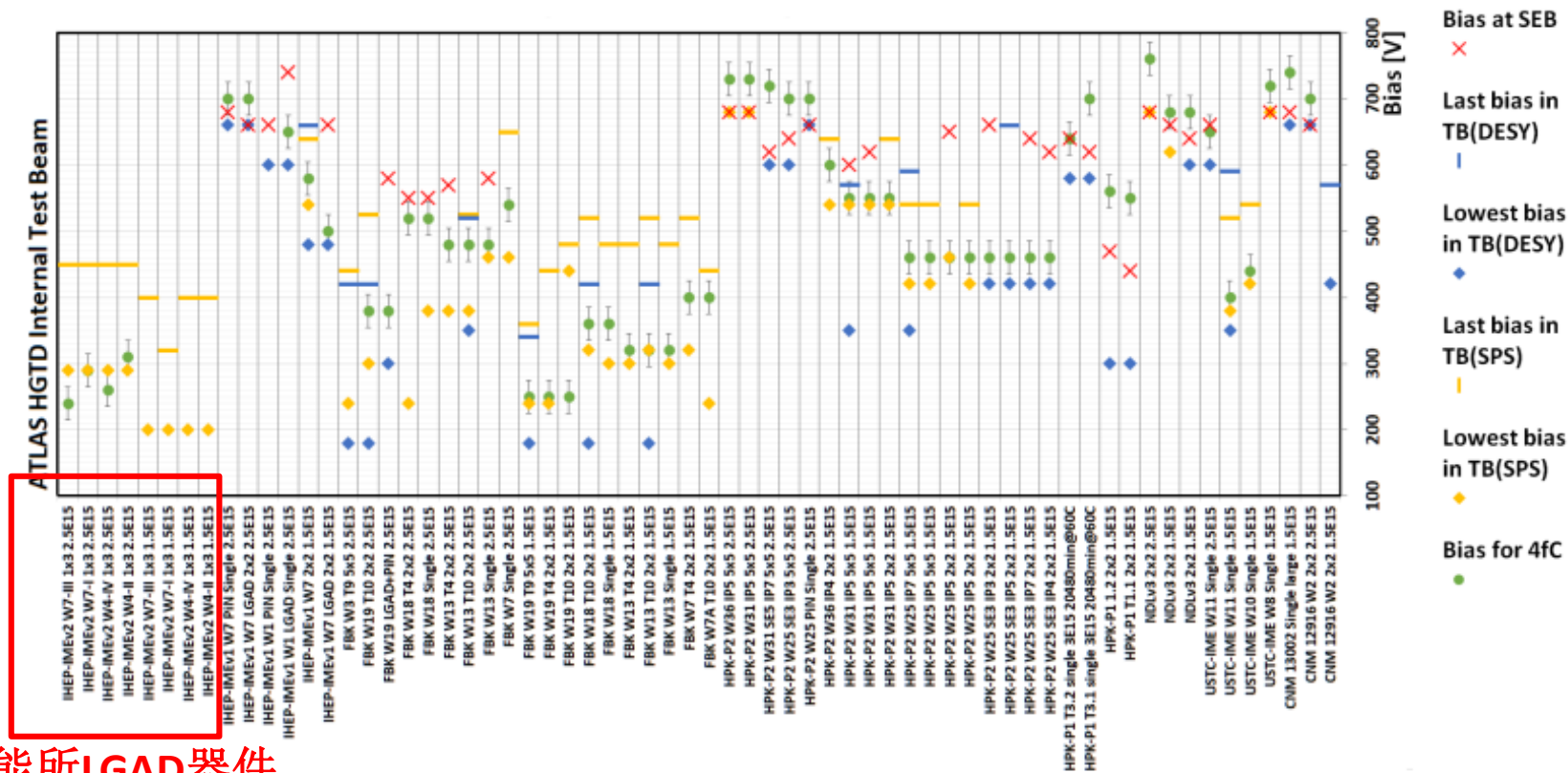


<https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167697>



# 高能所LGAD探测器：束流测试

ATLAS合作组开展的欧洲核子中心（CERN）的高能质子流测试：  
高能所掺碳LGAD器件辐照后均可在较低电压下收集足够的电荷（4fc），且在束流下长时间工作，无一烧毁



高能所LGAD器件

<https://arxiv.org/abs/2306.12269>



# 高能所LGAD探测器：量产

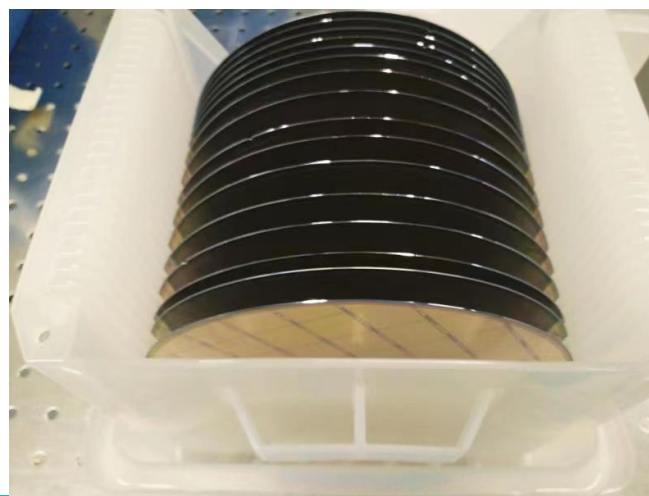
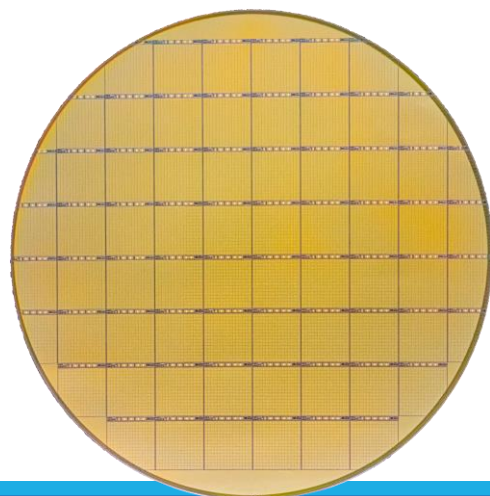
- 2023年高能所设计的LGAD探测器赢得CERN的LGAD全额招标订单
  - 在日本滨松、意大利FBK等竞争下，高能所设计的LGAD赢下招标
  - 欧洲核子中心（CERN）首次采购中国产的硅探测器
- HGTD项目LGAD探测器：21000颗
  - 高能所设计：90%（54% CERN国际招标采购+ 24%实物贡献+12% Spain 贡献）
  - 中科大设计：10% 实物贡献

Vendor		Percent
IHEP-IME	CERN	54%
	China in-kind	24%
	Spain in-kind	12%
USTC-IME	China in-kind	10%

2023年3月开始HGTD项目LGAD器件批量预生产，目前高能所与科大已完成预生产，生产了~1900颗芯片（高能所：~1700颗，科大：~200颗），性能符合项目要求。

预计于2024.7月底开始正式生产。

单晶圆有52个  
15x15 LGAD器件



预生产晶圆



# 高能所LGAD探测器：量产

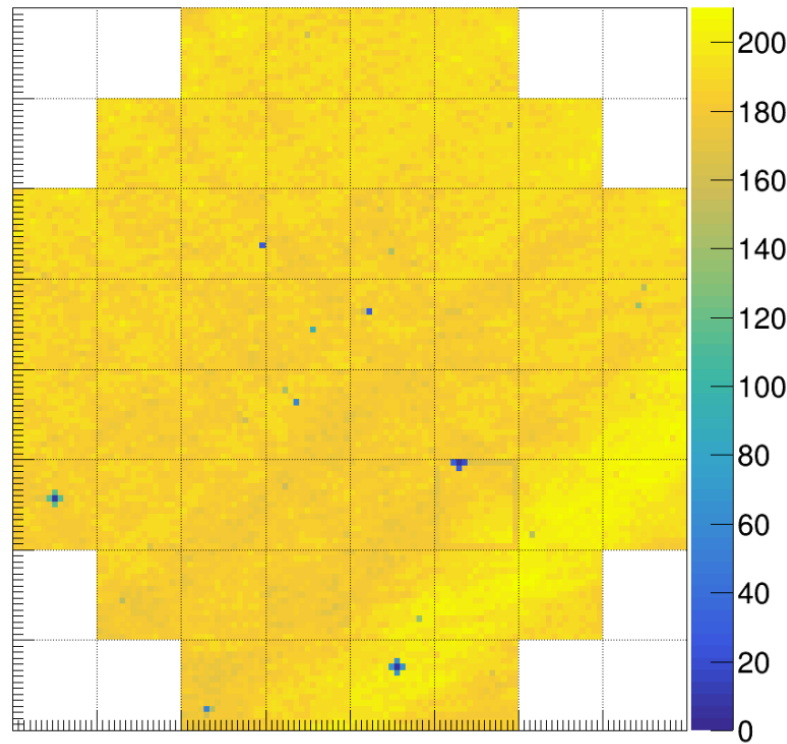
➤ 成品率： pad yield>99%, sensor yield: 64%

➤ 15x15 阵列器件性能一致性良好

225个pad的击穿电压偏差小于5%： $RMS(V_{bd,pad})/\langle V_{bd,pad} \rangle < 0.05$

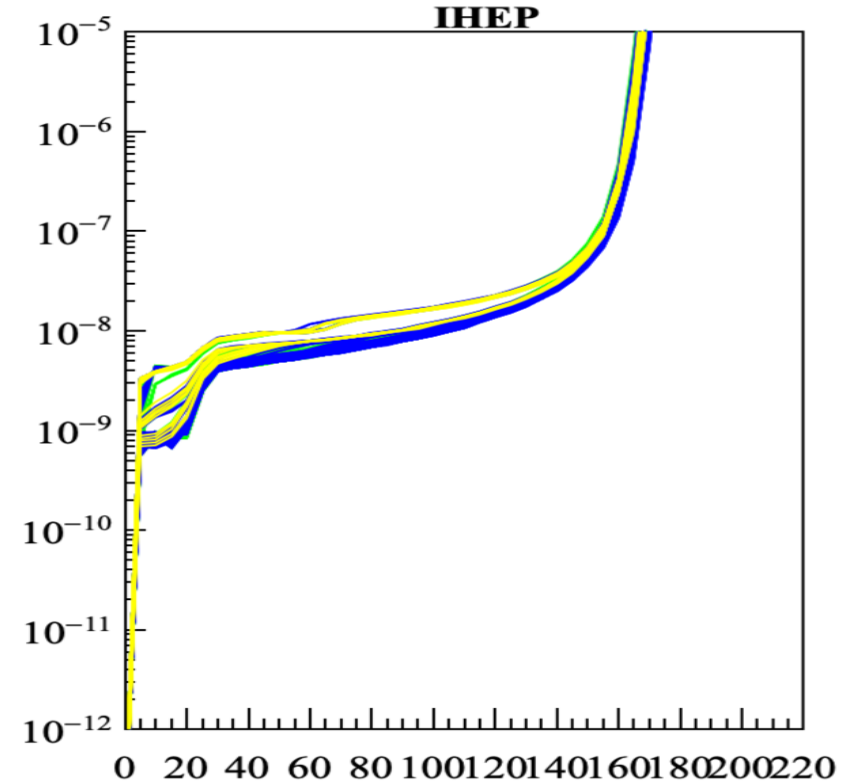
漏电流最大最小值的比值小于3， Pad leakage current spread at  $0.8V_{bd}$ , peak to peak within a factor of 3X

晶圆上器件间Vbd分布图



$V_{BD}$  Map

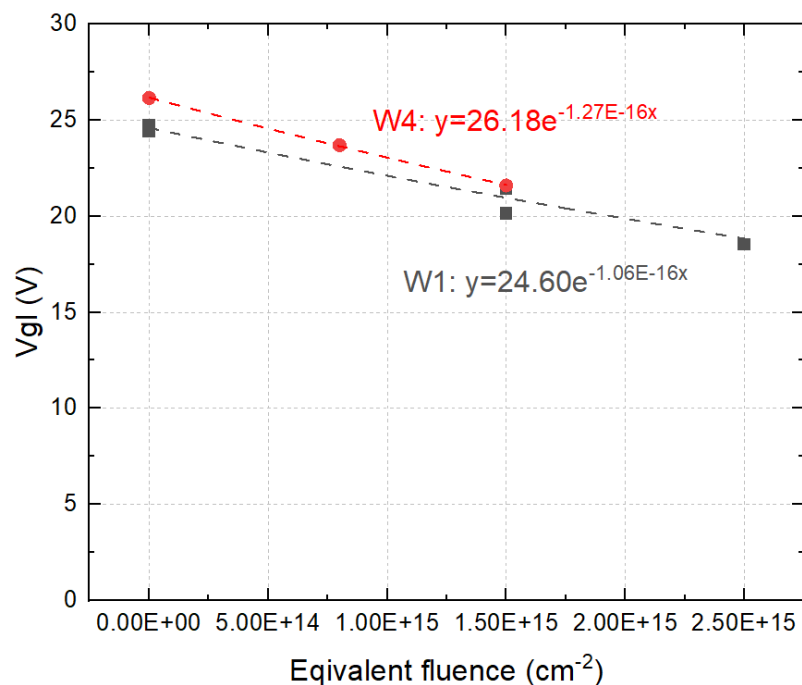
15x15器件上225个pad的IV图



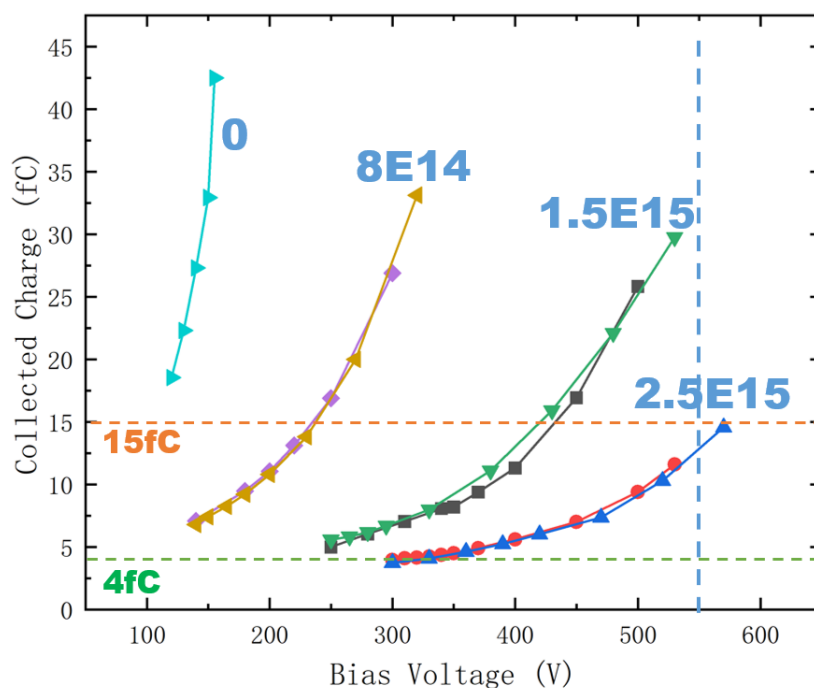


# 高能所LGAD探测器：预生产器件性能

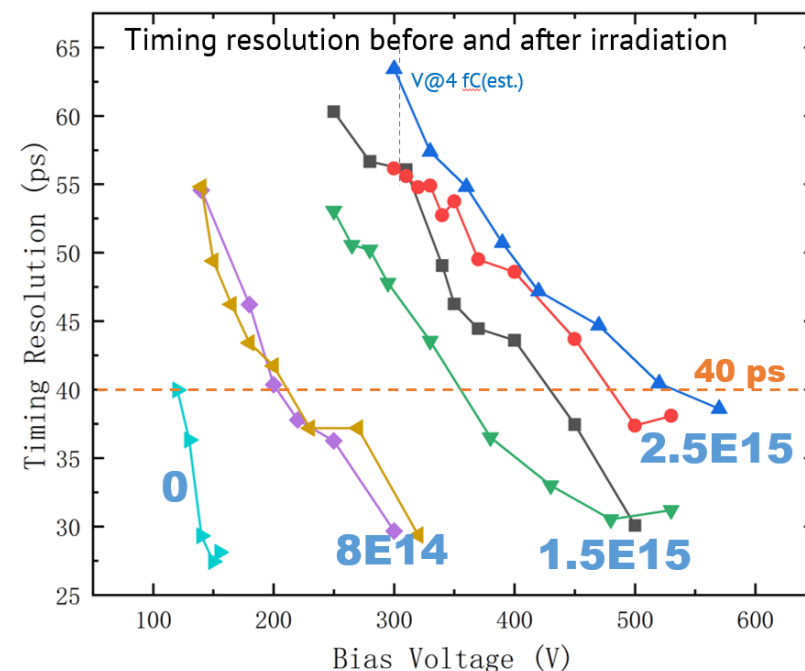
## 预生产器件抗辐照性能测试结果：中子辐照 (JSI)



受主移除率低:  $1.06e-16$   
 优于R&D run



辐照后在<400V, 可收集足够电荷



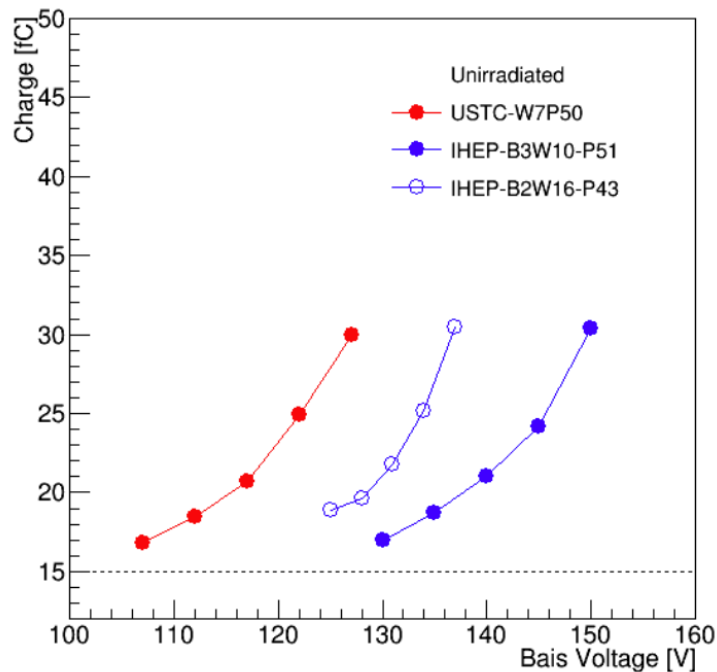
辐照前, 时间分辨可达<30ps  
 辐照后, 时间分辨可达<40ps



# 高能所LGAD探测器：预生产器件性能

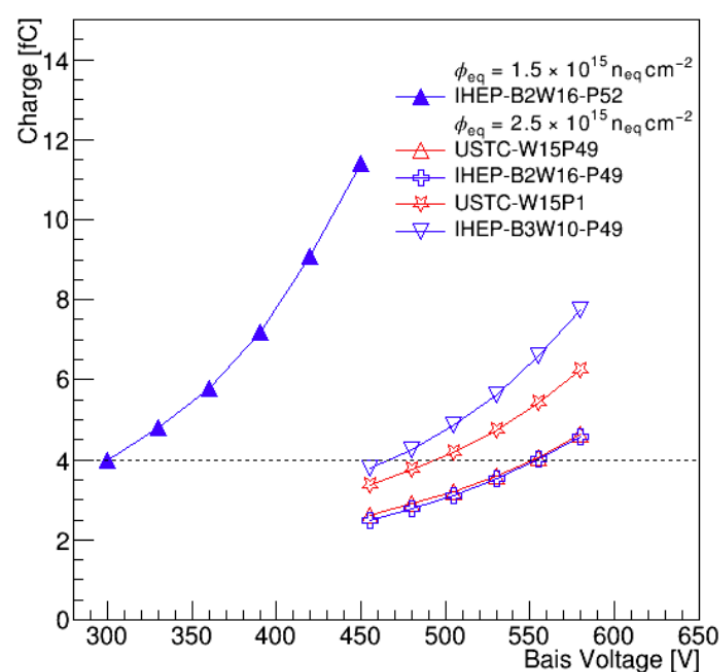
## 预生产器件抗辐照性能测试结果：辐照后器件的束流测试结果

Collected Charge - HGTD TB June 2024



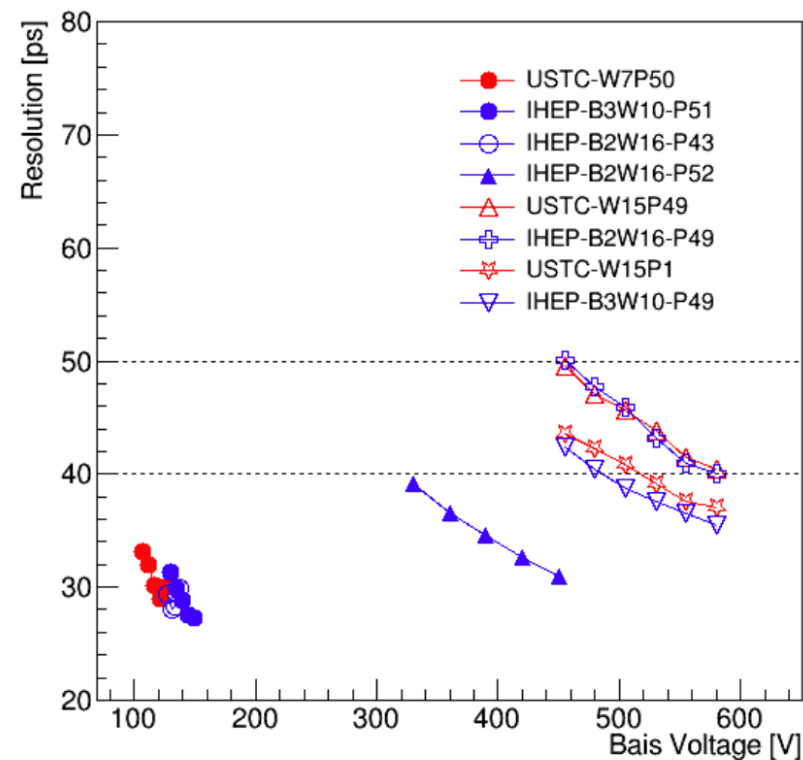
unirradiated sensor

Collected Charge - HGTD TB June 2024



irradiated sensor

Time Resolution - HGTD TB June 2024

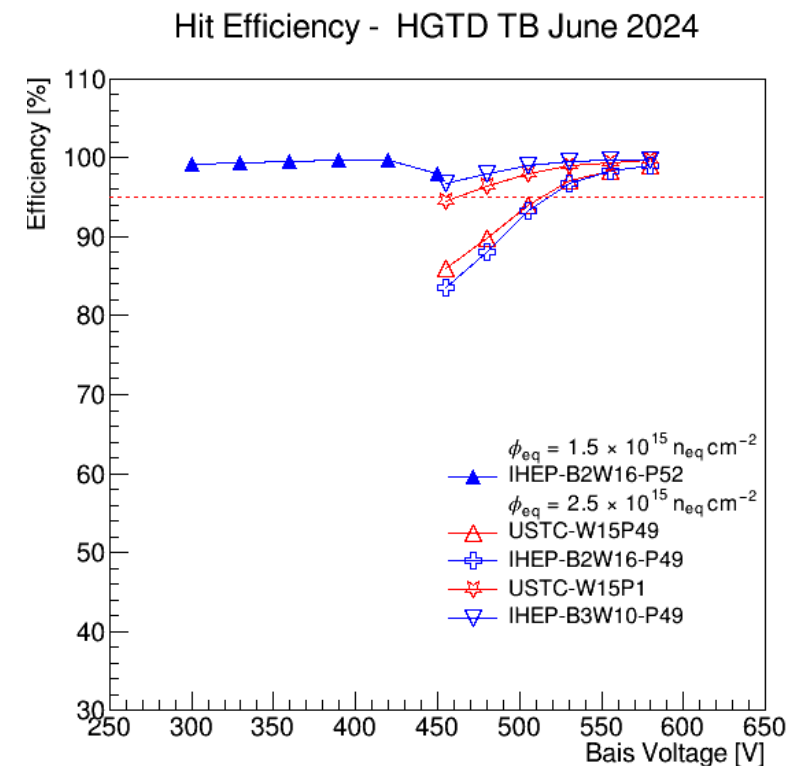
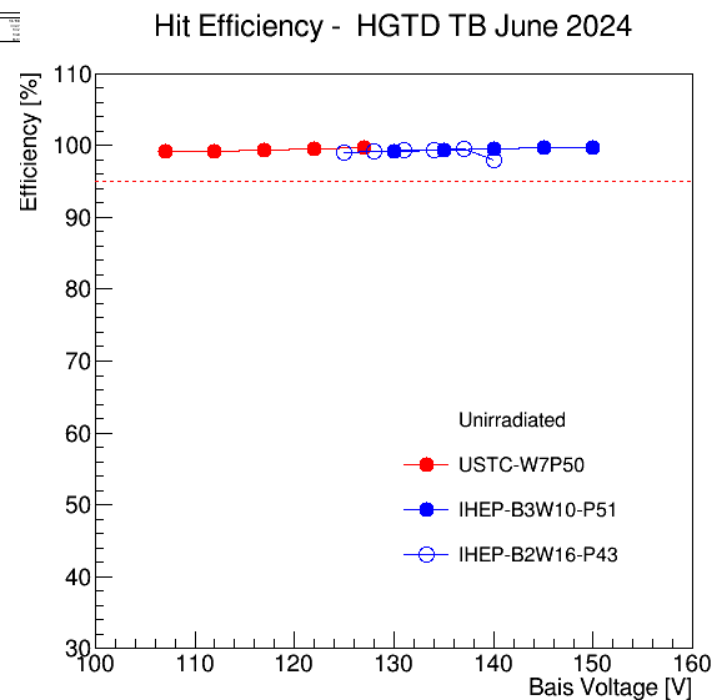
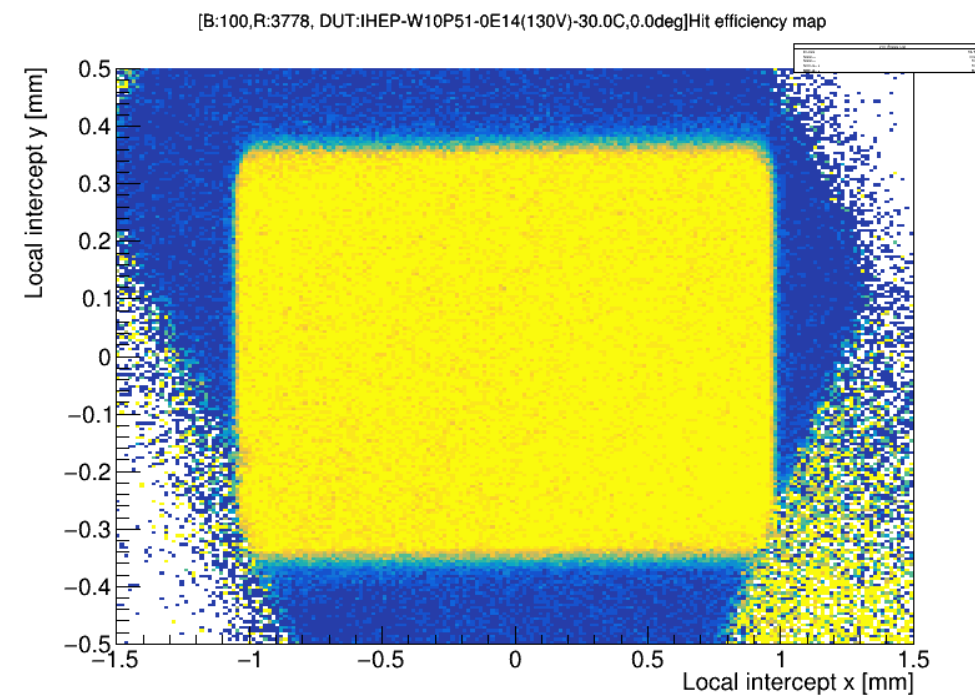


- 在低于550V的电压下收集足够的电荷 (>4fC)
- 达到30-50ps的时间分辨特性
- 有效避免束流测试中的单粒子烧毁现象(SEB), 完全满足HGTD项目的应用要求。



# 高能所LGAD探测器：预生产器件性能

## ➤ 预生产器件抗辐照性能测试结果：辐照后器件的束流测试结果



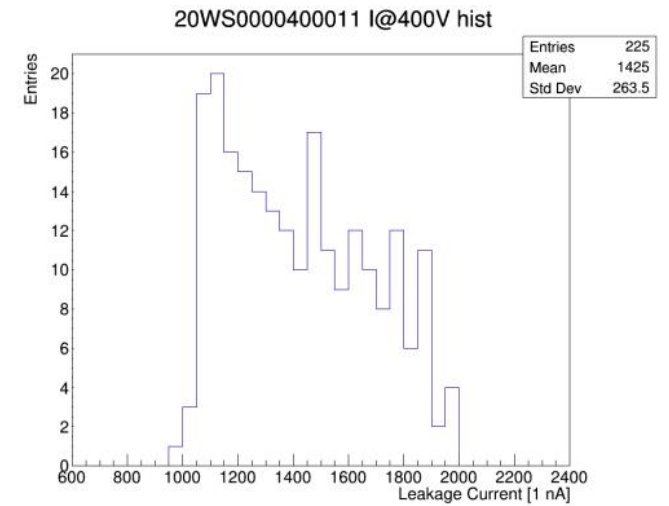
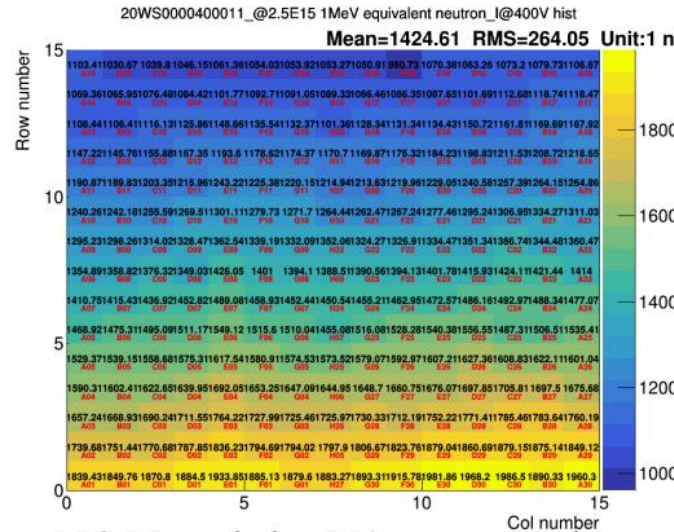
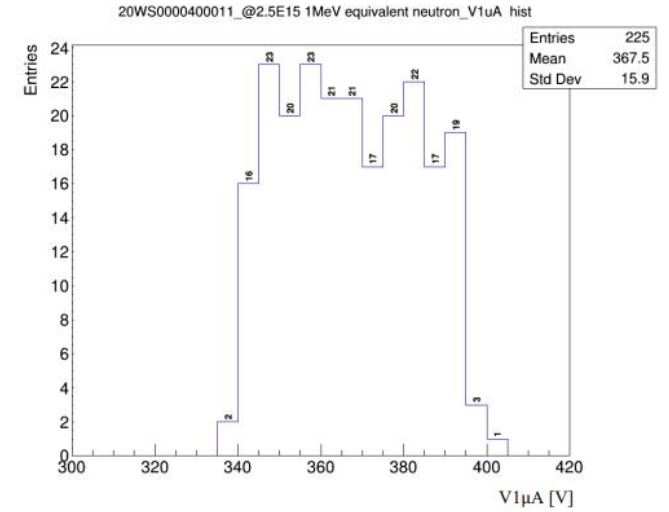
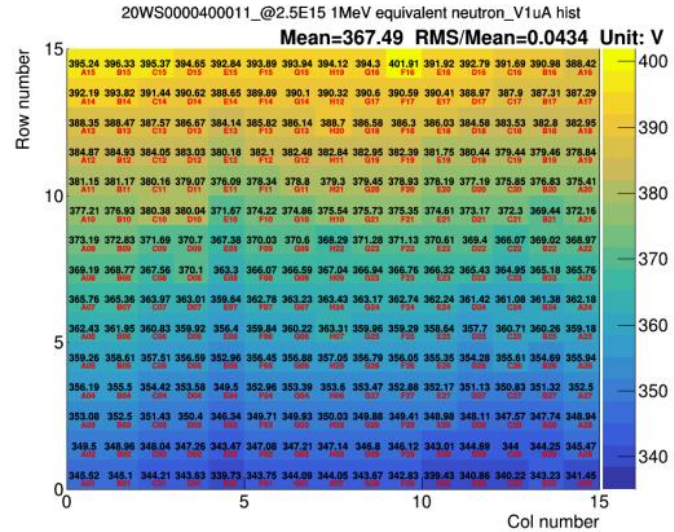
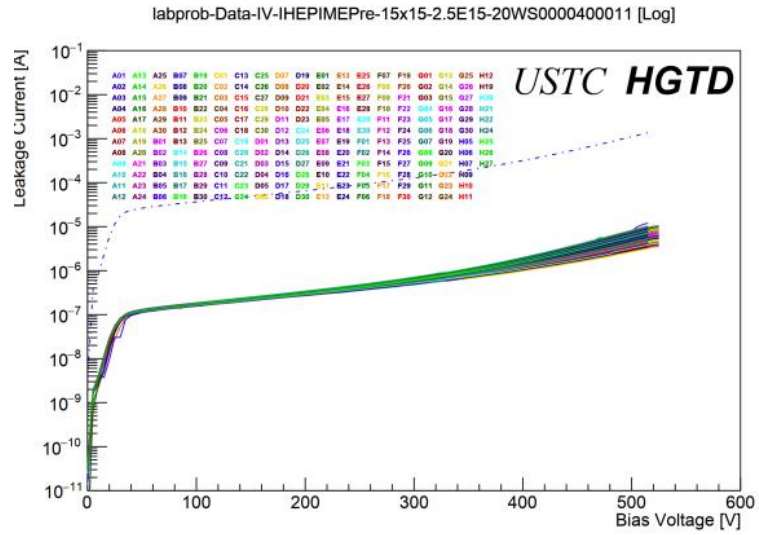
- 辐照前后均可达到>95%的探测效率，完全满足HGTD项目的应用要求。



# 高能所LGAD探测器：预生产器件性能

## ➤ 预生产器件抗辐照性能测试结果：

20WS0000400011@2.5E15 n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup>

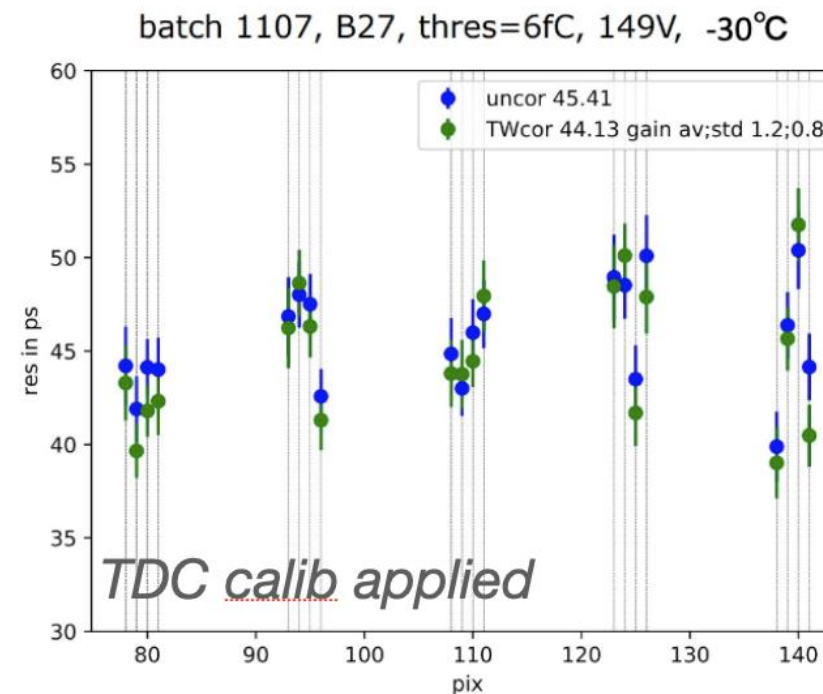
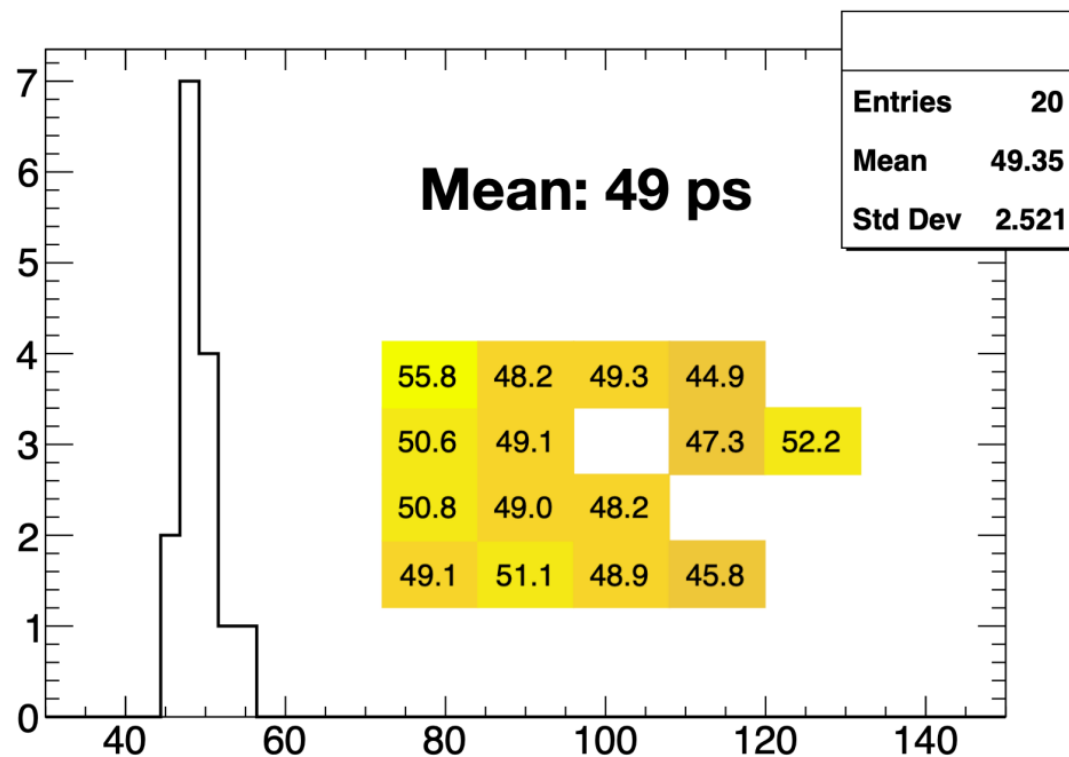






# 高能所LGAD探测器：预生产器件

- 预生产器件抗辐照性能测试结果：与ASIC联合Beam测试
- 时间分辨率可达50ps



~45 ps after calibration  
and time walk correction



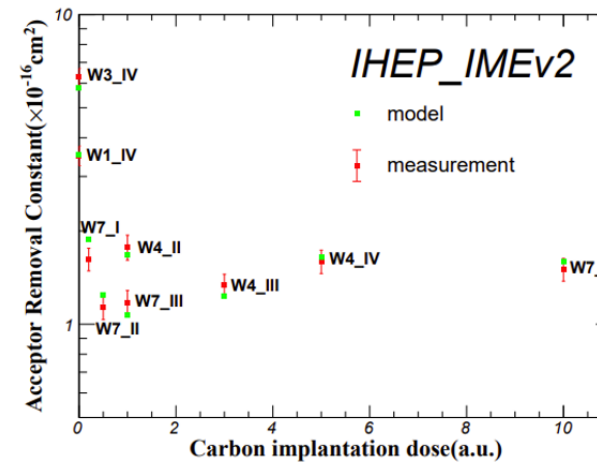
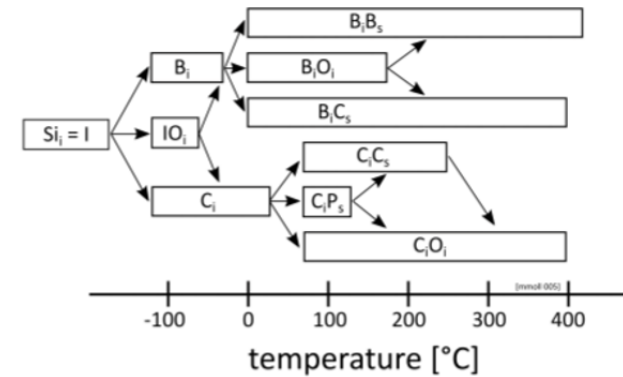
# 高能所LGAD探测器：进一步

- 掺碳器件的抗辐照原理研究：机理，如何最优？
- 辐照剂量更大：达到  $7e15 N_{eq}/cm^2$ ,  $1e16 N_{eq}/cm^2$

## ➤ 掺碳改善LGAD器件抗辐照性能的机理：

- 在高能粒子的照射下，硅晶格中形成缺陷簇、间隙（I）和空位（V）
- 辐射诱导的间隙与硼原子反应： $B_s + I \rightarrow Bi$ ，从晶格移动出来，并最终形成  $BiO_i$ ，造成了硼原子失活
- 掺杂进去的碳与辐照诱导的间隙同样可以反应： $C_s + I \rightarrow Ci$ ，并形成  $CiO_i$
- LGAD中掺杂的碳可替代硼与间隙反应并与  $O_i$  结合，因此，碳注入有助于抑制硼受体的去除。

- 为了进一步明确注入碳浓度和分布对受主移除的抑制作用，SIMS分析了不同样品的碳和硼离子分布情况，并在此基础上建立了 **LGAD关键区域硼和碳分布与受主移除系数的模型**。
- 模型计算得到的受主移除系数与高能所LGAD与其他传感器的测试结果吻合良好。
- 模型对LGAD抗辐照性能提升有一定的指导作用。

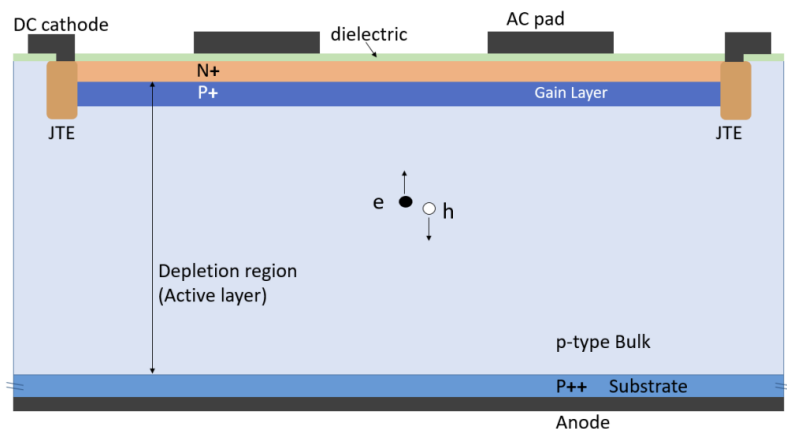


Study of the Acceptor Removal Effect of LGAD, TNS, 2022

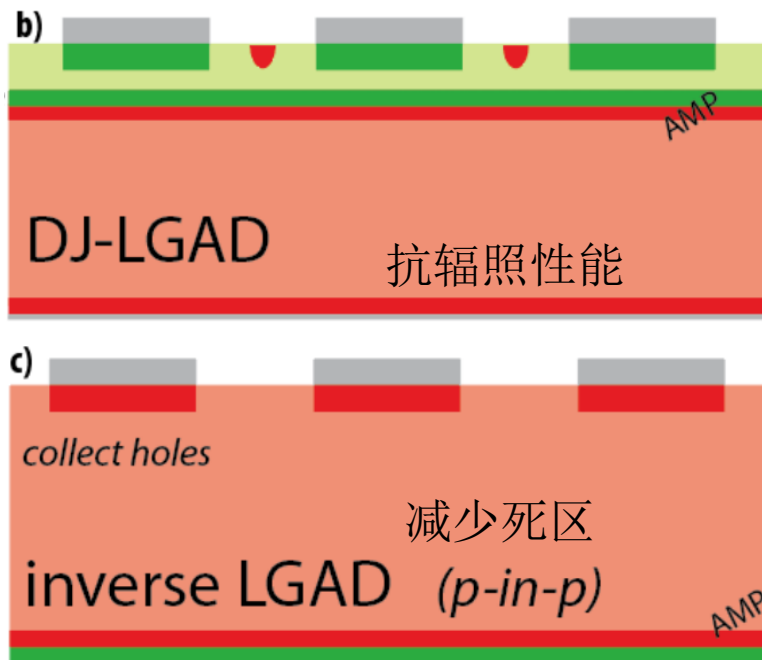


# LGAD探测器发展

## ➤ AC-LGAD, DJ-LGAD, inverse LGAD, Monolithic LGAD



AC-LGAD: 耦合电极  
同时实现时间和位置分辨, 4D  
位置分辨<10um, 时间分辨<35ps



LGAD上方做ASIC电路  
费米实验室, 日内瓦大学,  
INFN, CNM, FBK等

### 高能所AC-LGAD:

仿真与设计工作: JINST, 2022.9, DOI:[10.1088/1748-0221/17/09/C09014](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/09/C09014)

Pixel型和strip型: 工艺与设计尺寸研究

The performance of large-pitch AC-LGAD with different N+ dose, Trans. Nucl. Sci., 2023.6

The performance of AC-coupled Strip LGAD developed by IHEP, NIMA, Volume 1062, May 2024, 169203



## 传统-LGAD:

- ATLAS HGTD 项目: 预生产完成, 7月份正式生产, Timing information
- ATLAS BMA项目: Beam monitor (Talk from Yunyun)
- CMS项目: Timing information, 参与市场调研, 通过性能评估
- 东莞质子束流监测
- X射线探测: 怀柔光源线站, 空间X射线探测, 优化设计进行中

## AC-LGAD:

- 暗光计划 (Dark SHINE): 【<https://arxiv.org/pdf/2310.13926v1>】
- CEPC outer-tracker and TOF (Talk from Weiyi)
- 医学成像应用?

**Monolithic LGAD:** 像素型单片式快时间探测器, 同时具备时间和位置分辨能力。



# 总结

- ▶ 高能所基于国产工艺自主研发的LGAD探测器在ATLAS HGTD的超高辐照后其时间分辨率仍可达到30-40ps，并且可以工作在400V左右的低电压区（安全工作区），避免了器件的单粒子烧毁现象。
- ▶ 2023年高能所研制的LGAD探测器赢得欧洲核子中心的HGTD项目硅探测器公开招标，并获得其中100%的招标份额。为HGTD项目提供90%的LGAD器件。
- ▶ 高能所为HGTD项目预生产的器件辐照后电荷收集与时间性能满足HGTD项目要求，与ASIC联合测试可达到50ps时间分辨。
- ▶ LGAD探测器已经在各个领域得到应用。各种新型的LGAD探测器（DC-LGAD，AC-LGAD，DJ-LGAD，Monolithic LGAD）具有良好的应用前景。