

面向极端环境的碳化硅PIN和LGAD探测器研究进展及束流测试

报告人：王聪聪

中国科学院高能物理研究所

2026-10-11

4H-SiC的优势

物理特性	Si	4H-SiC
禁带宽度(eV)	1.12	3.26
热导率(W/(cm·K))	1.5	4.9
临界击穿场强(MV/cm)	0.5	3
电子饱和速度(cm/s)	1×10^7	2×10^7
电子-空穴对电离能(eV)	3.6	7.6
原子位移阈值(eV)	13	21.8

- ◆ 高热导率：高温下无需额外散热即可保持稳定工作
- ◆ 高击穿场强：可耐受更高工作电压
- ◆ 电子饱和速度快：快时间响应
- ◆ 高原子位移能：高抗辐照

高能物理和核设施监测

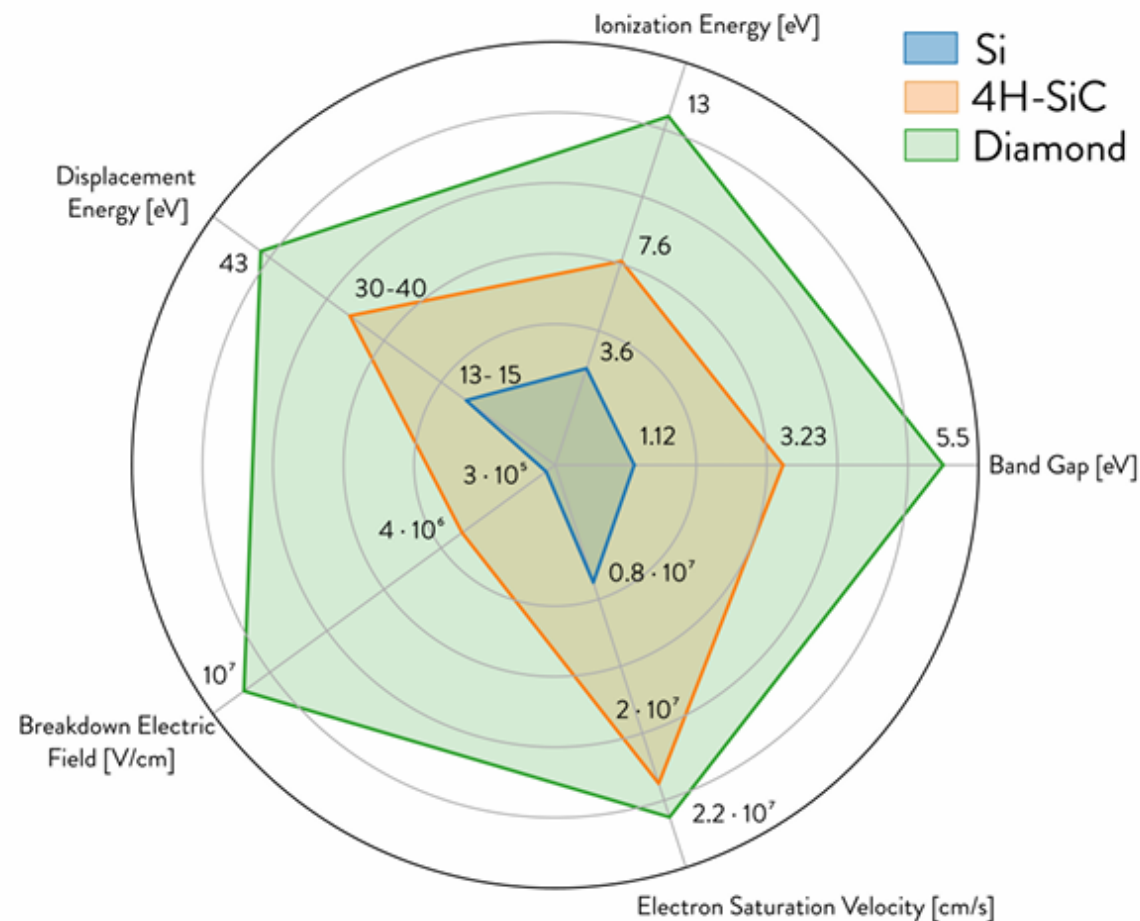
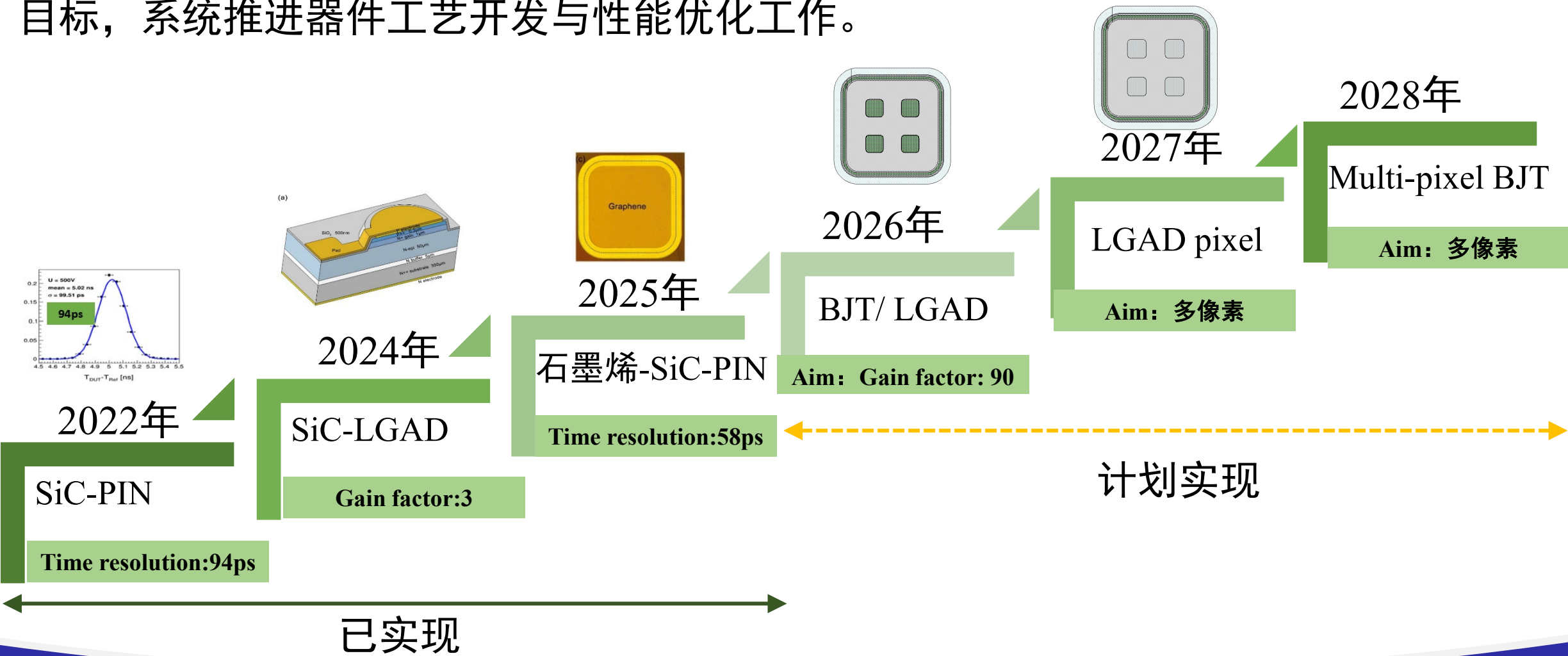


Fig 1 Physical properties of silicon, silicon carbide, and diamond

团队碳化硅探测器的发展和研究计划

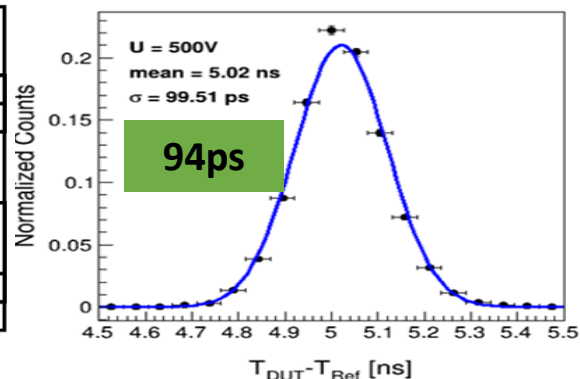
团队以开发高灵敏度（BJT）、高时间分辨与高空间分辨的碳化硅探测器为总体目标，系统推进器件工艺开发与性能优化工作。



碳化硅探测器的研究进展 (2021-2025)

SiC PIN detector and Graphene/SiC PIN detector

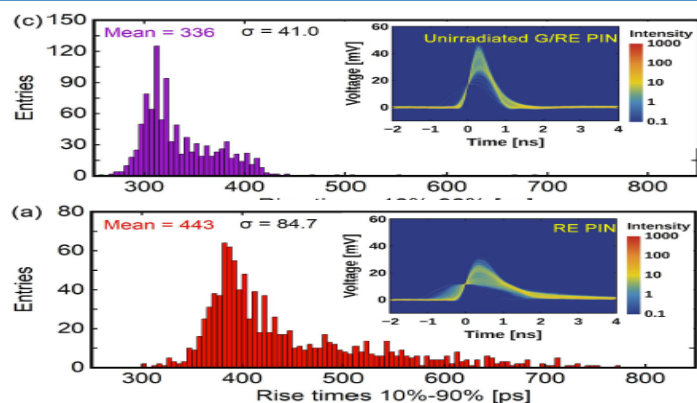
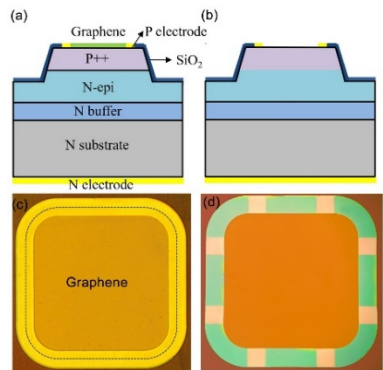
Au 1μm	Passivation layer	Au 1μm
Ni 75nm		
Imp P+		
100μm N- epi		
350μm N+ 4H-SiC sub		
Ni 75nm		
Ti/Al/Au 1.5μm		



94-ps timing resolution in 4H-SiC detectors (first report 2022)

<https://doi.org/10.3389/fphy.2022.718071>

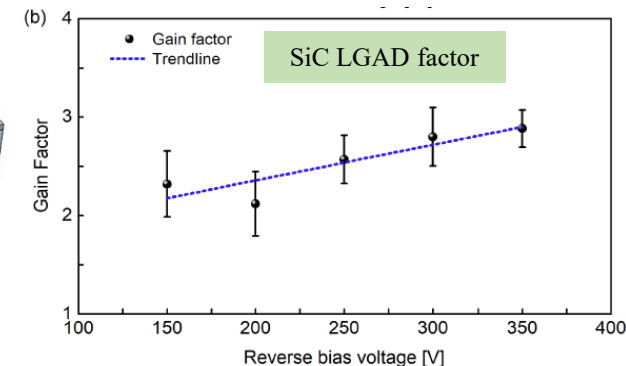
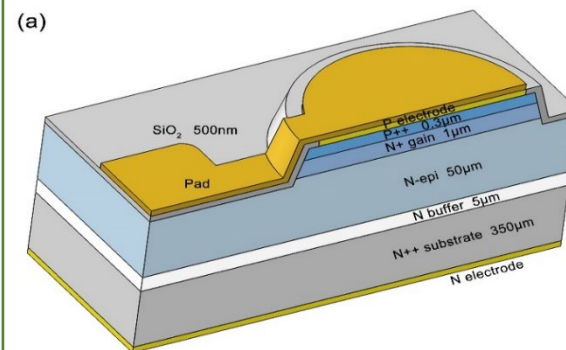
reduces rise time 24%



Fabricated Graphene/SiC PIN detector with fast rise time(2025)

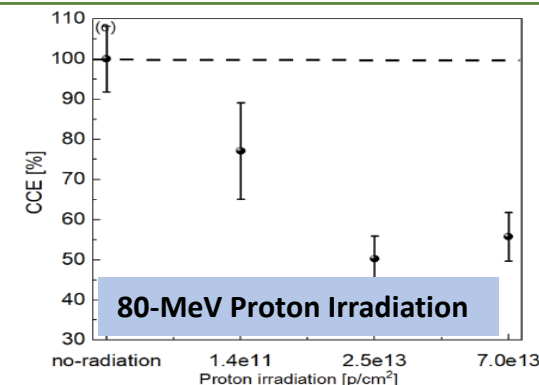
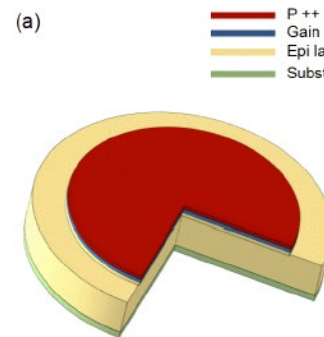
IEEE Xplore 10.1109/TED.2026.11372937

4H-SiC LGAD



Fabricated a 4H-SiC LGAD with gain factor 3 (2022-2024)

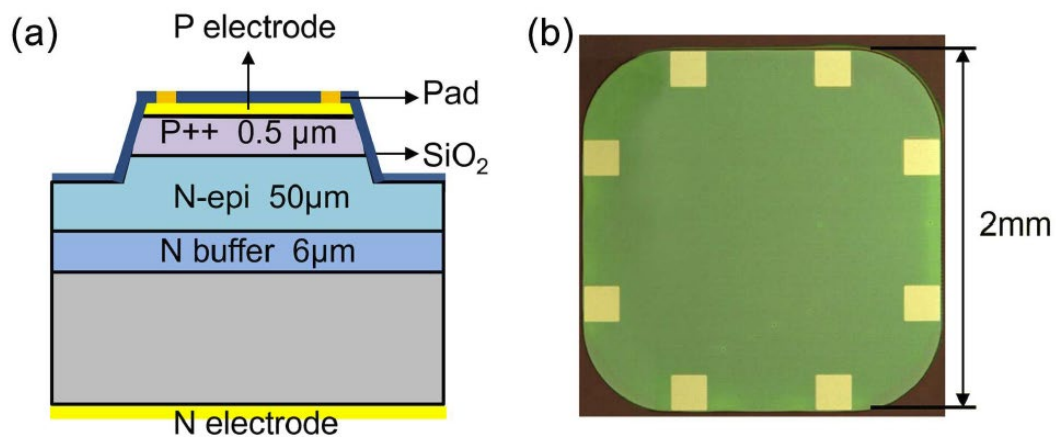
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10701498>



80-MeV proton irradiation defects on CCE of SiC LGAD (2026)

<http://ieeexplore.ieee.org/document/11261898>

16 MeV/u Ta重离子辐照前后碳化硅探测器时间分辨性能

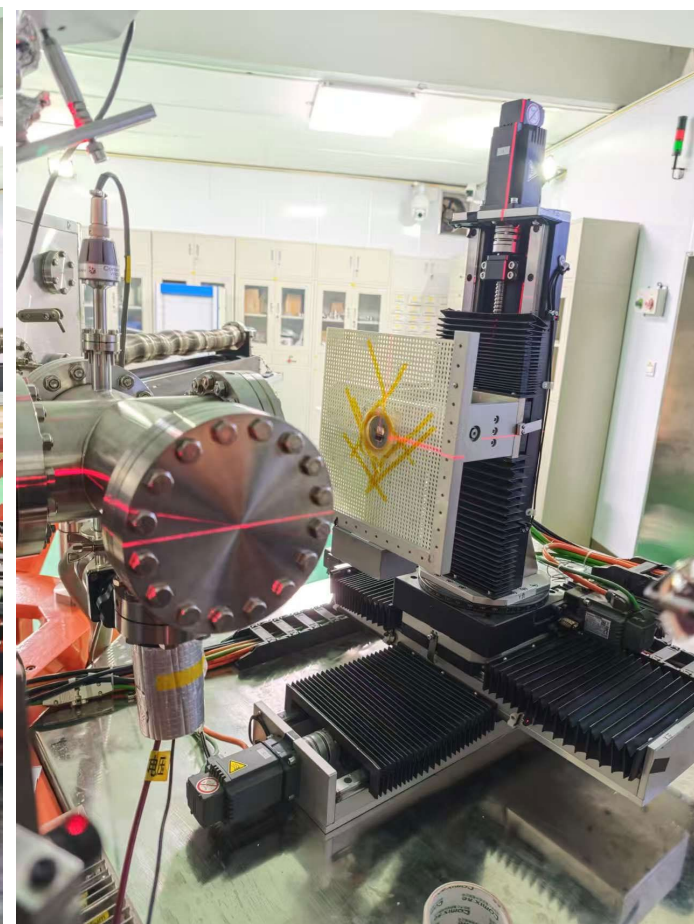
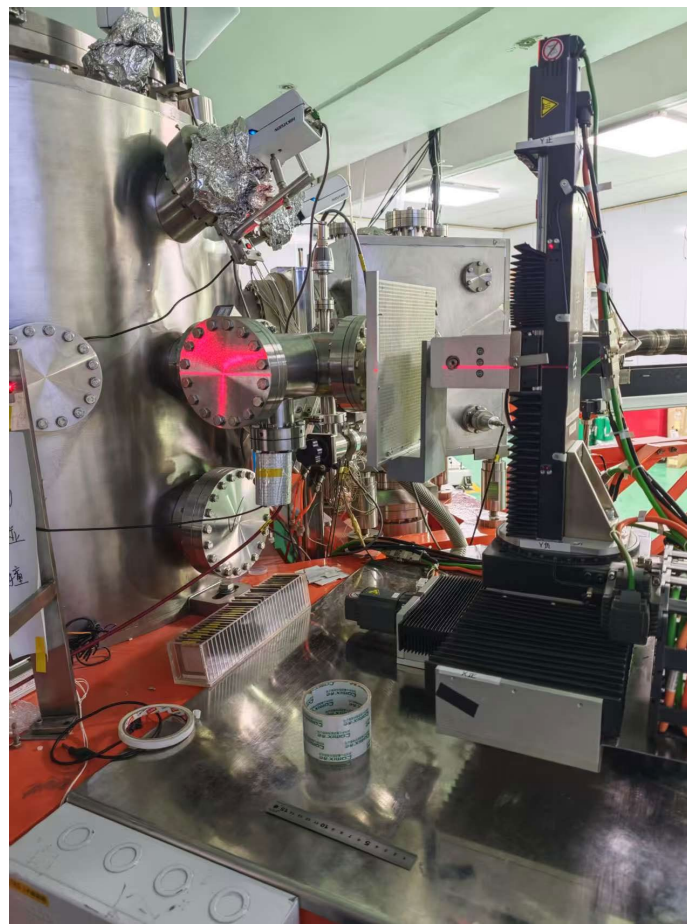


本征层50μm 4H-SiC PIN

辐照条件:

离子注量: $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$
 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

钽 (Ta) 离子总能量: 2.896 GeV



辐照在中国近代物理研究所完成

电学性能分析

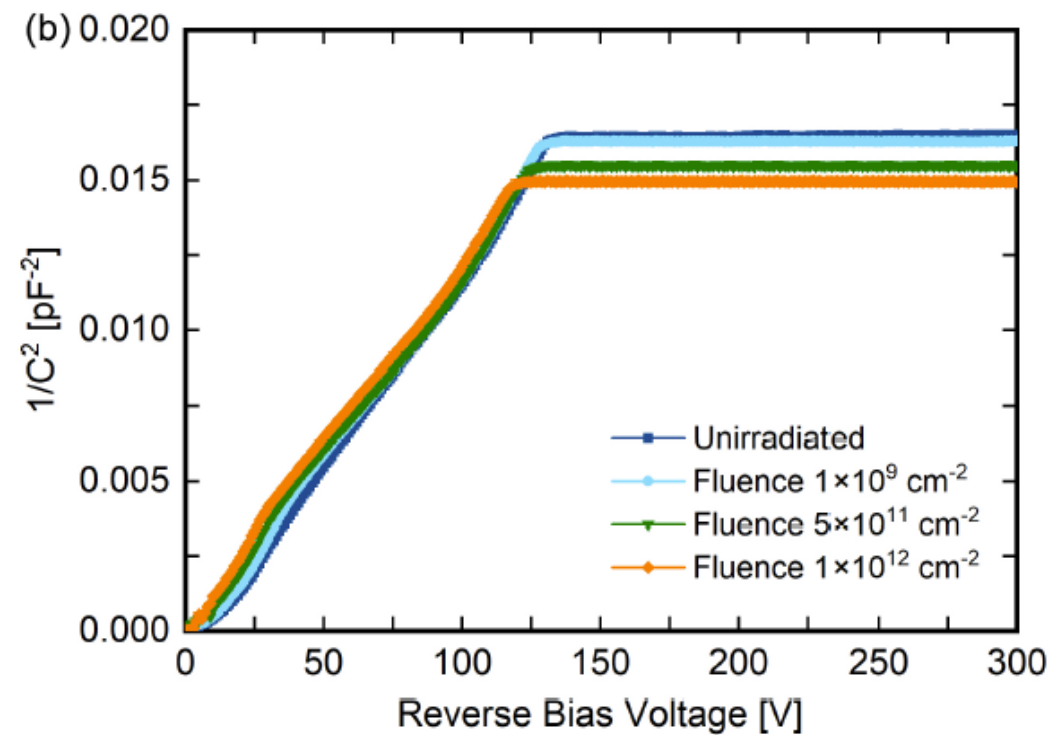
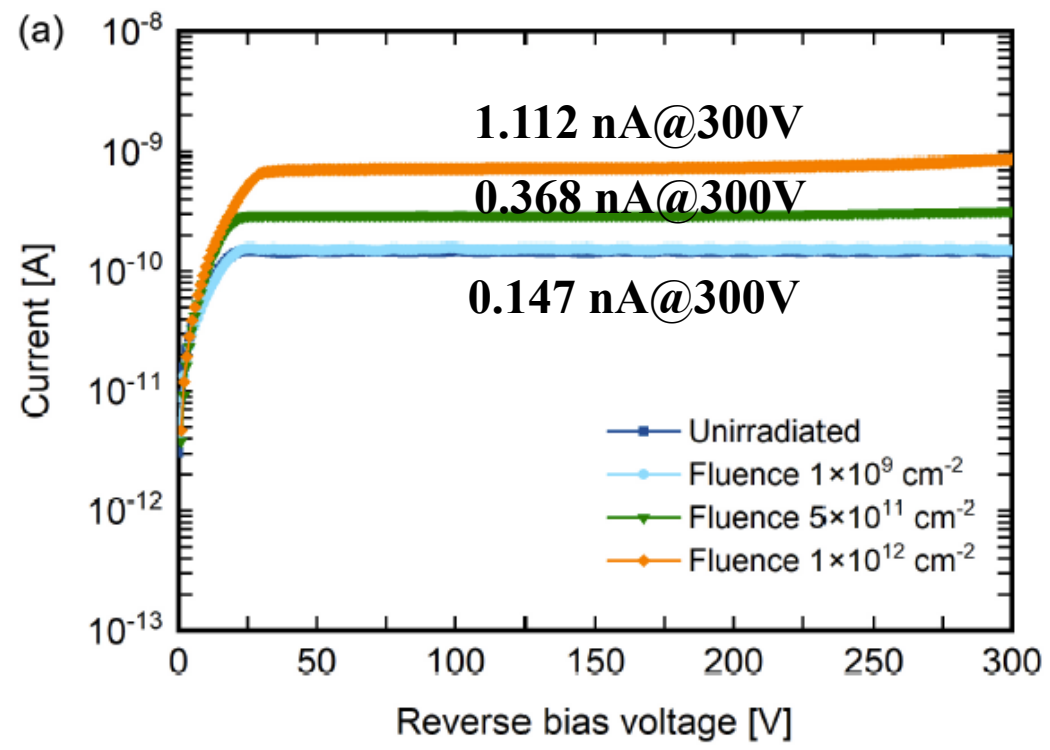


Fig. (a) I-V characteristics of 4H-SiC PIN detectors. (b) $1/C^2$ -V characteristics of 4H-SiC PIN detectors.

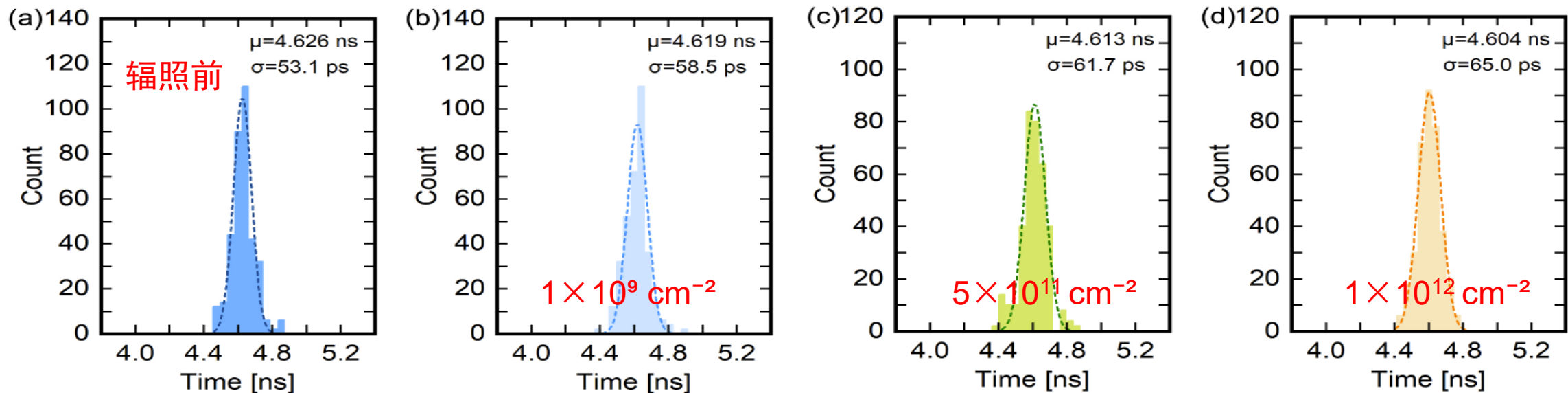
TABLE I
DOPING CONCENTRATIONS AND DEPLETION DEPTHS

4H-SiC PIN	Doping concentrations	Depletion depths
Unirradiated	$6.21 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	43.13 μm
Fluence 1×10^9	$6.13 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	43.54 μm
Fluence 5×10^{11}	$5.77 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	44.02 μm
Fluence 1×10^{12}	$5.34 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	44.18 μm

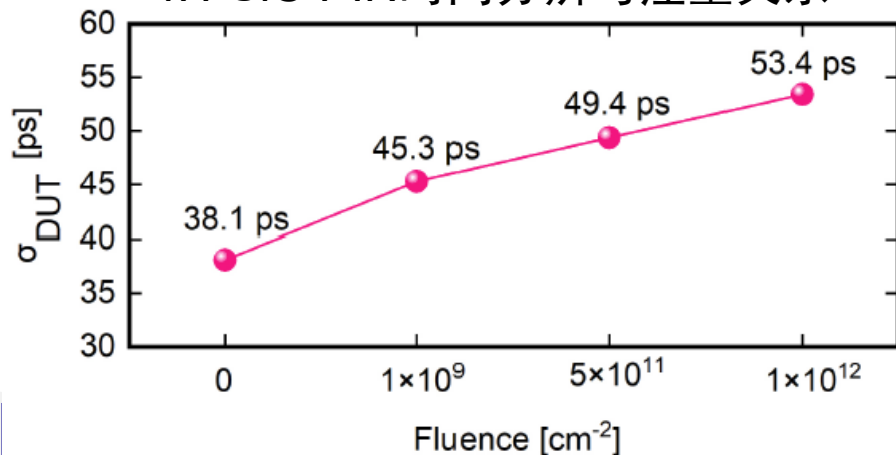
1. 注量达到 $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 器件漏电流未发生明显变化。
2. 随着辐照量增加,引入碳空位缺陷和复合中心,掺杂浓度和耗尽深度开始轻微变化。

16 MeV/u Ta重离子辐照前后碳化硅探测器时间分辨性能

联合时间分辨



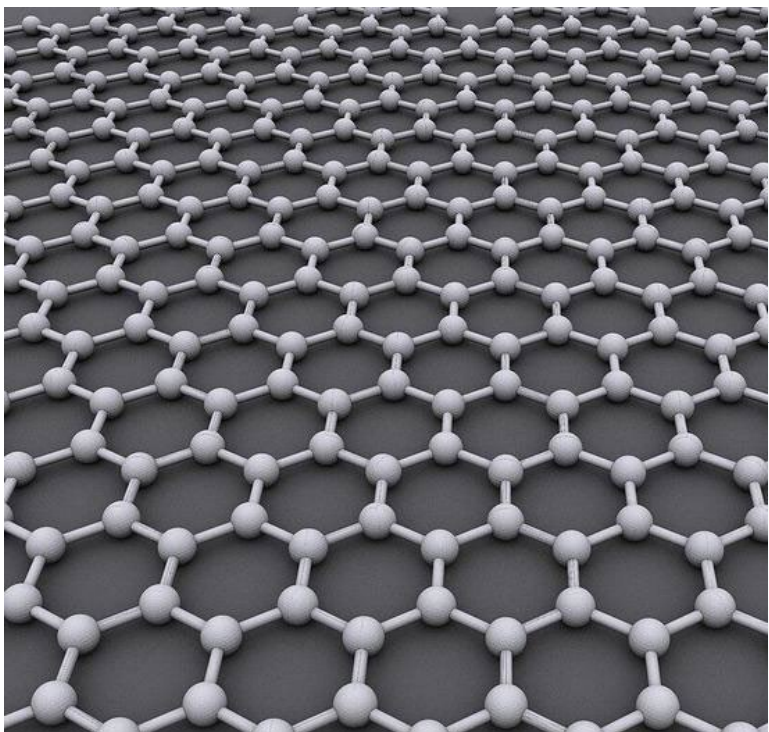
4H-SiC PIN时间分辨与注量关系



辐照前4H-SiC PIN探测器时间分辨为38.1ps。在中等注量重离子辐照下，时间分辨仅出现轻微退化（从38.1 ps增至53.4 ps）。该退化源于碳空位缺陷处空穴的俘获-释放过程引起的额外时间涨落以及信噪比的适度下降。

本工作于2026. 7被IEEE TNS 期刊正式接收

石墨烯/碳化硅探测器



Single-layer graphene

- 高热导率 ($5300 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
- 高载流子迁移率 ($15000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)

探测器特殊领域应用

- 低穿透粒子探测器
- 低能软X射线
- 紫外光
- 瞬态电流技术 (TCT)

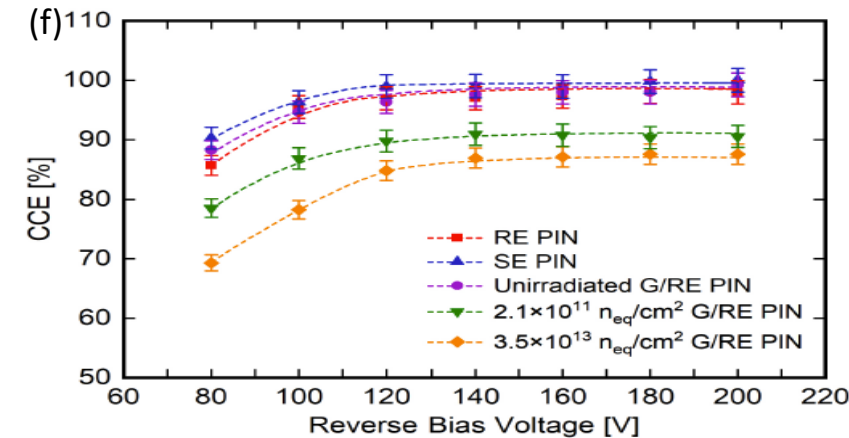
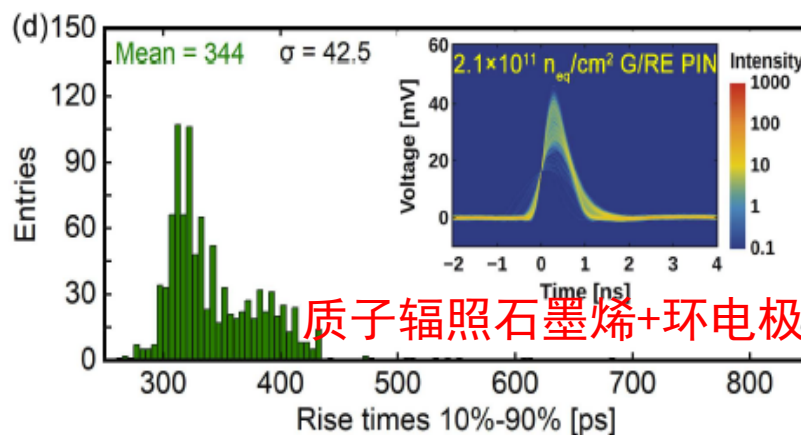
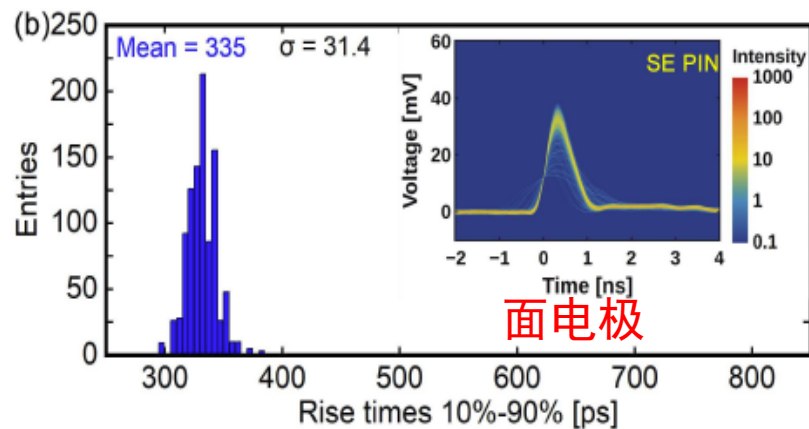
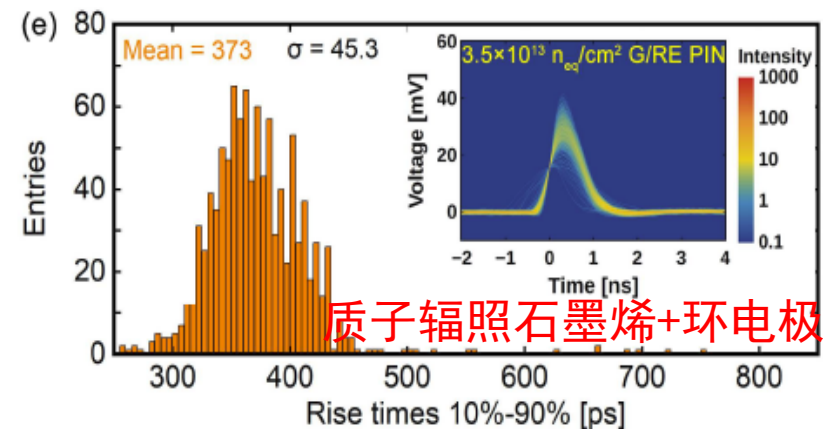
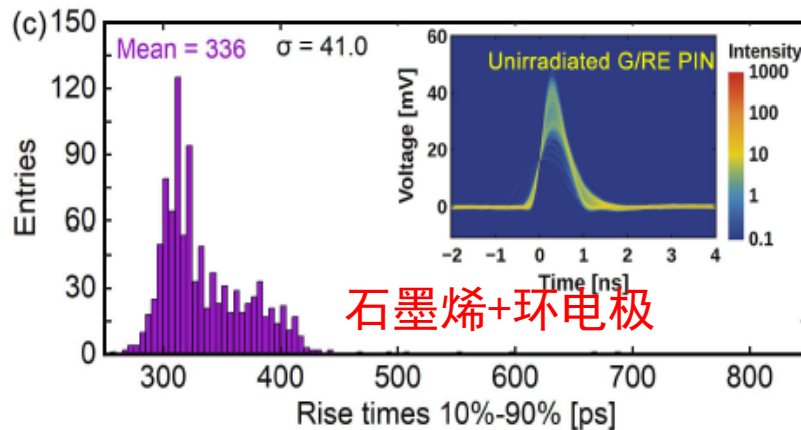
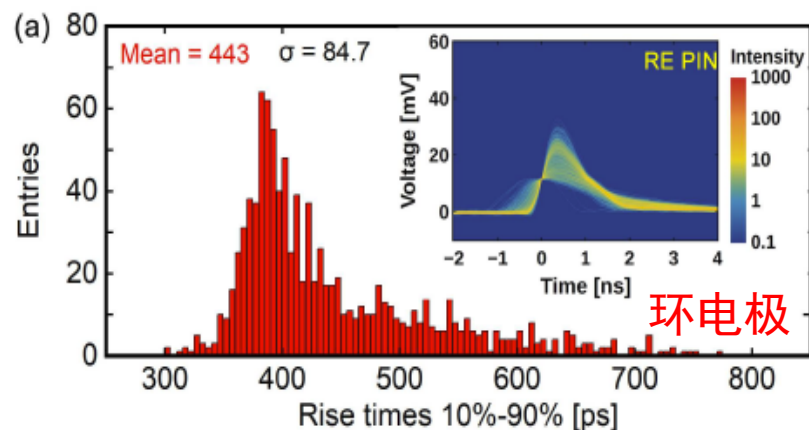
开窗缺陷

- 增加死区
- 电场不均匀
- 信号不稳定
- 时间分辨性能差

我们研制了一款Graphene-SiC探测器。

目标：在特定应用场景中，石墨烯能够增强信号稳定性、改善时间分辨率，并提升时间分辨率的均匀性。

石墨烯/碳化硅探测器电荷收集量和信号上升时间

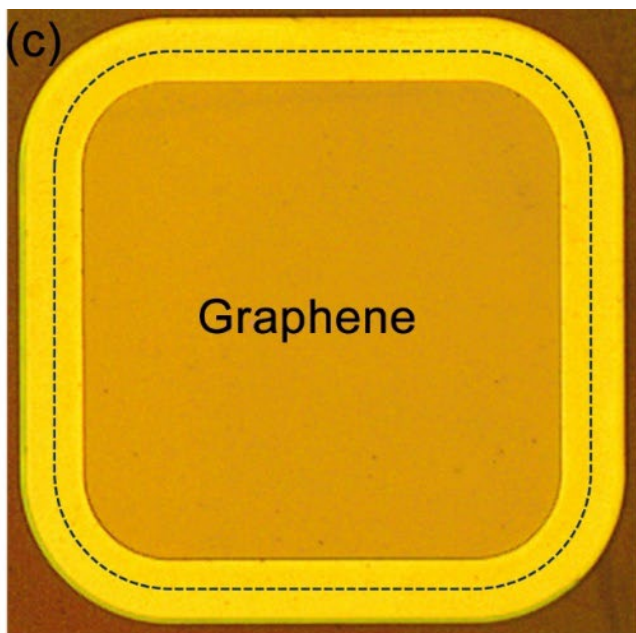


在200V偏压下，石墨烯/探测器上升时间缩短了 24%（环电极相比）。电荷收集效率（CCE）达到 99.22%，表明电荷收集近乎完美。石墨烯经过80 MeV质子束，辐照量为 $2.1 \times 10^{11} n_{eq}/cm$ ，探测器上升时间均匀性无显著影响。石墨烯表现出一定抗辐射能力。

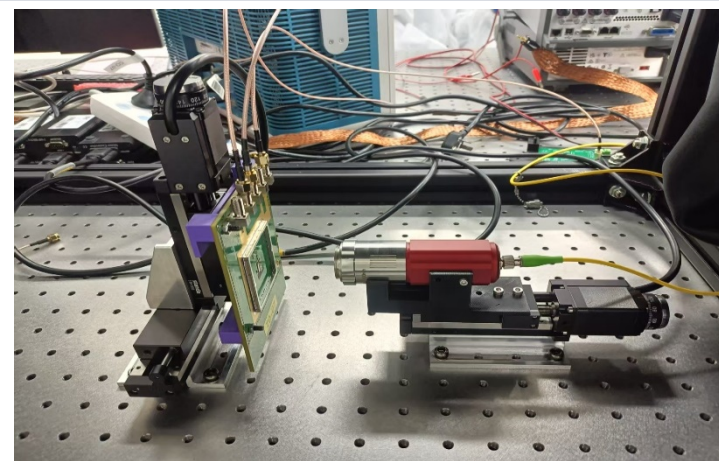
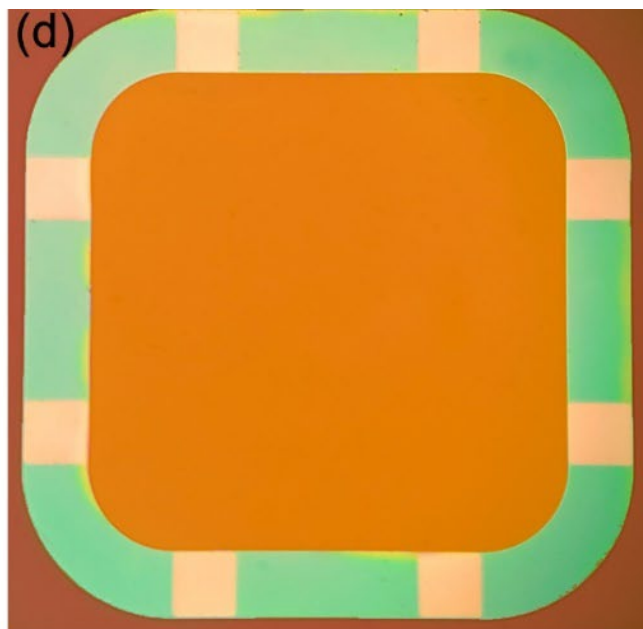
本工作于2026. 2在IEEE TED (IF=3.6) 发表

时间分辨测试系统搭建(TCT+ ^{90}Sr 源)

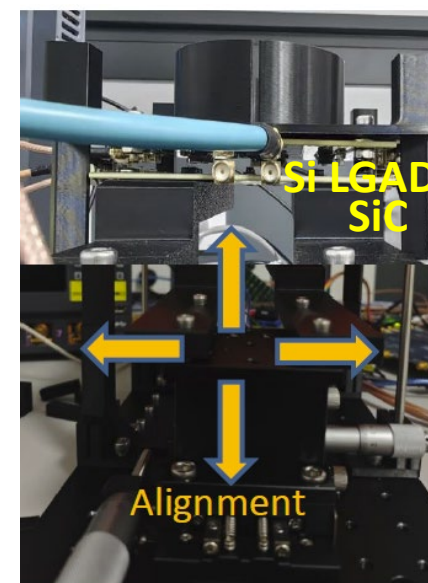
石墨烯环电极 4H-SiC PIN



环形电极 4H-SiC PIN



TCT Experimental Setup



^{90}Sr 源时间分辨测试实验装置

石墨烯/碳化硅和环电极碳化硅探测器时间分辨 (^{90}Sr 放射源)

^{90}Sr 放射源时间分辨测试系统

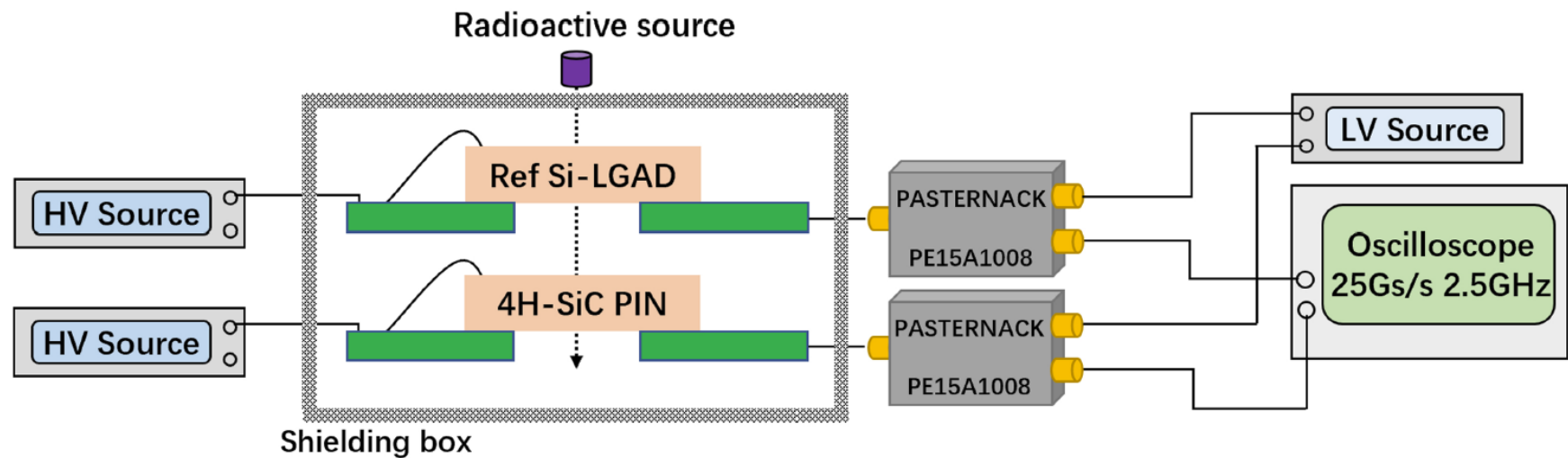
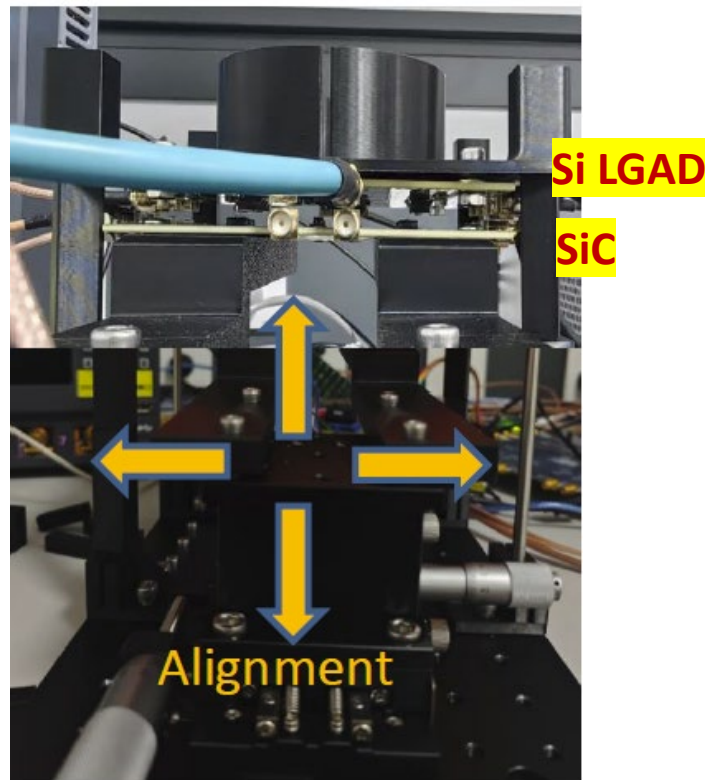
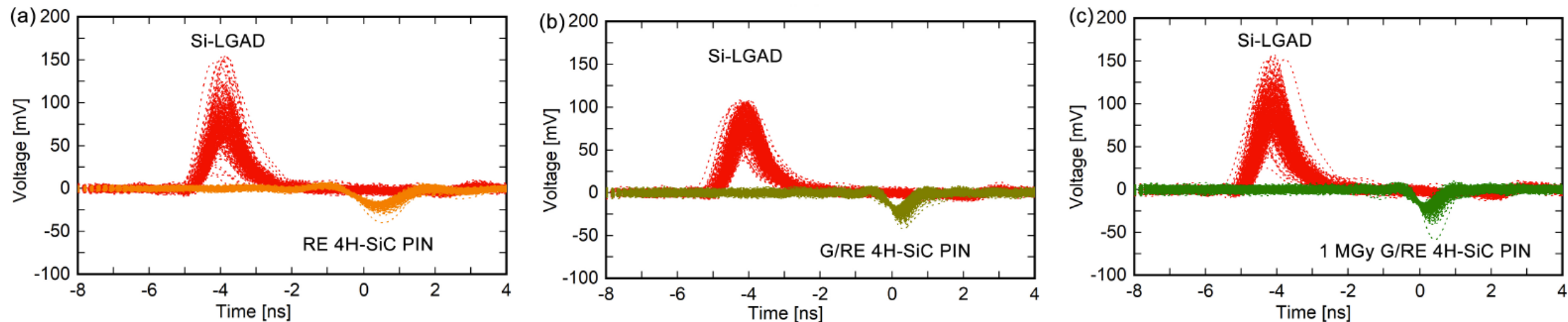
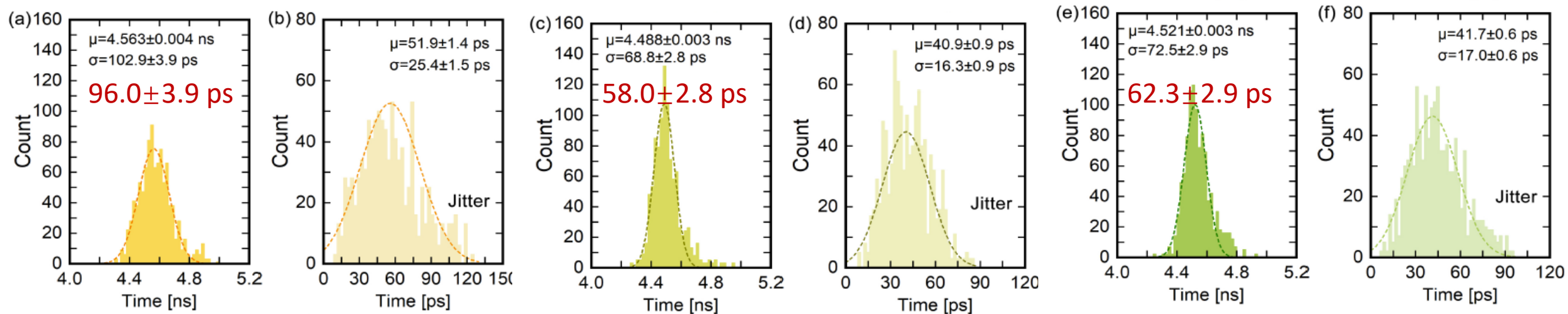


Fig. 3: Experimental setup for time resolution of a ^{90}Sr source.

石墨烯/碳化硅和环电极碳化硅探测器时间分辨 (^{90}Sr 放射源)



信号波形：(a) Si-LGAD与环形电极4H-SiC PIN (b) Si-LGAD与石墨烯/环形电极4H-SiC PIN (c) Si-LGAD与石墨烯/环形电极4H-SiC PIN



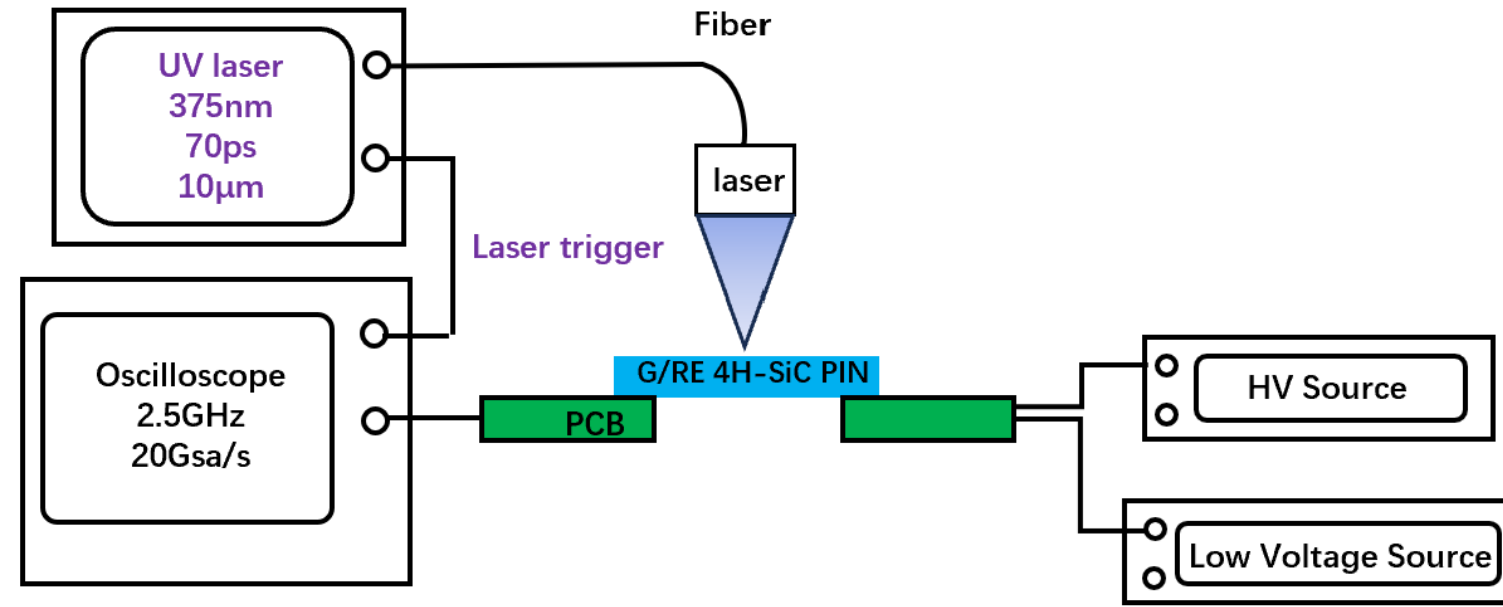
联合时间分辨和Jitter:

Si-LGAD与环形电极4H-SiC PIN

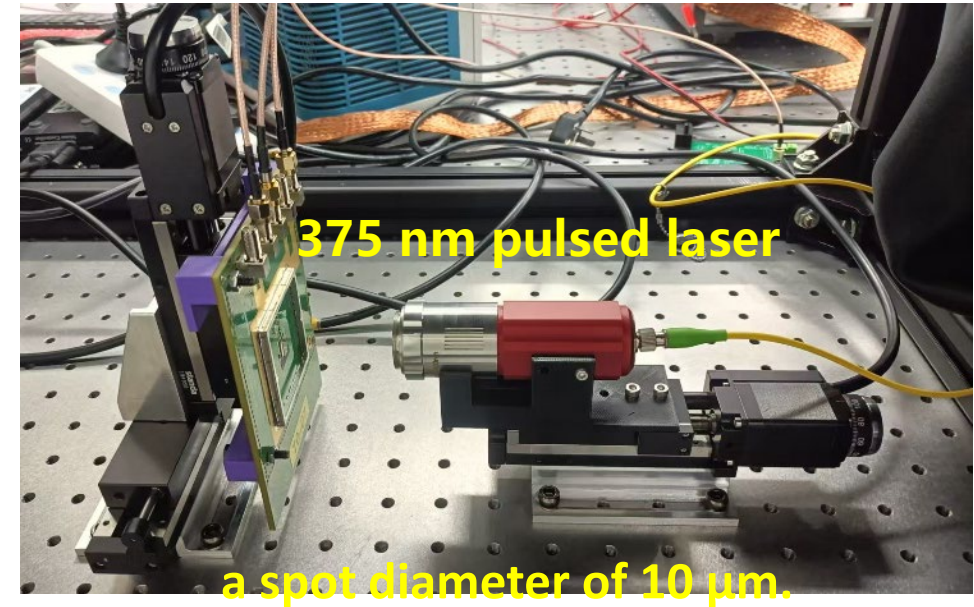
Si-LGAD与石墨烯/4H-SiC PIN

Si-LGAD与1MGy X射线辐照的石墨烯/4H-SiC PIN

石墨烯/碳化硅和环电极碳化硅探测器时间分辨 (TCT)



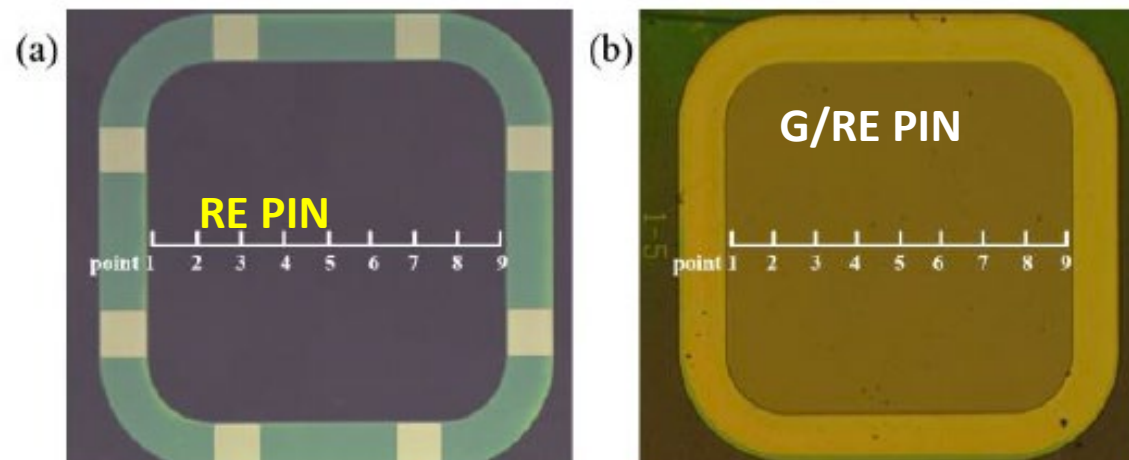
- 紫外激光器：波长 375 nm，脉冲宽度 < 70 ps，光斑直径 $10\text{ }\mu\text{m}$
- 待测探测器：G/RE 4H-SiC PIN
- 低压源 (Low Voltage Source) 和高压源 (HV Source)
- 示波器 (Oscilloscope)：带宽 2.5 GHz，采样率 20 GSa/s



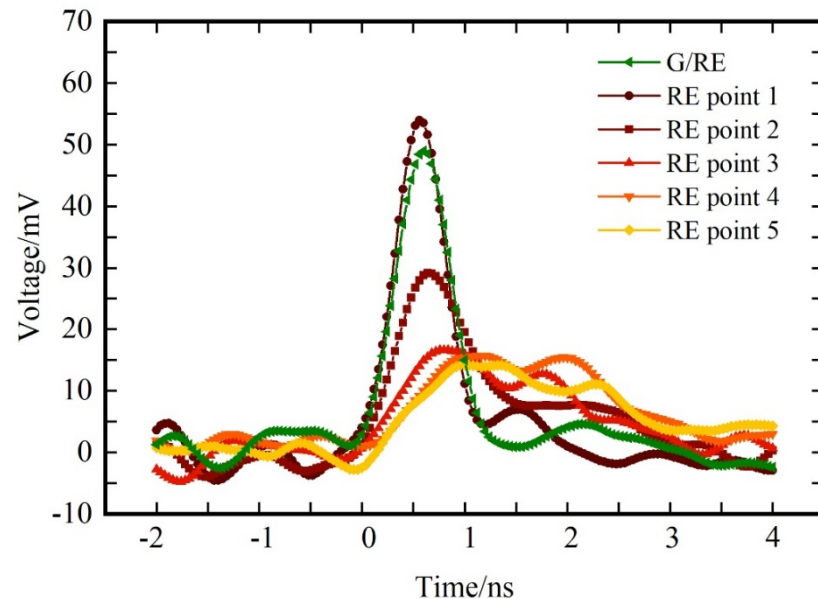
Photograph of the TCT experimental setup

该测试在山东高等技术研究院完成

石墨烯/碳化硅和环形电极碳化硅探测器性能对比)



Waveforms of the RE detector and the G/RE



RE探测器 (点1→5)

✗ 信号幅度显著衰减

✗ 波形明显展宽

● 根本原因:

P^{++} 层有限薄层电阻

传输延迟增加

RC增大

G/RE探测器 (点1→5)

✓ 波形退化程度大幅降低

✓ 信号完整性有效维持

● 改善机制:

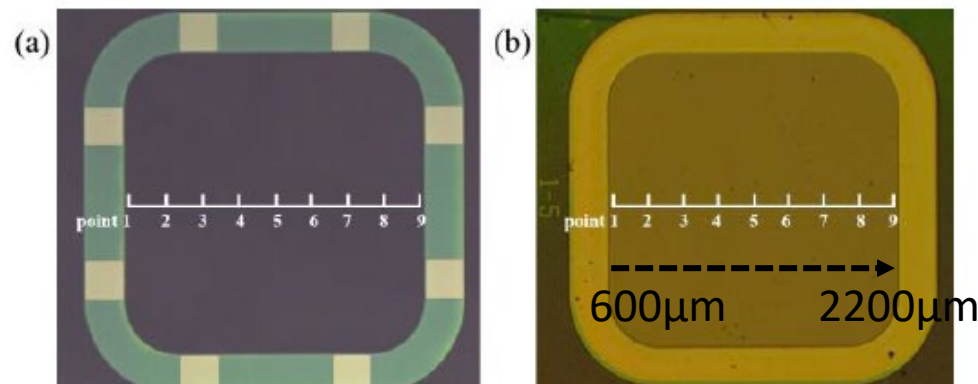
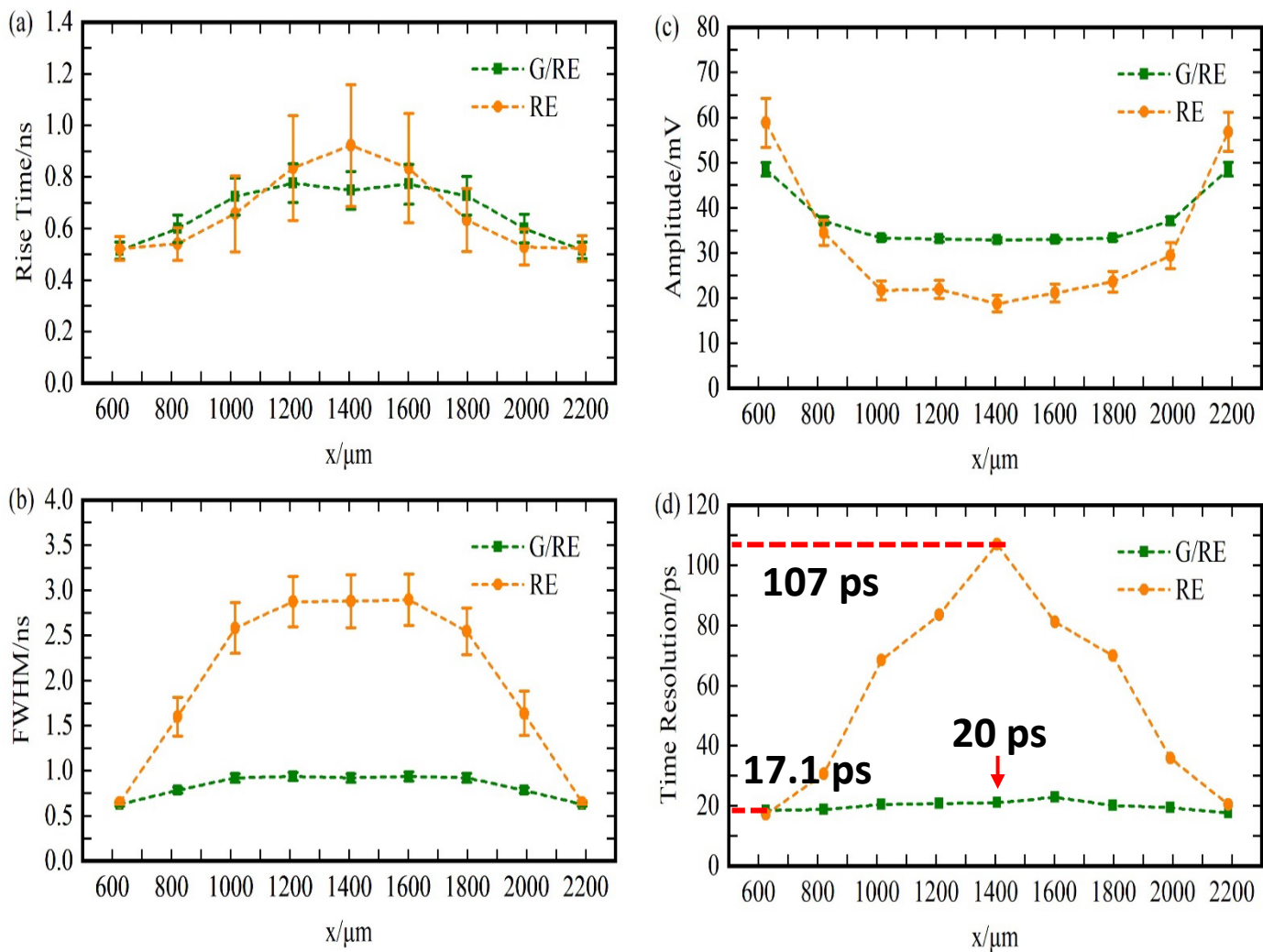
石墨烯层提供横向导电通道

降低传输延迟

RC减小

石墨烯增强了探测器有源区信号的稳定性

石墨烯/碳化硅和环形电极碳化硅探测器性能对比)



参数	RE探测器	G/RE探测器
时间分辨率	17.1 ps $\rightarrow$ >107 ps	约20 ps
信号幅度	60 mV $\rightarrow$ 20 mV	稳定
上升时间/半高宽	增加	稳定
误差棒 (稳定性)	中心区域较大	小且均匀

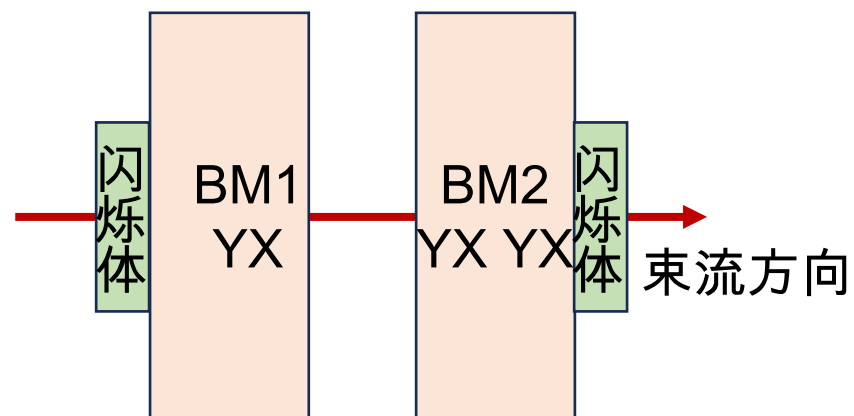
总结：石墨烯存在使得整个探测器区域信号幅度、波形、时间分辨更佳稳定。

本工作于2026. 7被IEEE TNS 期刊正式接收

Fig. 1 (a) Rise time (b) FWHM (c) Signal amplitude (d) Time resolution

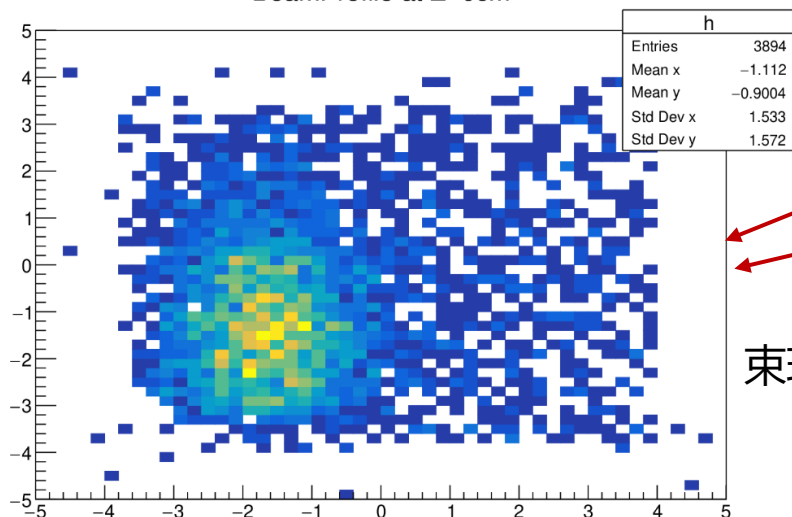
硅径迹探测器在HERD束流中的应用(电子和强子束流)

CERN PS站点 (2026.4.29-5.8)

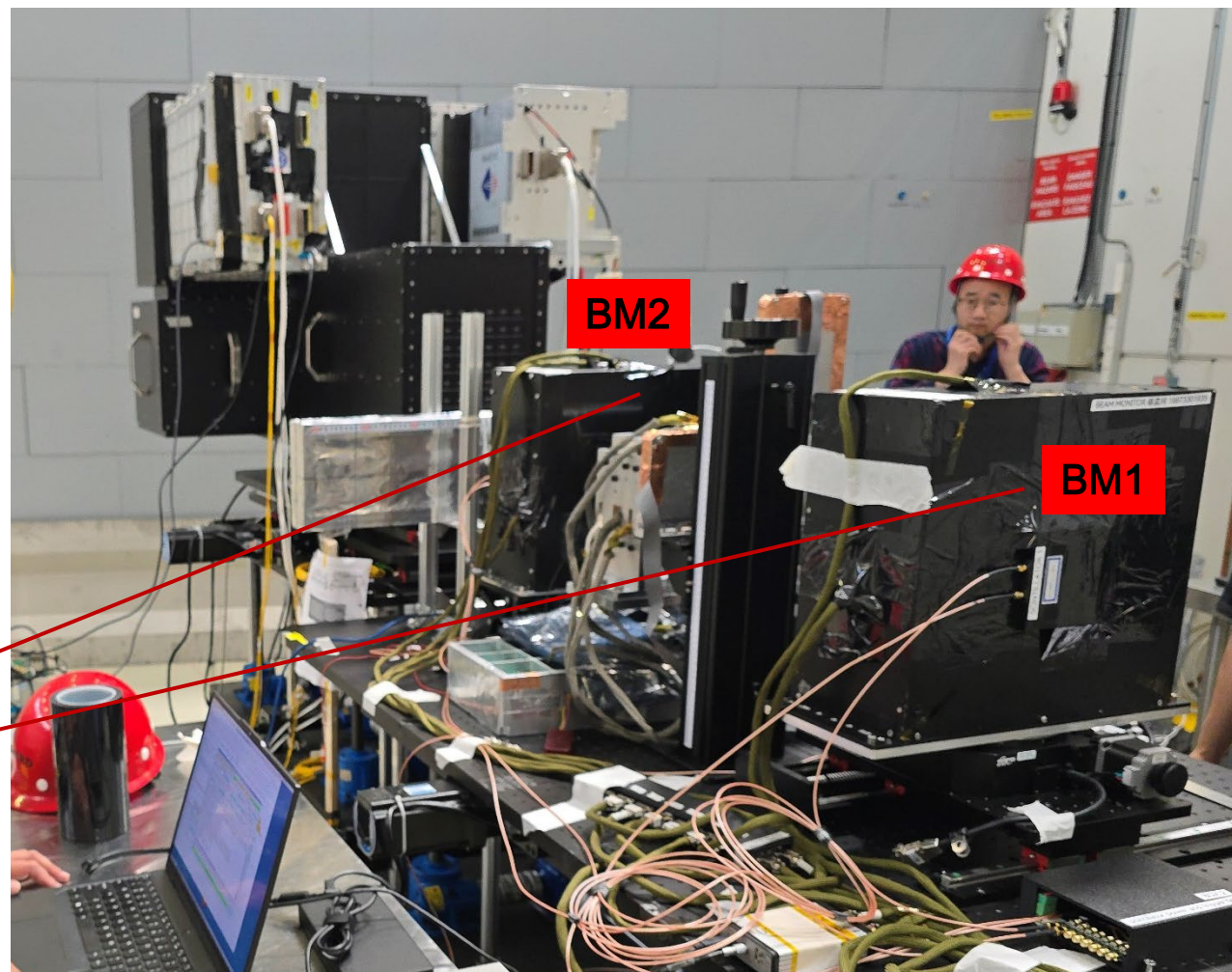


微条探测器系统 Beam Monitor

BeamProfile at Z=0cm



束斑位置

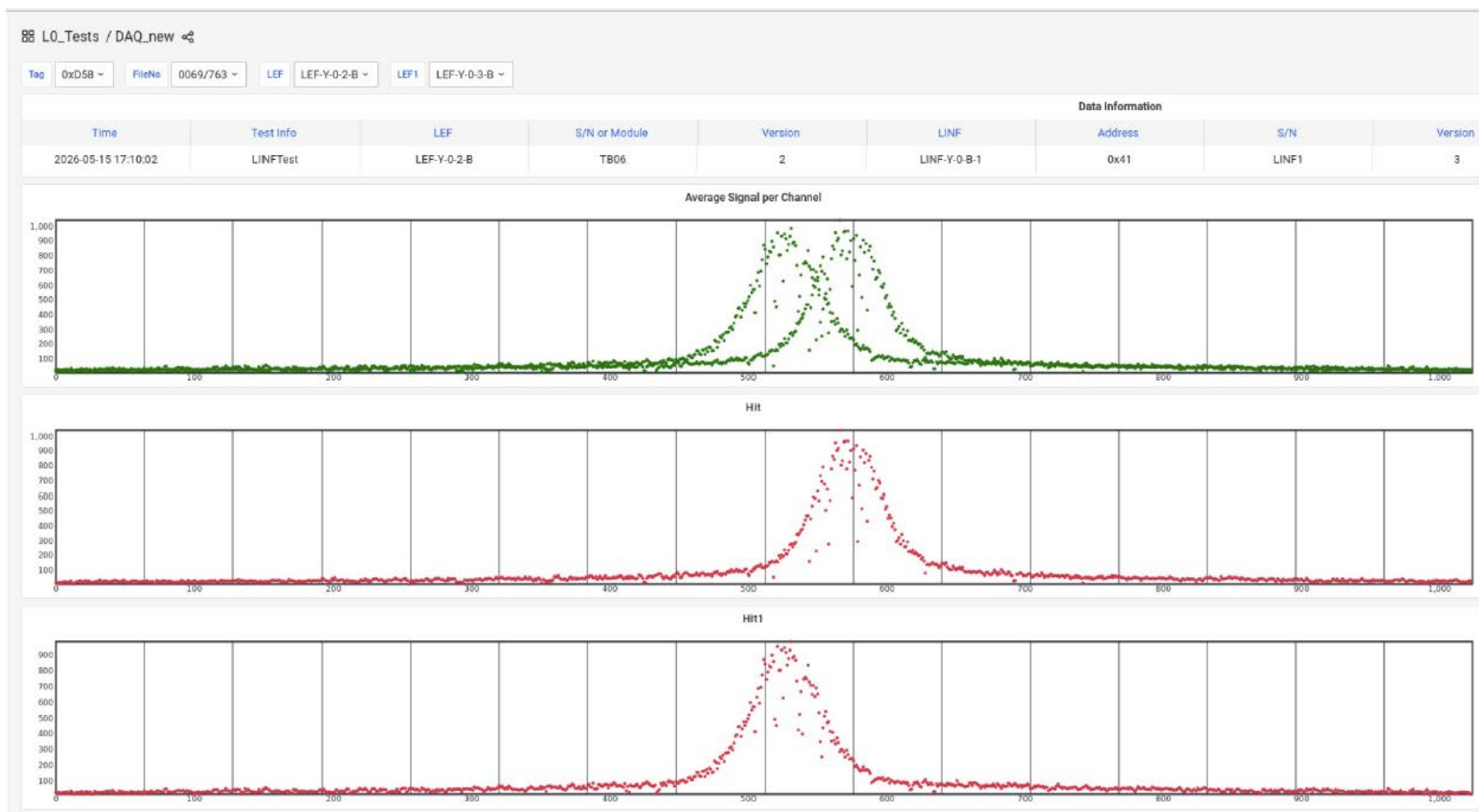


硅径迹探测器在HERD束流中的应用(电子和强子束流)

interposed

Y

X



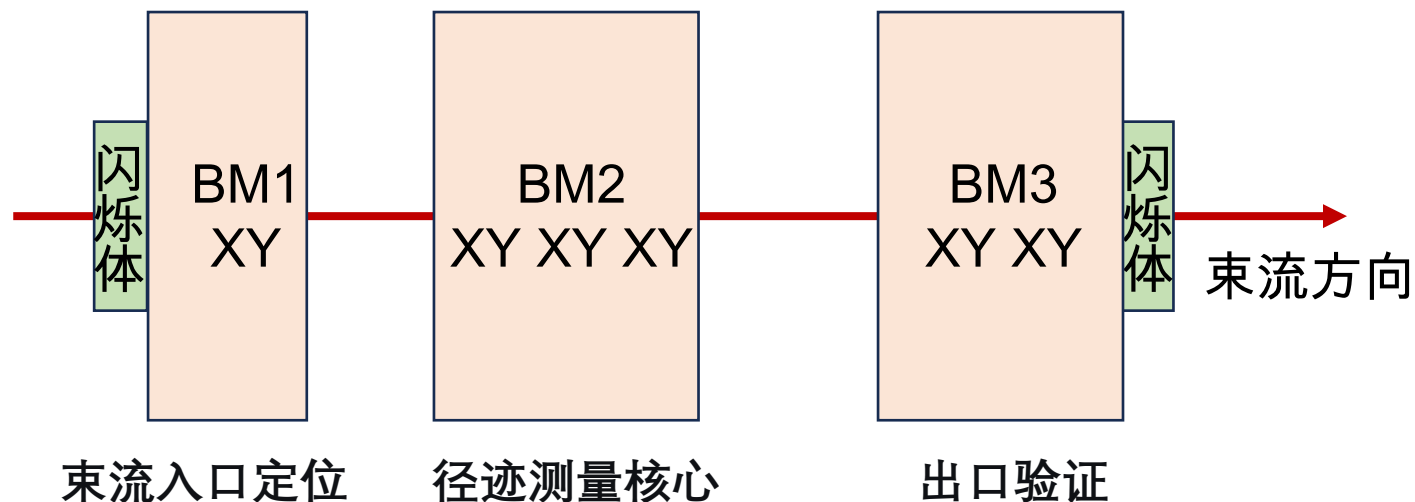
束流监测器观测到的束斑分布

FWHM ~ 4mm

硅径迹探测器在HERD束流中的应用(重离子束流)

CERN SPS站点 (2026.8.19-8.29)

微条探测器系统 Beam Monitor



Beam Monitor布局方案:

BM1=1层 (快速定位)

BM2=3层 (重建精度)

BM3=2层 (出口验证)

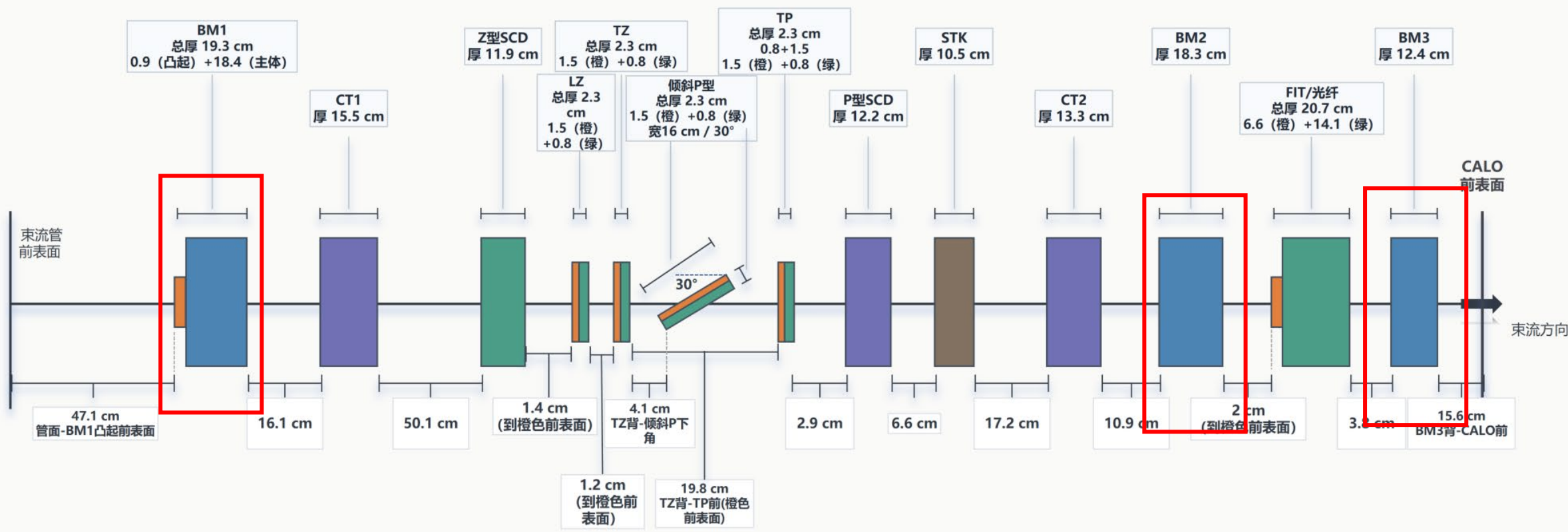
物质质量最小化与重建可靠性的平衡

硅径迹探测器在HERD束流中的应用（重离子束流）

束流测试探测器尺寸与位置标注图

尺寸统一标在上方，间隔统一标在下方

BM: beam monitor
CT: Charge tagger

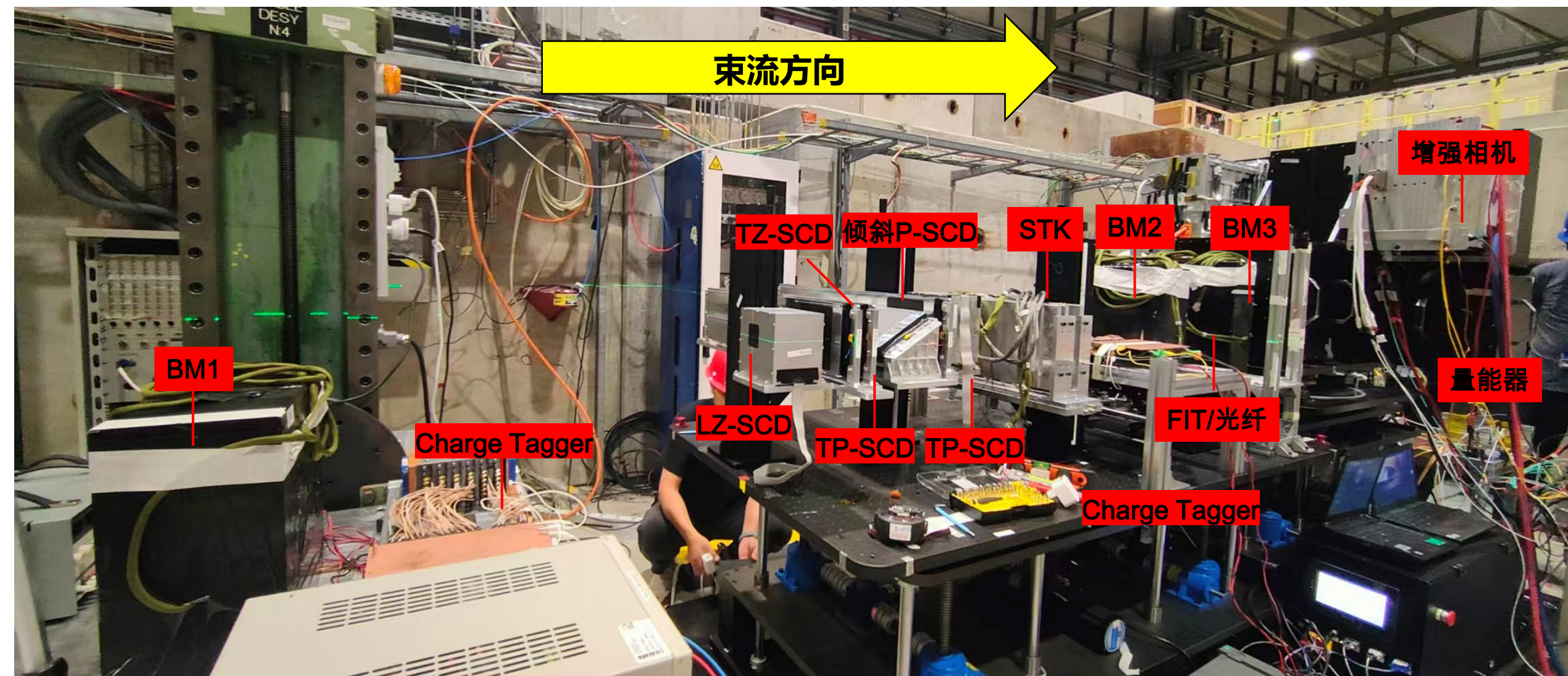


有些探测器有凸起 (BM1)，或者两个不同宽度的矩形结构 (SCD, FIT)，这部分用法橙色表示。

CERN SPS站点 (2026.8.19-8.26)

三个 BM 探测器形成了一套完整的束流监测体系，贯穿整个实验装置。

硅径迹探测器在HERD束流中的应用



通过本次实验积累的束流测试经验、对准方法和数据分析流程，未来可以直接迁移到碳化硅半导体探测器的束流检测应用中，为新型探测器的研发和验证提供重要支撑。

感谢聆听

Thanks for Your Attention