

面向极端辐射环境的4H-SiC传感器的研究进展

张希媛、常正则、陈娇龙、陈思雨、崔宇鑫、胡坤、黎紫瑶、骆首栋、贾文韬、
荆小平、李刚、李筱婷、刘泊璇、刘磊、钱小辉、史欣, Teoh Jiajian (张嘉健)、
王传烨、王聪聪、汪凯宁、严琪、严雄波、杨俊玲、叶竞波、越云凯、
张理凯、张奕晗、张振涛、张志航、赵梅、赵展鸿、等

2026年8月12日

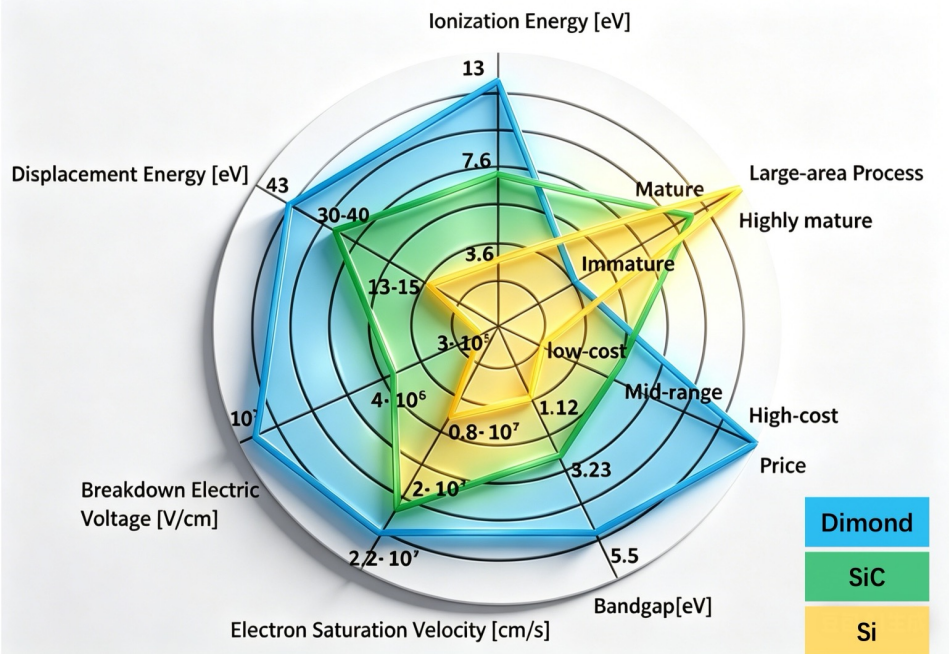


中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

4H-SiC 辐射探测器的优势与挑战

核心优势

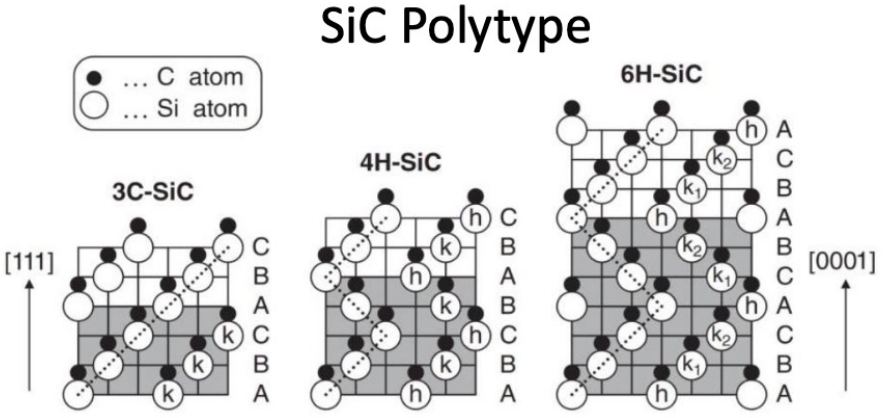
- **宽带隙** $\sim 3.23\text{eV}$ ($\text{Si} \sim 1.12\text{eV}$)
极低漏电流，实现高信噪比
- **高热导率**
无需额外冷却
- **高击穿电场**
支持器件在更高偏压下运行
- **高电子饱和漂移速度**
具备出色的时间分辨优势
- **高原子位移阈能**
赋予优异的潜在抗辐照性能
- **可见光不敏感**
有效抵抗复杂环境光干扰



面临挑战与关键突破方向

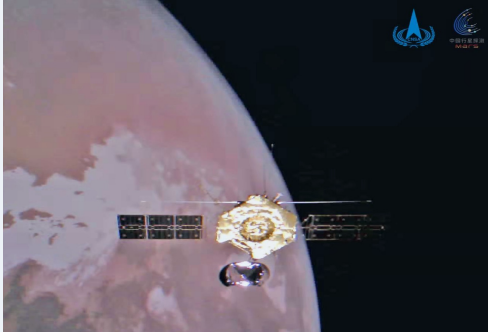
技术瓶颈:

- 多型体共存，制备难
- 平均电离能高，单位能量沉积信号产能较低
- 外延层厚度 $< 150\mu\text{m}$ ，载流子产额低，需要额外增益



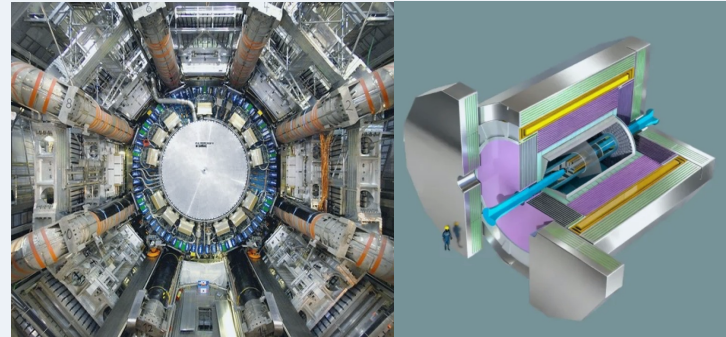
4H-SiC在辐照环境下的潜在应用前景

Space

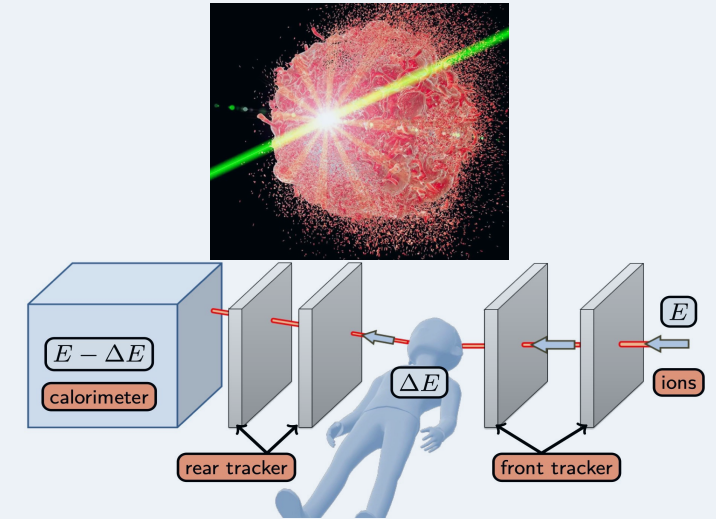


DOI: [10.1109/LAEDC65721.2025.11289012](https://doi.org/10.1109/LAEDC65721.2025.11289012)

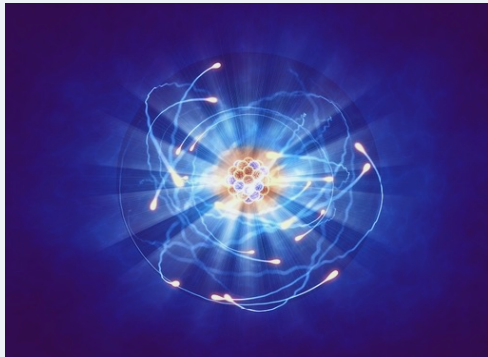
Hep



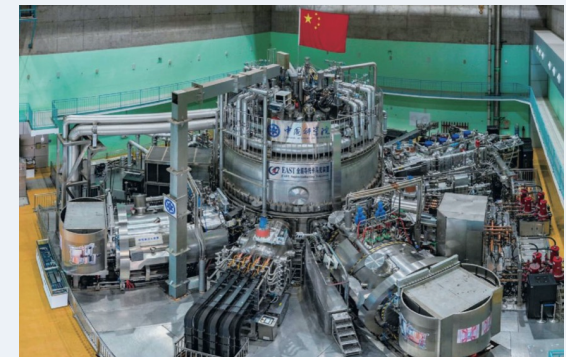
Radiotherapy



Nuclear Physics

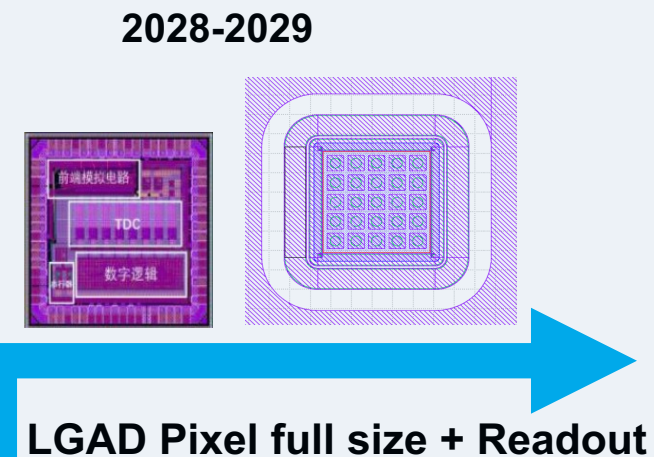
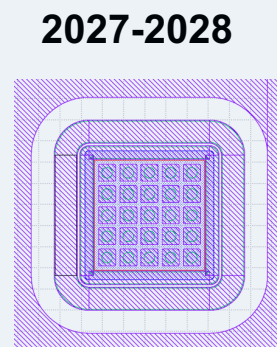
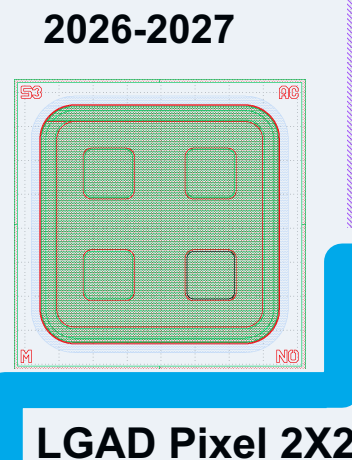
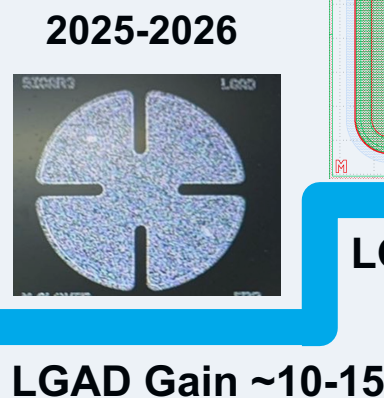
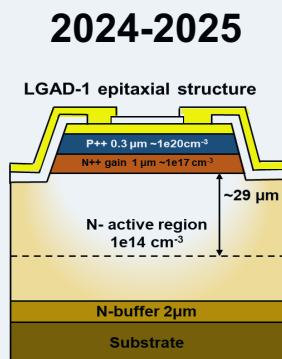
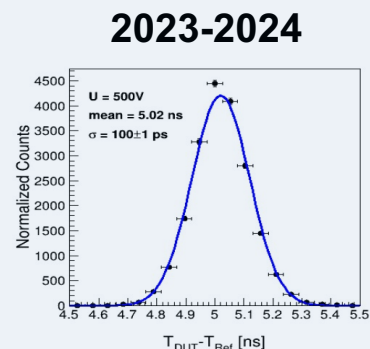


Plasma diagnostic in Fusion reactors



SICAR 发展规划

- 从基础结构验证起步，逐步实现可控增益、像素化与集成读出系统
- 围绕工艺改进，时间、空间分辨性能提升
- 面向强辐照、高温环境下的应用



PIN Time resolution ~ 100ps

4H-SiC传感器研发 — SICAR1_PIN

- 全外延生长结构设计（2024 年）

采用完整的外延生长结构，包含厚度为50μm的N-有源区及P+重掺杂接触层

- 尺寸

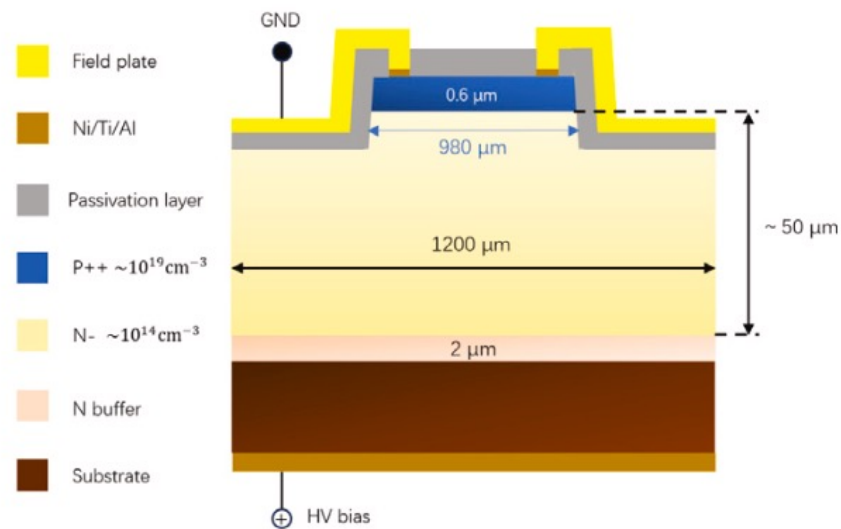
$1.2 \times 1.2 \text{ mm}^2$

- 终端电场调控技术

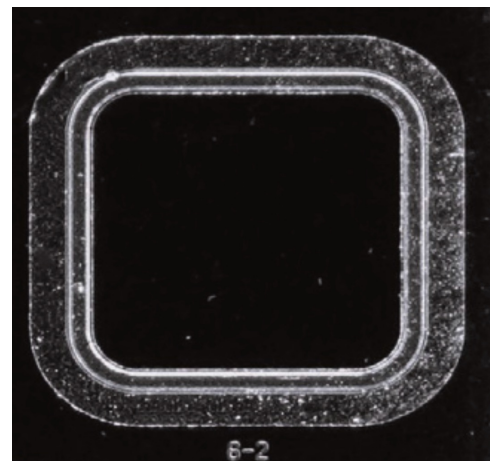
结合刻蚀终端与金属场板结构，有效缓解器件边缘电场集中效应

- 工艺特点

无需高温高能离子注入及后退火处理，简化了制造流程，大幅降低了工艺成本与能耗。



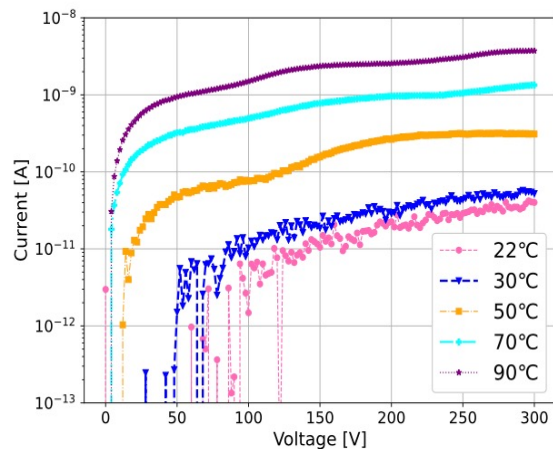
4H-SiC PIN 传感器多层结构示意图



传感器实物显微镜观测图

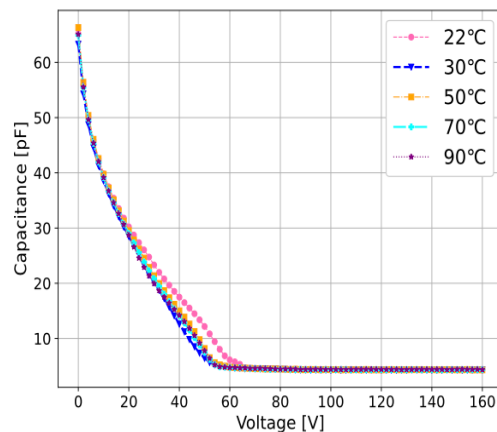
4H-SiC PIN 传感器的热稳定性

● 超低漏电流



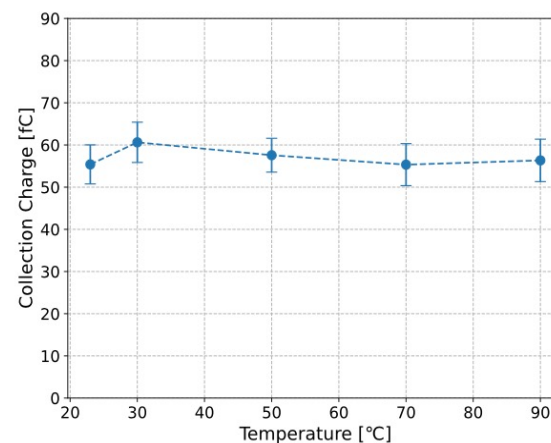
- RT ~ 50 pA;
- 90°C < 10 nA

● 结电容温度稳定性



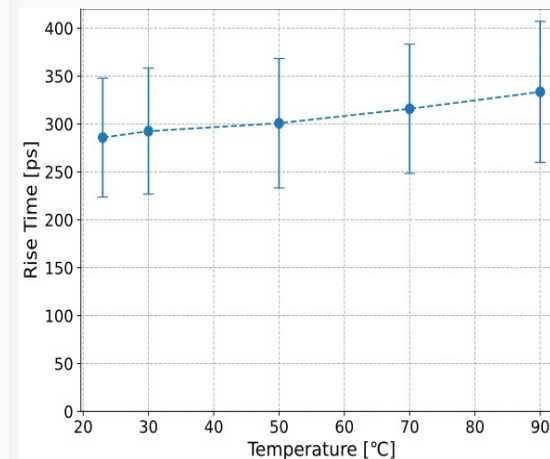
- 随环境温度变化幅度极小
- 全耗尽电压 ~ -76 V
- 全耗尽电容值 ~ 3.5 pF

● CCE 热稳定性



- Alpha粒子电荷收集效率温度依赖性极低, 高温性能稳定

● 超快上升时间



- < 350 ps (@ 90°C)

4H-SiC PIN传感器抗辐照特性 — x射线辐照

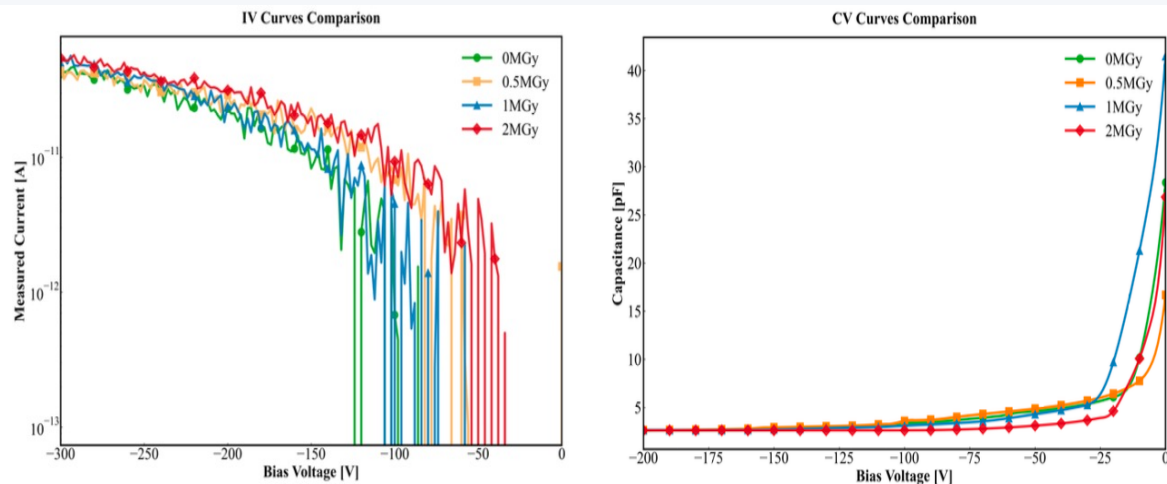
● 辐照实验条件

MultiRad 160 @ 40keV

● 优异的辐照耐受

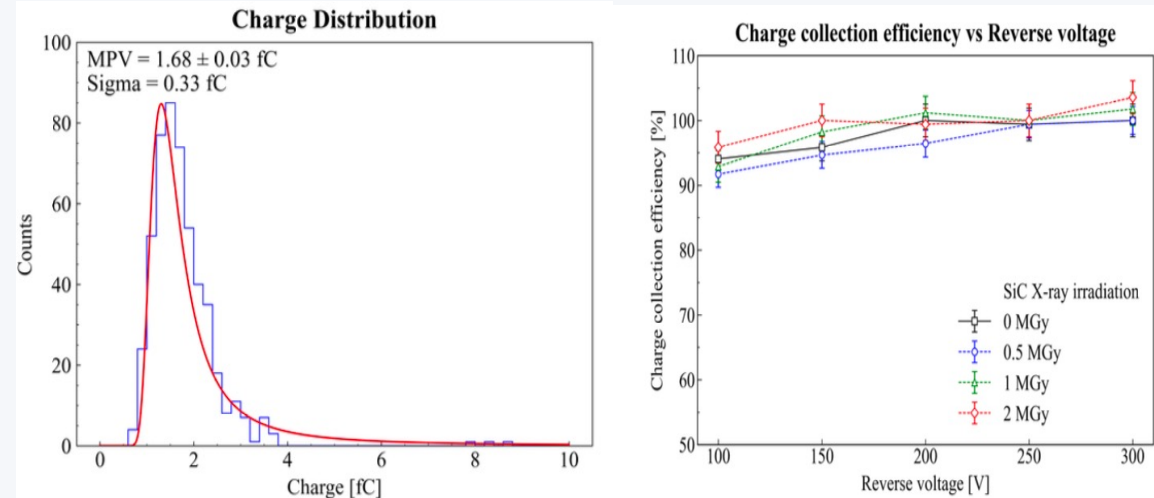
累计辐照耐受剂量达 2 MGy

● IV & CV X 射线辐照耐受性



- 漏电流基本保持恒定;
- 全耗尽基本保持恒定;
- 漏电流 < 80 pA @ 300V
- 全耗尽电容 ~ 2.5 pF

● β 粒子电荷收集量 X 射线辐照耐受性

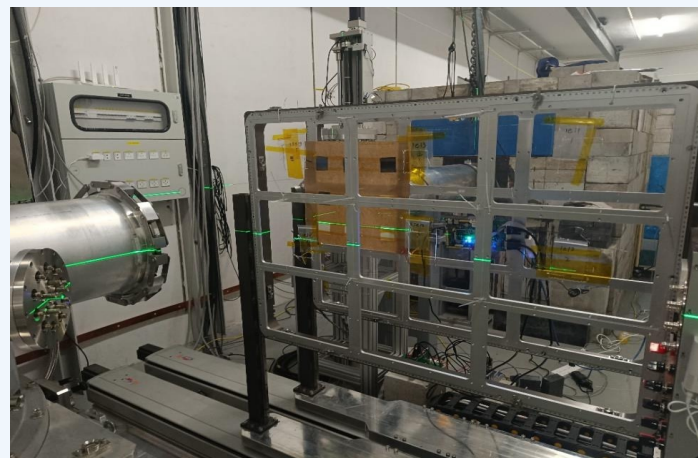
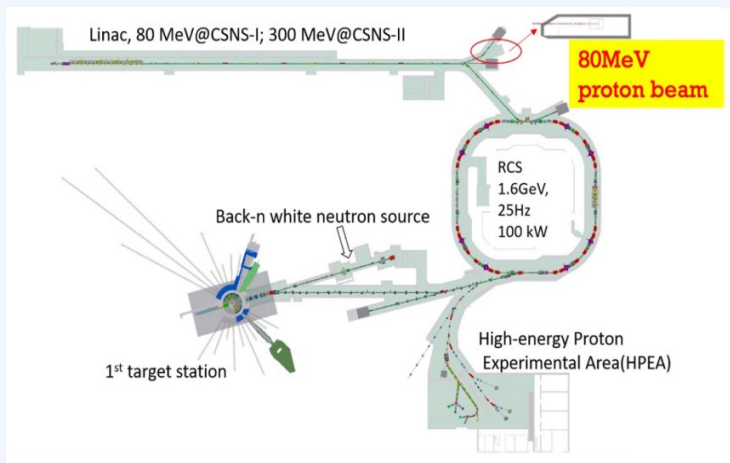


- 辐照前后 β 粒子 CCE 无退化,
- 保持优异的探测能力

4H-SiC PIN 传感器抗辐照特性 — 质子辐照

● 中国散裂中子源 (CSNS) 开展辐照实验

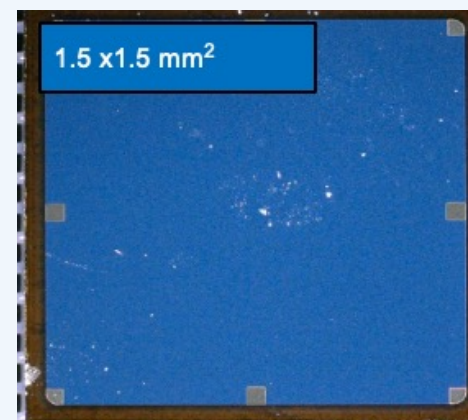
- 80 MeV 质子束; 束斑 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$; 注量梯度为 1.4×10^{11} 、 2.5×10^{12} 、 7.0×10^{12} 及 $7.0 \times 10^{13}\text{ p/cm}^2$



● 4H-SiC PIN 传感器 (NJU)

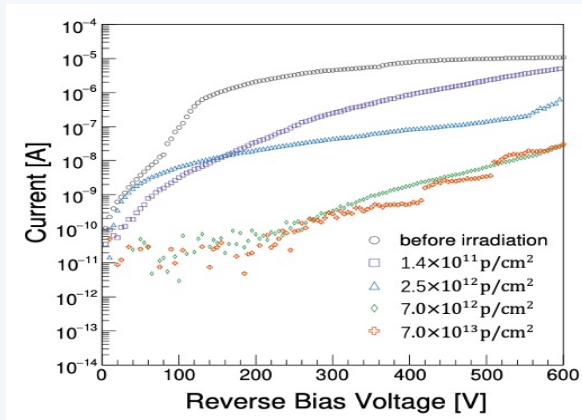
- 尺寸 $1.5 \times 1.5\text{ mm}$;
- 外延层 $100\mu\text{m}$

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



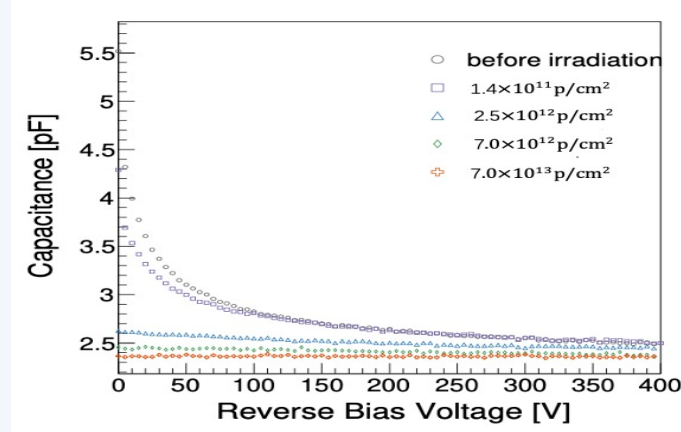
4H-SiC PIN传感器抗辐照特性 — 质子辐照

● 漏电流下降



- 漏电流随辐照注入量提升而下降（与 Si 相反）
- 热激发载流子产额极低，避免了漏电流热失控

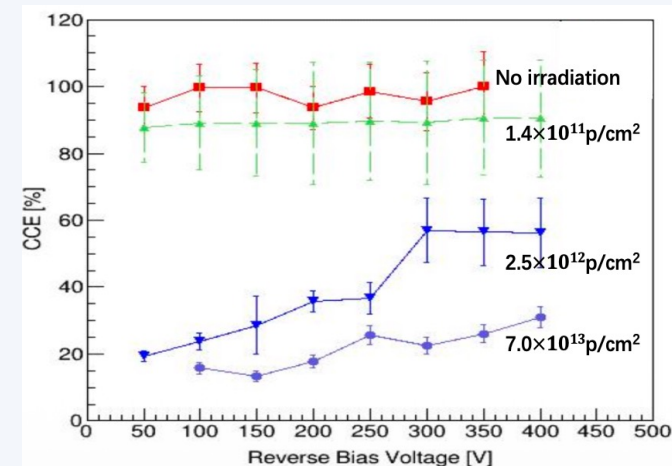
● C-V 曲线趋于常数



- 电容随辐照注量增加趋于常数
- 受主型缺陷补偿了有效掺杂，使得耗尽区迅速贯穿

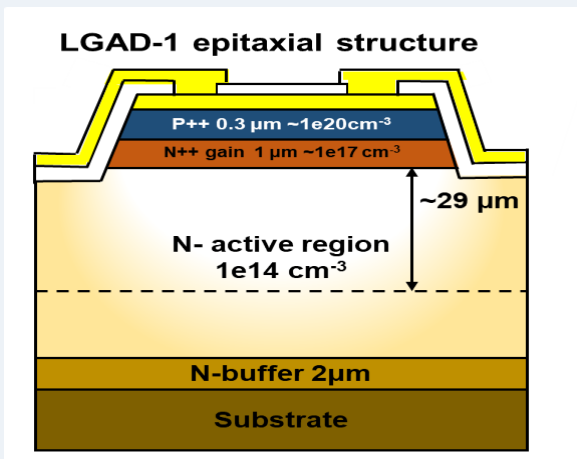
● α 粒子电荷收集效率(CCE)退化

- 室温下进行电荷收集量测试
- 注入量 $7.0 \times 10^{13} \text{ p/cm}^2$ 时，效率降至辐照前的30%

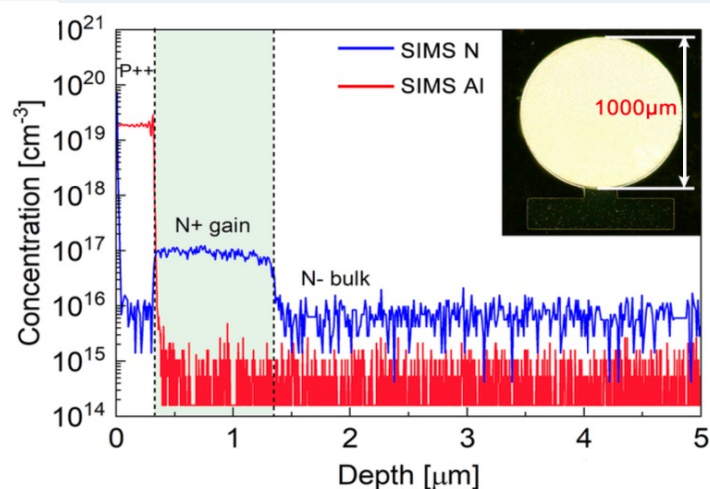


4H-SiC传感器研发 — SICAR1_LGAD

● 全外延生长垂直结构

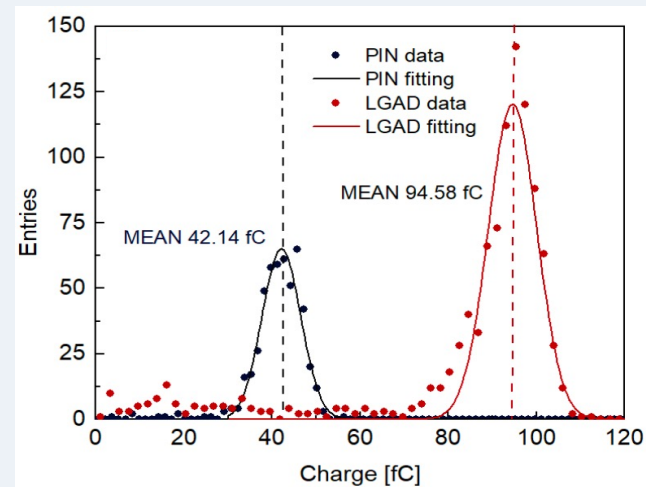


- N-型有源区 (50 μm)
- N+型增益层 (1 μm)
- P++ 型层
- 刻蚀终端结构

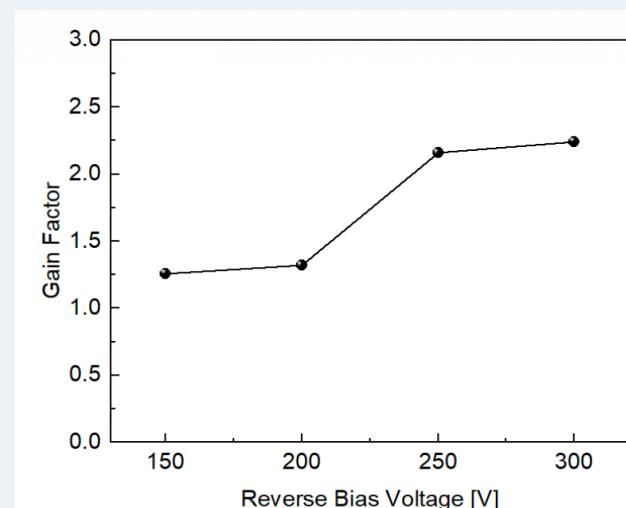


- SIMS 测试结果
与设计吻合

● 低增益雪崩倍增



- PIN& LGAD Alpha 粒子
电荷收集量



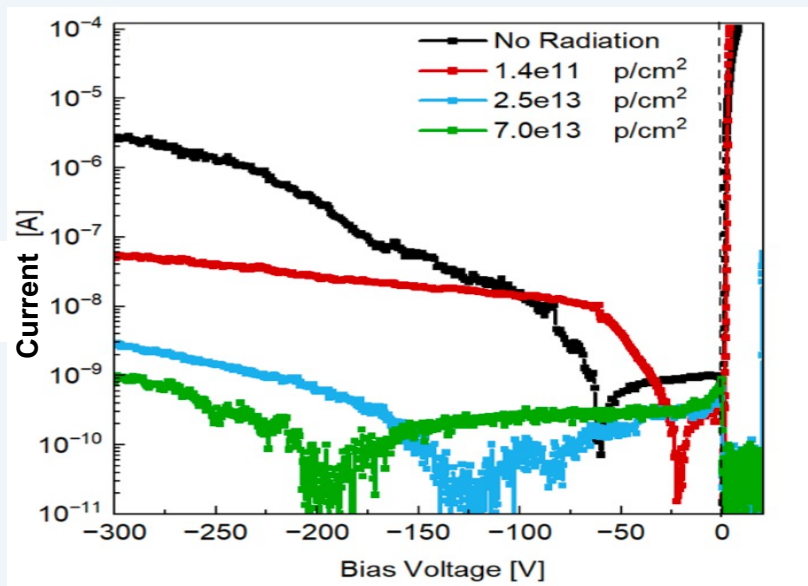
- 实现2~3倍增益@300V

4H-SiC LGAD传感器抗辐照特性 — 质子辐照

● 中国散裂中子源 (CSNS) 开展辐照实验

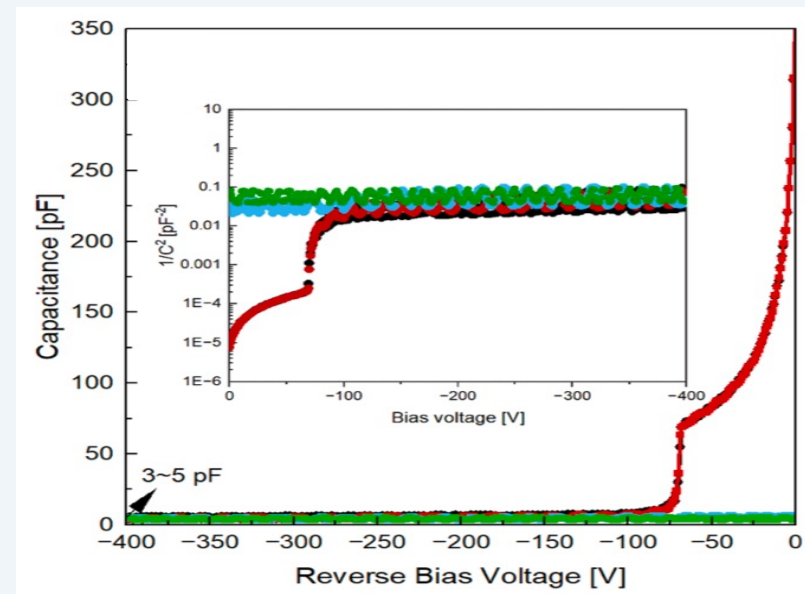
➤ 80 MeV 质子束; 束斑 20 mm × 20 mm; 注量梯度为 1.4×10^{11} 、 2.5×10^{12} 及 7.0×10^{13} p/cm²

● 质子辐照后 I-V特性



- 质子辐照前, 漏电流 $> 1 \mu\text{A}$ @300V, 较PIN二极管高5个数量级
- 器件漏电流随质子注入量的增加而呈下降趋势
- 7×10^{13} p/cm² 辐照注入量, 漏电流 $\sim 1 \text{nA}$ @ 300V

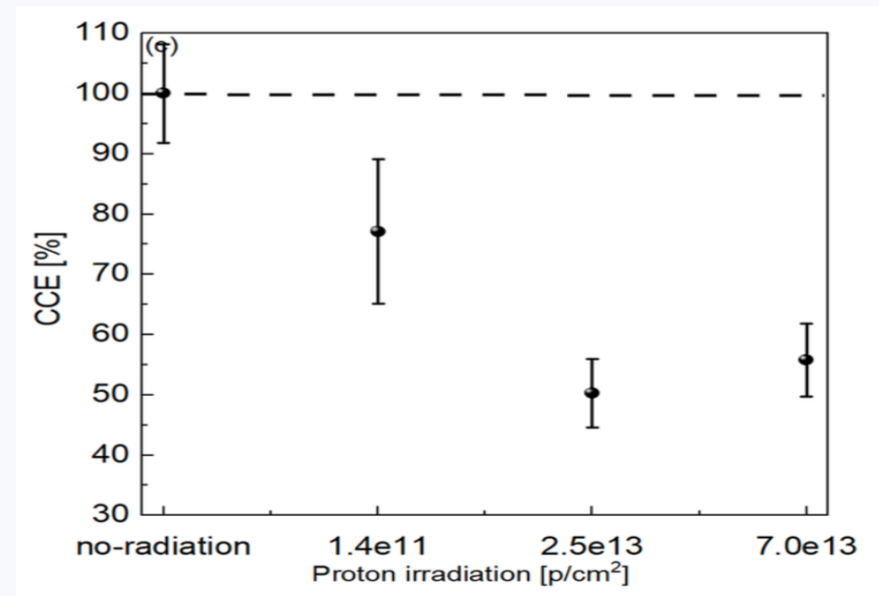
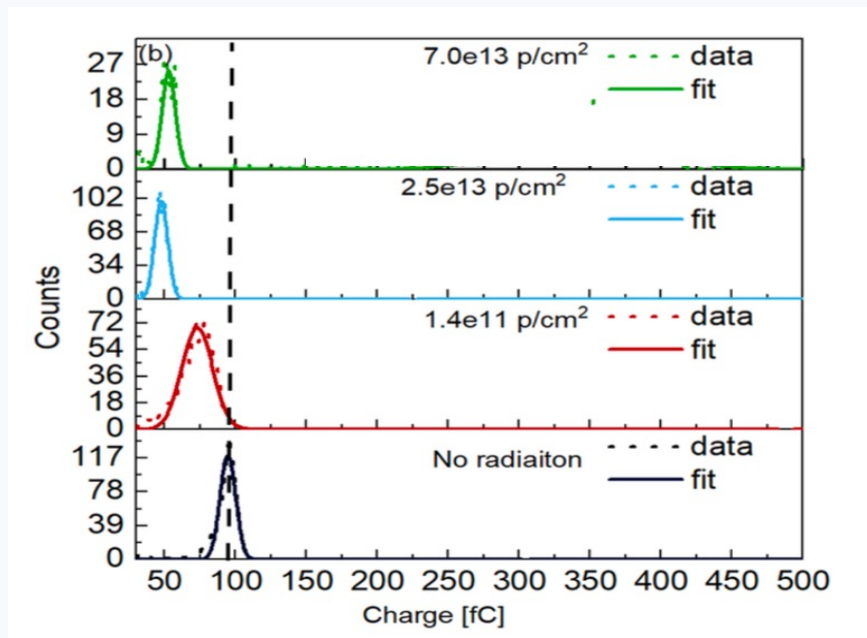
● 质子辐照后C-V 特性



- 增益层耗尽电压约**75V**, 全耗尽电压约**100V**
- 电容随辐照注入量增加而趋于平缓
- 全耗尽电容约为**3~5 pF**

4H-SiC LGAD传感器抗辐照特性 — 质子辐照

● CCE随辐照注入量增加退化



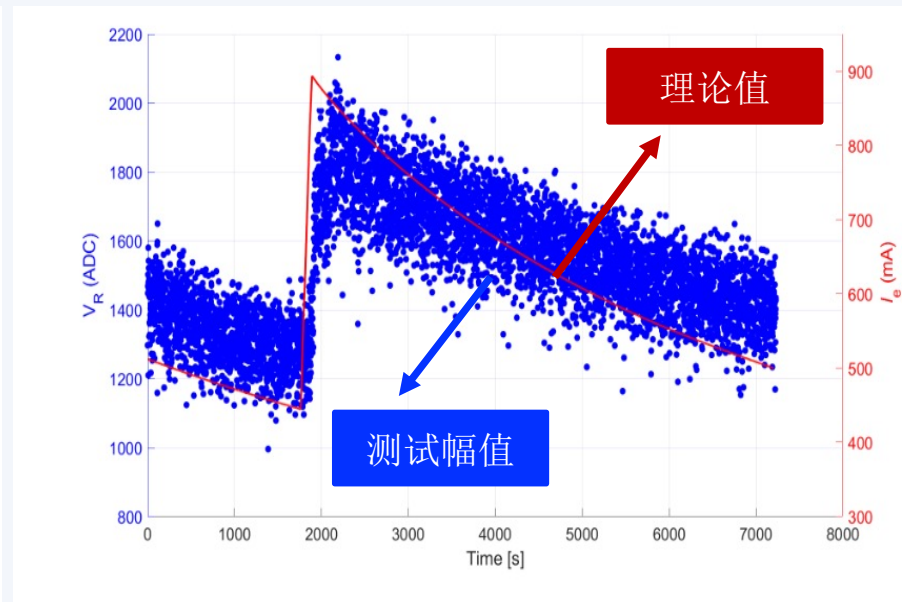
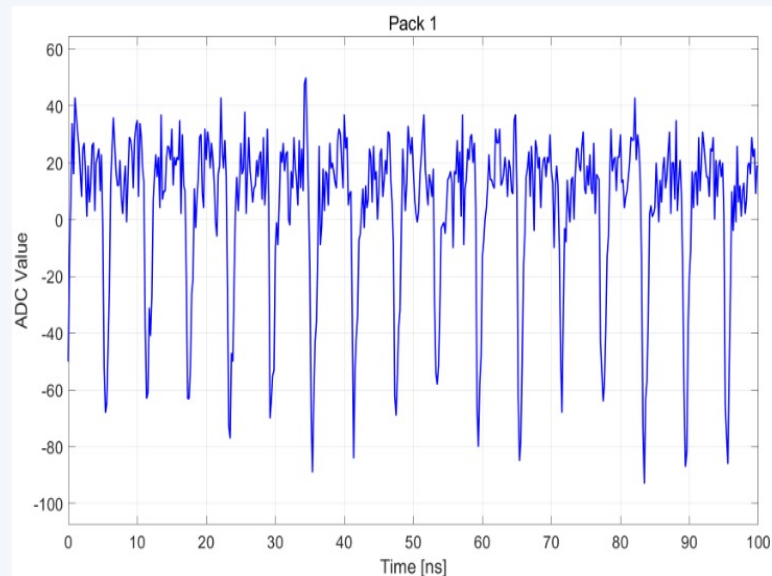
- 室温下进行 α 粒子电荷收集量测试
- CCE 随辐照注量增加呈现退化趋势

- 在最高注量 7×10^{13} p/cm²条件下, 器件 CCE 下降至辐照前始值的57%

归因于质子辐照产生的施主移除效应, 导致增益层的有掺杂浓度下降

4H-SiC 传感器在亮度监控上的应用 (2025.12)

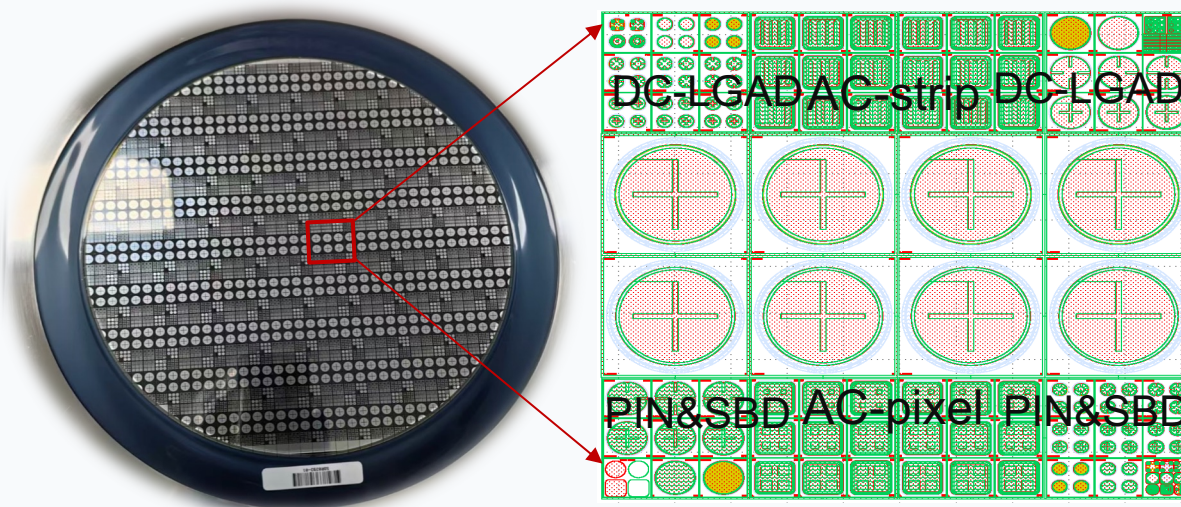
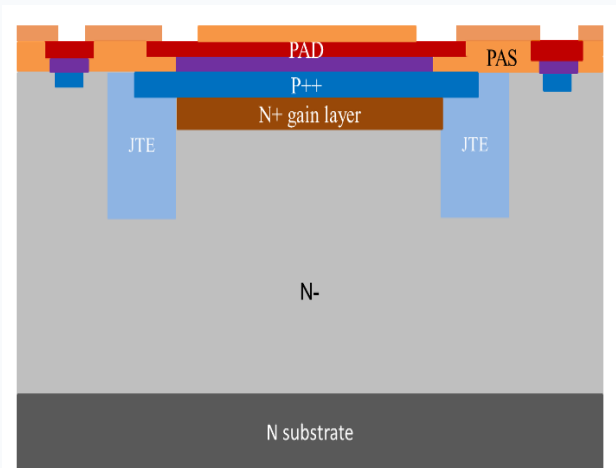
- 于北京同步辐射 (BSRF) 进行了亮度监控验证, 其光子能量 8keV, 通量 7.5×10^{12} Phs/sec/0.1%BW



- 搭建亮度监控原型样机
- 同步辐射光子束团时间间隔为 8ns
- 探测器响应随时间变化与储存环电子束流强的变化高度同步
- 初步验证4H-SiC PIN 器件可以用于亮度监控

4H-SiC LGAD SICAR3 研制

- 首次于350nm MOSFET 产线完成流片（2026. 4），采用有源区外延结合终端及增益层的高温高能离子注入技术



● 核心工艺优势

- 表面损伤小，器件漏电流低；
- 电场分布均匀，适合制造大尺寸阵列器件

● 技术挑战

- 工艺复杂且成本高昂；
- 高温（ $> 500^{\circ}\text{C}$ ）；高能量注入 $> 1\text{ MeV}$
- 需超高温($>1600^{\circ}\text{C}$)退火修复缺陷并激活载流子

● 8-inch 外延片

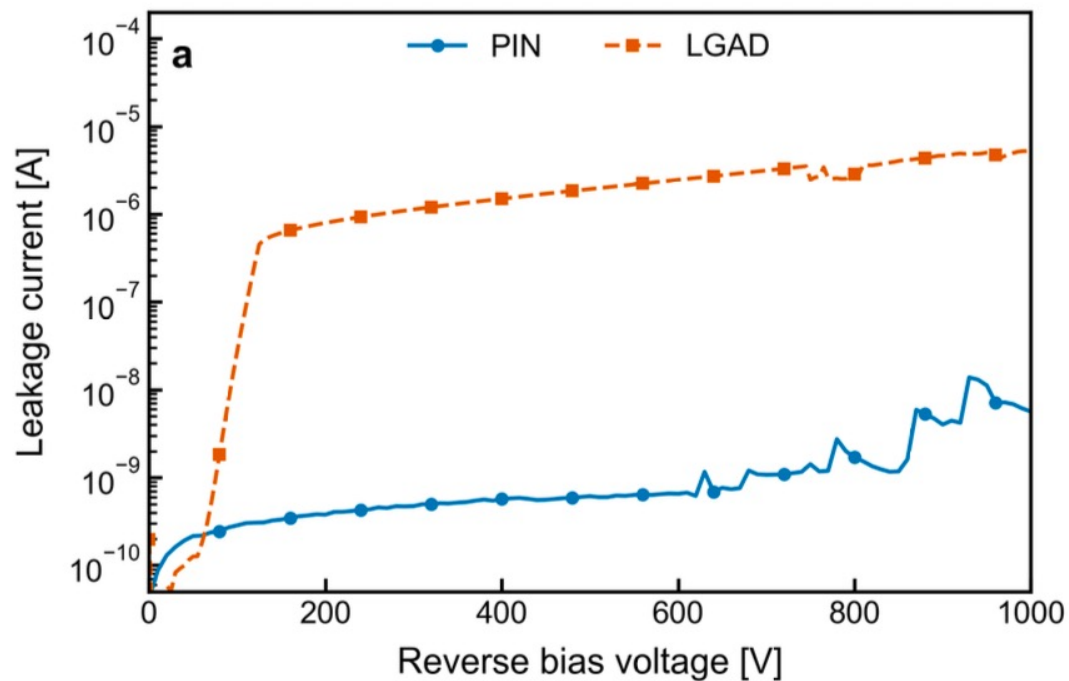
- 96.5% yield

● 器件类型

- PIN: $d \sim 1.4/0.5\text{mm}$;
- 肖特基二极管 (SBD) : $d \sim 0.5\text{mm}$;
- LGAD: $d \sim 1.4/0.5\text{mm}$;
- AC LGAD/DC RSD – 像素型/微条型

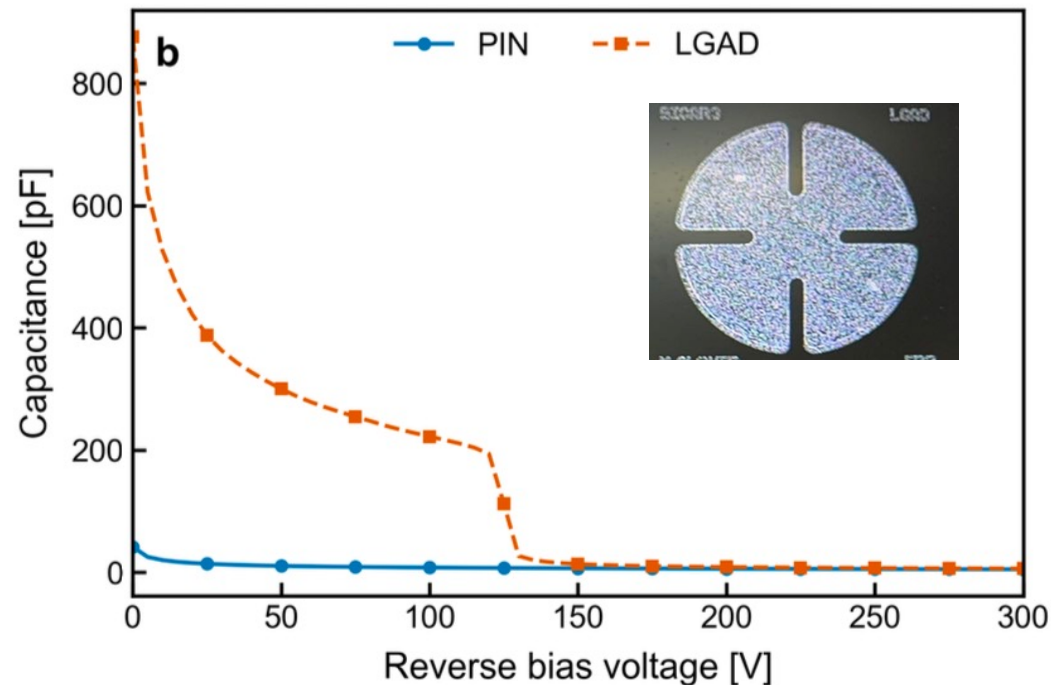
4H-SiC LGAD IV&CV 特性

● PIN & LGAD IV 特性



- PIN二极管实现了超低漏电流 (<1 nA @ 1000V) ;
- LGAD在1000V下漏电流约为1 μ A;

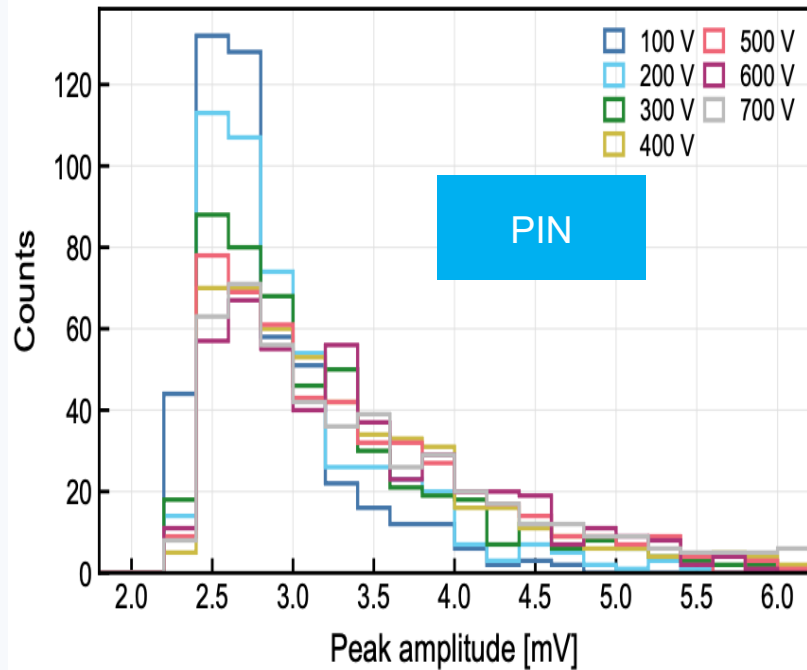
● PIN & LGAD CV 特性



- 增益层耗尽电压: 约130V;
- 全耗尽电容: 3.8 pF ($d \approx 1.4$ mm)

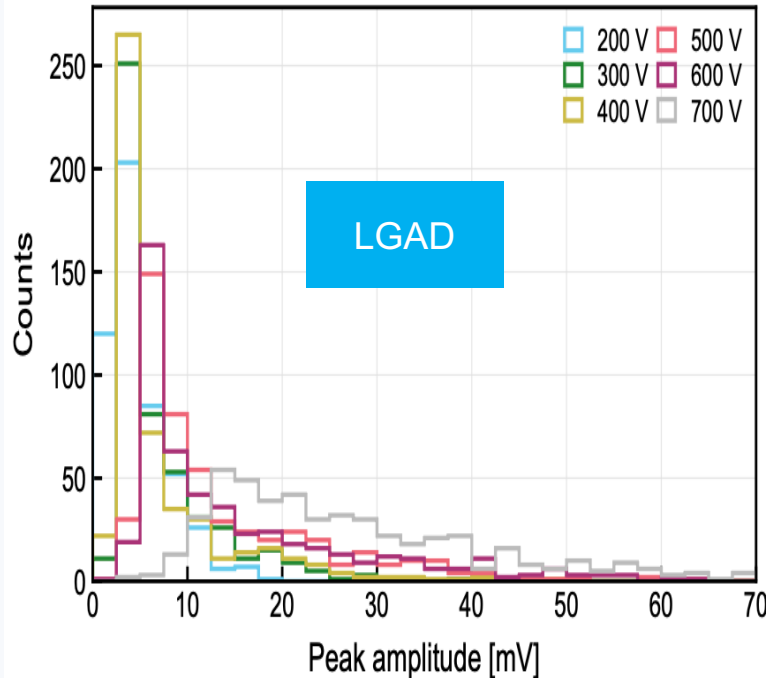
4H-SiC LGAD β 粒子电荷收集

● 利用 ^{90}Sr 源进行增益系数标定



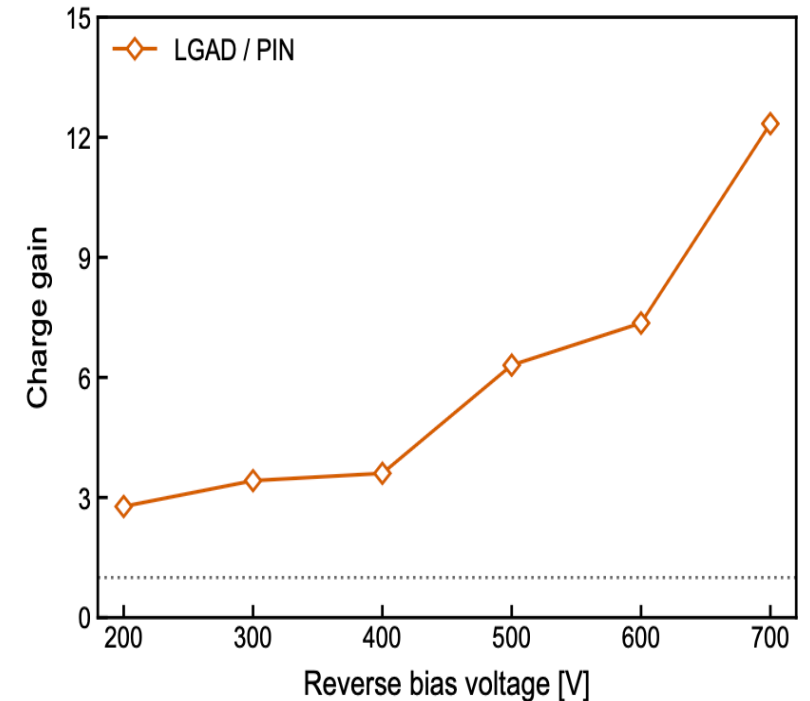
● PIN二极管:

- 信号幅度随偏压升高保持不变;



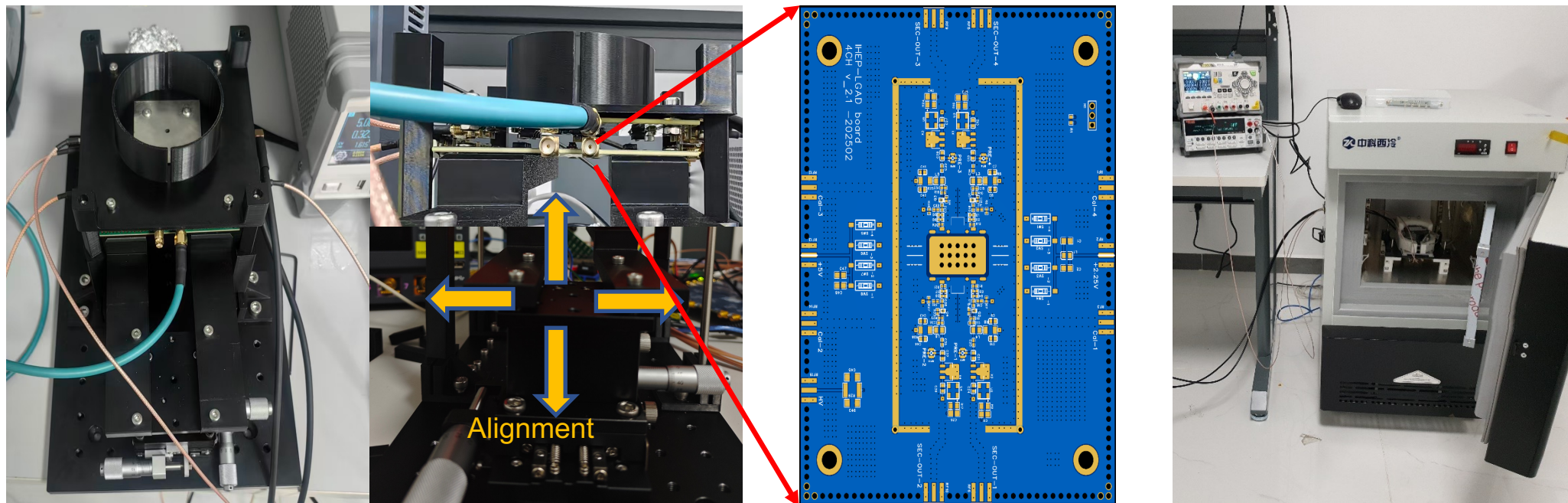
● LGAD (低增益雪崩探测器):

- 信号幅度随偏压升高而增大;



● 增益系数可达 ~12 倍 @700V

4H-SiC LGAD β 粒子时间分辨测试系统



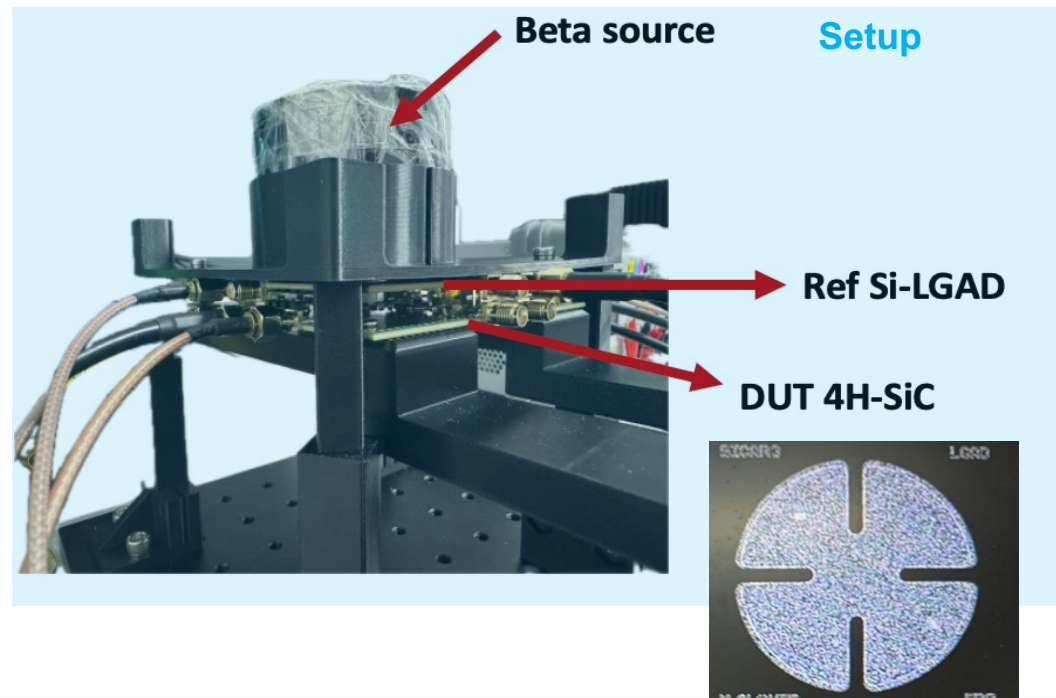
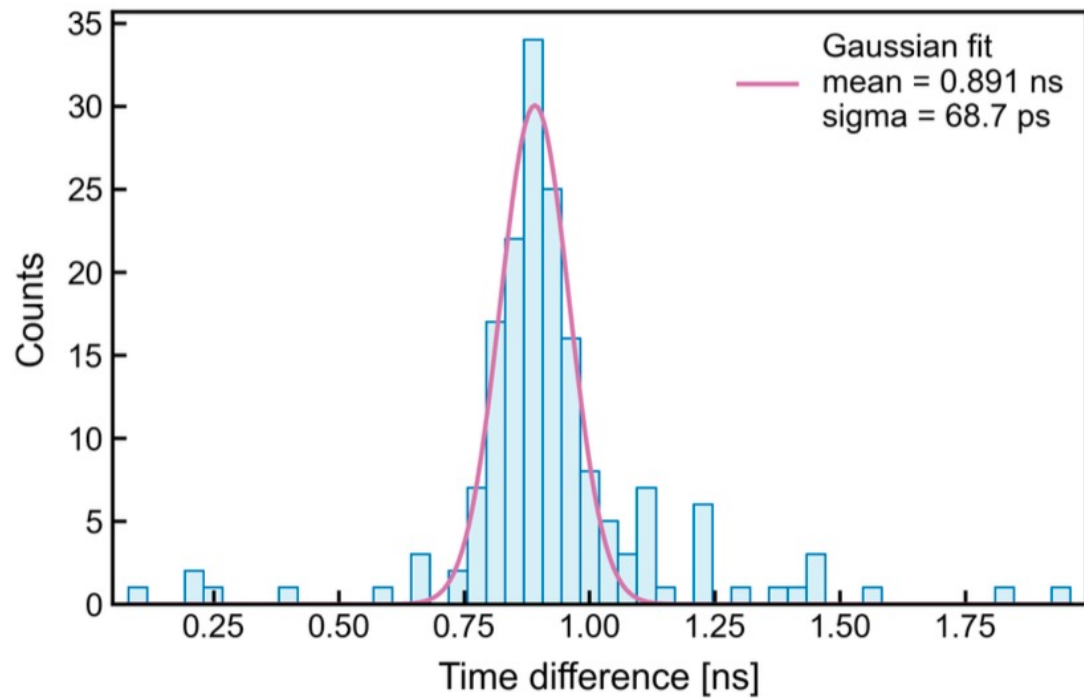
- **4通道LGAD前置放大器电路板:**

- 为SiC传感器提供高压偏置
- 四个信号读出通道
- 每通道放大倍数: 跨阻放大器 (TIA, $R_f \sim 475\Omega$) $\times$ 电压放大器 (10倍)

- **符合测试系统:**

- 三轴位移台 (X、Y、Z方向) 的运动控制

4H-SiC LGAD β 粒子时间分辨测试系统



- **Si-LGAD ~ 42ps @ 180V** ^[1]
 - 硅基低增益雪崩探测器 (Si-LGAD) 在180V偏压下时间分辨率约为42皮秒 ^[1]
- **SICAR3 的时间分辨率 ~55 ps (d~1.4mm) @ 400V**
 - SICAR3在400V偏压下时间分辨率约为55皮秒

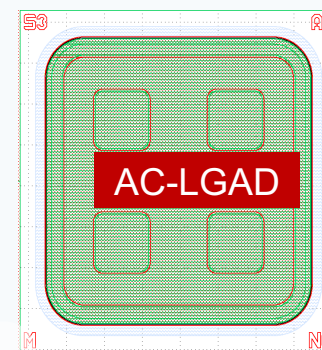
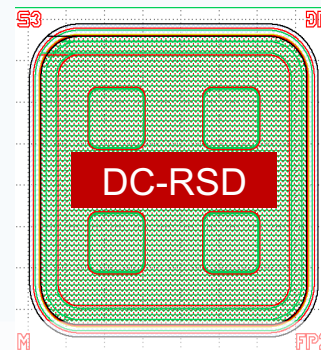
总结与展望

● 成果总结

- 4H-SiC PIN 传感器具有极低漏电流、优异热稳定性；2MGy X射线辐照下性能稳定，但质子辐照后电荷收集效率出现退化；LGAD 器件在质子辐照后电荷收集虽下降，但显著优于同注入量 PIN 器件
- 首次在 350nm MOSFET 产线中完成流片，SICAR3 可实现 ~ 10 倍增益，时间分辨可达 $\sim 55\text{ps}$

● 工作计划

- 研制抗辐照、大尺寸高时间、高位置分辨的交流耦合像素、微条型传感器
- 研究P型阻性电荷分享机制
- 多通道读出系统集成化探索
- 辐照后性能退化机制研究



面向高温强辐照极端环境粒子探测，研制多通道集成化探测器，欢迎各方合作！