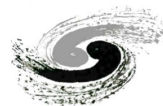


HPES长期流强检测设备

Beam Monitor Online System - BMOS

史欣

代表 BMOS 开发团队



中国科学院高能物理研究所

2025 年 8 月 16 日

测试束流与先进探测技术研讨会

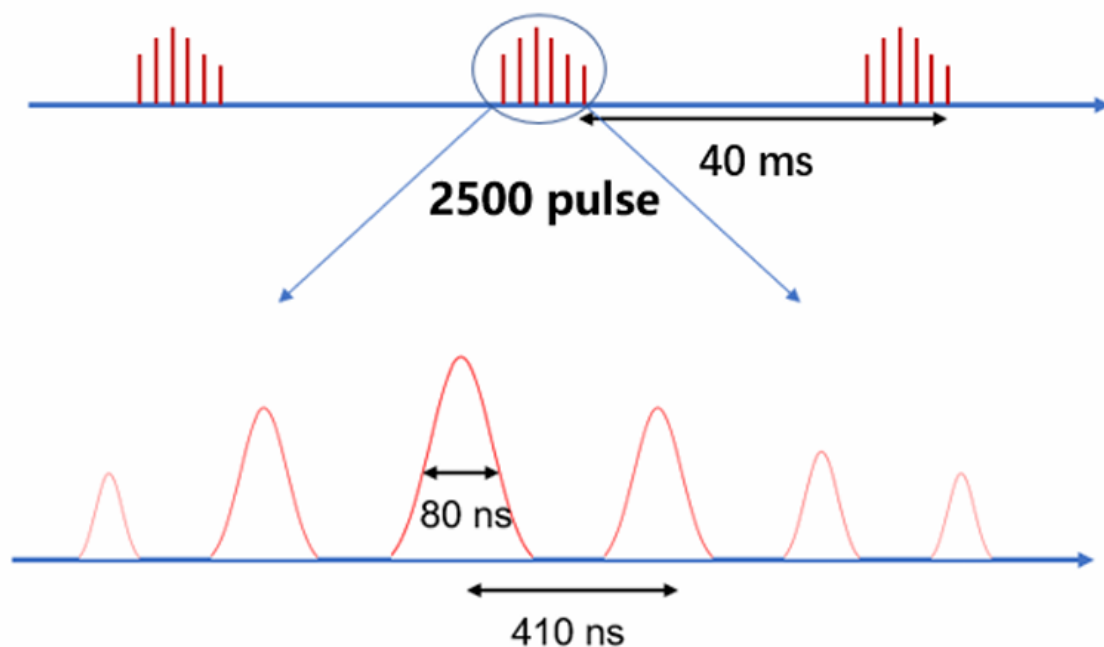
CSNS 高能质子束流



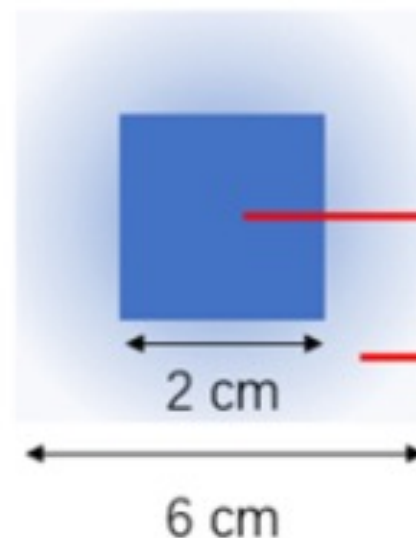
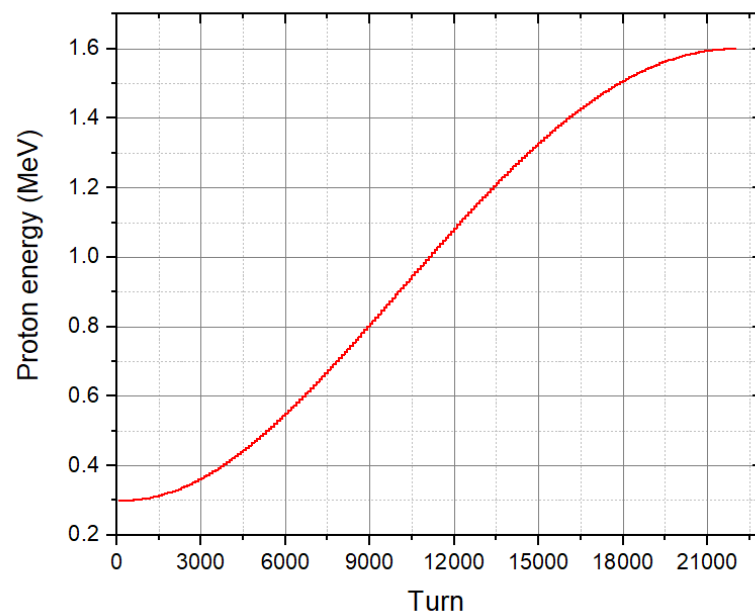
束流参数

- 束流参数

- 质子束流能量: 1.6 GeV
- 脉冲间隔: 410 ns
- 脉冲宽度: 80 ns
- 束团间隔: 40 ms



束团和脉冲结构



束流流强分布

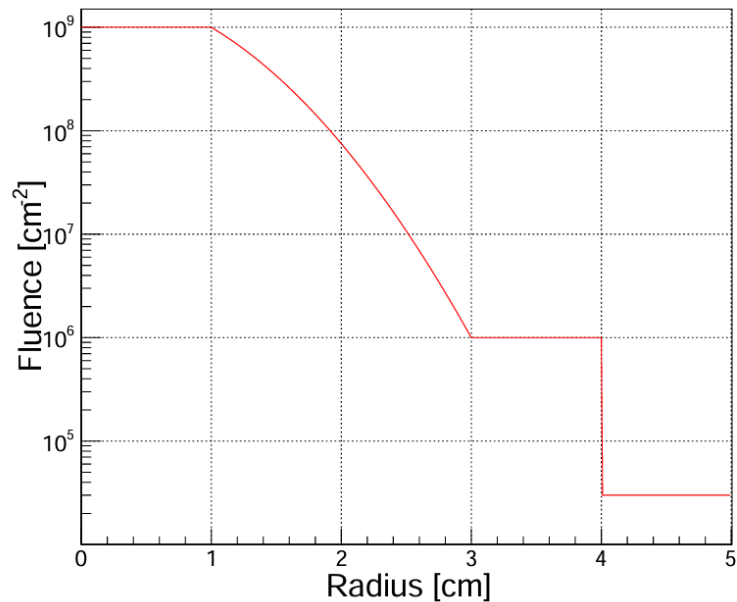
$$4.23 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$$

$$5.4 \times 10^{11} n_{eq}/cm^2$$

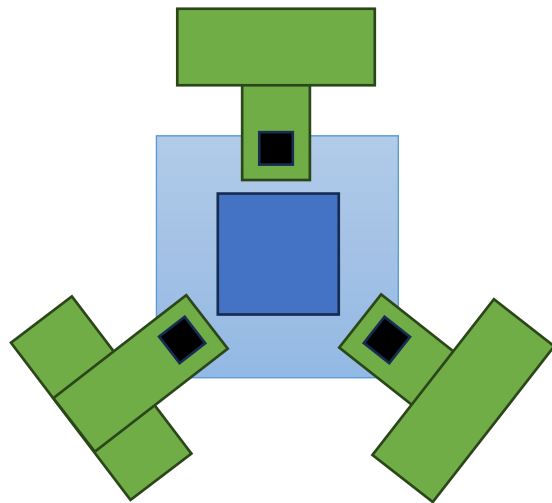
BMOS 整体设计

设计目标

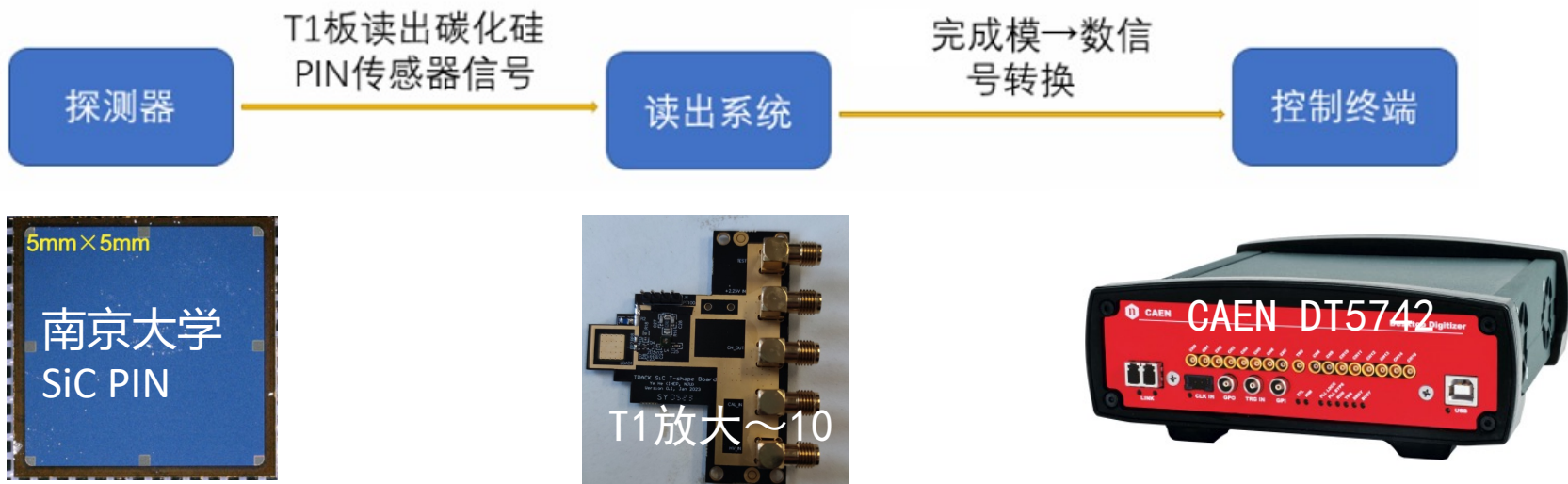
- 实时监测束流 (20ns/hit) 强度、位置及均匀性
- 设计寿命: 5000 小时/年
- 测量误差: $< 1\%$



- **探测策略：间接测量法**，将探测器布置于束流中心边缘（距中心 3.5 cm），避开中心高剂量辐照区域，保障探测器寿命与束流稳定性。
- **监测逻辑：**通过测量边缘束流强度，结合束流强度分布模型反推整体参数。
 1. 束流有效工作区域：中心 2 cm×2 cm 正方形
 2. 探测器布局：边缘非直接辐照区



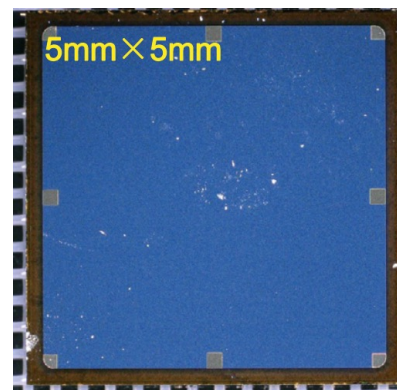
总体布局及设备组成



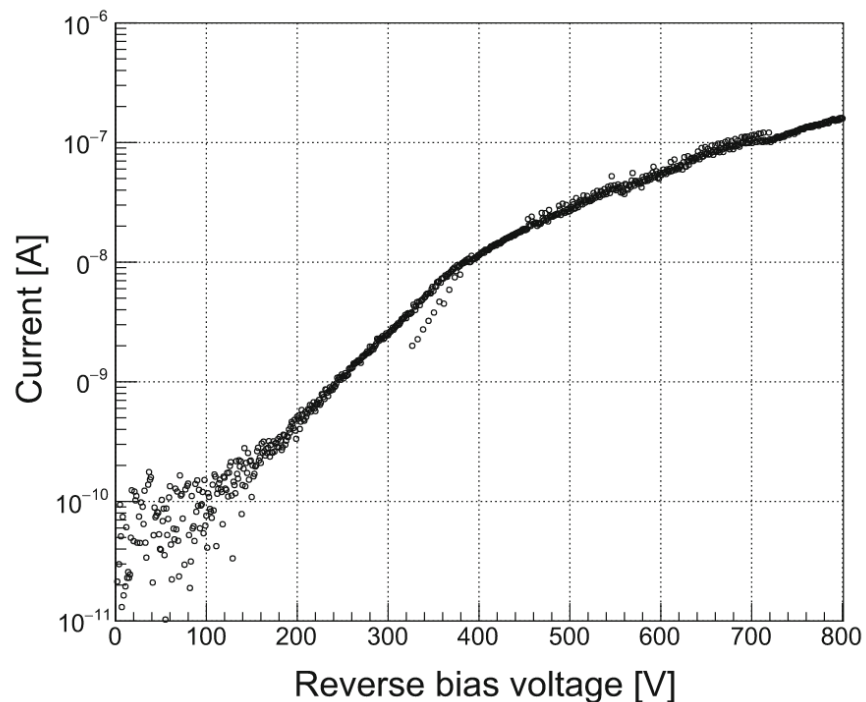
- 探测器
 - 碳化硅PIN传感器和前端读出板T1
 - 读出1.6 GeV质子束流的信号
- 读出系统
 - 基于CAEN DT5742设计
 - 将产生的模拟信号转换成数字信号进行读出
- 控制终端
 - 负责整个系统的运行与数据处理

碳化硅传感器

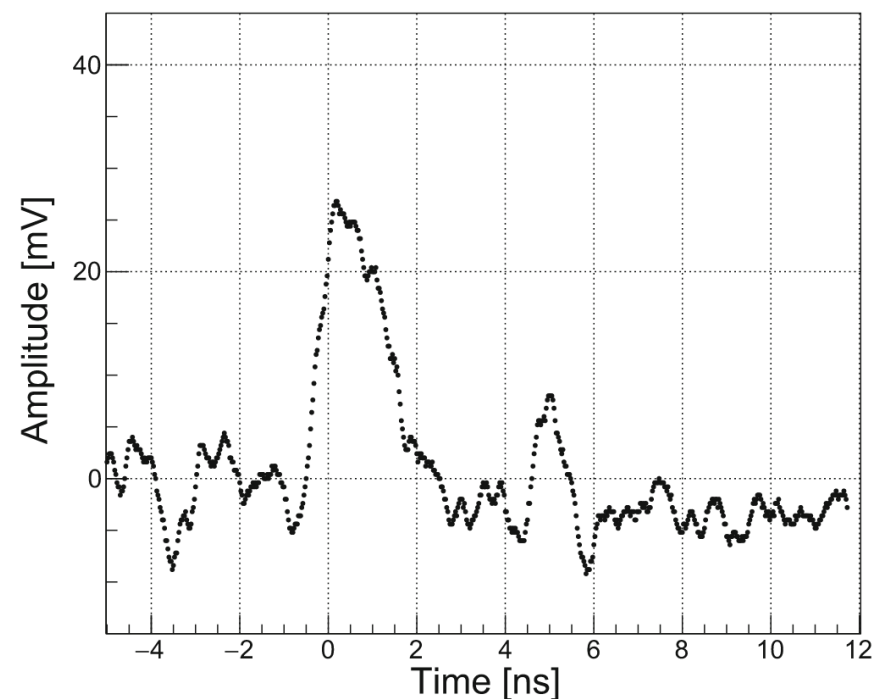
- 采用南京大学研制的 SiC PIN
 - 尺寸 5mm X 5mm
 - 外延层: 100 μm
 - 漏电流: $\sim 20\text{nA}@500\text{V}$



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

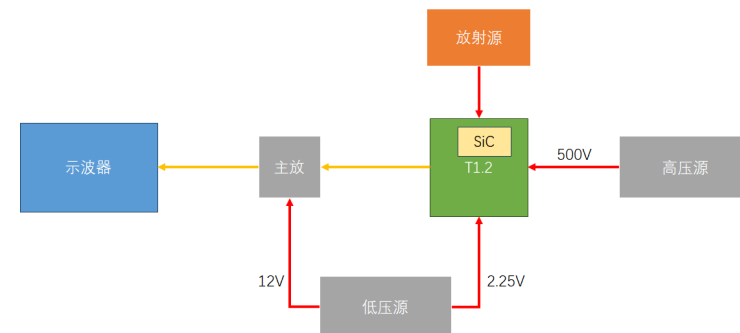


β 源在测试在示波器上的响应

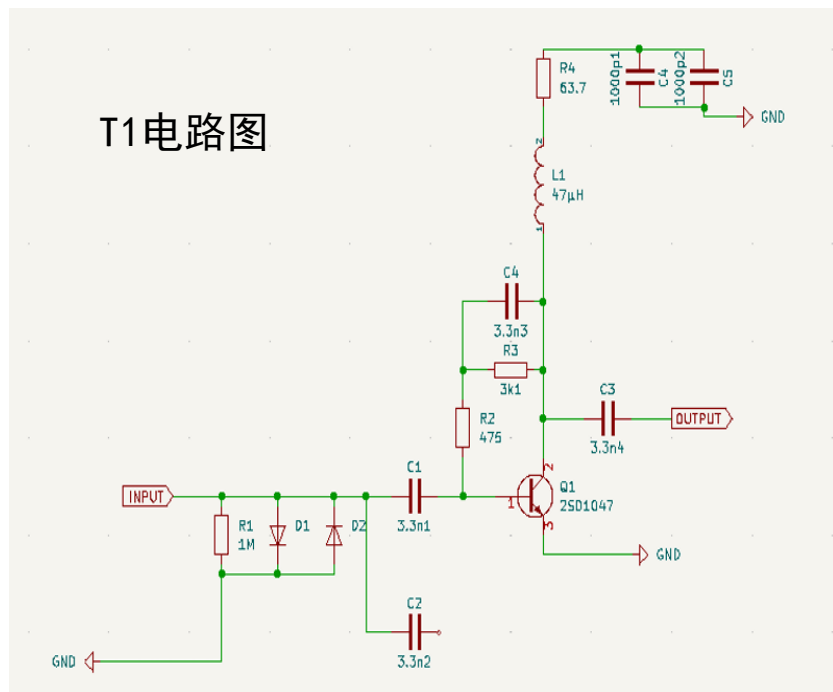


读出电路板设计 T1

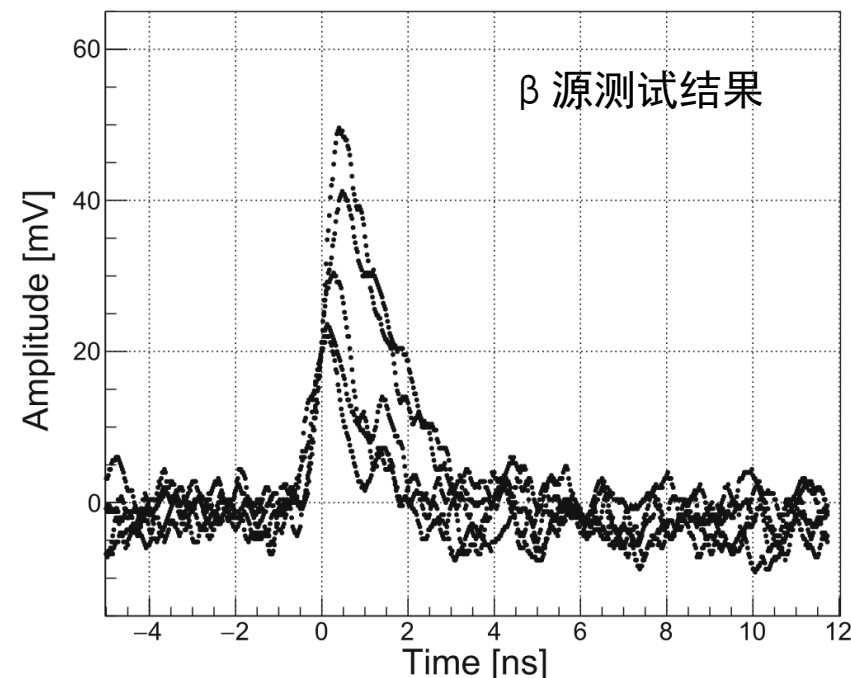
- 放大器的基本结构采用跨阻放大器TIA
 - 将电流信号放大为电压信号，并保持原信号的形状
 - 放大倍数约为20dB



T1电路图



T1实物图

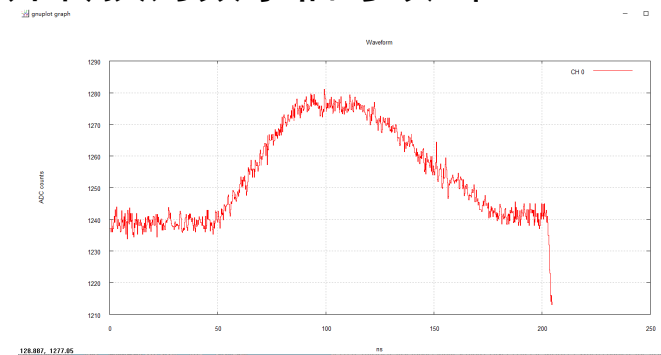


读出系统设计

- 读出系统采用了CAEN DT 5742波形数字化仪器，其功能是读取模拟信号波形并转换为数字信号读出

- 主要参数

- 分辨率: 12 bit
- 通道数: 16
- 采样率: 5 G/s - 750 M/s 可调
- 死时间: 110 μ s



- 连接方式为CAEN DT 5742输入T1产生的模拟信号，通过SMA-MCX转接线连接，产生的数字信号可以用USB进行输出
- 使用信号发生器模拟束流的信号，周期410 ns，信号时间展宽80 ns。通过调整采样延迟时间可以完整采到第二个周期的信号

机械设计与真空方案

- 共享真空腔：

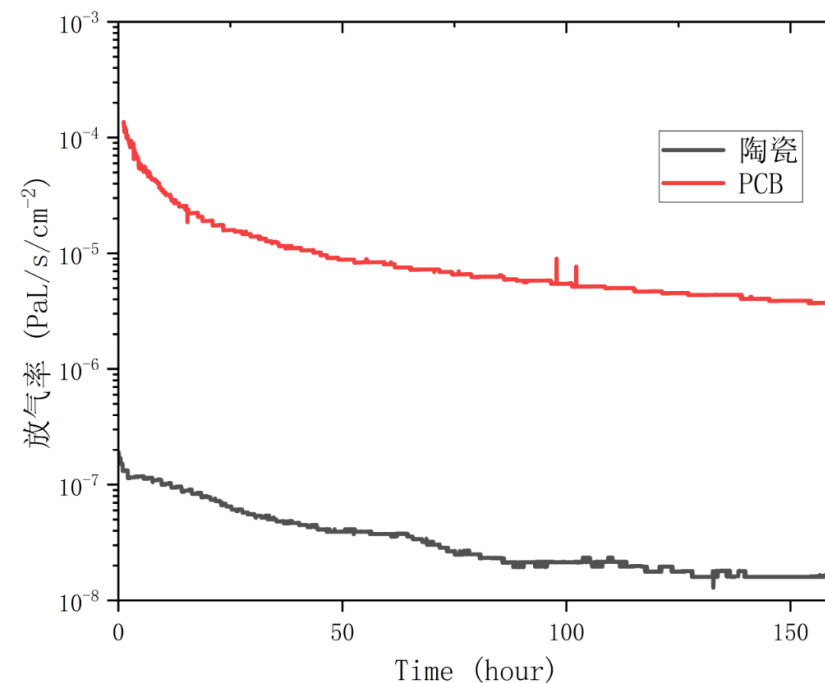
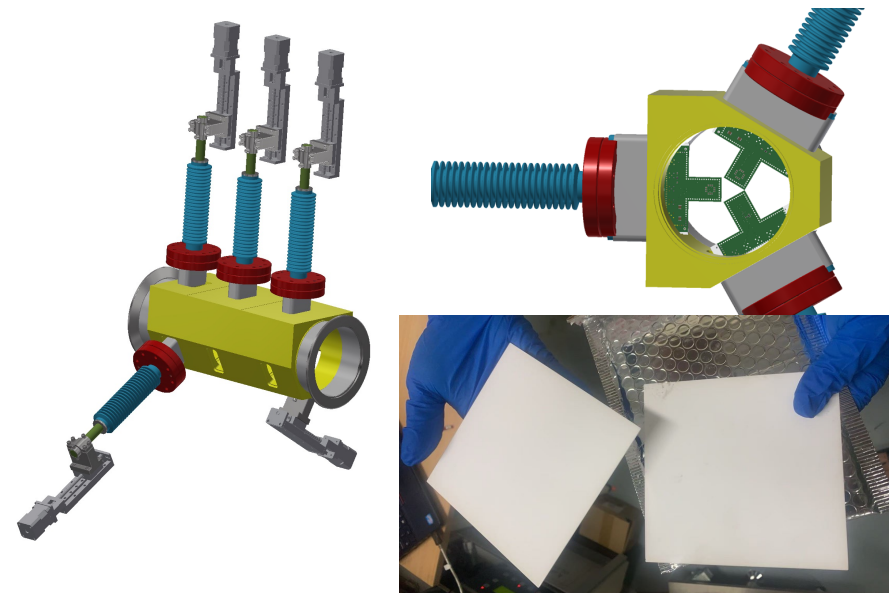
- 与其他装置共用真空环境，降低系统复杂度

- 机械设计：

- 轻量化支撑结构适配探测器与电子学模块集成

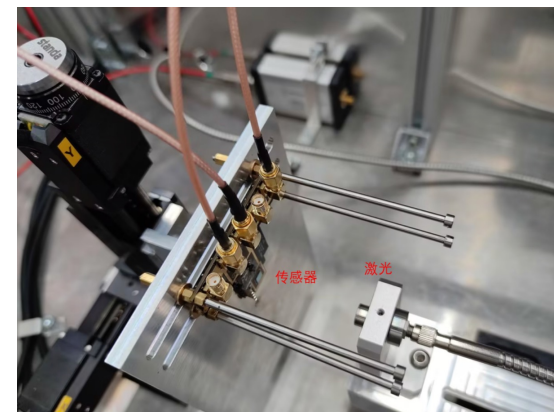
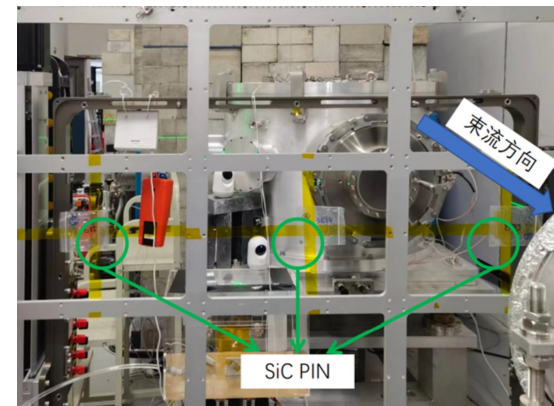
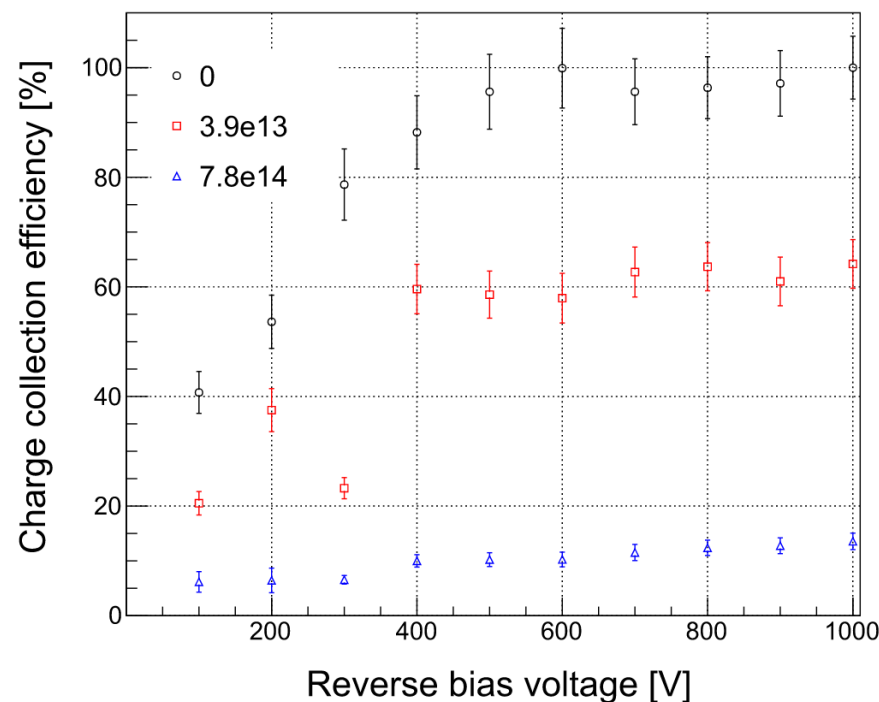
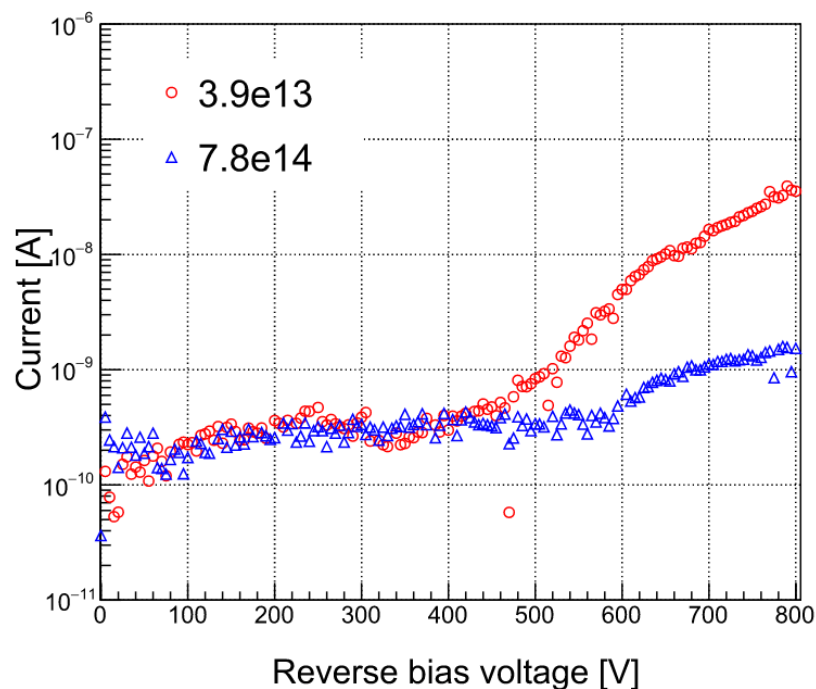
- T 型陶瓷板：双层设计

- 放气率 $\leq 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ （真空兼容）



传感器辐照测试

- 在CSNS 的伴生质子束 80MeV 进行了辐照测试
 - 估算BMOS 工作一年的等效剂量为 $1 \times 10^{12} n_{eq}/cm^2$
- 通过355nm激光测试电荷收集效率
 - 工作一年效率降低 $\sim 2\%$

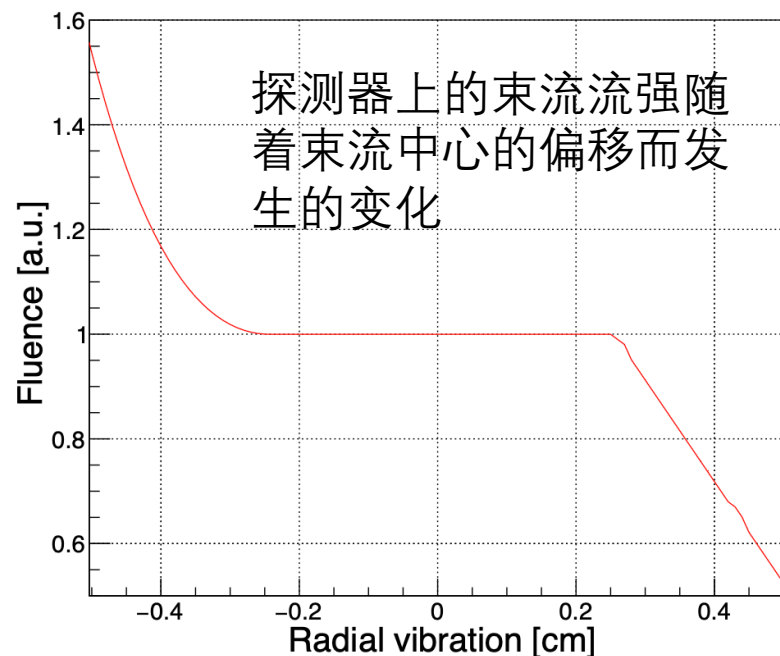
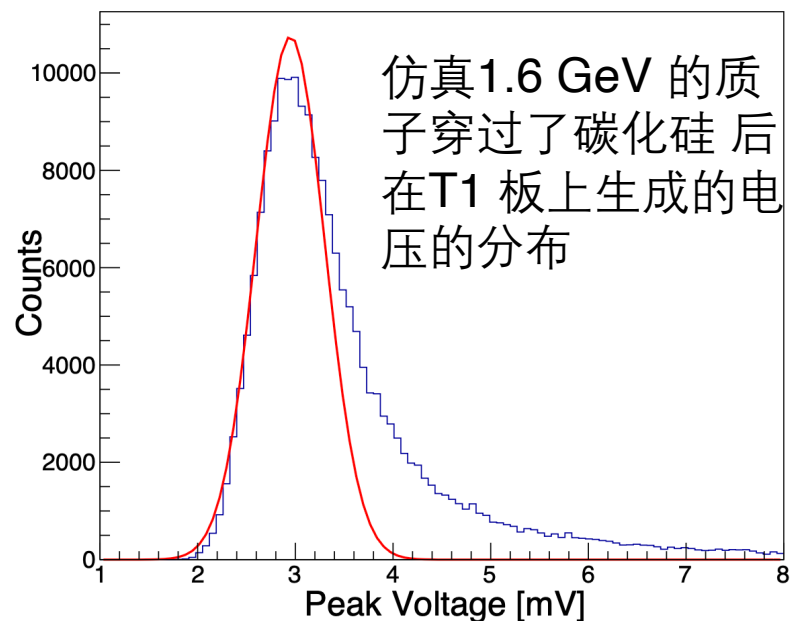


测量误差

$$\sigma = \frac{N_{loss}}{N_{total}}$$

- 束流监控系统的误差：未被探测到的粒子/束流总粒子数
- 主要来源：朗道噪声、电路板背景噪声、辐照损伤、束流震荡

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{Landau}^2 + \sigma_{elec}^2 + \sigma_{rad}^2 + \sigma_{fluc}^2} < 0.68\%$$



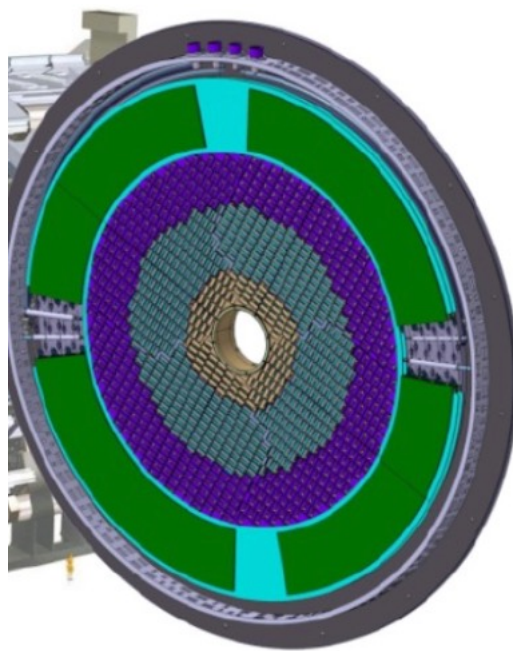
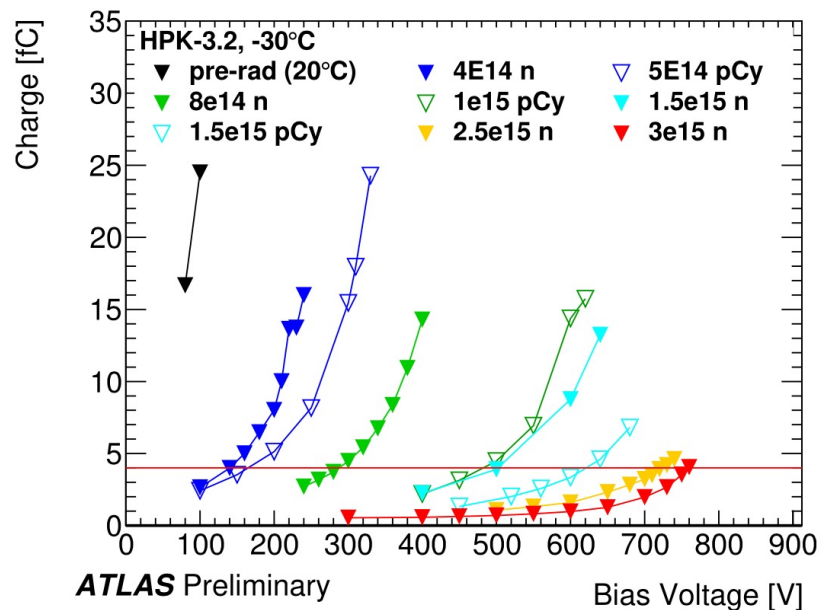
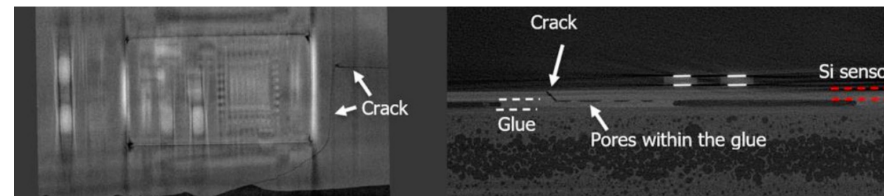
Source	σ / %
σ_{Landau}	0.33
σ_{elec}	0.30
σ_{rad}	0.10
σ_{fluc}	<0.14

- 物理设计达到束流测量精度 <1% 的要求

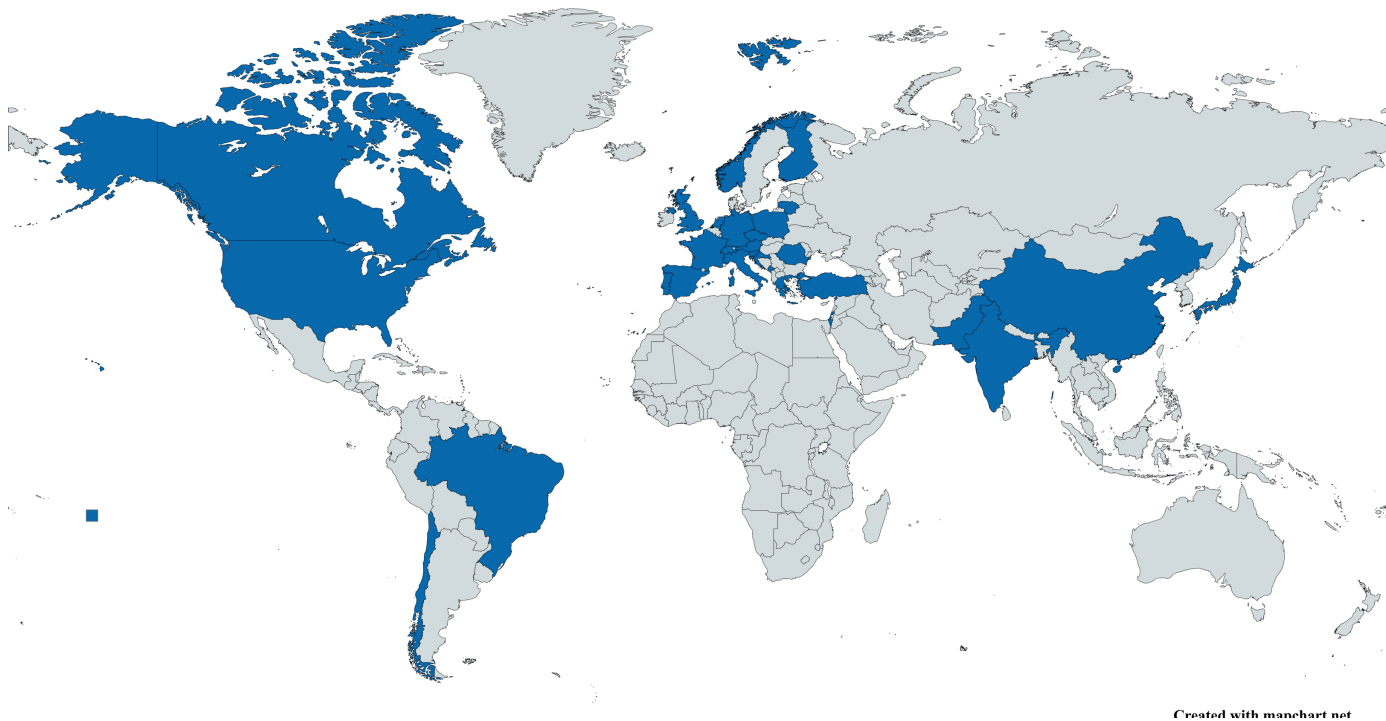
碳化硅传感器

硅探测器的局限性

- 硅探测器已经在高能物理实验上有成熟的应用，但是有局限性：
 - 抗辐照性能差 $\Rightarrow$ 需要更换内层探测器
 - 辐照后漏电流增高 $\Rightarrow$ 需要在低温下运行
 - 硅微条传感器低温下产生碎裂现象



DRD3 半导体探测器国际合作组



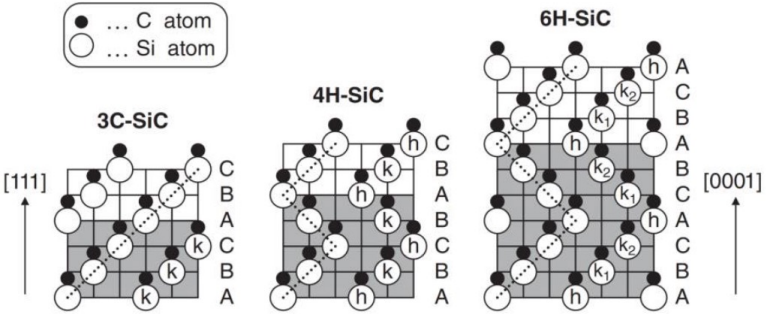
8 个研究方向

1. 集成式硅探测技术
2. 复合式硅探测技术
3. 辐射损伤与强辐照环境
4. 半导体探测器仿真
5. 测试技术与设施
6. 宽禁带与新型传感器材料
7. 键合与器件制做
8. 宣传与推广

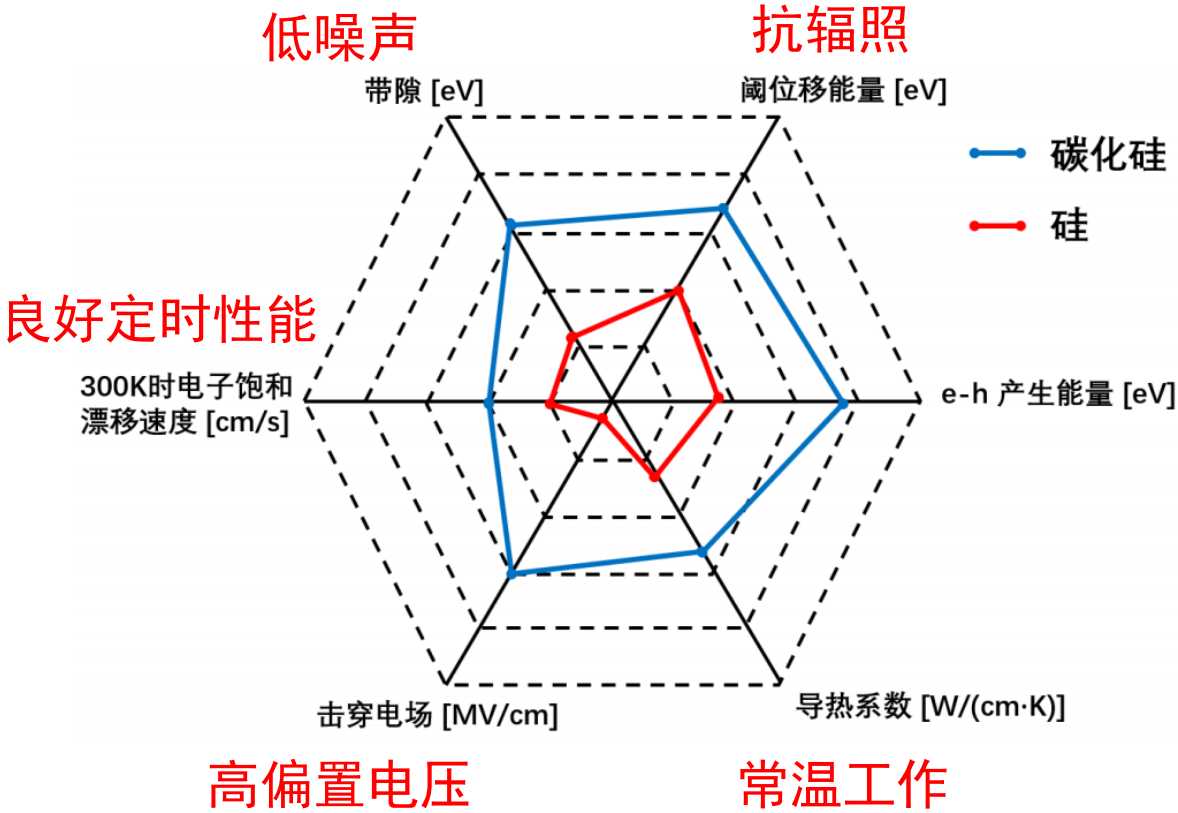
- 140 多个单位
- 570 多位成员

- <https://drd3.web.cern.ch>

碳化硅作为粒子探测器的潜力

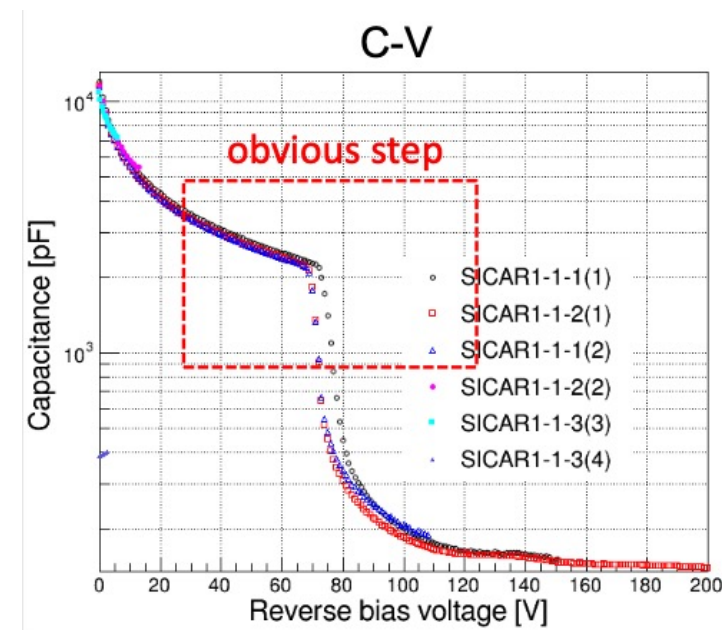
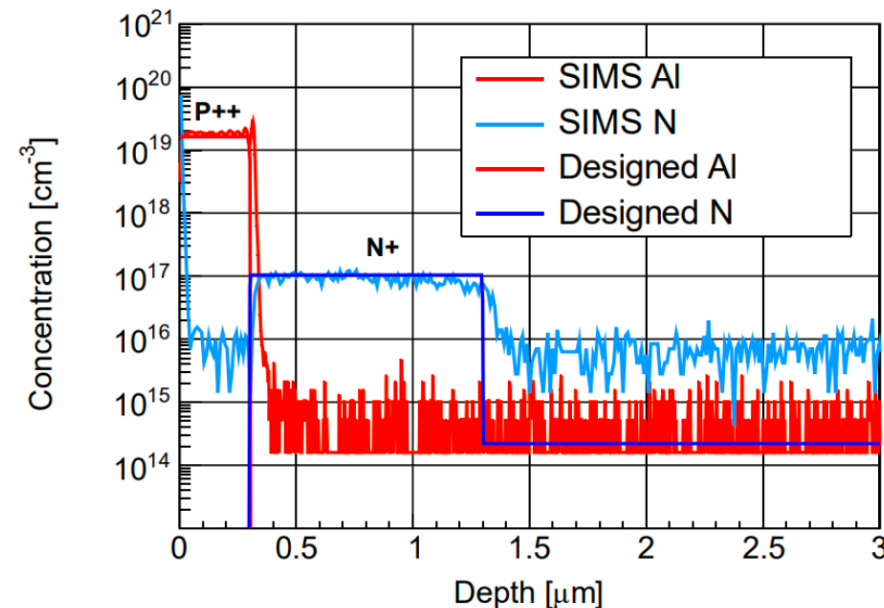
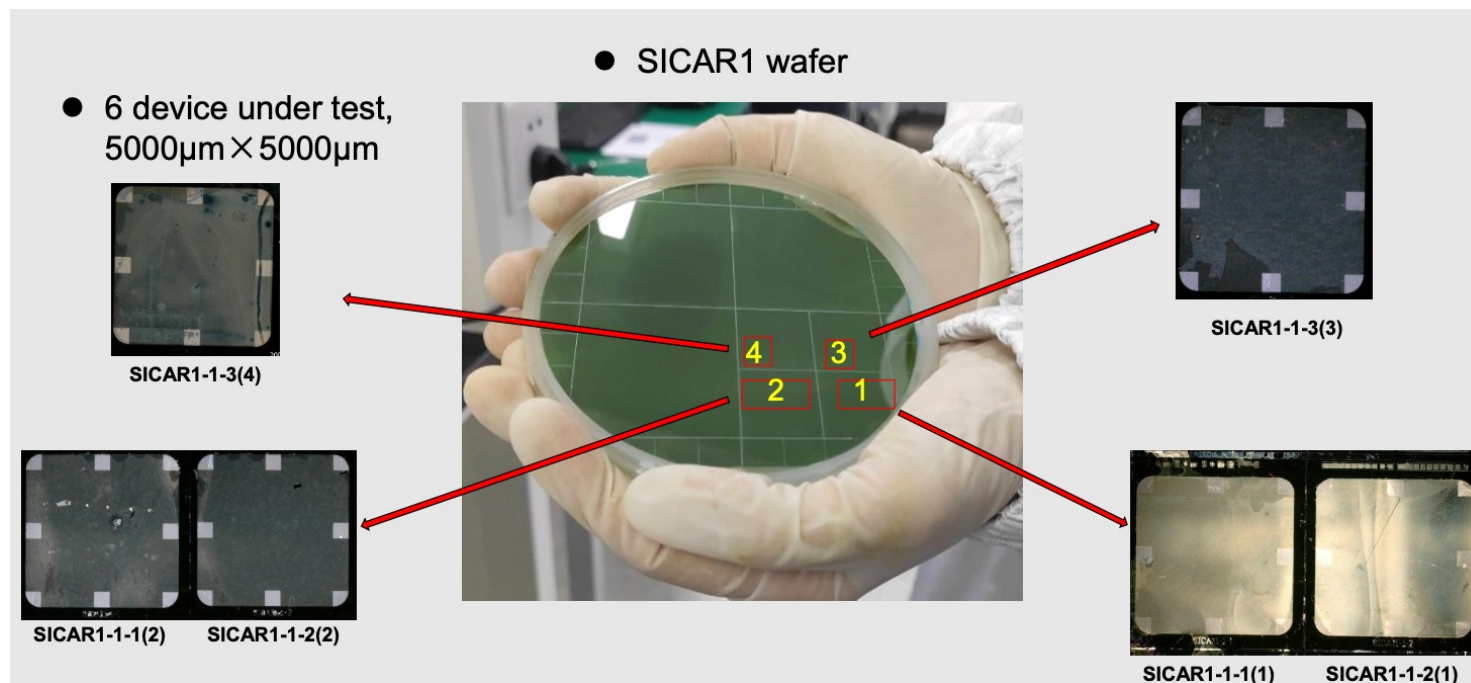


物理量	硅	碳化硅
禁带宽度 [eV]	1.12	3.26
热导率 [W/K cm]	1.5	4.9
击穿电场 [MV/cm]	0.3	2.0
原子位移阈能 [eV]	13	22
平均电离能 [eV/e-h]	3.6	7.8
电子饱和漂移速度 [cm/s]	1e7	2e7
空穴饱和漂移速度 [cm/s]	0.6e7	1.8e7

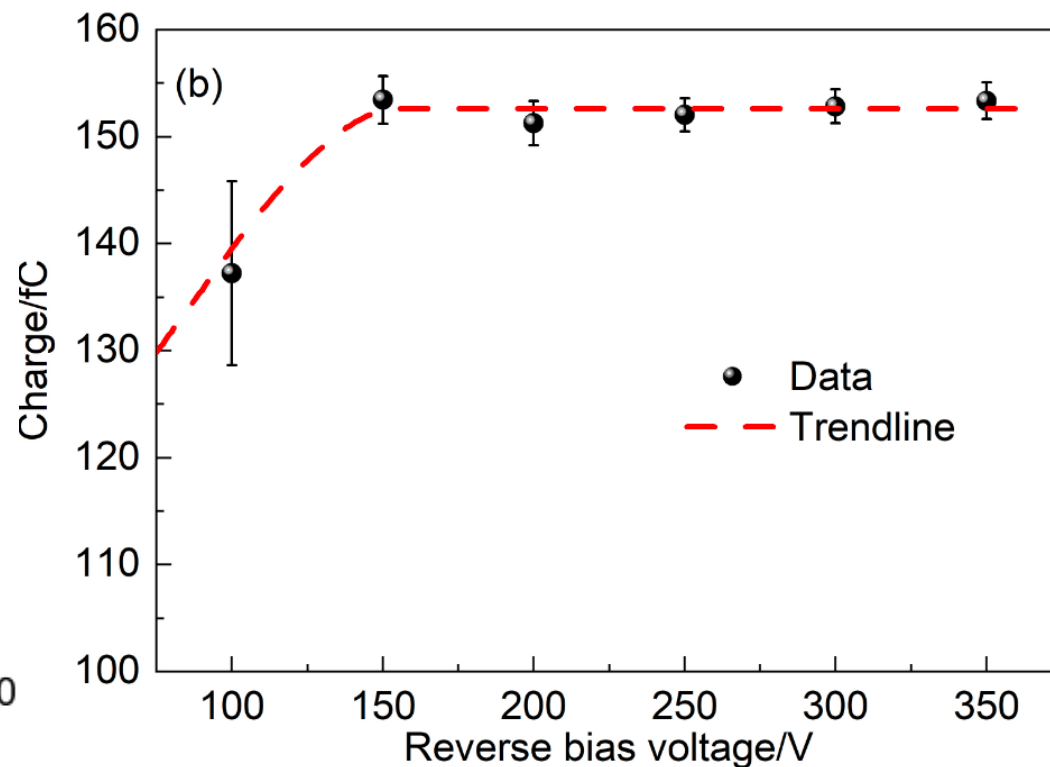
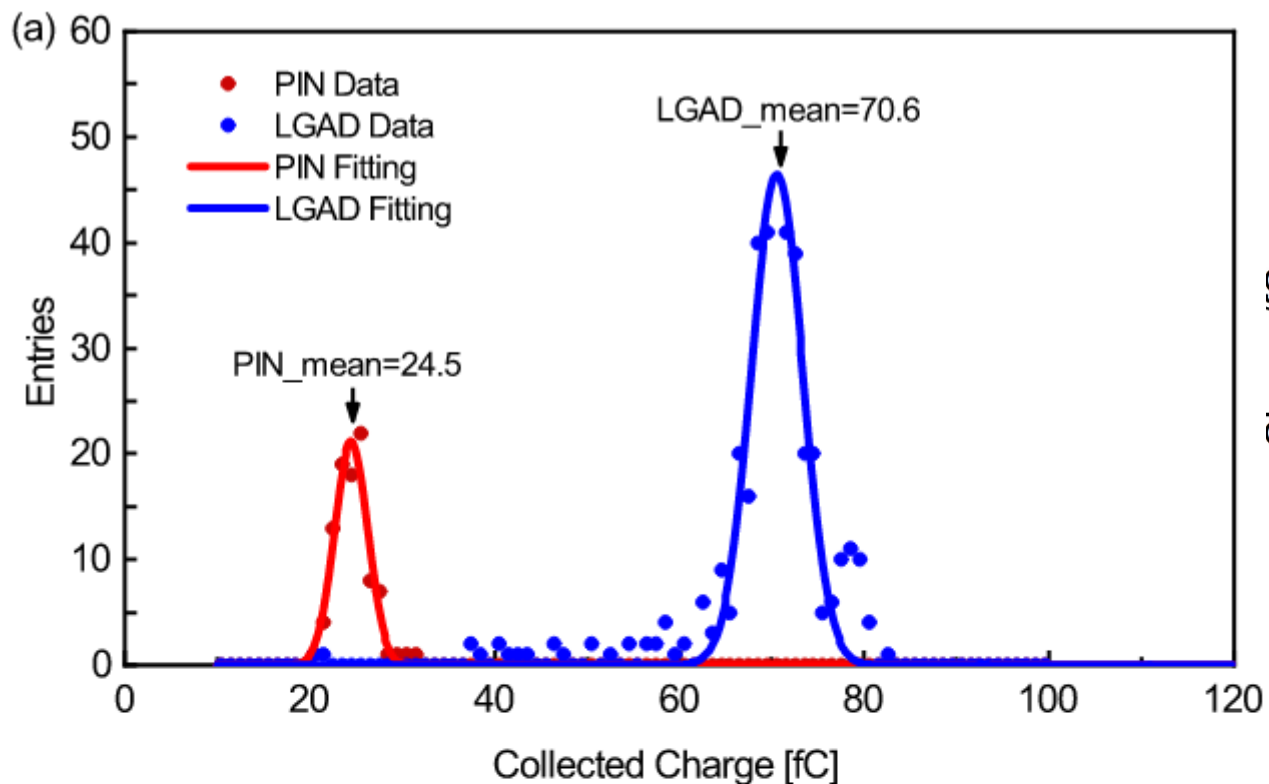
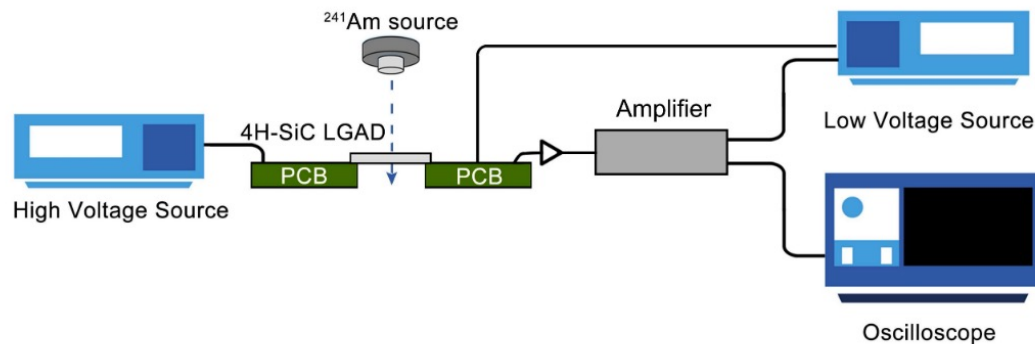


SICAR1 – 外延片与加工工艺

- 研制碳化硅低增益快时间探测器SICAR
 - 第一版初步结果显示增益层结构



SICAR1 – α 源测试



- 电荷收集量相比 PIN 明显增大

- 150V~ 350V 电荷收集趋于饱和

IEEE VOL. 71, NO. 11, 2024