



IFIT



# 质子束流强度测量检测系统

史欣<sup>1</sup> 肖素玉<sup>2</sup> 何野<sup>3</sup>

1 中国科学院高能物理研究所

2 山东高等技术研究院

3 南京大学

2023-10-19

# 质子束流强测量需求

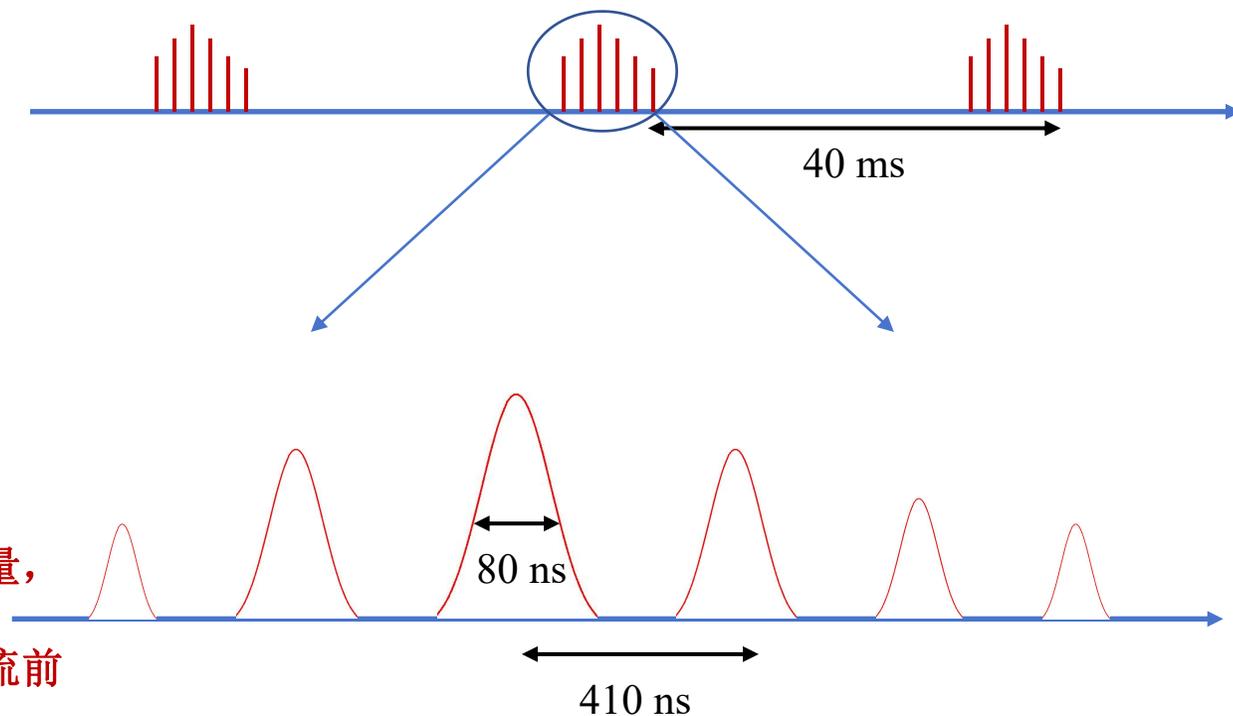
## ◆ 高能质子束线引出参数

- ✓ 质子能量: 0.8~1.6 GeV
- ✓ 束流脉冲宽度: 80ns
- ✓ 脉冲重复频率: 410ns
- ✓ 束斑尺寸: 大束斑 $>\phi 100\text{mm}$
- ✓ 束流引出阶段单个脉冲束流粒子个数: 1-10000

## ◆ 流强探测器测量需求

- ✓ 调试阶段给出单个脉冲内束流粒子个数
- ✓ 高效率, 快响应
- ✓ 探测器信号幅度满足: 0.3mip~10000mip

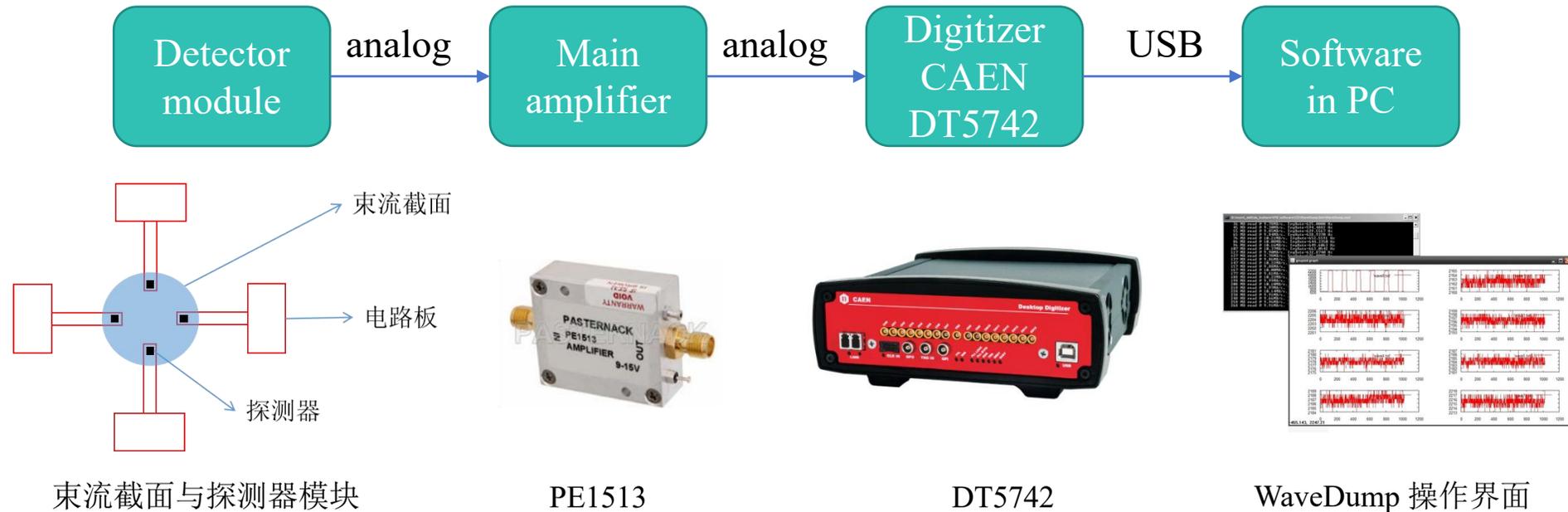
1. 脉冲束, 无法进行计数测量, 通过重建沉积能量, 反推出计数
2. 重复频率快, 难以采用电荷积分读出, 采用电流前放, 通过波形采样进行读出
3. 要达到约30000倍的动态范围



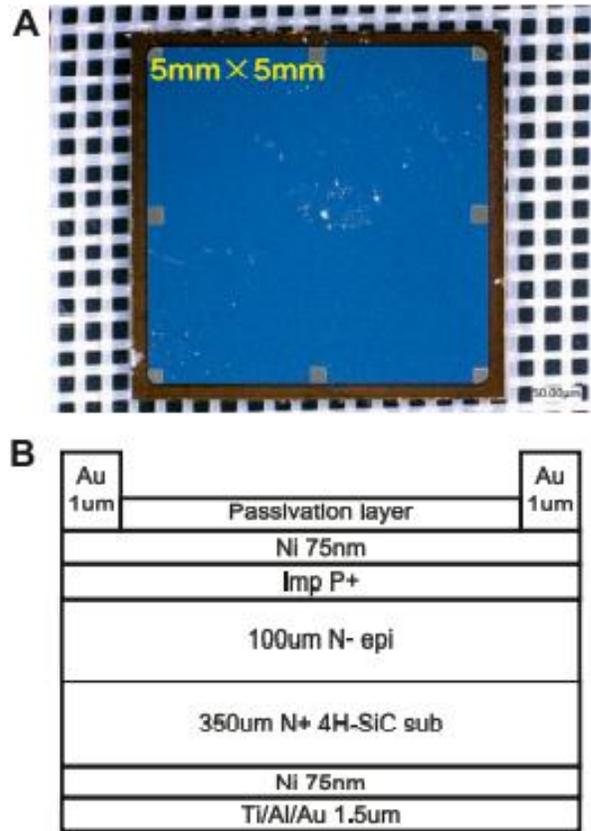
束流引出阶段脉冲时间结构

# 基于CAEN DT5742的读出方案

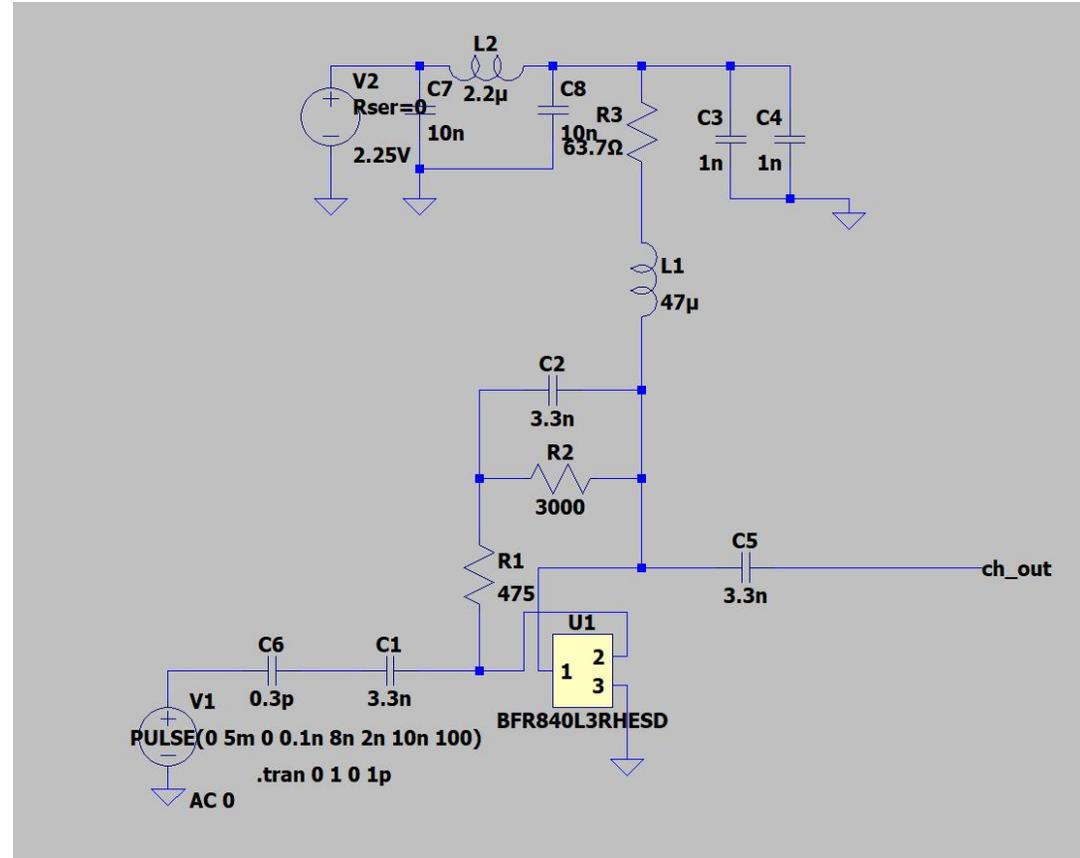
- 标定SiC探测器的质子数与响应电流或电荷量的线性关系区间
  - 束流的能量 --> 计算束流沉积的能量
  - 探测器收集电荷的效率 --> 收集的e-h
  - 辐照对收集效率的影响



# 探测器与读出电路

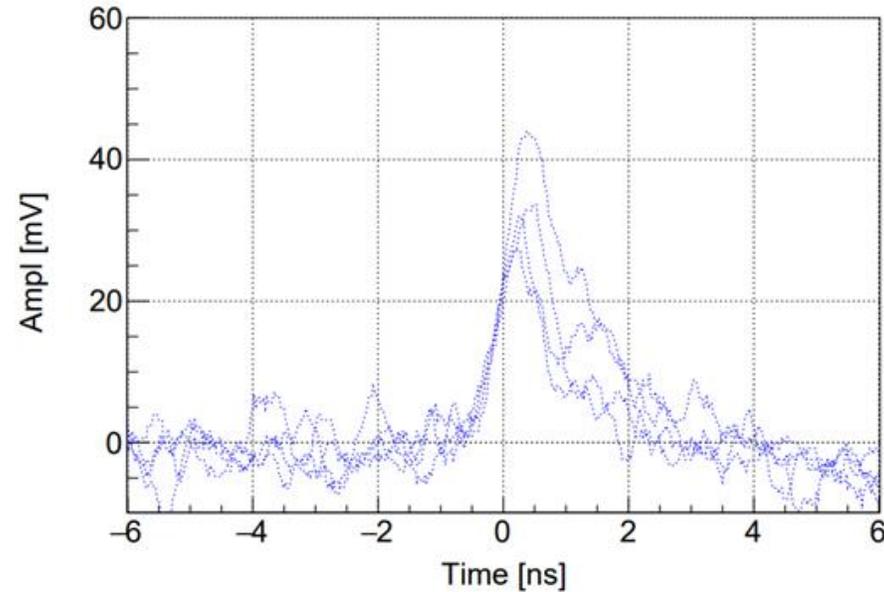


南京大学生产的SiC探测器与截面示意图



UCSC电路板电路图

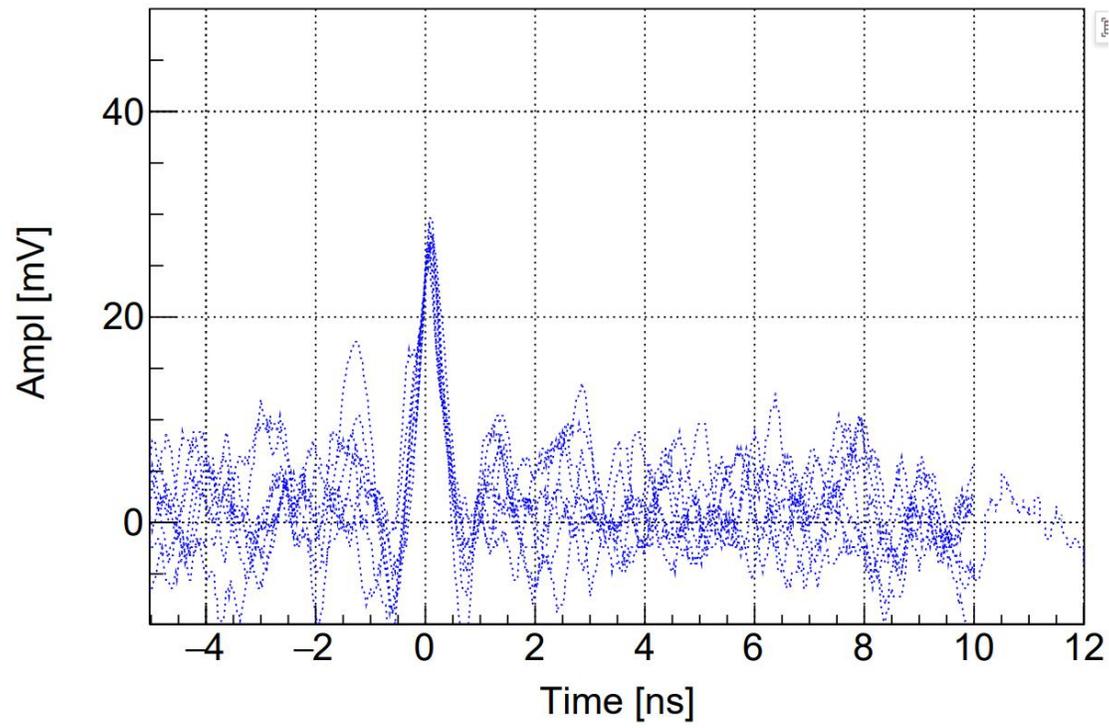
# 宇宙线验证探测器模块性能



- 触发22mV，理论计算15事例/小时
- 事例率~1事例/小时，探测效率~6.7%
- 探测器模块上的电子学针对收集电荷 $>4\text{fC}$ 的情况，对于 $>0.9\text{fC}$ 的需求需要进一步改进



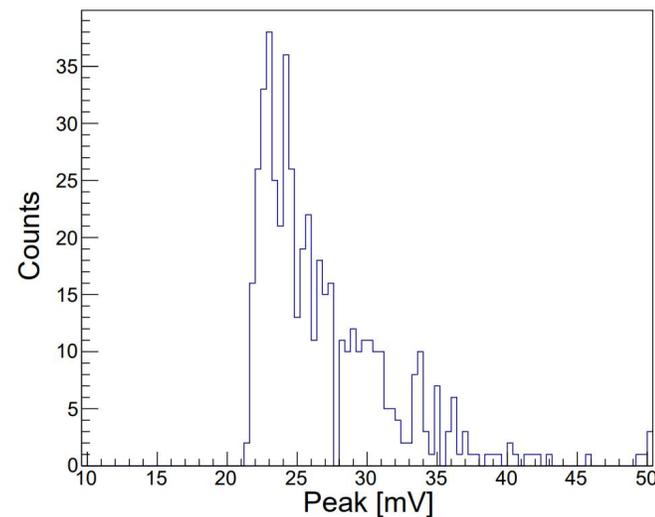
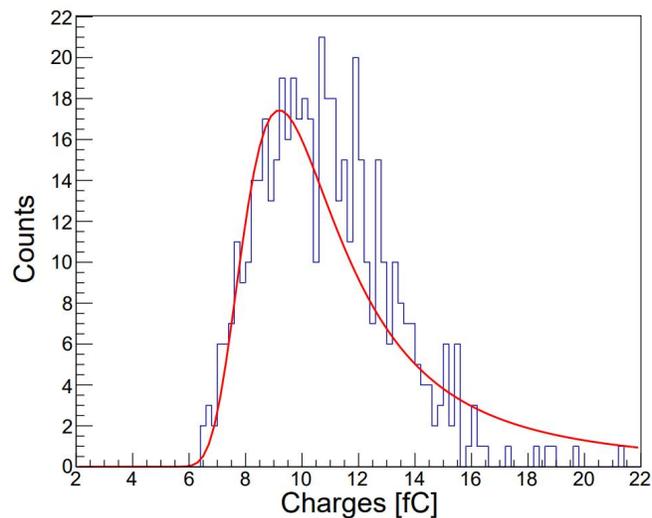
# $^{90}\text{Sr}$ 源测试



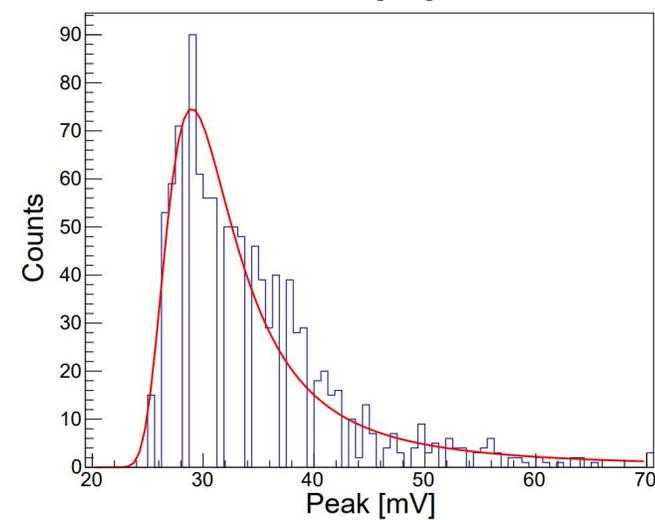
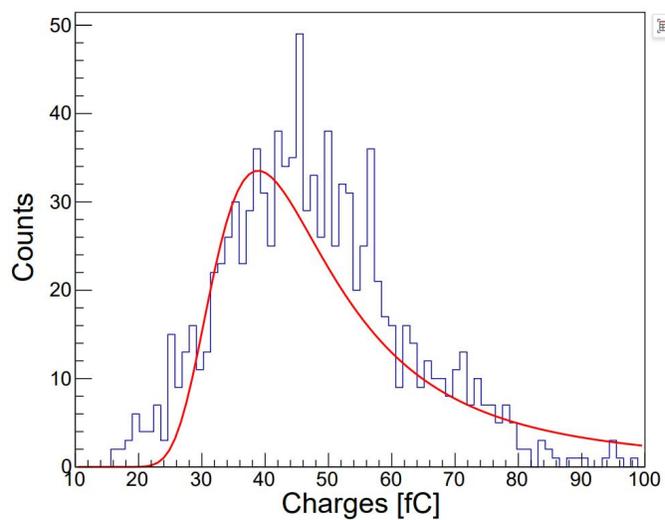
使用UCSC电路板采集到的波形

# UCSC电路板R1对信号的影响( $^{90}\text{Sr}$ 源)

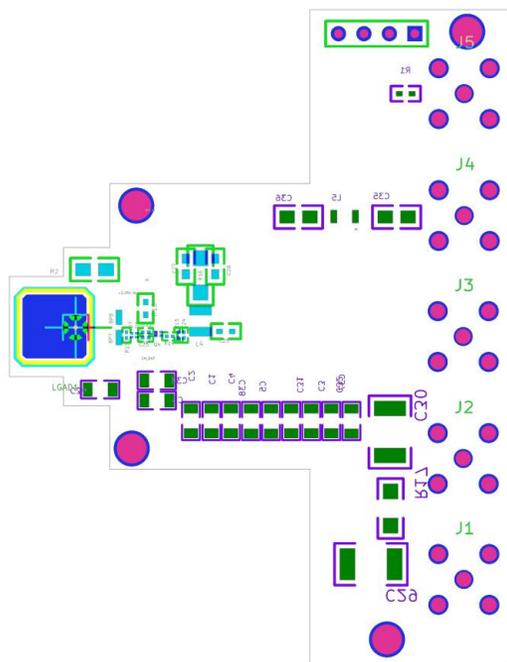
R1=475 $\Omega$ :



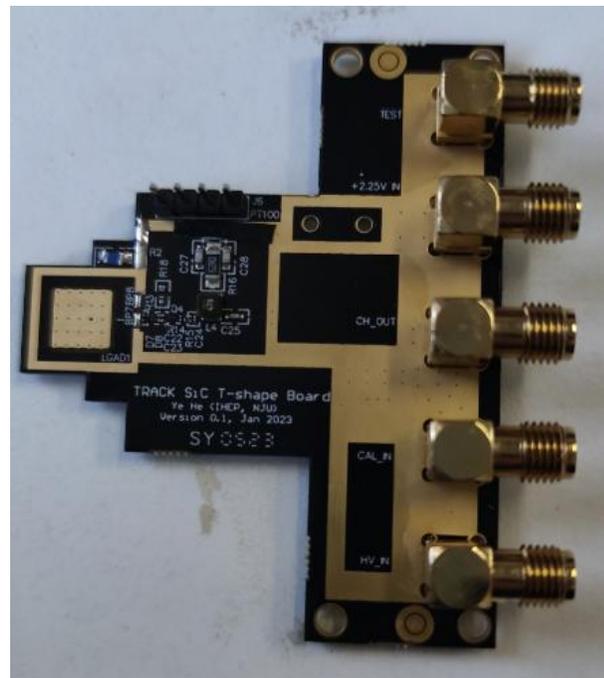
R1=4000 $\Omega$ :



# 读出板设计与加工



读出板设计图



读出板实物图

- 基于前面的模拟与测试结果，将UCSC电路板R1的值改为4000Ω，重新布板生产T型电路板。

# 机械设计

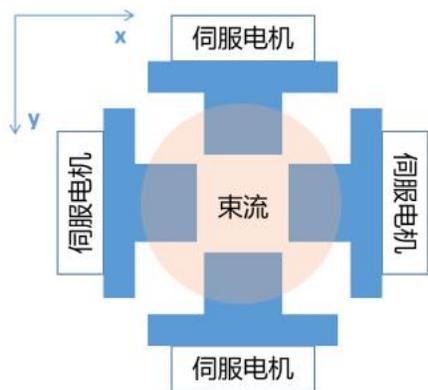
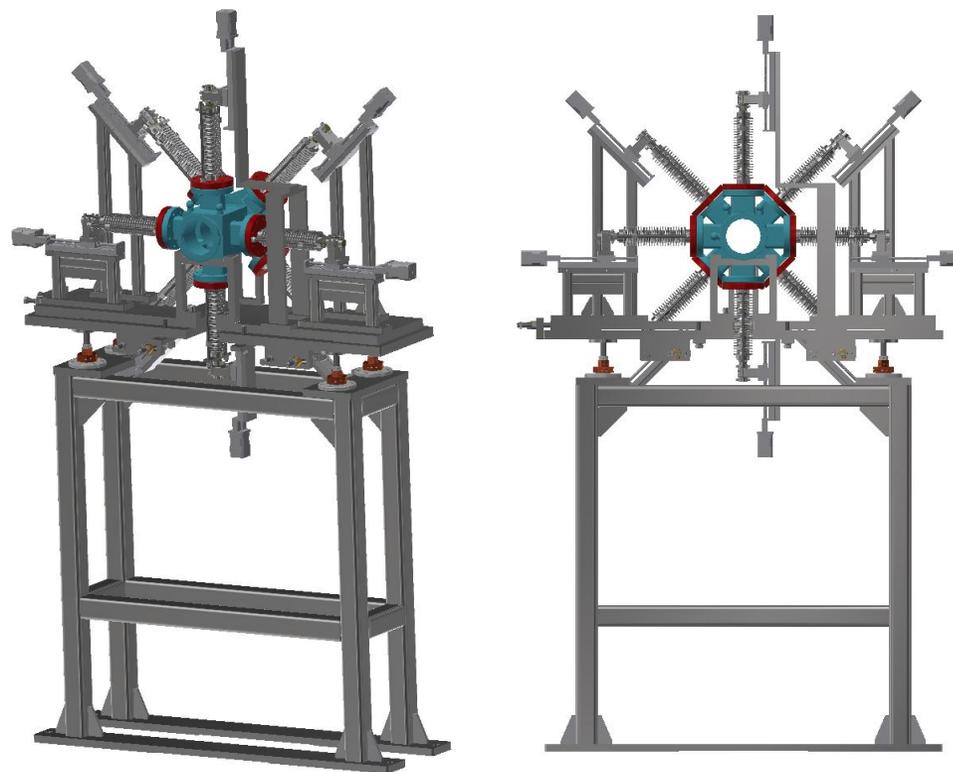


图 1 束流监测平面 1



图 2 束流监测平面 2

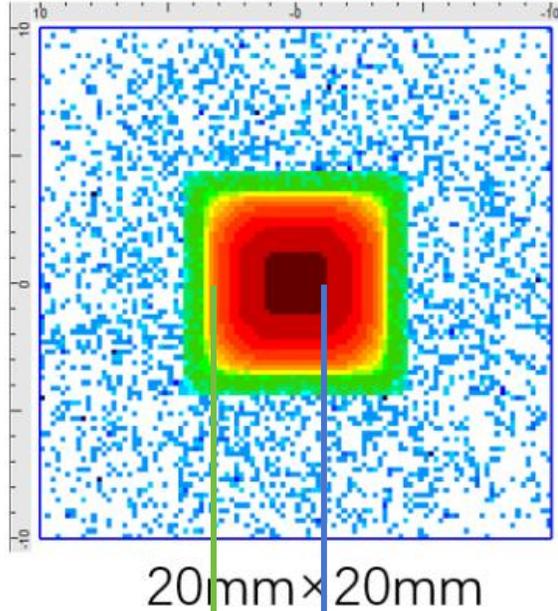
束流截面探测器与电路板位置示意



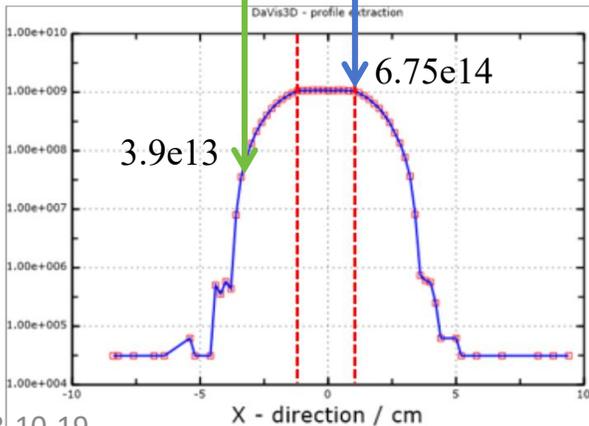
设备初步三维结构模型

- 感谢聂老师协助设计三维结构模型。

# 辐照剂量估算 -- 平均分布



20mm×20mm



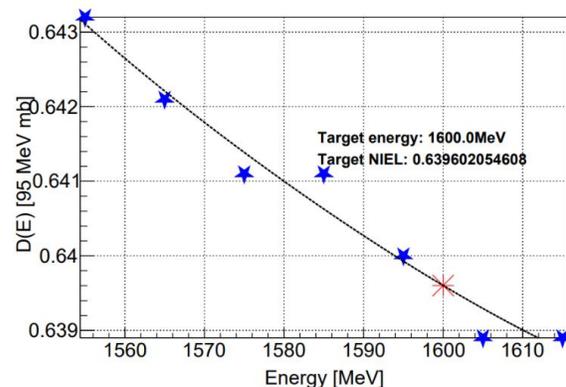
Q5 出口处质子流强	2.35E8 p/s	微脉冲频率~2445 Hz, 宏脉冲 25Hz
------------	------------	-------------------------

$$2.35e8 * 5000 * 3600 * 0.6396 = 2.7e15$$

- 假设所有粒子都分布在2cm\*2cm（深红）区域内，最大辐照量 $2.7e15 / (2cm * 2cm) = 6.75e14$
- 计划将探测器放置在黄色环形内测（距束流中心~3cm），预计辐照量约为**3.9e13**

# 辐照剂量

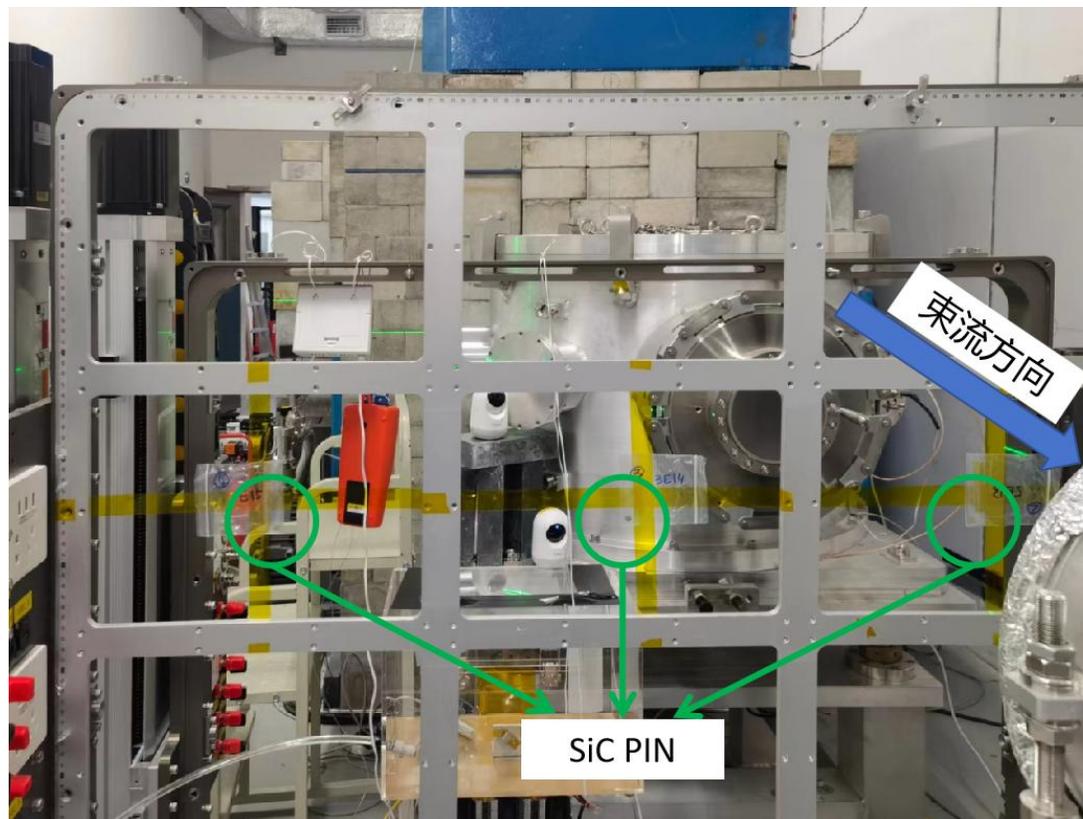
- 80MeV质子束流，电流13.5uA，束斑20mm\*20mm



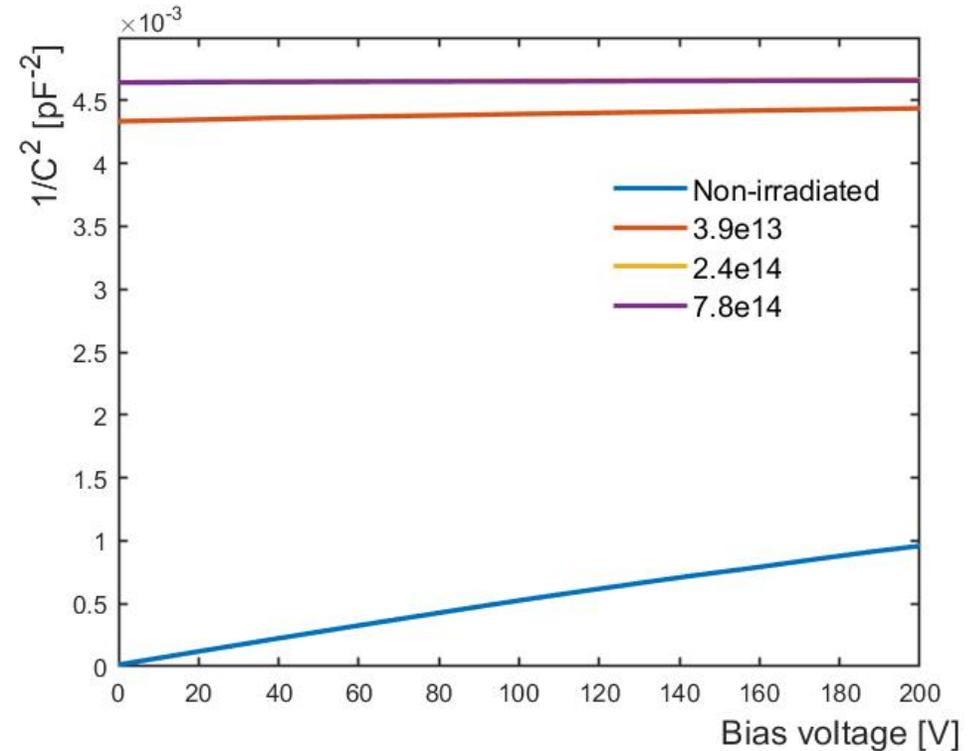
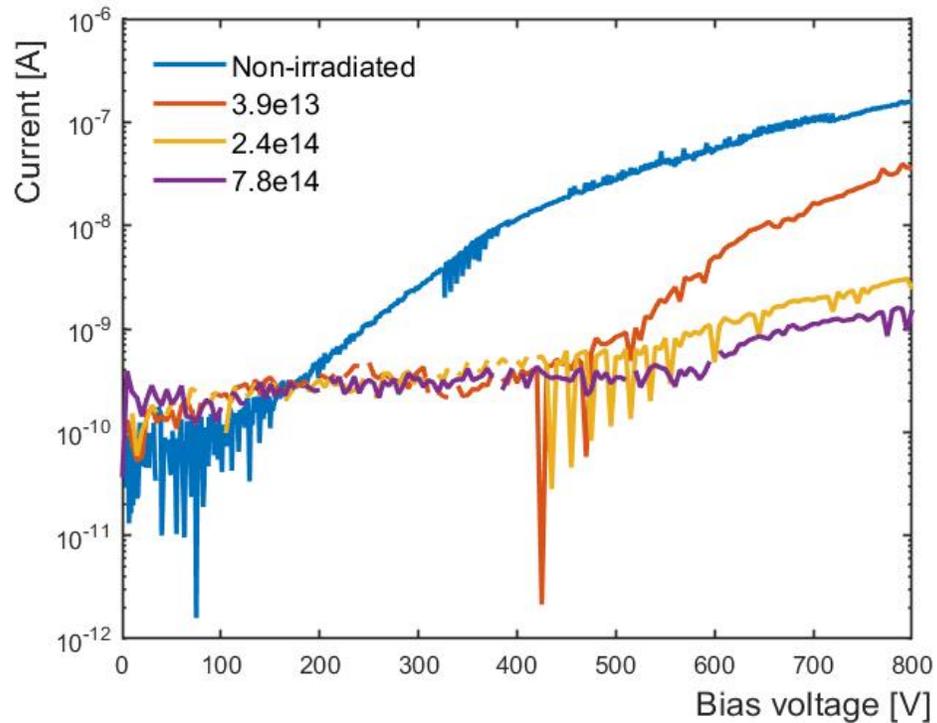
目标注量	10uA	13.5uA	等效中子系数	空气影响	辐照时长	实际注量
5e13	3.4e9	4.59e9	1.427	2.66/3.4 =0.78	2h7m10s	<b>3.9e13</b>
3e14					12h43m20s	<b>2.3e14</b>
1e15					1d18h30m	<b>7.8e14</b>

- 2022年11月进行的辐照测试，实际受到的辐照剂量3.9e13到7.8e14。

# 质子辐照实验设备

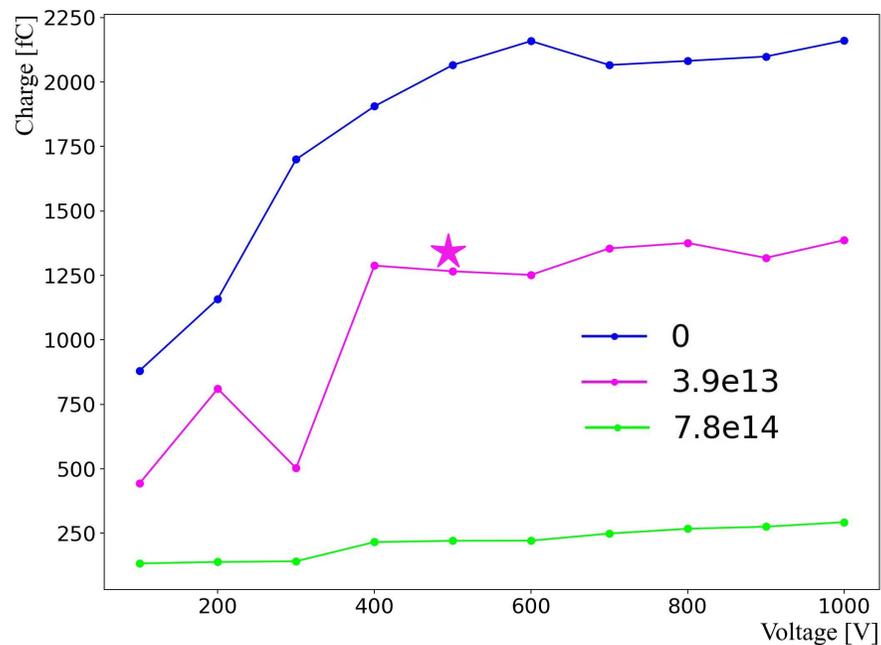


# IV&CV曲线

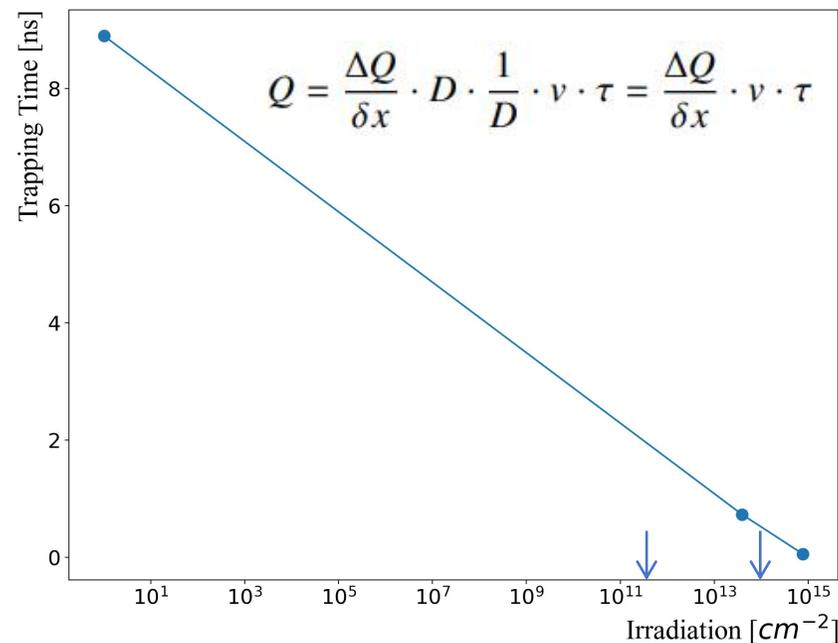


- 辐照后暗电流在低压时更高，高压时更低；辐照剂量越大，高压时的暗电流越低。
- 辐照后电容减小， $1/C^2$ 增大，变化趋势减小。

# 电荷收集 355nm激光源



Charge collection after irradiation



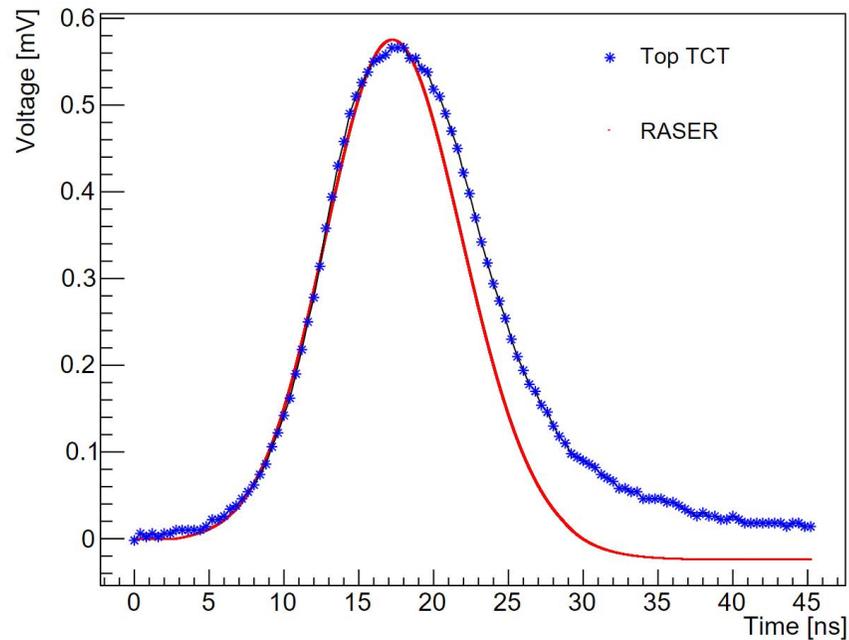
Trapping time estimated from charge collection

- SiC探测器放置位置附近，一年累计辐照量~**3.9e13**，收集电荷**>60%**。
- 估算俘获时间，俘获时间与辐照剂量有良好的线性关系。

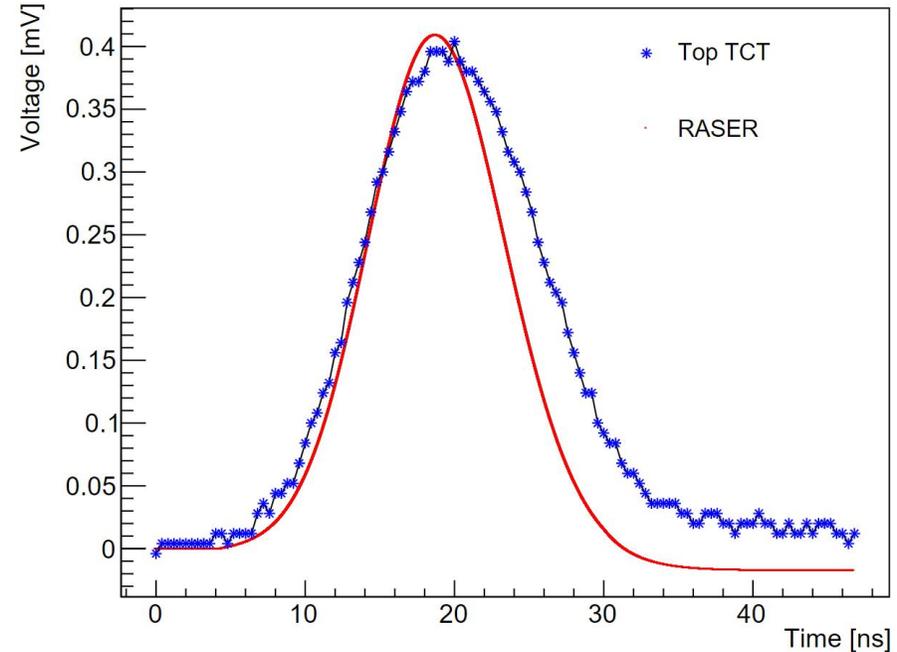
# RASER模拟

- 根据收集电荷估算载流子俘获时间，将俘获时间加入模拟，可用于电流的估算：

$$I_{e,h}(t) = Ae_0N_{e,h} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{eff},e,h}}\right) \vec{v}_{e,h}(t) \cdot \vec{E}_w$$



Waveform and RASER simulation

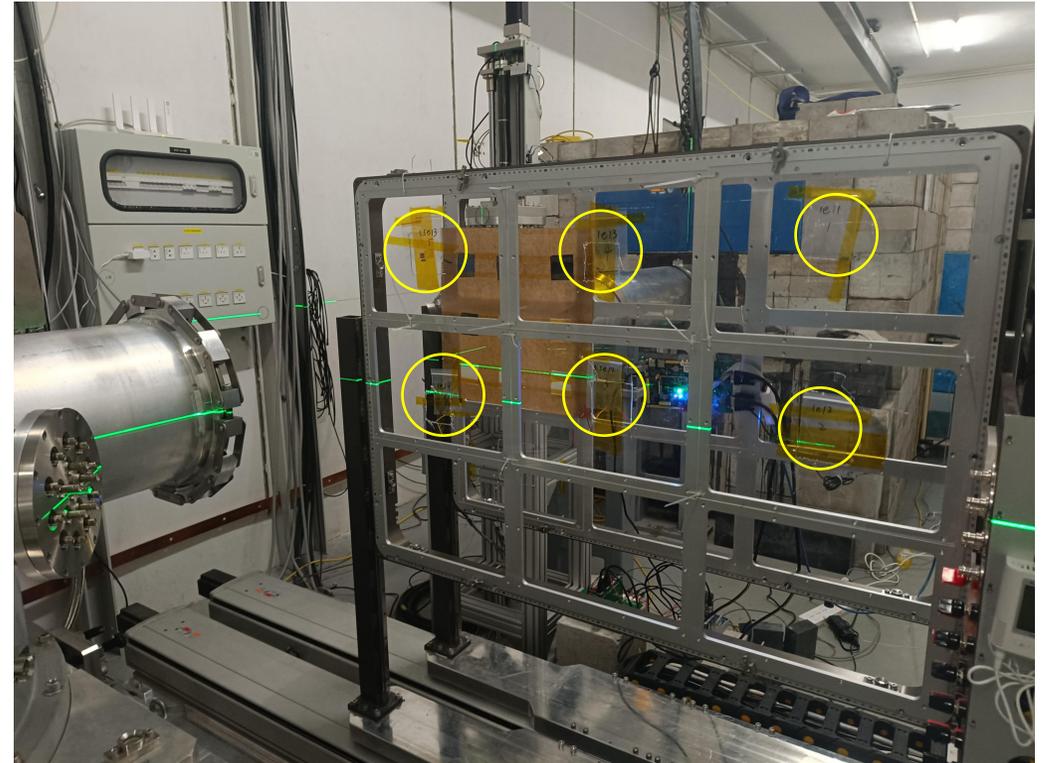


Waveform after 3.9e13 irradiation

# 2023年6月补充辐照点

- 辐照样品： $1.5 \times 1.5\text{mm}$  NJU-PIN
- 质子束流能量：80MeV
- 束斑大小： $20 \times 20\text{mm}$
- 实测束流强度： $15\mu\text{A}$

样品编号	辐照剂量( $n_{eq}/\text{cm}^2$ )	质子通量( $p/\text{cm}^2$ )	辐照时间(s)	
1	$2 \times 10^{11}$	$1.407 \times 10^{11}$	35.27	35.27s
2	$1 \times 10^{12}$	$7.037 \times 10^{11}$	176.37	2min56.4s
3	$3.5 \times 10^{12}$	$2.463 \times 10^{12}$	617.31	10min17.3s
4	$1 \times 10^{13}$	$7.037 \times 10^{12}$	1763.73	29min23.7s
5	$3.5 \times 10^{13}$	$2.463 \times 10^{13}$	6173.1	1h42min53.1s
6	$1 \times 10^{14}$	$7.037 \times 10^{13}$	17637.3	4h53min57.3s



# 总结

- ✓ SiC性能估算能达到束流探测的要求，读出电路整体符合项目需求
- ✓ 实验与模拟出SiC探测器在辐照后的表现，确定辐照修正方法
- 读出电路板需要优化，更换板材
- 讨论检测系统的机械结构
- 与加速器控制部分的联调