



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

# 碳化硅探测器俘获时间与辐照效应的影响研究

肖素玉 on behalf of RASER team\*

山东高等技术研究院

第二十一届全国核电子学与核探测技术学术年会（恩施）

2023年8月10日

[suyu.xiao@iat.cn](mailto:suyu.xiao@iat.cn)

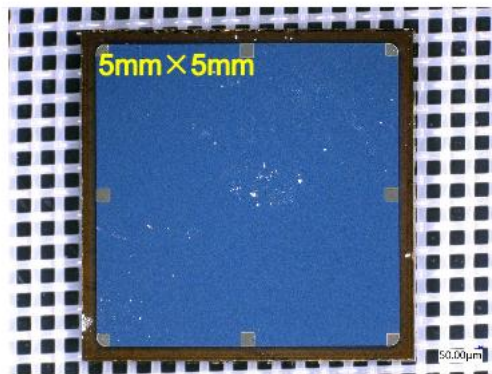
\* <https://raser.team>

# Outline

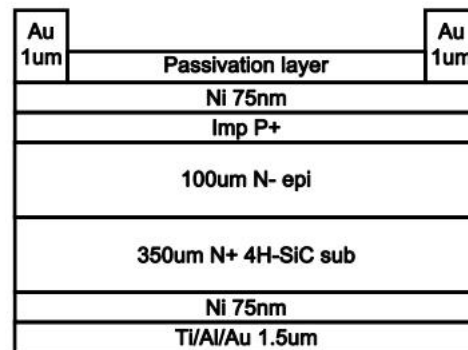
---

- SiC探测器的Top-TCT测试
- 俘获时间估算与RASER仿真模拟
- SiC探测器辐照效应
- 总结与计划

# SiC探测器



SiC PIN



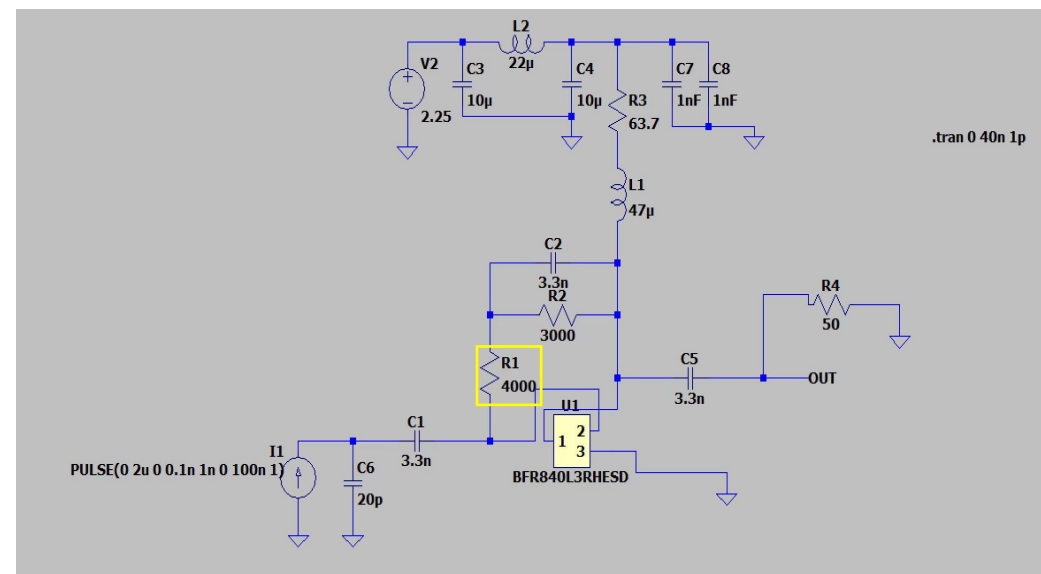
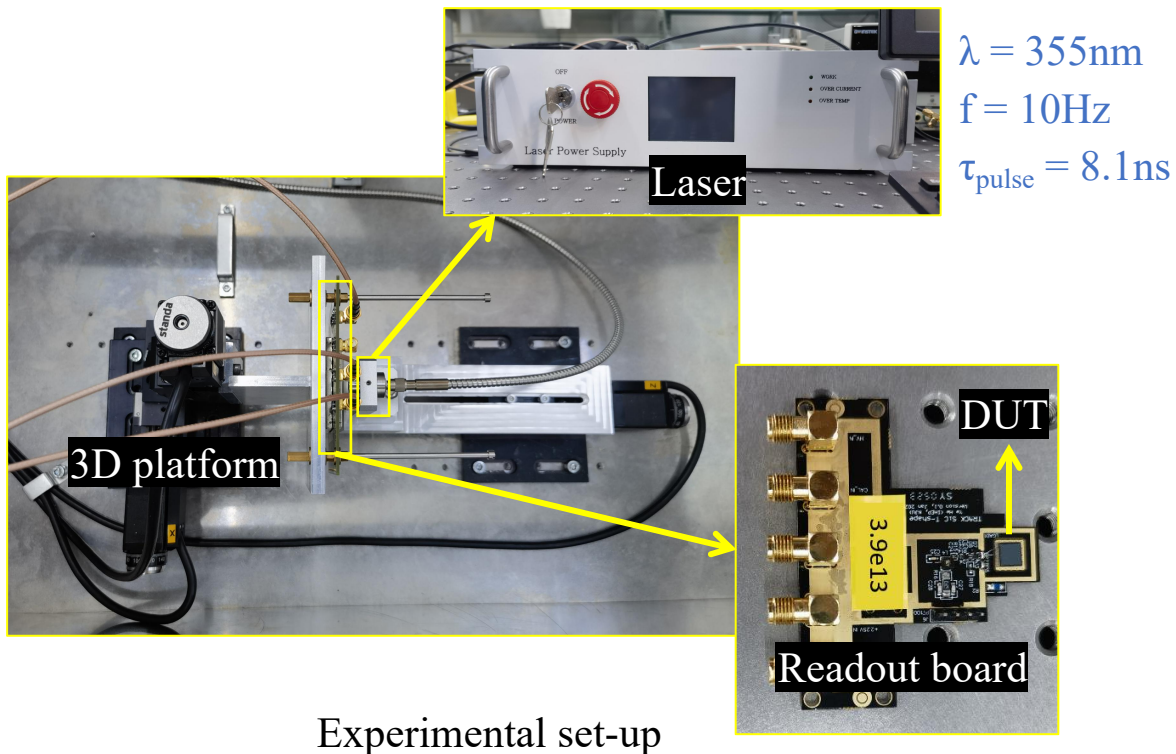
Cross section of PIN

- 5mm × 5mm SiC PIN, 由南京大学提供
- 外延层100μm, 基底350μm
- $N_{\text{eff}} = 5.2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ,  $V_{\text{dep}} = 484 \text{V}$

$$N_{\text{eff}} = \frac{2}{q\epsilon A^2 d(1/C^2)/dV} \quad V_{\text{dep}} = \frac{q|N_{\text{eff}}|d^2}{2\epsilon}$$

相关文献: Time Resolution of the 4H-SiC PIN Detector <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.718071>

# 实验装置与读出



Circuit diagram of readout

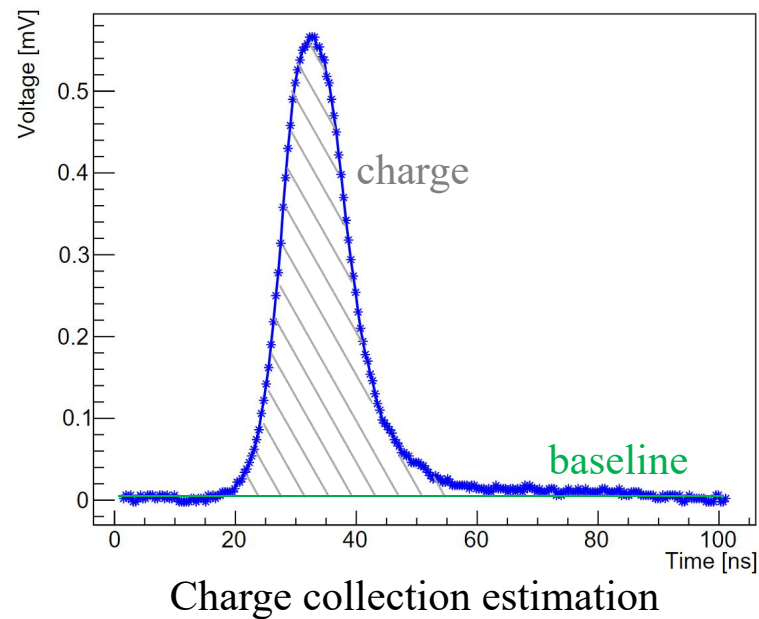
- 使用355nm激光，用于碳化硅探测器top-TCT测试
- 根据UCSC读出版图设计与LTSpice模拟，修改R1的阻值为4000Ω

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Main/UcscSingleChannel>

<https://indico.cern.ch/event/1132520/contributions/5149453/attachments/2556919/4406364/SiC%20for%20beam%20monitor%20system.pdf>

# 电荷收集与俘获时间

- 收集电荷计算:  $Q=I \cdot t$



- 俘获时间估算:  $Q = \frac{\Delta Q}{\delta x} \cdot D \cdot \frac{1}{D} \cdot v \cdot \tau = \frac{\Delta Q}{\delta x} \cdot v \cdot \tau$

$\frac{\Delta Q}{\delta x}$ : 单位长度电荷

$v$ : 载流子移动速率

- RASER (<https://pypi.org/project/raser/>) 是由RASER团队自主开发的用于平面和三维SiC PIN时间分辨的快速仿真软件

Time Resolution of the 4H-SiC PIN Detector <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.718071>

Timing Performance Simulation for 3D 4H-SiC Detector <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/1/46>

- 功能添加与优化:

- DEVSIM for IV/CV and field distribution

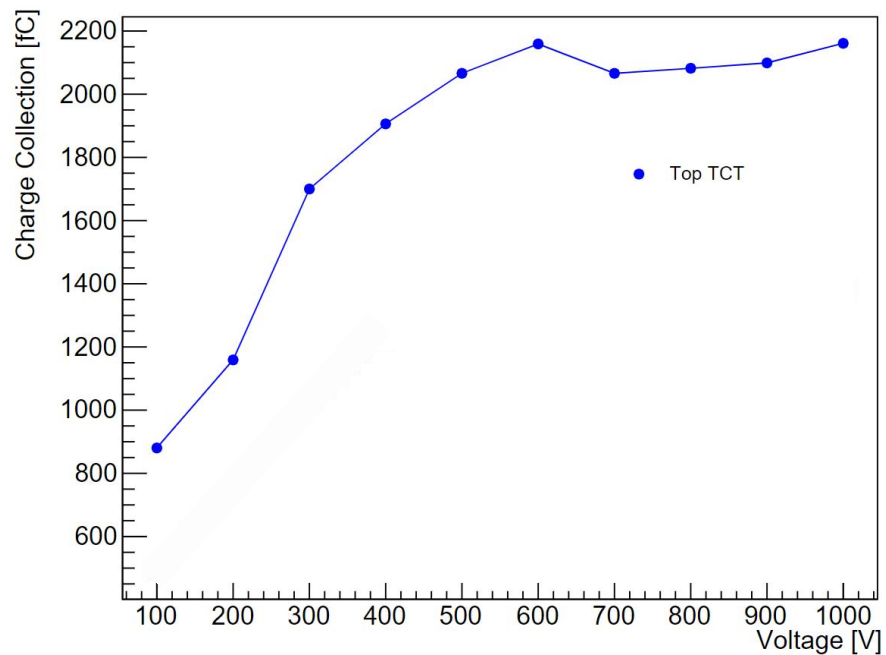
[https://indico.cern.ch/event/1132520/contributions/5149103/attachments/2556958/4406436/Xiyuan%20Zhang\\_41st\\_rd50\\_workshop.pdf](https://indico.cern.ch/event/1132520/contributions/5149103/attachments/2556958/4406436/Xiyuan%20Zhang_41st_rd50_workshop.pdf)

- 电子学读出优化

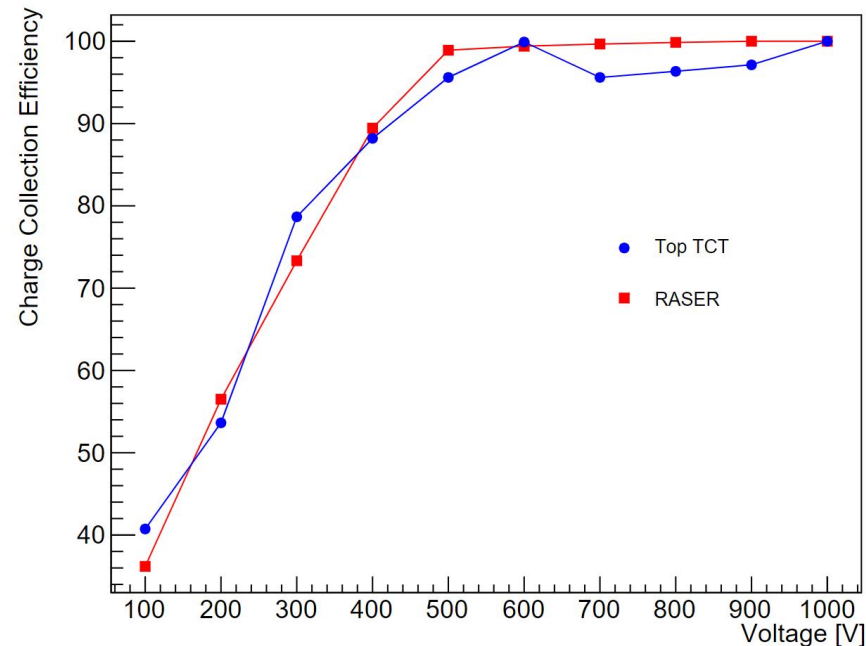
使用NGSpice模拟读出电路

- 将前置放大器电路转换为代码作为输入
- 信号模拟后的输出电压

# RASER模拟电荷收集



Charge collection by laser



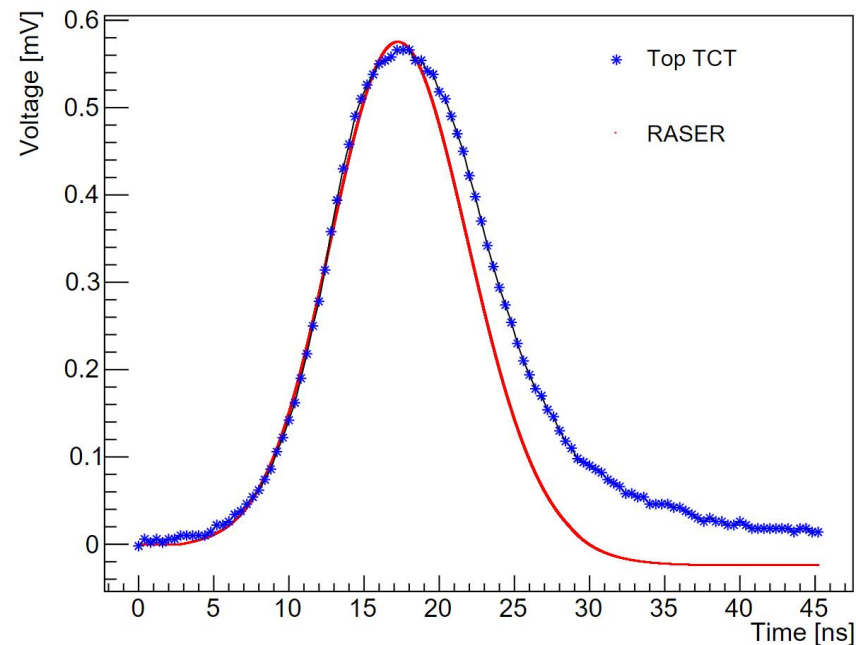
Charge collection efficiency and RASER simulation

- 单脉冲激光 $\sim 7 \times 10^{-9}$ J, 收集电荷 $\sim 21$ nC
- 电荷收集的模拟结果与测试一致。 $V_{\text{dep}} = 484$ V

# 波形比较

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

俘获时间对感应信号的贡献



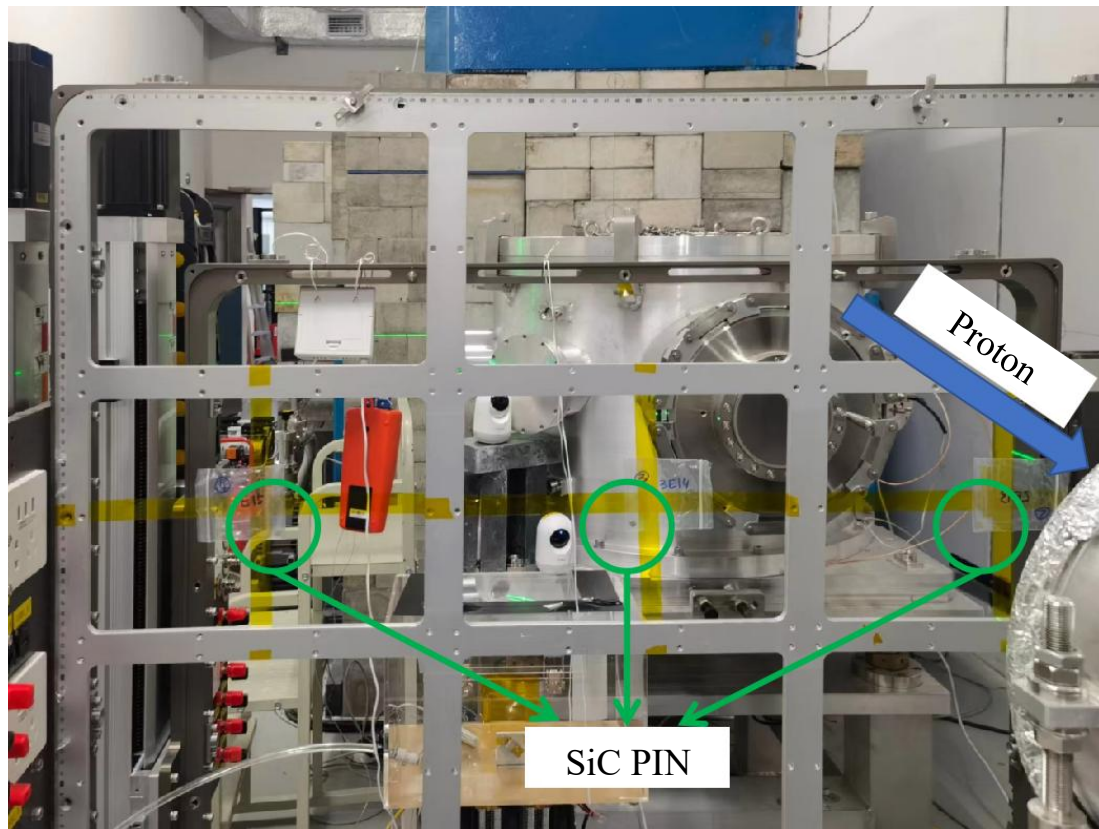
Waveform and RASER simulation

- 在模拟中加入俘获时间，波形趋势一致。
- 波形下降沿尾部模拟结果与实验的差异可能是受电缆影响。



# 辐照实验

- 在中国散裂中子源完成对SiC探测器的辐照

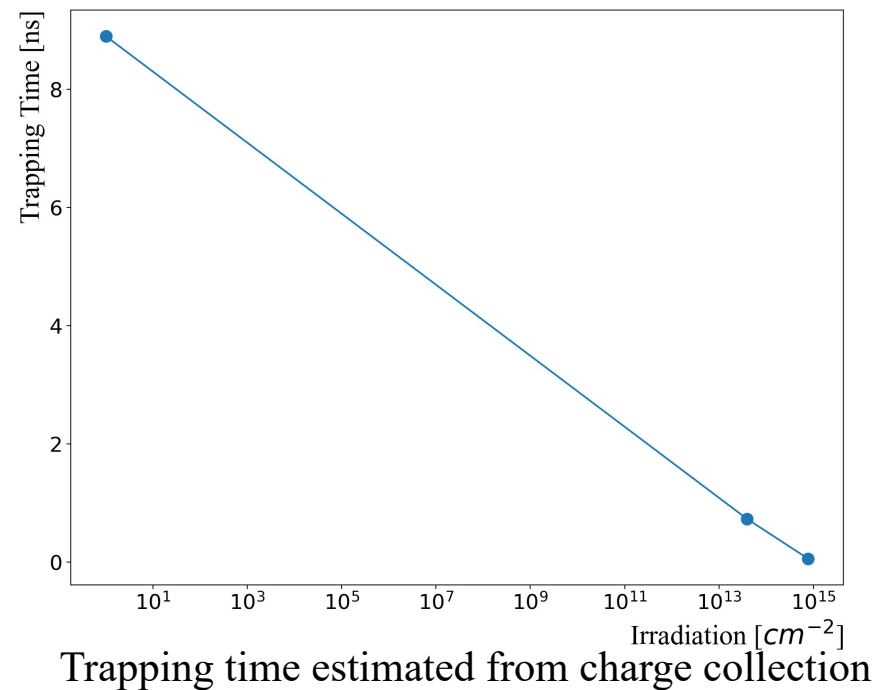
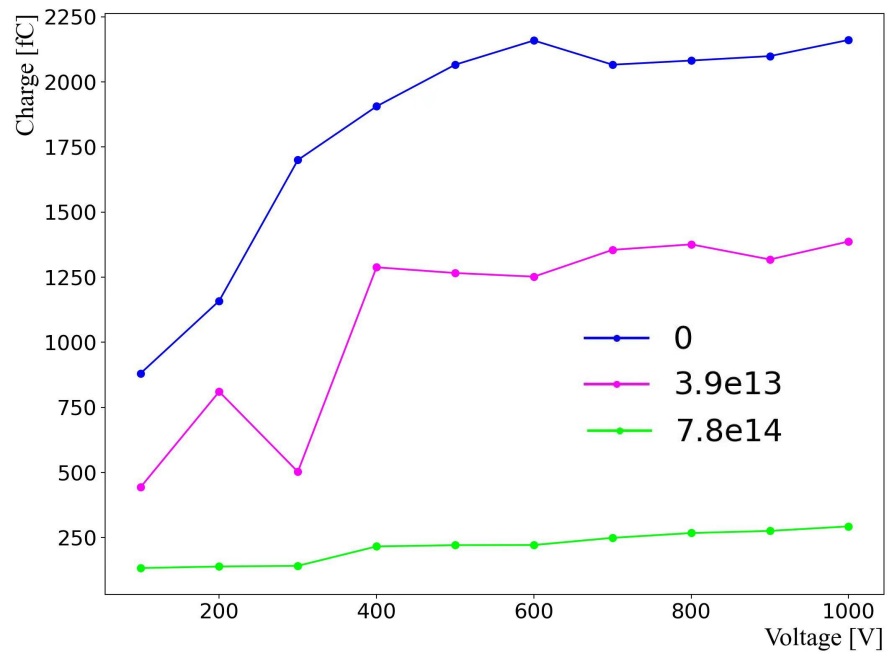


Irradiation setup

- 种类: 质子
- 能量: 80MeV
- 强度: 10mA
- 面积: 20mm × 20mm
- 剂量:  $3.9 \times 10^{13} n_{eq}/cm^2$ ,  $7.8 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$
- 未控制辐照过程的温度与湿度

# 辐照与电荷收集

- 辐照引起的缺陷使载流子在传输过程中更容易被俘获，从而影响俘获时间。

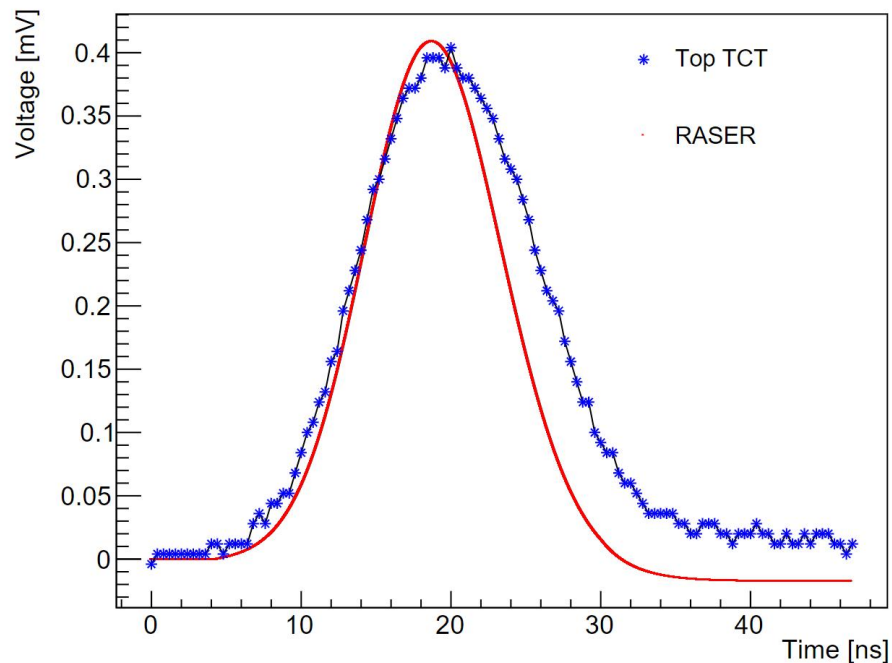


- 俘获时间与 $\log(\text{辐照剂量})$ 呈现较好的线性关系。

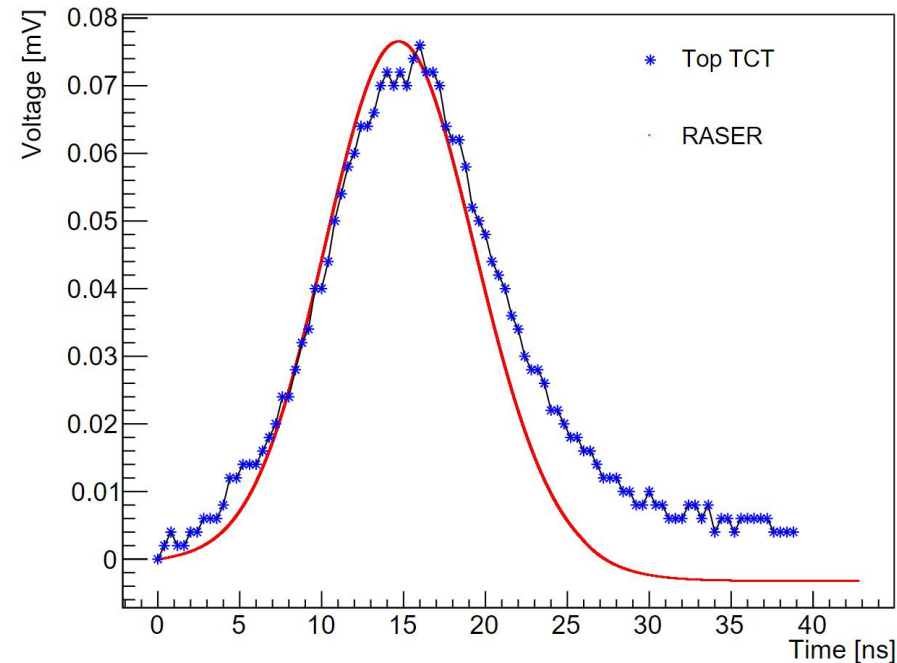
# 俘获时间与RASER模拟

- 包含俘获时间，研究辐照后的信号波形

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



Waveform after  $3.9 \times 10^{13}$  irradiation



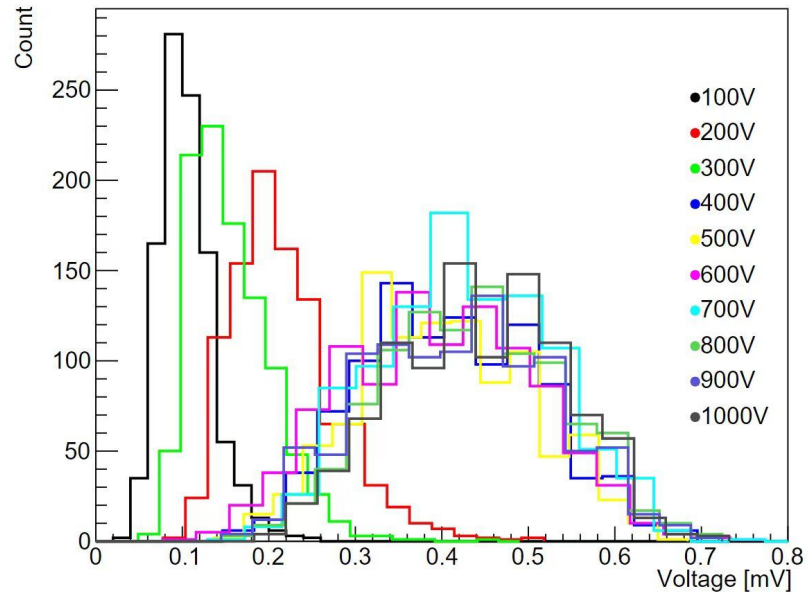
Waveform after  $7.8 \times 10^{14}$  irradiation

- 辐照后的SiC探测器RASER模拟波形与实验结果吻合较好。

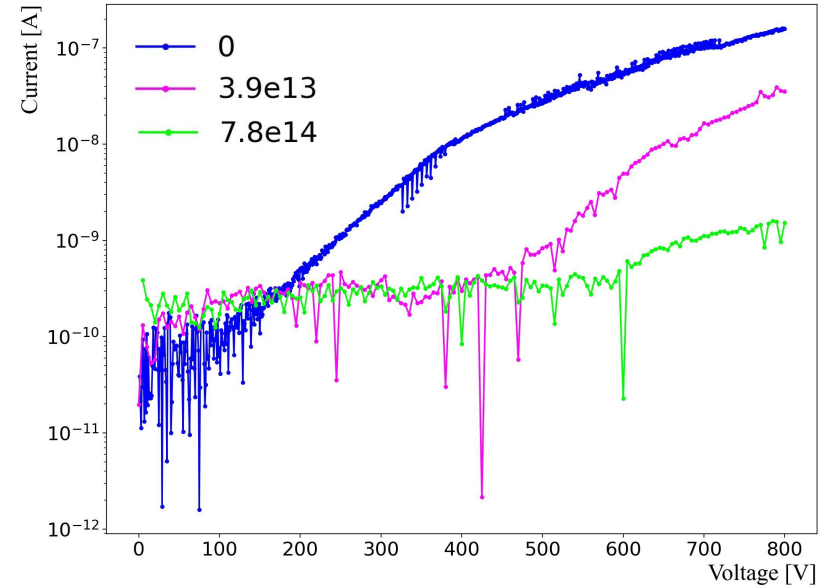
# 总结与计划

- ✓ RASER在场的计算与读出电子学方面进行了更新与优化，波形与电荷收集显示了很好的一致性。
- ✓ 俘获时间是RASER模拟的关键参量，俘获时间的大小与 $\log(\text{辐照剂量})$  呈现很好的线性关系。
  - 增加低剂量辐照点检查俘获时间与辐照剂量的线性关系， $1 \times 10^{11} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 和 $1 \times 10^{12} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 。
  - 继续优化读出电子学模拟，改善波形下降沿模拟与实验的不一致的现象
  - 结合深能级瞬态谱（DLTS）分析结果，加深对于缺陷的理解

**Thanks for your attention.**



Amplitude vs. voltage



IV curve after irradiation