

硅微条探测器的辐照模型仿真研究

李星臣¹ 肖素玉²

吉林大学¹ 山东高等技术研究院²

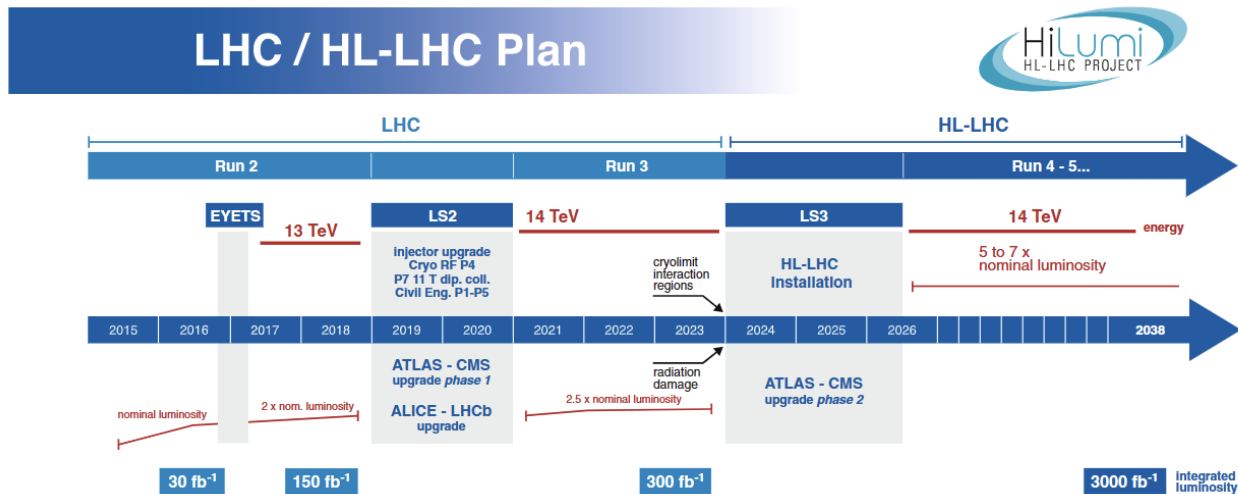
代表RASER团队*

*<https://raser.team>

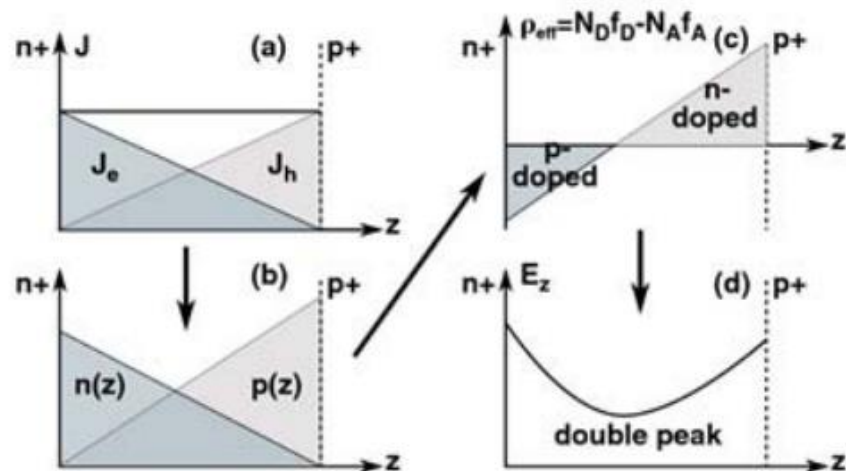


山东高等技术研究院
SHANDONG INSTITUTE
OF ADVANCED TECHNOLOGY

- 研究背景及模拟介绍
- 辐照前模拟与实验对比
- 辐照模型原理和辐照后模拟与实验对比
- 总结与展望



[A Roadmap for HEP Software and Computing R&D for the 2020s - CERN Document Server](#)

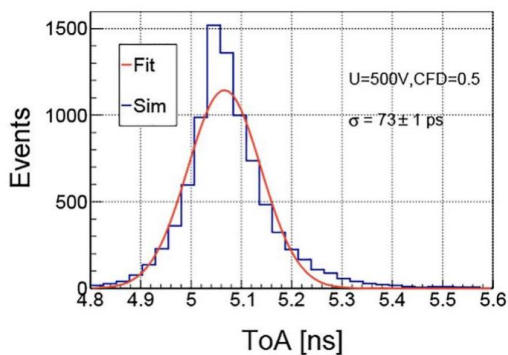


双峰电场形成原理

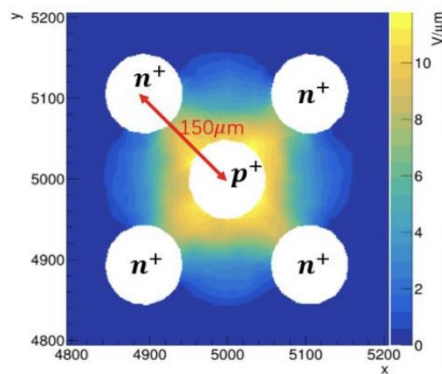
[The origin of double peak electric field distribution in heavily irradiated silicon detectors](#)

- 随着HL-LHC的计划升级，探测器将面对更高辐照剂量的挑战，目前我们对高剂量辐照下探测器的性能表现及原因了解不够深入
- 现有的研究已经在高辐照剂量下的硅探测器中观察到了双峰电场，电荷收集效率降低等现象，辐照模型可以一定程度上解释这些现象
- 本研究通过仿真验证辐照模型对探测器影响的可靠性

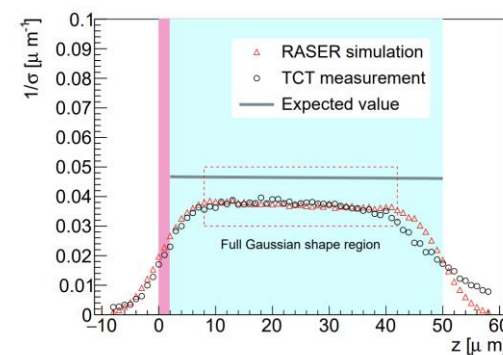
- [RASER](#)=RAdiation SEmiconductorR
- [RASER-Team](#)开发
- 基于python开发
 - GEANT4、 DEVSIM、 ROOT
- 模拟预测半导体粒子探测器的性能
 - PIN、 3D、 LGAD、 Strip、 Pixel



Time resolution of NJU 5mm × 5mm 4H-SiC-PIN

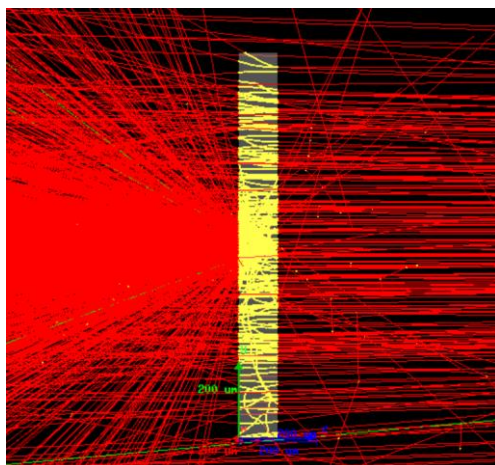


Timing Performance Simulation for SiC 3D Detector



Simulation of edge-TCT on Si Lgad

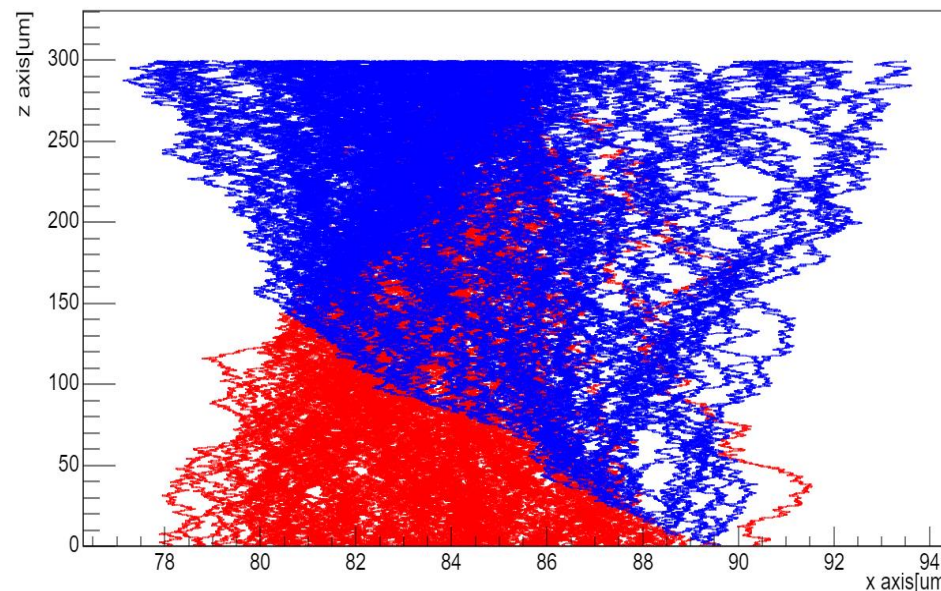
- Geant4模拟粒子入射，并挑选事例得到粒子路径和能量沉积
- Devsim求解探测器电场
- 引入迁移率模型并计算由电场和热运动引起的载流子漂移



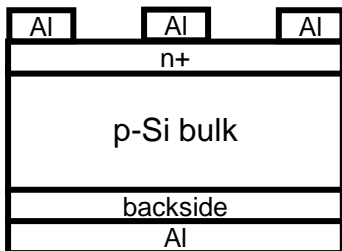
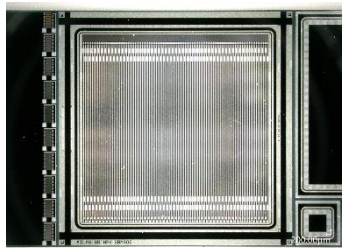
Geant4示意图

- 由肖克利拉莫定理得到感应电流:

$$I_q(t) = q\vec{v}_q(t) \cdot \nabla U_w(\vec{x}_q(t))$$



载流子漂移示意图



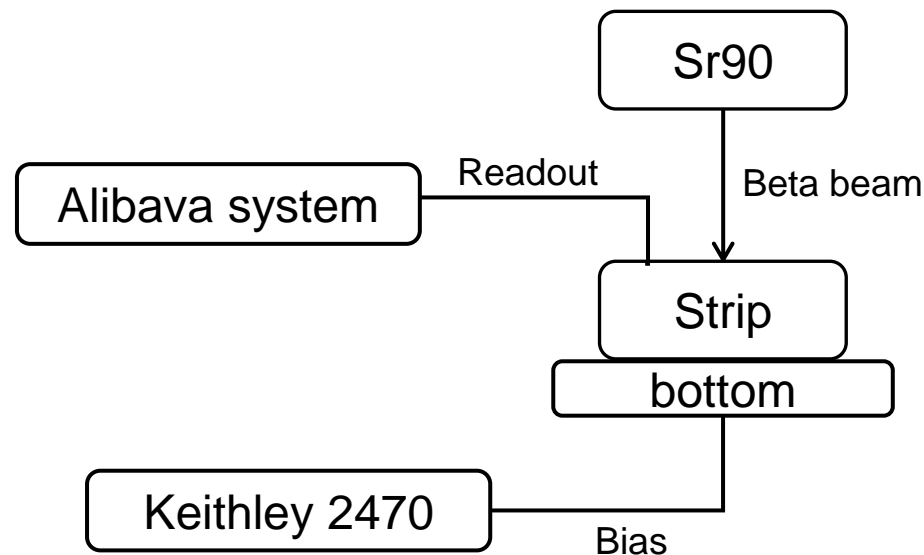
ITk mini sensor		
n+	$1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	1 μm
p	$3.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$	300 μm
backside	$1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	5 μm



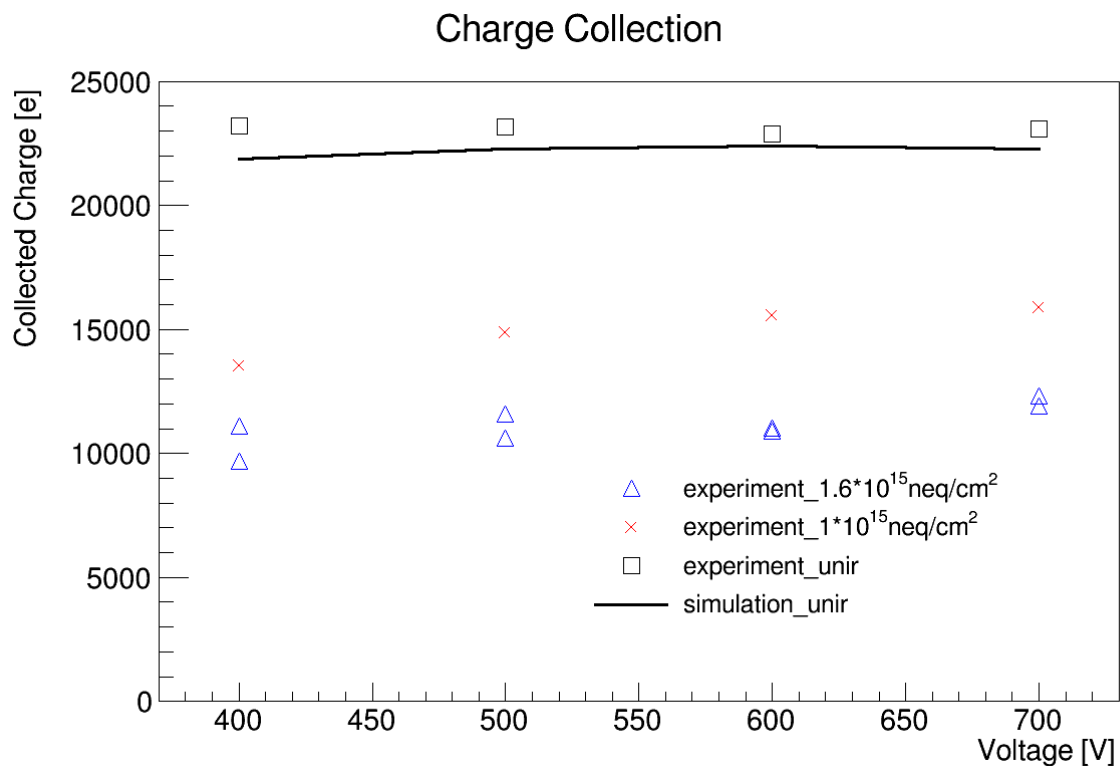
Alibava system classic

探测器及其剖面示意图

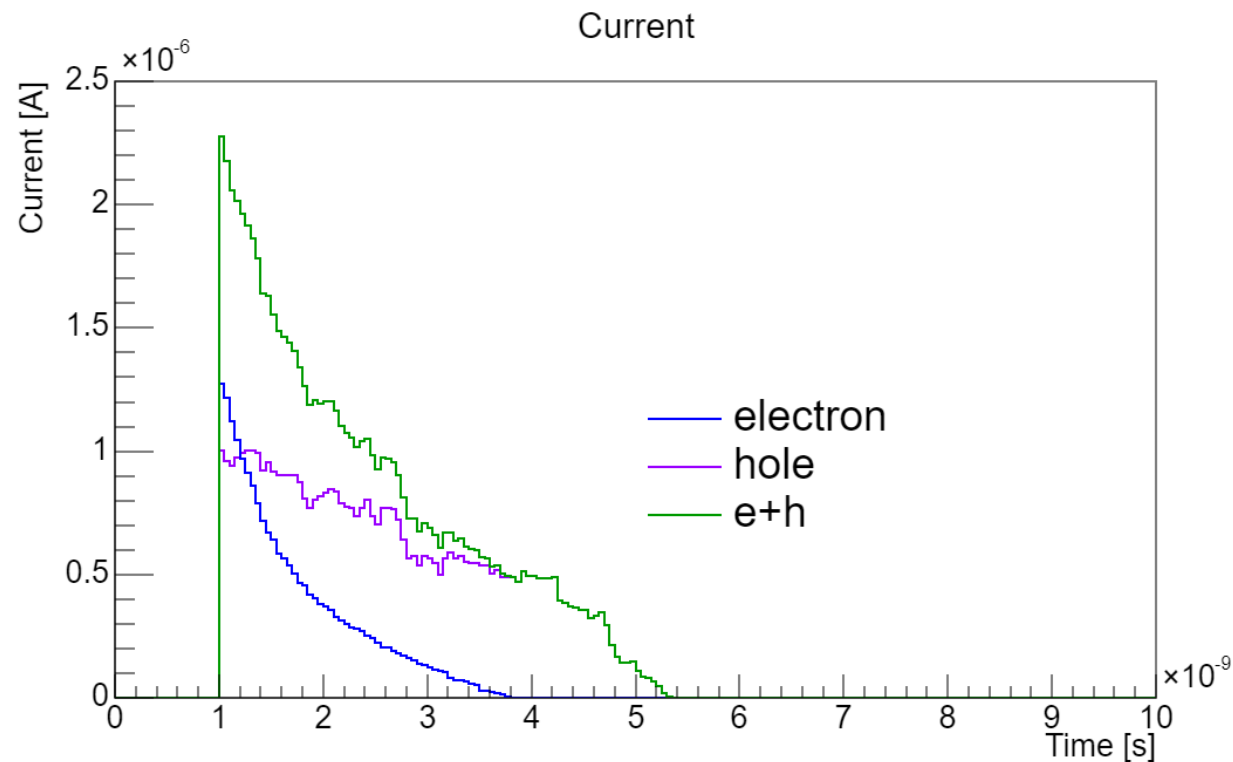
- 实验采用Sr-90源产生beta粒子轰击探测器，高压接在探测器背部，并使用Alibava system classic进行信号读出。
- Alibava system能自动将信号积分得到电荷收集



实验装置示意图

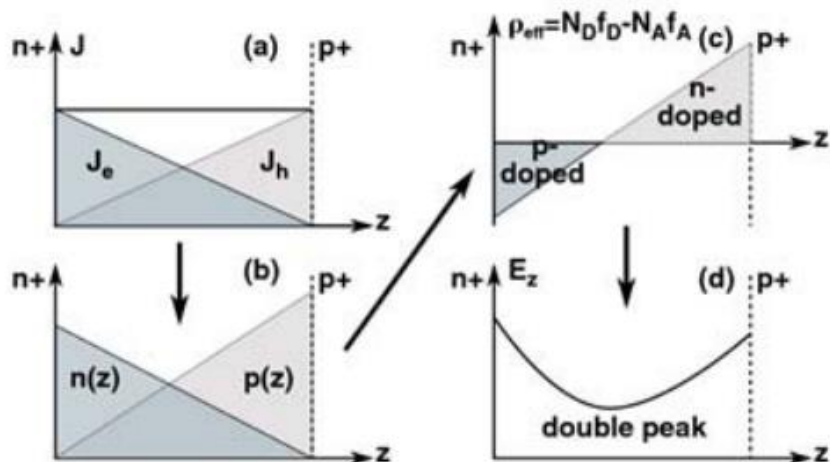


工作电压下辐照前实验与模拟电荷收集对比
辐照前实验温度为20°C，模拟与实验温度设定一致



辐照前的载流子贡献

- 工作电压下，辐照前模拟电荷收集与实验符合良好



[The origin of double peak electric field distribution in heavily irradiated silicon detectors](#)

- 漏电流产生自由载流子
- 自由载流子部分被深能级缺陷俘获，从而产生额外的空间电荷
- 总有效空间电荷被改变，影响电场分布，最后，如果总有效空间电荷在n+接触处为负，在p+接触处为正，则观察到双峰电场

- 缺陷积累电子所占的比例：

$$f_t = \frac{n_t}{N_t - n_t} = \frac{c_n n_{+e_p}}{c_n n_{+e_n} + c_p p_{+e_p}}$$

- 深能级缺陷积累载流子的产生速率：

$$G_n = N_t f_t e_n \quad G_p = N_t (1 - f_t) e_p$$

- 深能级缺陷中的载流子浓度：

$$n(x) = p(x) = \frac{J}{e \langle v_{th} \rangle}$$

- 有效空间电荷浓度：

$$N_{eff} = N_{sh} + (1 - f_t) N_{DD} - f_t N_{DA}$$

- 如果由于粒子入射或激光照射产生的自由载流子被深能级缺陷俘获，并在信号采集的时间内未被释放的话，则会导致信号的缺失
- 电子和空穴的俘获时间：

$$\bullet \frac{1}{\tau_{eff,e}} = \sum_{defects} c_n(1 - f_t)N_t$$

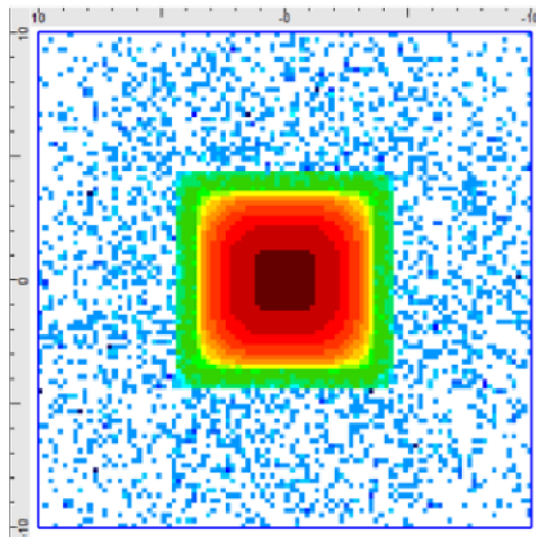
$$\bullet \frac{1}{\tau_{eff,h}} = \sum_{defects} c_p f_t N_t$$

Type	Energ[eV]	$g_{int}[cm^{-1}]$	$\sigma_e[cm^2]$	$\sigma_h[cm^2]$
Acceptor	$E_c - 0.42$	0.48	1e-15	1e-14
Acceptor	$E_c - 0.46$	0.18	7e-15	7e-14
Donor	$E_v + 0.36$	0.05	3.23e-13	3.23e-14
Donor	$E_v - 0.48$	0.64	4.1e-15	1.9e-16

模拟引入的缺陷参数

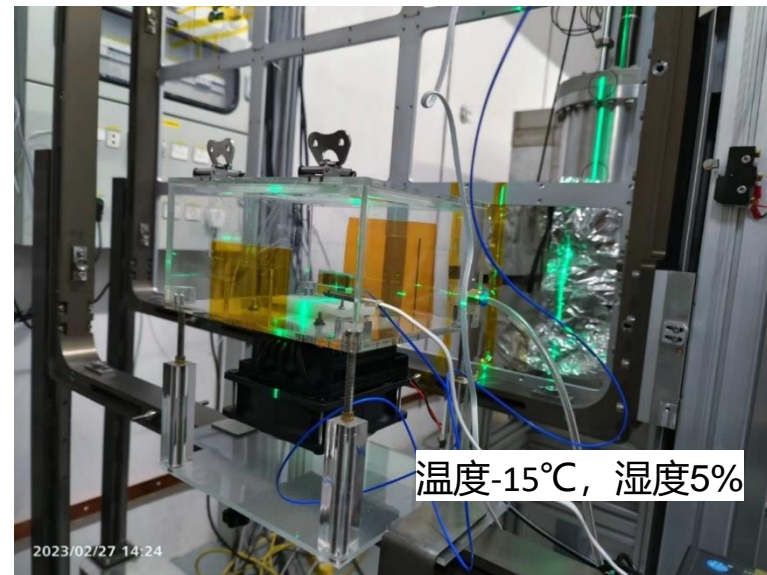


中国散裂中子源鸟瞰图



20mm×20mm

束流强度截面示意图

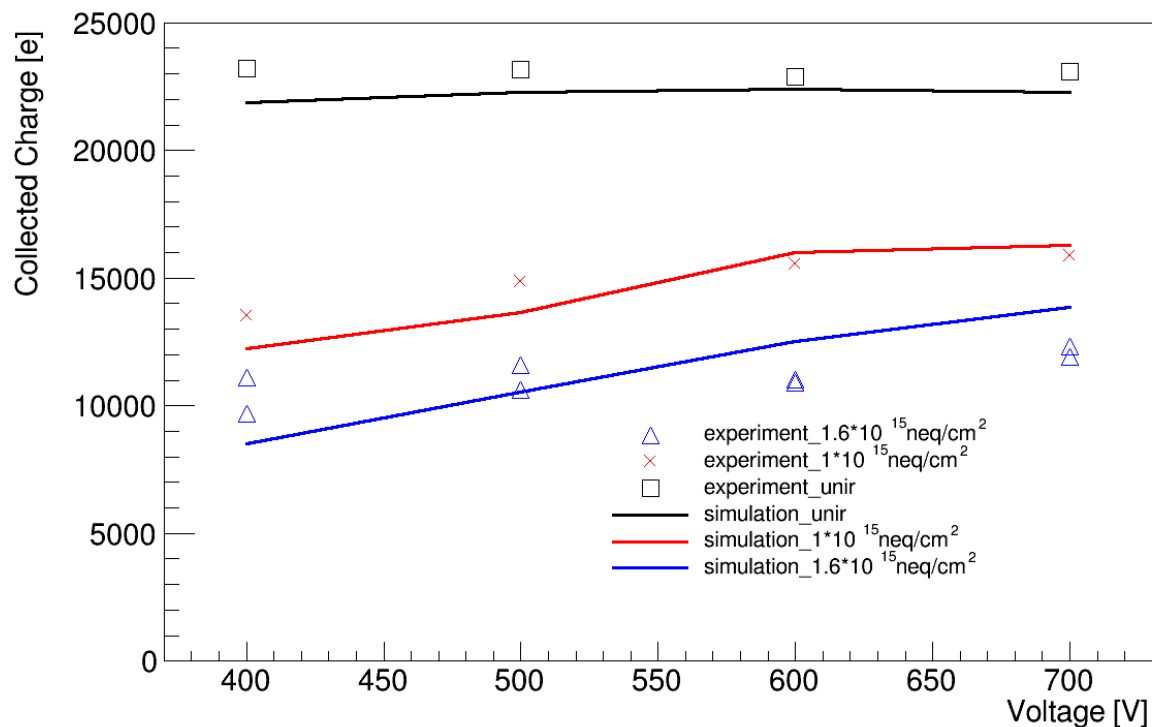


带有冷却的辐照装置

- 80MeV质子束流, 13.5uA, 束斑20mm*20mm
- 辐照点: 1×10^{15} neq/cm², 1.6×10^{15} neq/cm²

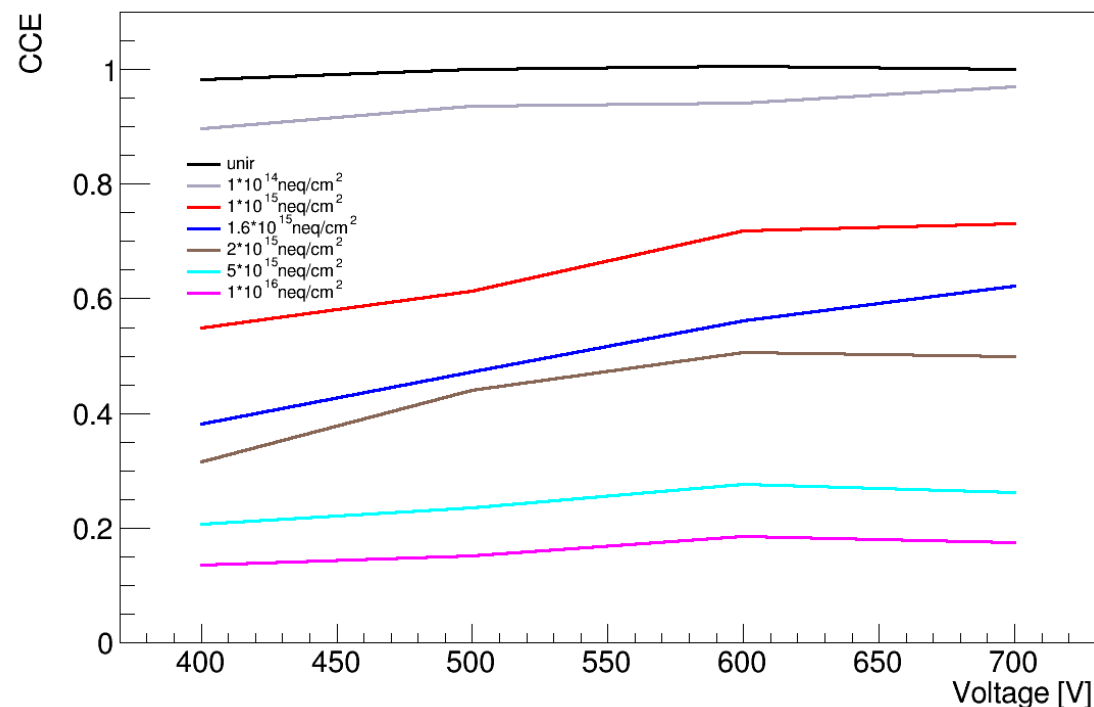
[PSD13: The 13th International Conference on Position Sensitive Detectors : A study on the feasibility of CSNS becoming an ATLAS ITk sensor QA irradiation site](#)

Charge Collection



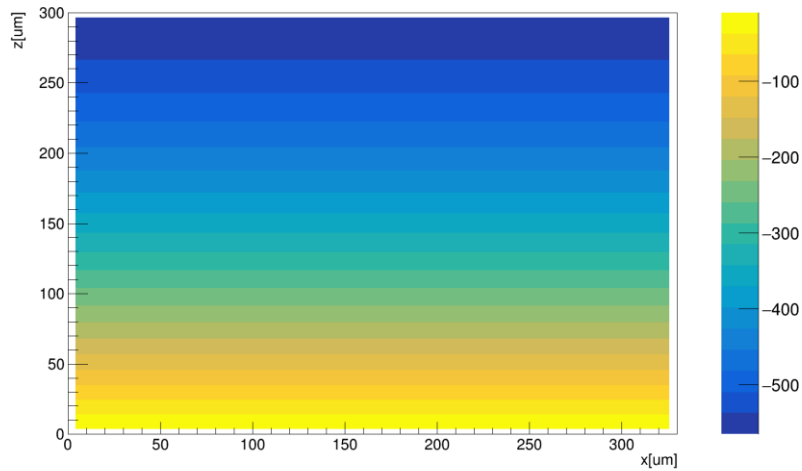
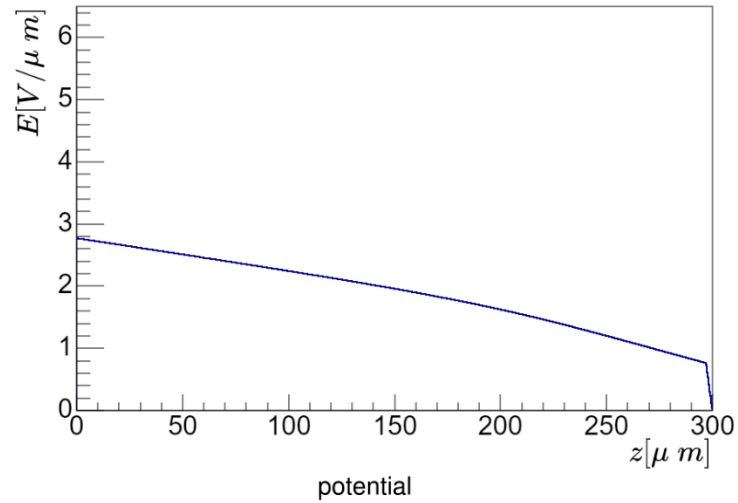
工作电压下辐照后实验与模拟电荷收集对比
辐照后实验温度为-20°C，模拟与实验温度设定一致

Charge Collection Efficiency

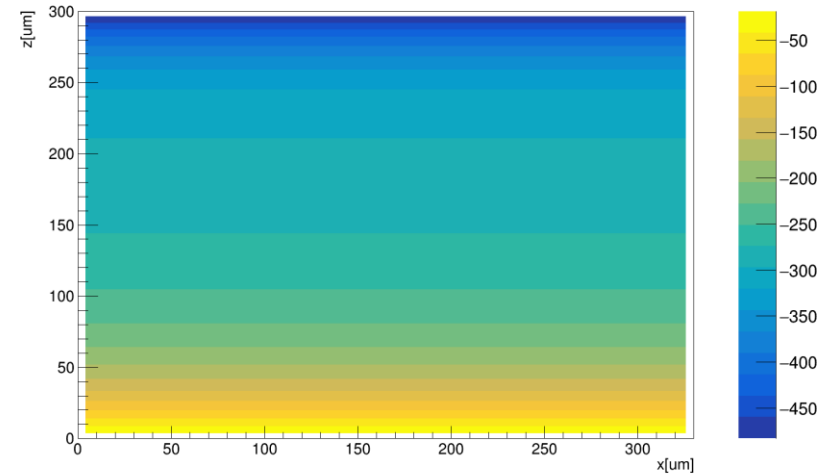
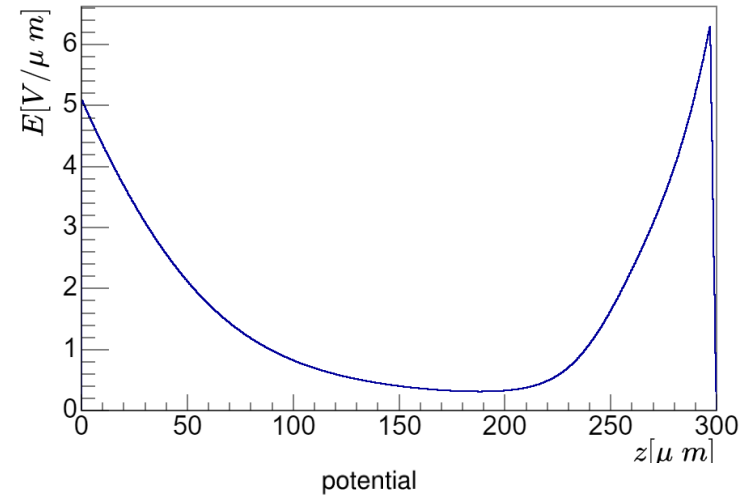


模拟预测不同辐照剂量下的电荷收集曲线

- 工作电压下，辐照后模拟电荷收集与实验符合较为一致

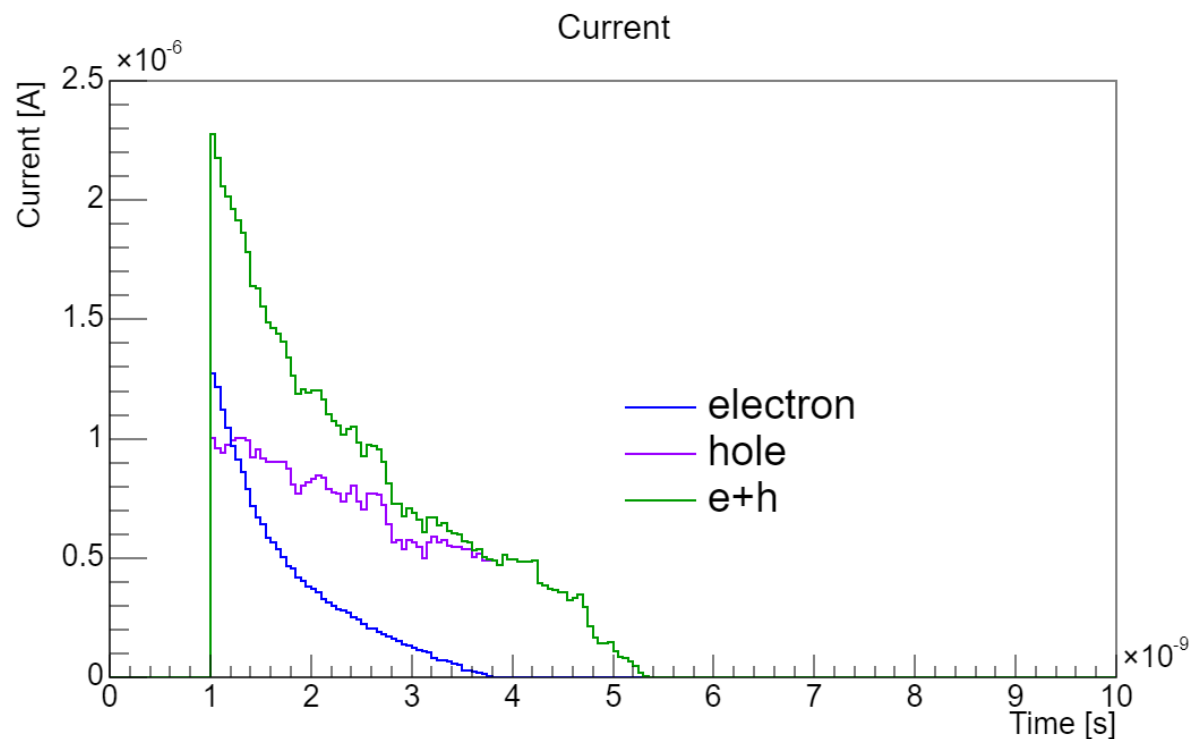


未辐照时的电场和电势

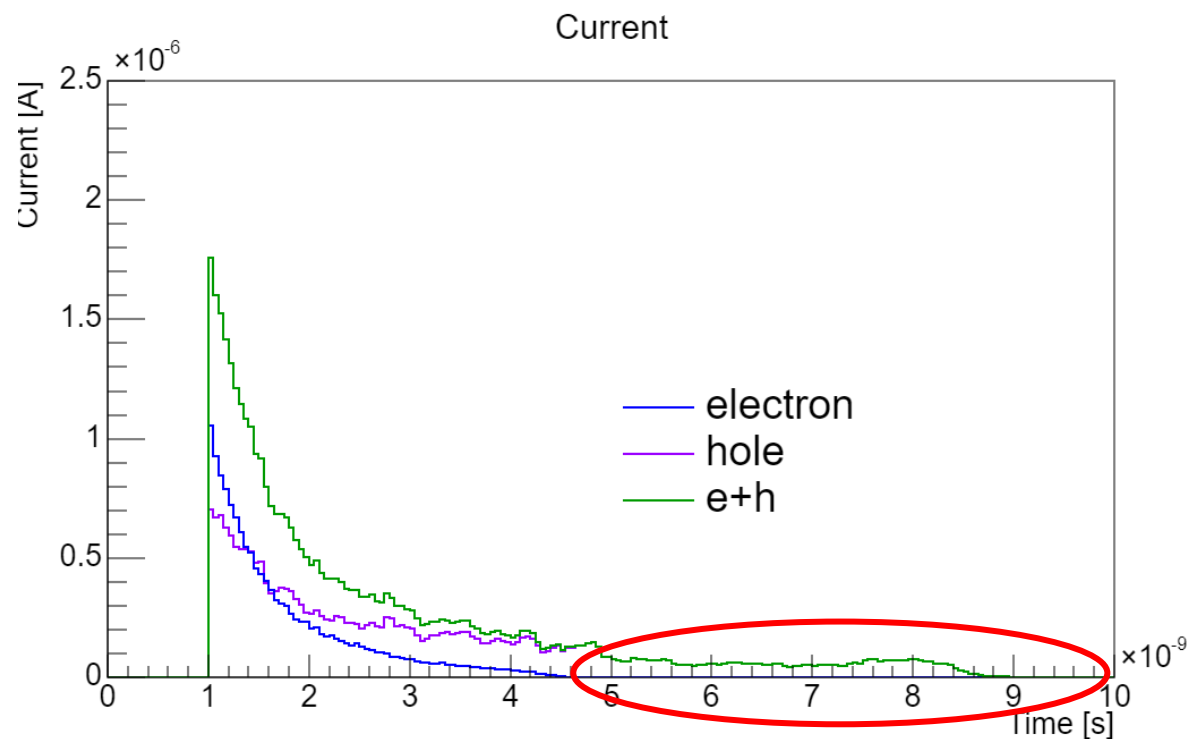


辐照剂量为 1.6×10^{15} neq/cm²时的电场和电势

- 加入辐照模型能够比较好反映出双峰电场

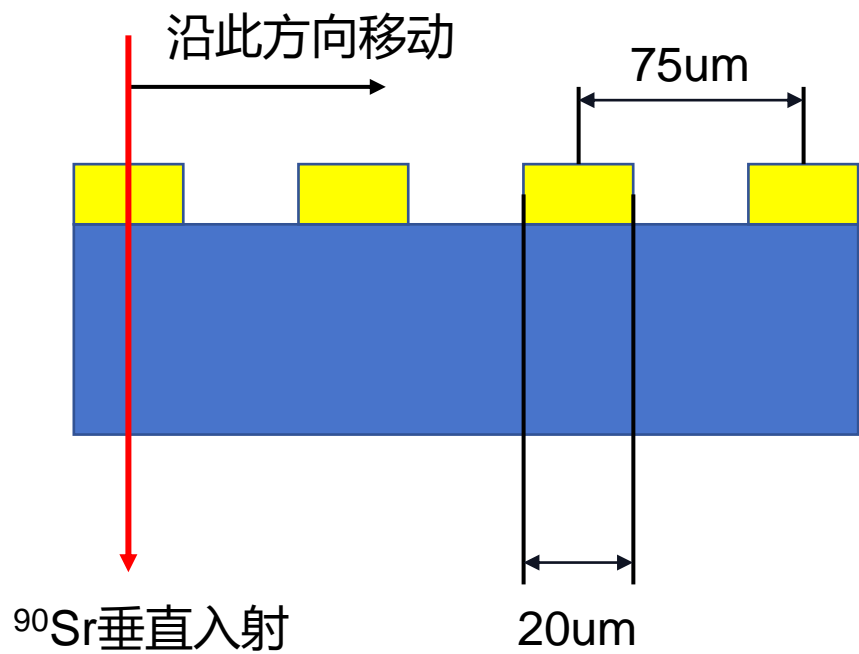


未辐照下的载流子贡献



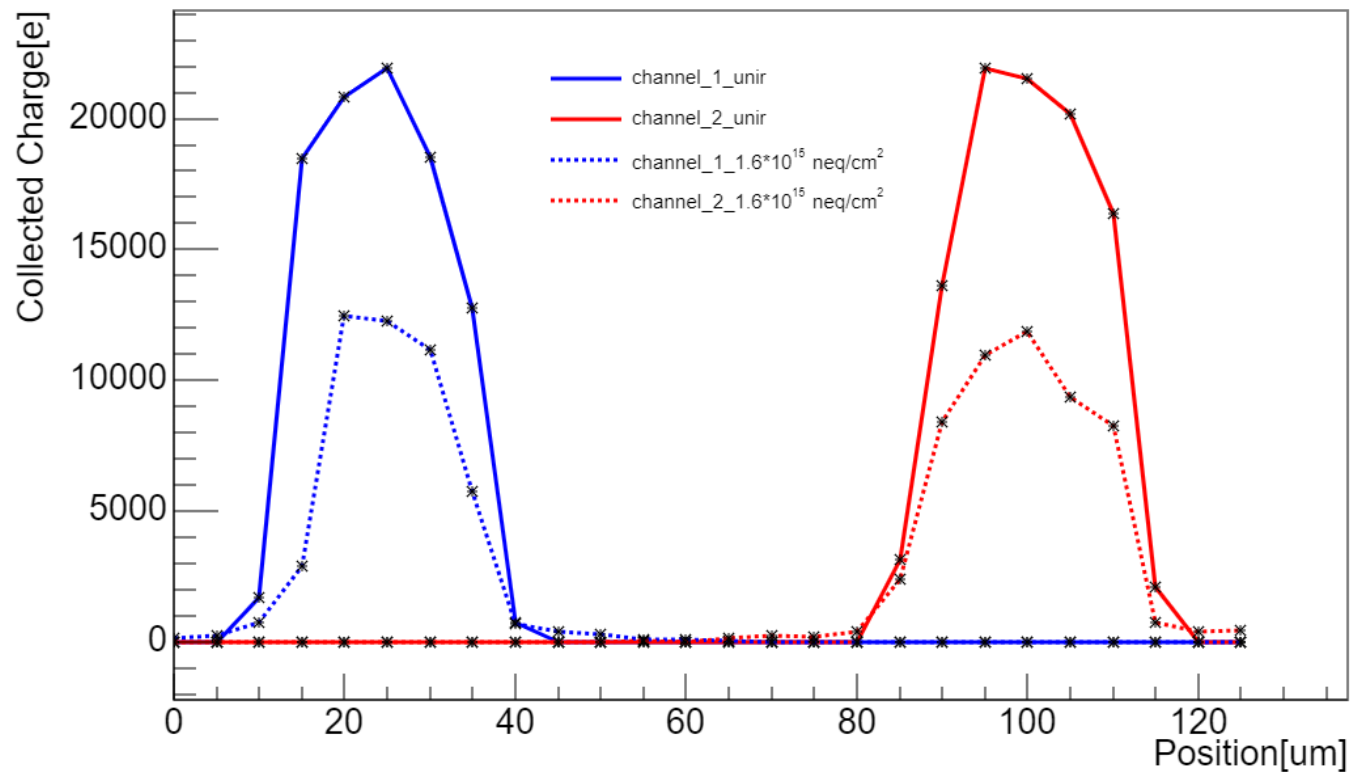
辐照剂量为 1.6×10^{15} neq/cm²下的载流子贡献

- 由于载流子俘获导致辐照后信号幅度减小
- 由于双峰电场导致辐照后信号下降沿变长



模拟示意图

Signal with Distance



模拟不同位置下粒子入射得到的信号分布

- 辐照后整体读出信号都有了大幅度的衰减

- ✓ RASER实现了对于硅微条探测器电荷收集的仿真功能
- ✓ 使用RASER验证了辐照模型对辐照器件仿真的可靠性
- 补充辐照点，用实验来验证当前的模拟结果，构建探测器在辐照过程中性能连续变化的曲线
- 研究辐照对于硅微条探测器位置分辨性能的影响

谢谢!