



山东高等技术研究院

SHANDONG INSTITUTE
OF ADVANCED TECHNOLOGY



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

半导体模拟软件 RASER的开发与进展

肖素玉 on behalf of RASER Team

2024年5月25日 青岛

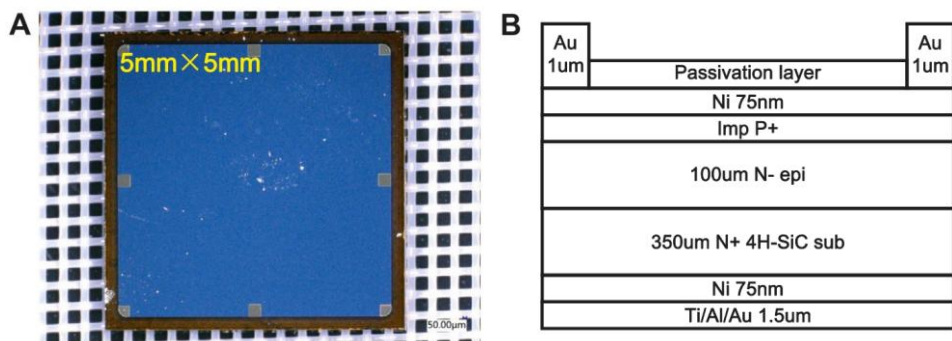
第四届半导体辐射探测器研讨会

目录

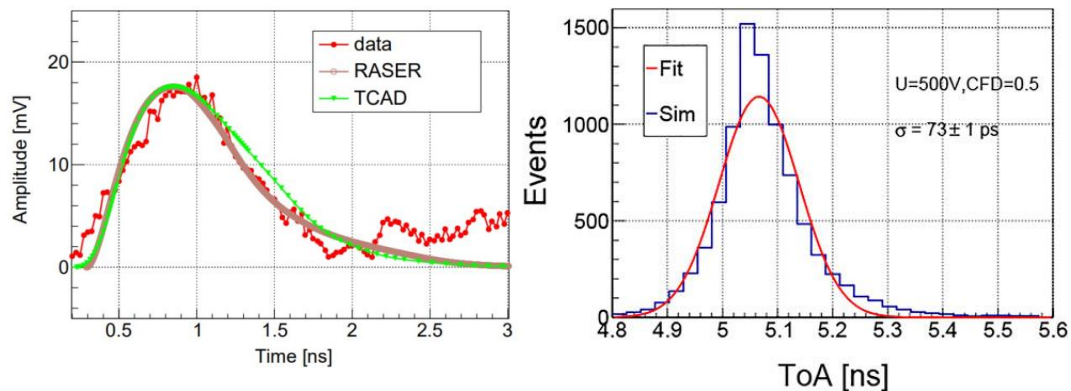
- RASER基本情况
- 针对多种具体探测器RASER的模拟情况
 - LGAD, SICAR, ITk mini sensor, SiC...
- 平面SiC探测器在束流监测中的模拟与应用
- 探索环形电极结构下的仿真求解
- 总结与展望

RASER (RADiation SEMiconductoR) 基本情况回顾

• 南京大学研制4H-SiC PIN探测器时间分辨研究



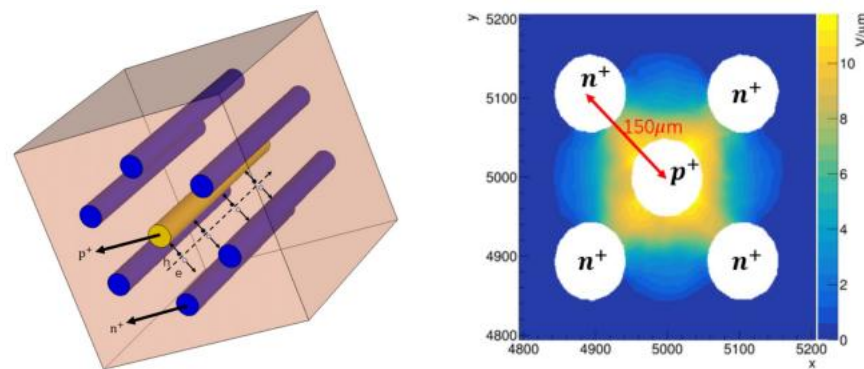
4H-SiC PIN探测器外观（左）及剖面图（右）



RASER仿真波形（左）与时间分辨结果（右）

Time Resolution of the 4H-SiC PIN Detector, Front. Phys.

• 3D SiC探测器时间分辨研究



3D SiC探测器示意图（左）与RASER电场模拟（右）

Table 1. The simulation parameters and results for planar 4H-SiC, 3D-4H-SiC-7E, and 3D-4H-SiC-5E detectors with 500 V bias voltage.

SiC Detector Type	Column Spacing (μm)	Thickness (μm)	Rise Time (ns)	Pulse Height (mV)	Time Resolution (ps)
Planar	100	100	0.38	13	77
3D-4H-SiC-7E	50	350	0.29	48	34
3D-4H-SiC-5E	50	350	0.32	53	25

不同参数对3D SiC探测器时间分辨的影响

Timing Performance Simulation for 3D 4H-SiC Detector, Micromachines

RASER基本情况

- 感应电流估算:

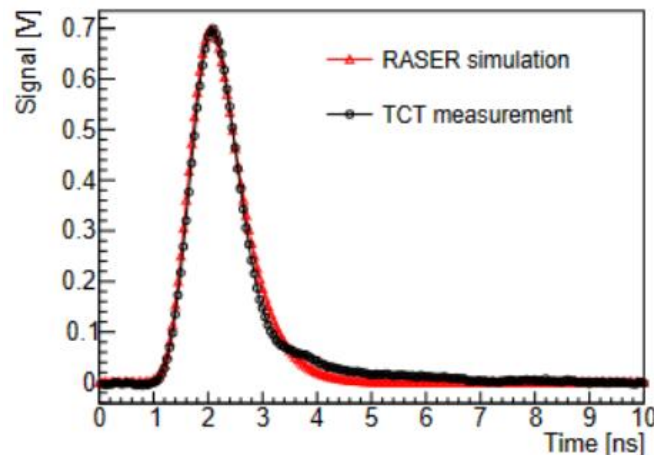
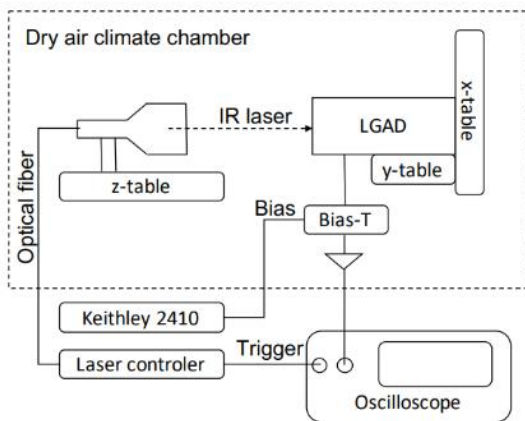
$$I(t) = -q \vec{v}(\vec{r}(t)) \cdot \vec{E}_w(\vec{r}(t))$$

- 求解泊松与拉普拉斯方程估算电场与加权场: FEniCS → **DEVSIM**

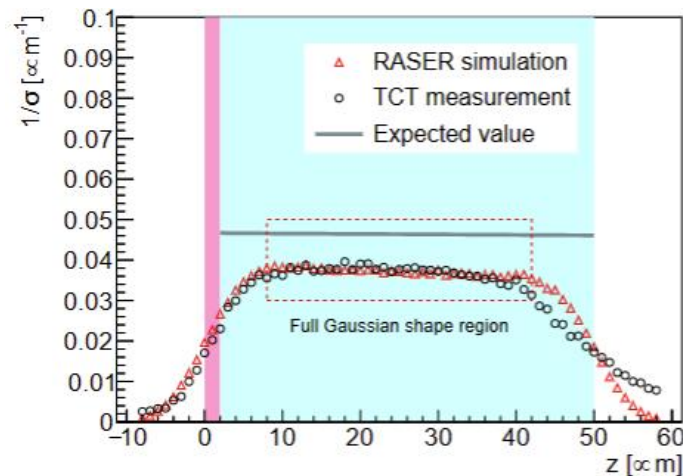
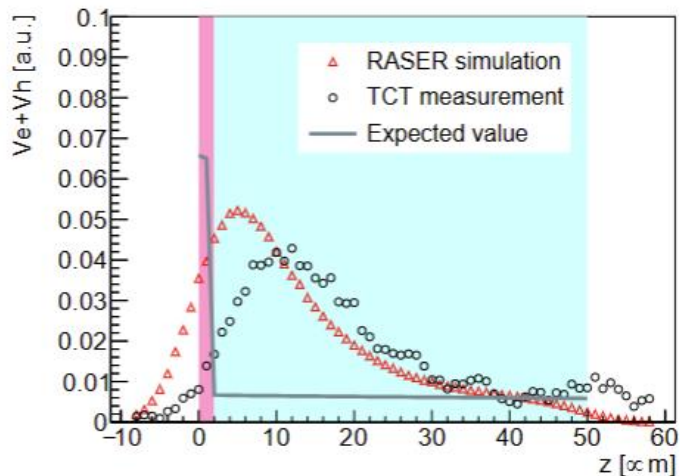
$$\nabla^2 \vec{U}(r) = -\frac{\rho}{\epsilon}, \quad \nabla^2 \vec{U}_w(r) = 0$$

- 模拟粒子入射路径与沉积能量分布: **GEANT4**
- 电子学模拟: 电流灵敏放大器模型 → **NGSpice**

低增益Si探测器(LGAD)的模拟



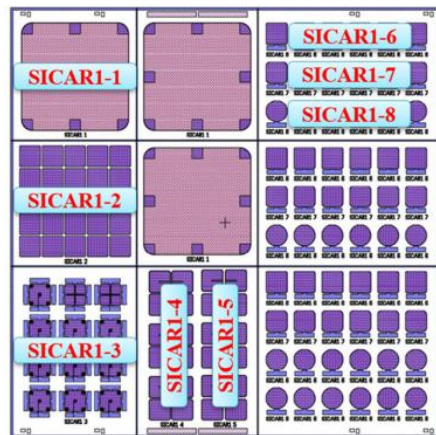
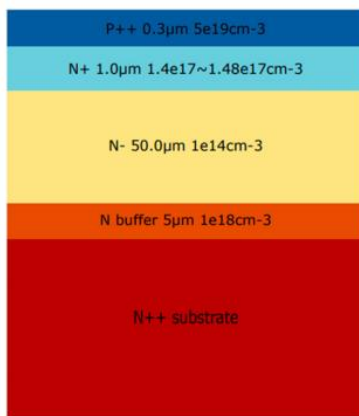
LGAD edge-TCT实验装置示意图（左）和实验与仿真波形比较（右）



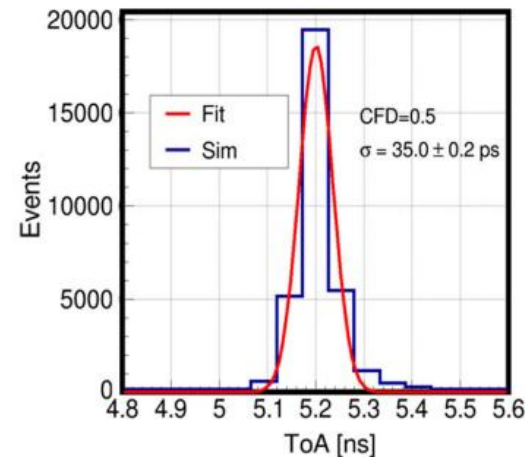
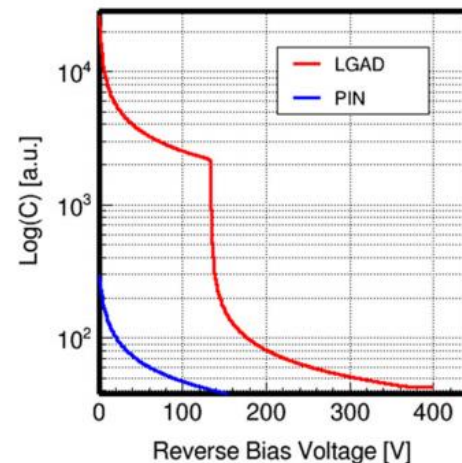
传统斜率方式（左）与扩散法衡量电场水平（右）在LGAD中的效果

- 在RASER中实现了对于Si LGAD的仿真
- 构建基于红外激光的edge-TCT的测试系统
- 提出基于载流子扩散评估电场水平的方式 $\frac{di_q}{dt} \Big|_{max} = \frac{k_2 \sum N}{\sqrt{\tau^2 v_e^2 + \sigma^2}}$ ，相比PIN中传统使用的波形斜率方式有了明显改进

低增益SiC探测器(SICAR)的模拟



SICAR剖面图(左)与流片设计排布(右)

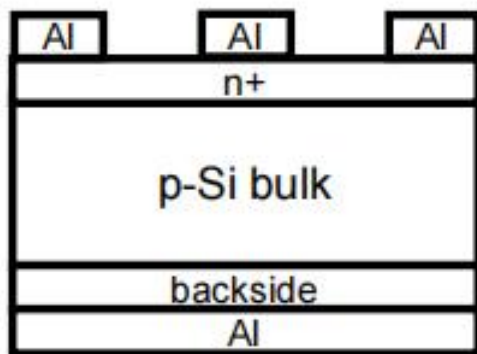
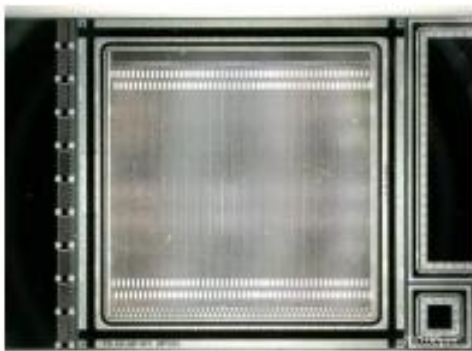


SICAR的CV曲线模拟(左)与时间分辨的模拟结果(右)

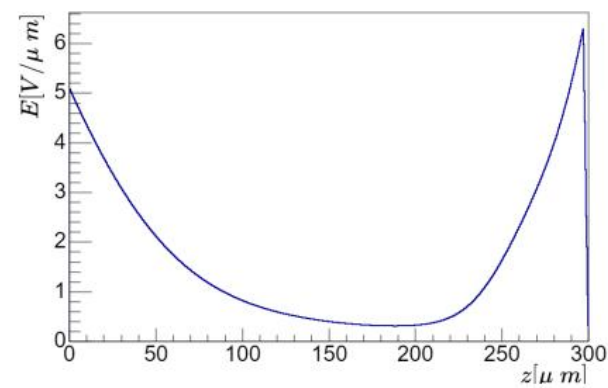
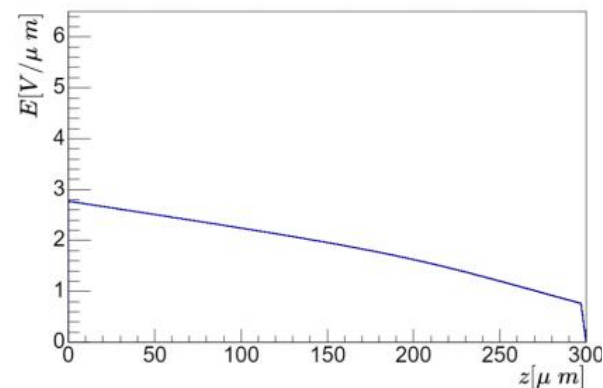
- 完成了SICAR的设计与流片
- RASER仿真PIN与SICAR的IV、CV曲线, 耗尽电压~400V, 截断电压~3700V
- 800V工作电压下, SICAR仿真时间分辨~35ps

Design and simulation of a novel 4H-SiC LGAD timing device, RDTM

硅微条探测器的辐照损伤模拟



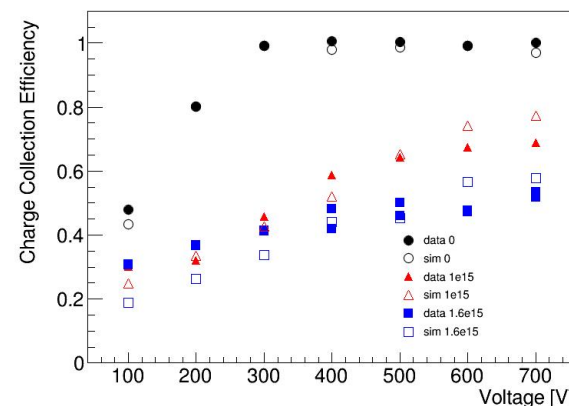
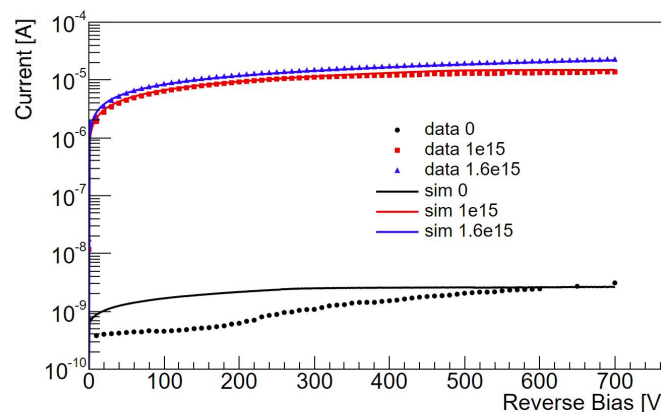
硅微条探测器ITk mini sensor外观（左）及剖面图（右）



RASER仿真ITk mini sensor辐照前（左）、后（右）的电场分布

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	$4.1e-15$	$1.9e-16$

辐照模拟引入的缺陷参数

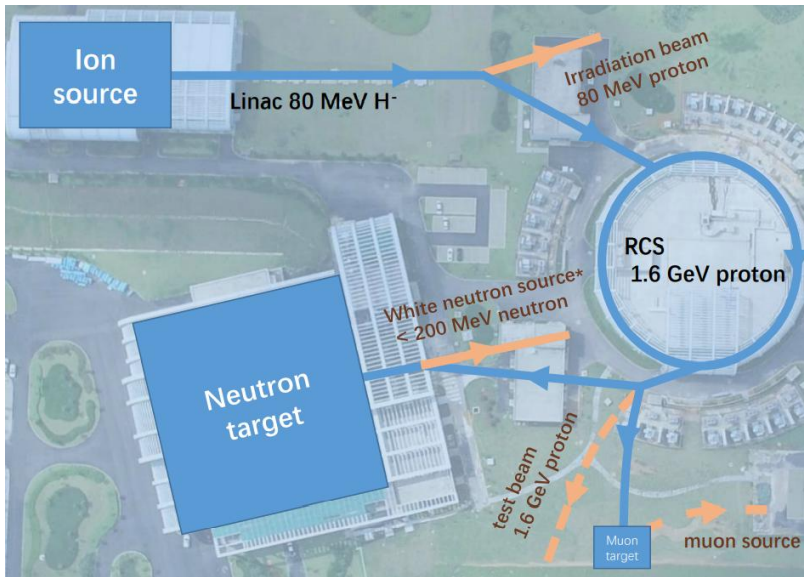


ITk mini IV曲线（左）与收集电荷效率（右）的模拟与实验结果

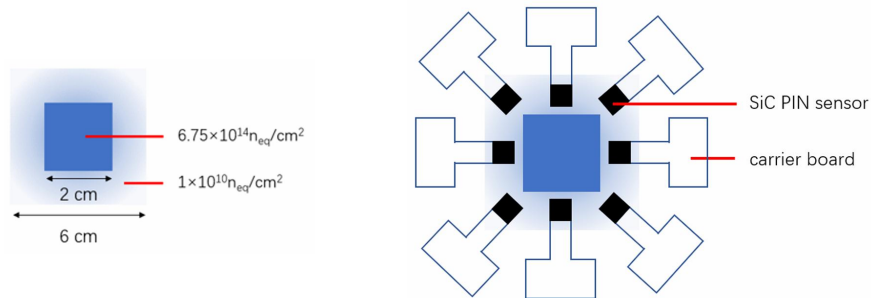
- 通过优化辐照模型参数，成功实现了RASER对于硅微条探测器辐照的IV、CCE模拟

平面SiC探测器在束流监测中的应用

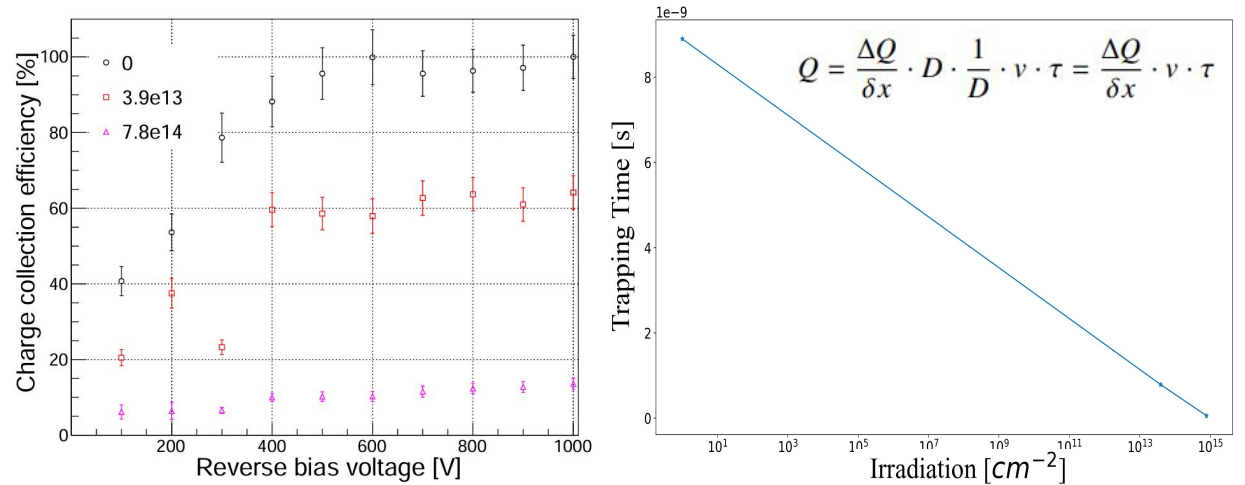
- 计划在中国散裂中子源（CSNS）的1.6GeV质子束线上搭建基于SiC探测器的束流监控系统



新建1.6GeV质子束流线



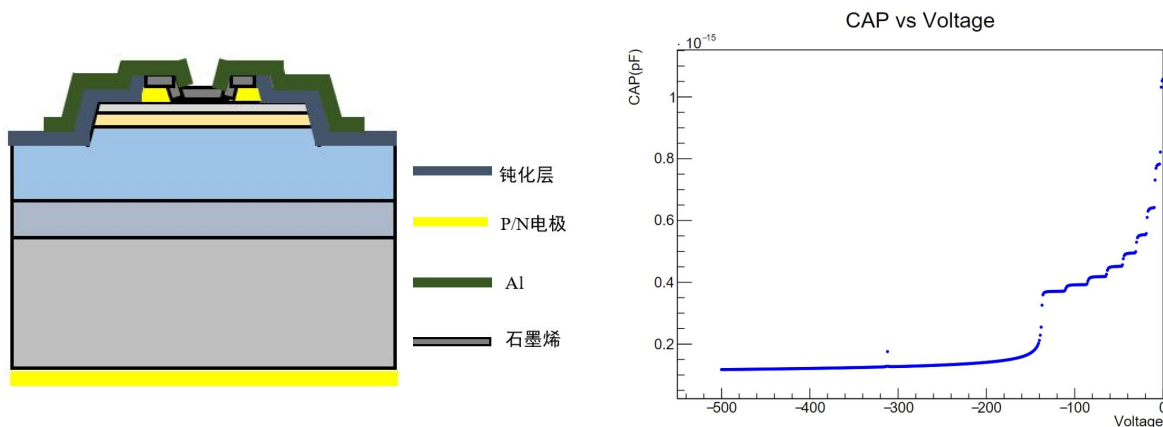
束流强度示意图（左）与探测器位置设计摆放（右）



SiC辐照前后的电荷收集（左）和载流子俘获时间与辐照剂量（右）

- 通过辐照实验证明了SiC探测器用于束流监控的可行性
- 获取载流子俘获时间与辐照剂量之间的关系，利用RASER实现SiC长期使用的校准

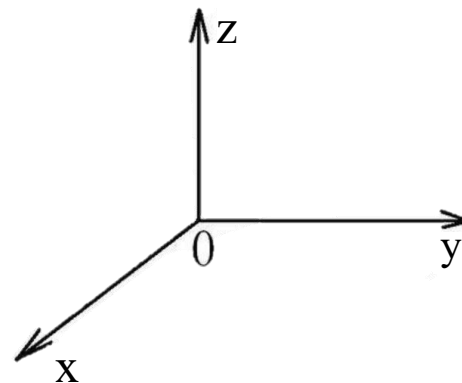
探索环形电极结构下的仿真求解



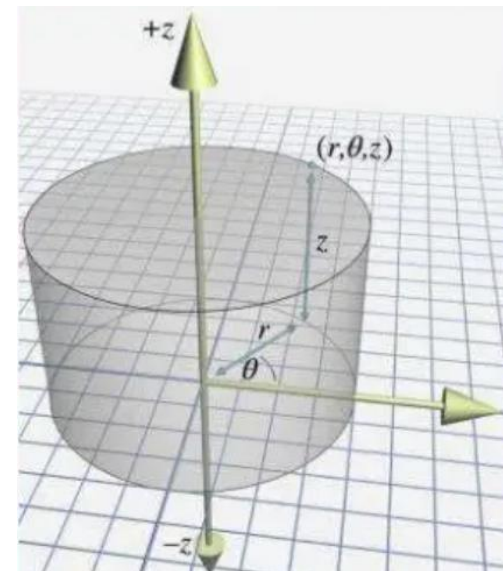
环形电极探测器示意图（左）与CV仿真曲线（右）

- 笛卡尔坐标系实现简单柱状电极仿真，得到C-V曲线存在网格稀疏造成C-V阶梯状
- 网格细密则会受限于算力，无法顺利求解

- 笛卡尔坐标系到三维极坐标转换



笛卡尔坐标系(x, y, z)

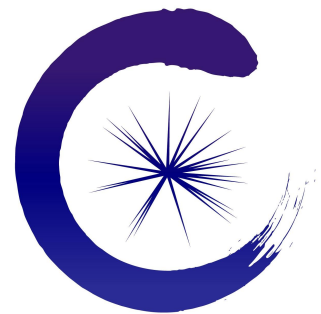


圆柱坐标系(r, θ , z)

总结与展望

- RASER在电场求解、电子学处理方面进行了更新
- 完成了LGAD、SICAR、ITk mini sensor辐照等模拟工作
- 验证了SiC PIN在束流监测中的应用，并依据RASER构建长期连续工作的校正
- 尝试处理三维场解问题，积极探索环形电极、像素探测器的模拟

RASER代码开源使用



谢谢!