

山东高等技术研究院

SHANDONG INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY

基于RASER的碳化硅探测器 性能与应用研究

肖素玉 on behalf of RASER Team

2025年7月15日

RASER Workshop 2025

目录

- 碳化硅探测器应用中的模拟需求
- RASER功能与优势
- 碳化硅探测器的开发与应用
- 总结与展望

碳化硅探测器应用中的模拟需求

1

探测器结构-电子学输出全链条仿真模拟

需要建立探测器结构与工艺仿真、电荷传输与信号生成、电子学电路仿真与优化以及全链条整合与验证

2

应用场景中多变量耦合仿真模拟

建立温度、辐照能量、剂量率、时间、粒子种类等多变量因素的耦合方法

3

仿真结果的可靠性验证

通过设计实验，根据实验结果对仿真模型进行反馈修正和迭代，确保模拟结果的准确性和可靠性

RASER功能与优势

- 现在国际上已有的模拟软件TCAD、Geant4、Allpix2, Garfield、Ngspice等能实现特定过程的仿真，但没有一款软件能实现全过程的模拟

模拟软件名称	核心领域	关键特点与优势
TCAD	半导体器件与工艺	支持全流程工艺仿真（离子注入、氧化、刻蚀等），结合 Sentaurus Interconnect 实现后端互连建模。
Geant4	粒子物理与辐射	开源蒙特卡罗框架，精确模拟粒子输运与物质相互作用，支持复杂几何建模和跨平台开发。广泛应用于高能物理、医学成像和空间科学。
Allpix2	探测器设计	模块化架构整合 Geant4 粒子模拟与 TCAD 电场数据，支持混合像素探测器（如 Medipix2/Timepix）的单光子计数和能量分辨。适用于加速器实验与探测器优化。
Garfield	电荷传输仿真	专注气体 / 半导体探测器电荷漂移与扩散建模，与 Geant4 协同优化 TPC 空间分辨率。支持自定义物理模型，适用于核物理与天体粒子实验。
Ngspice	电路系统仿真	开源混合信号模拟器，兼容 Spice 模型，支持模拟 / 数字电路协同设计。跨平台支持（Windows/Linux），社区资源丰富，适合教育与工业级验证。

RASER功能与优势

- 感应电流估算:

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

电场与加权场: **DEVSIM**求解电场与加权场

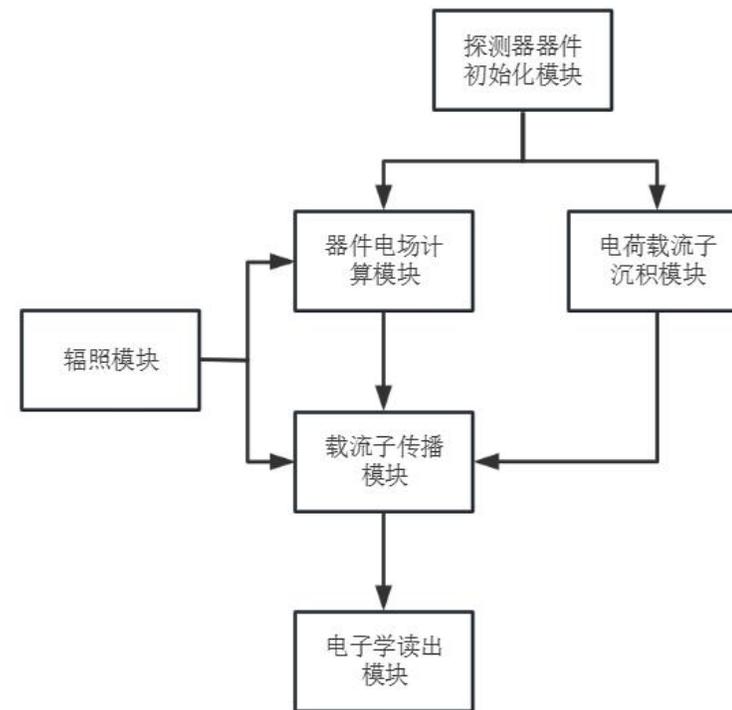
模拟粒子入射路径与沉积能量分布: **GEANT4**

电子学模拟: 电流灵敏放大器模型、**NGSpice**

辐照模型构建、优化

- 软件开发基于**Python**, 对初学者友好

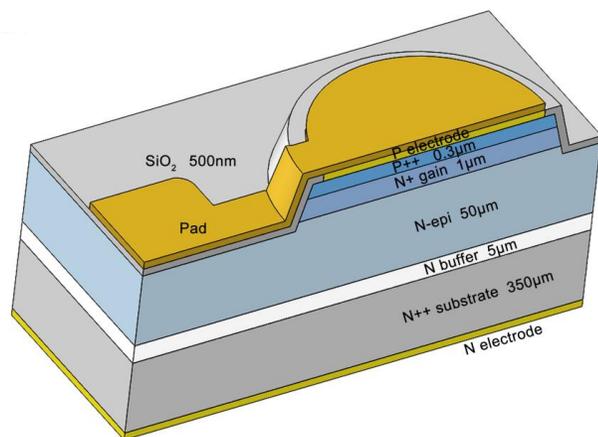
- 架构完整, 本科生、研究生同学都可以参与开发, 团队持续维护



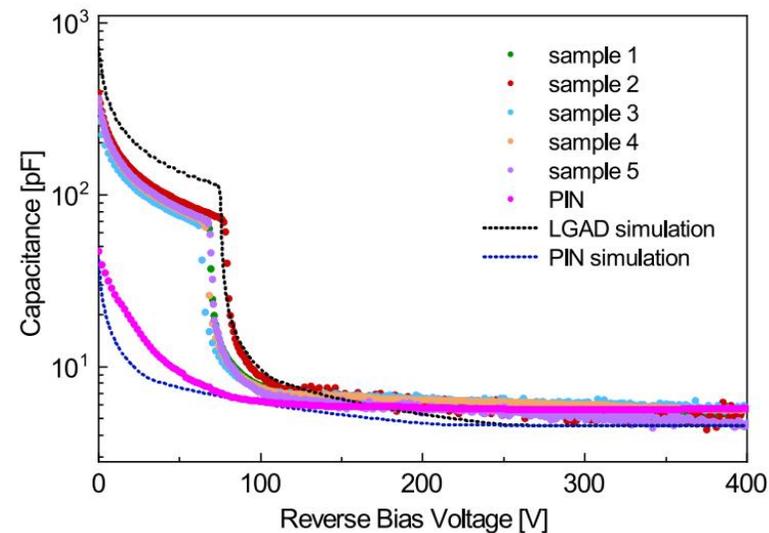
RASER仿真通过各子模块构成与功能

碳化硅LGAD

- 在SiC PIN中实现LGAD增益层的引入



SICAR剖面图

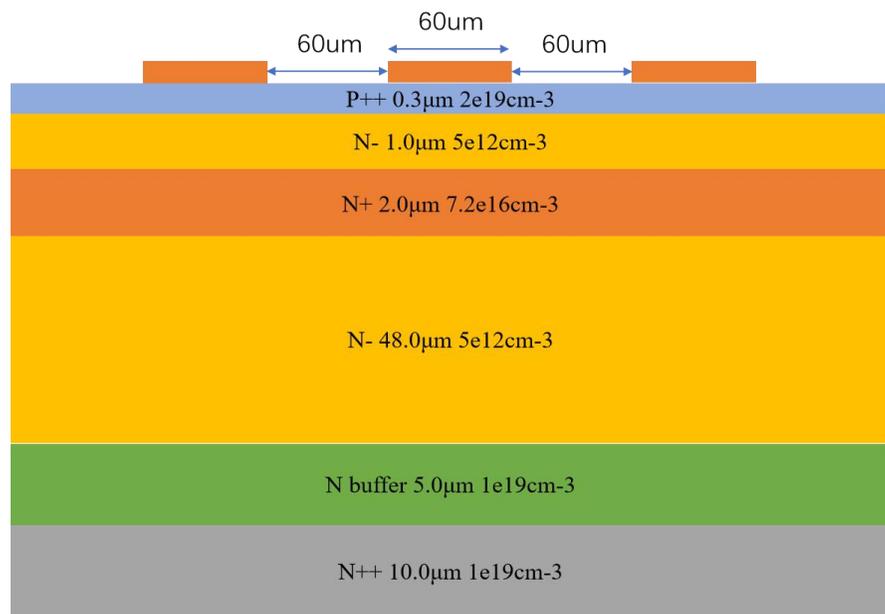


SICAR CV曲线

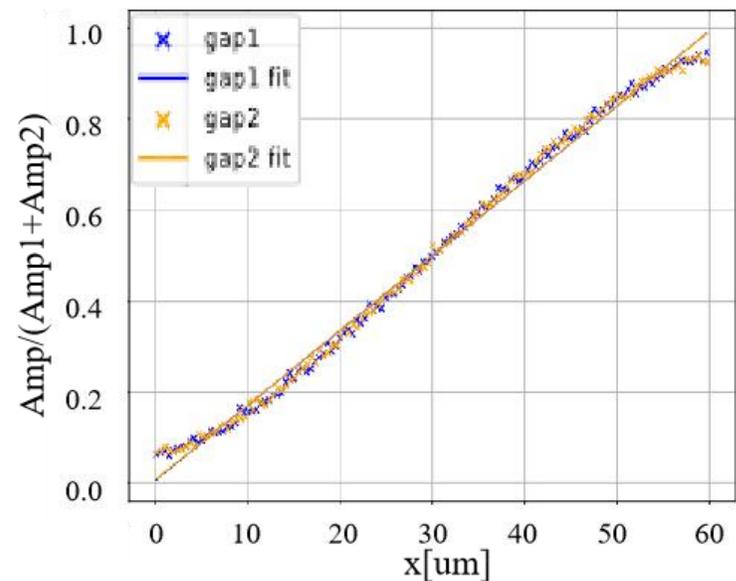
- 在SiC探测器中引入LGAD技术（SICAR），实现载流子的雪崩倍增，有效放大信号，提高探测器的信噪比和信号质量
- N+增益层在信号放大过程中起关键作用， $1.4e17cm^{-3}$ ， $1\mu m$
- 电子束蒸发实现衬底上的金属接触，通过优化金属厚度与退火温度，达到最佳性能

SiC LGAD strip仿真

- SiC LGAD strip的分辨仿真



SiC LGAD strip结构示意图

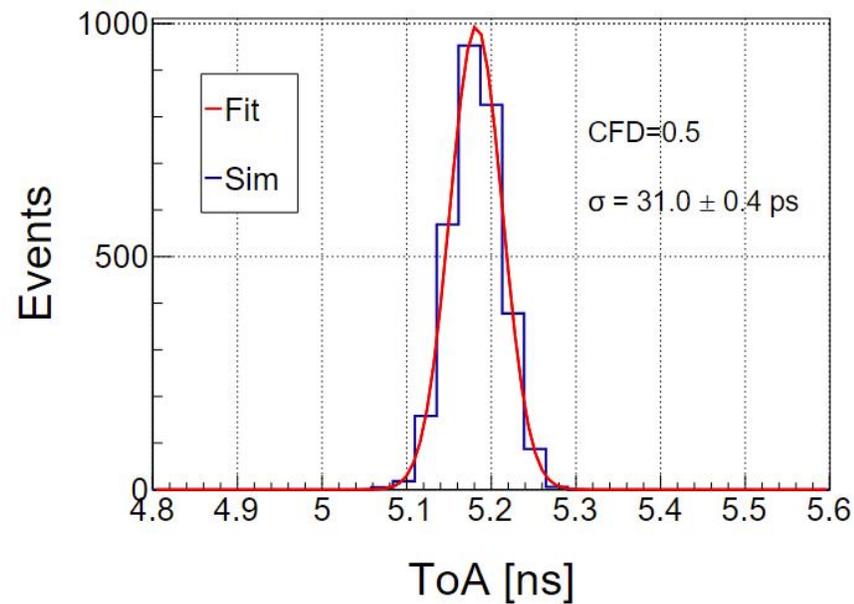
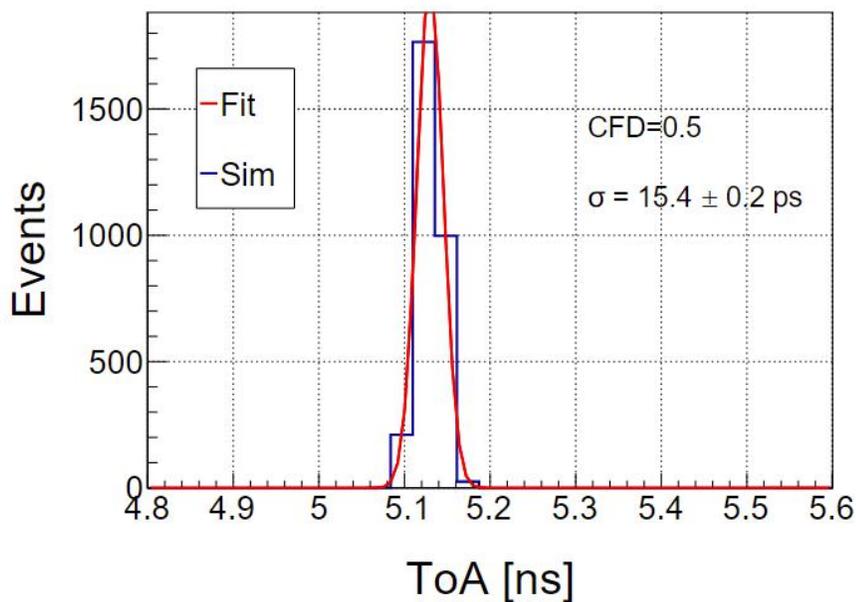


位置扫描时电极幅值的变化关系

- 设计微条读出，采取375nm激光扫描研究探测器的时间、位置分辨。
- 线性拟合激光扫描时特定电极的脉冲读出，拟合值与实验测量之间的差异变化作为位置分辨

SiC LGAD strip仿真

- SiC LGAD strip的分辨仿真

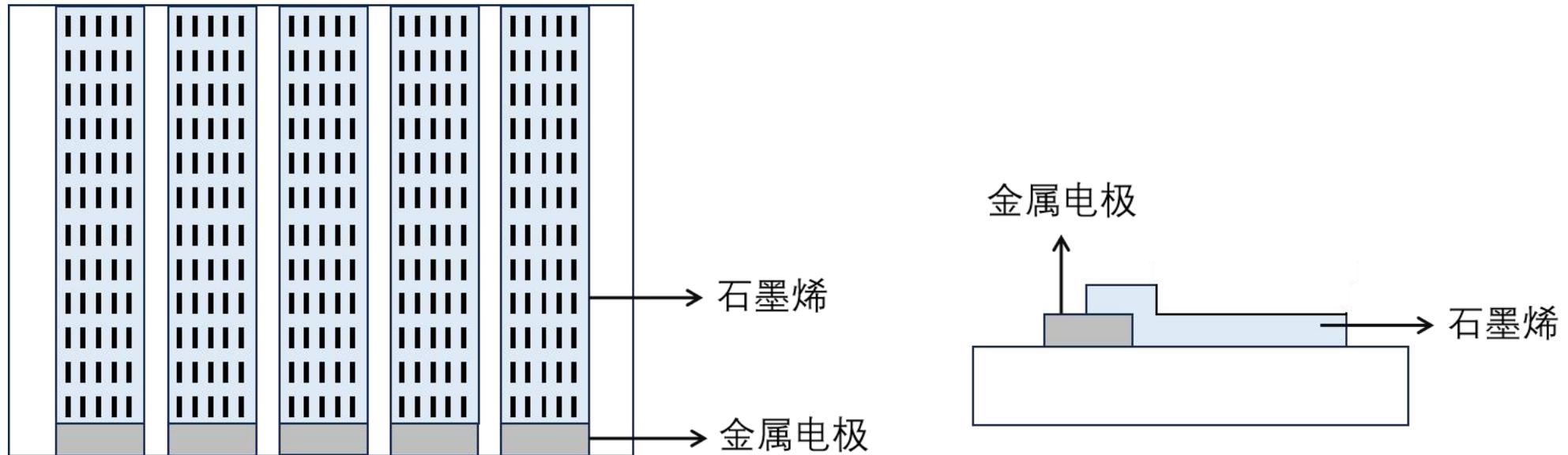


相邻两个电极条的时间信息，均差于直接电极入射的 9.0 ± 1.6 ps

- 激光从电极正上方入射时，时间分辨未 9.0 ± 1.6 ps
- 激光从两个电极中间入射时，两个相邻的电极时间分辨均差于垂直入射

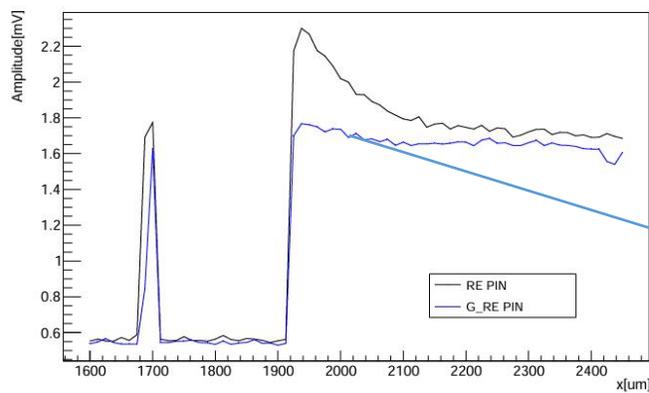
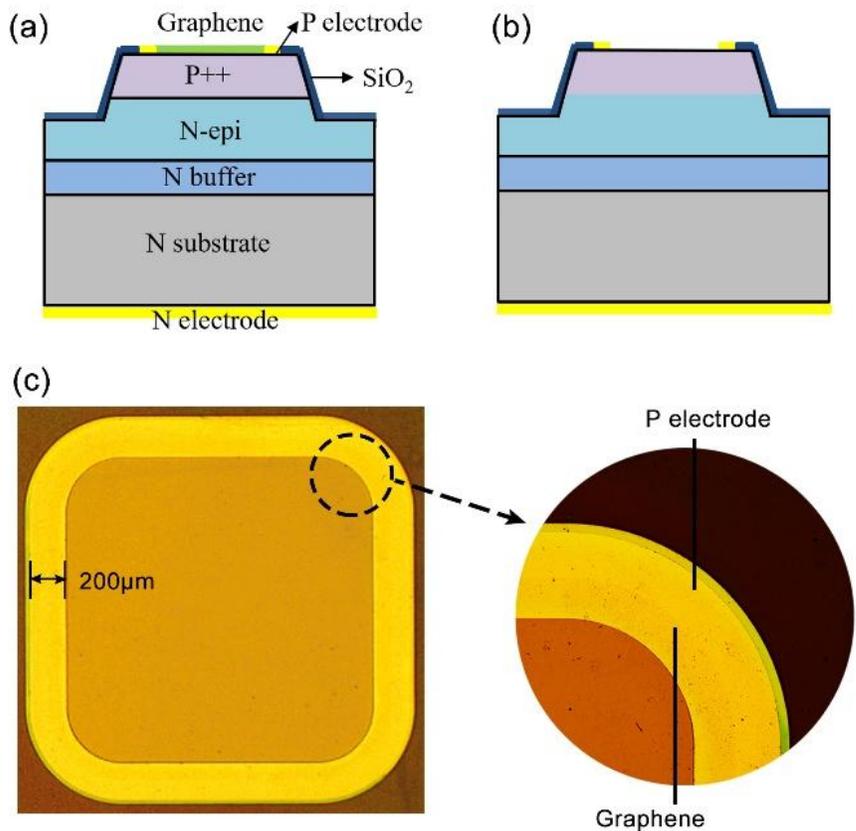
二维材料与金属电极相结合

- 激光无法穿透金属层，考虑将二维透明材料和金属耦合的方式共同构成电极，在允许激光穿透的同时方便电气键合

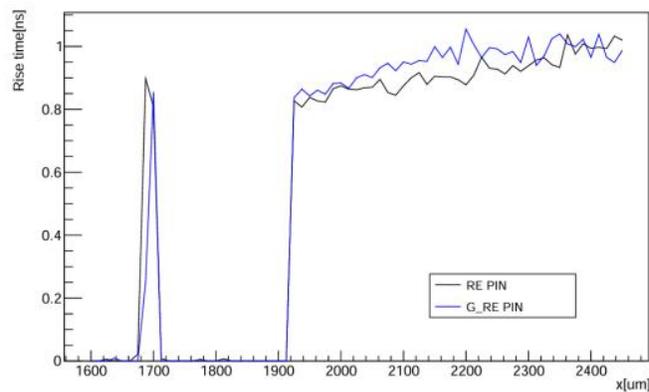


二维材料与金属电极相结合

- 石墨烯作为电极的可靠性验证

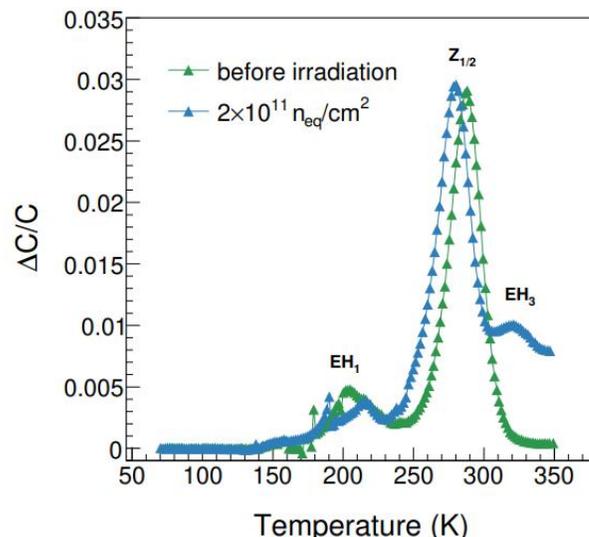


石墨烯的存在使不同位置激光入射的波形信息更趋于一致



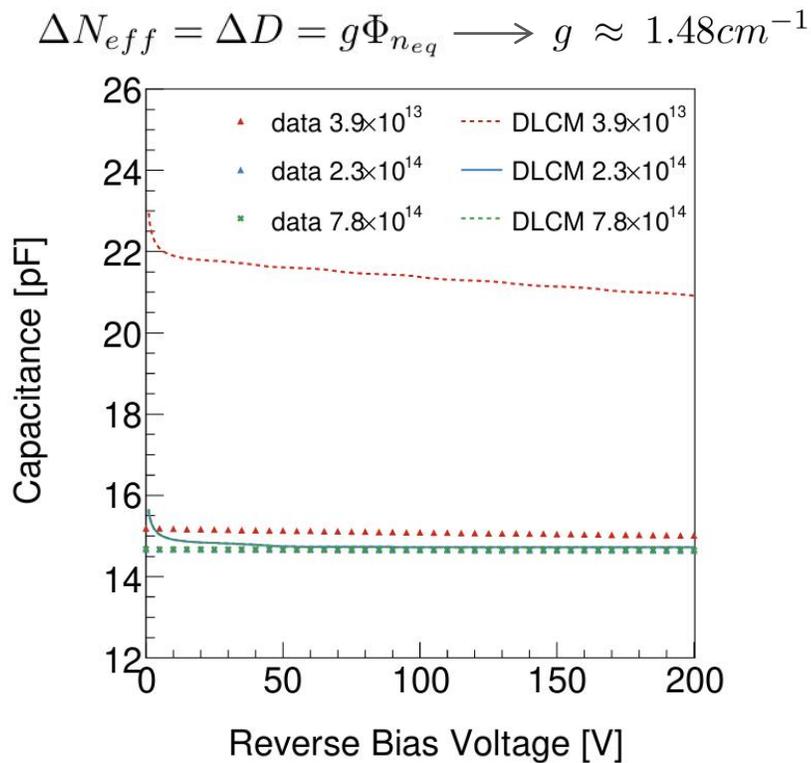
有无石墨烯对上升时间影响不大

SiC辐照损伤研究



label	$E_C - E_T$ (eV)	$N_{initial}$ (cm^{-3})	$N_{irradiated}$ (cm^{-3})	assignment
EH_1	0.44	1.40×10^{11}	1.11×10^{11}	V_{Si}
$Z_{1/2}$	0.63	8.52×10^{11}	8.66×10^{11}	V_C
EH_3	0.685	-	2.95×10^{11}	V_{Si}

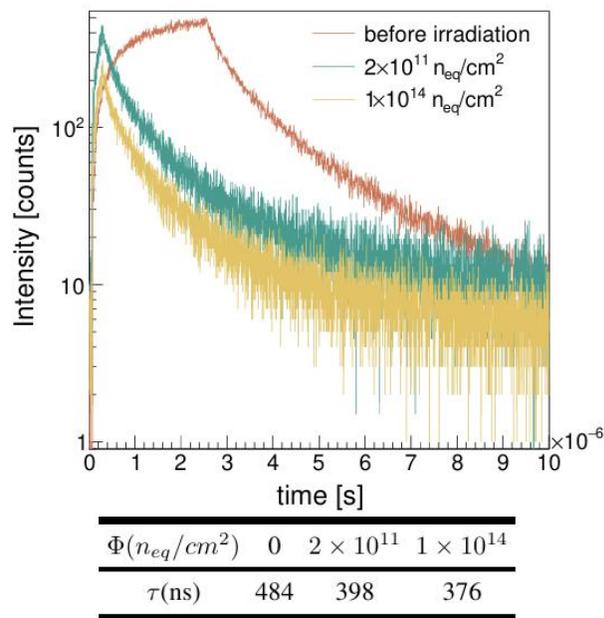
未辐照与 $2e11$ 等效中子剂量辐照下DLTS（深能级瞬态谱）结果



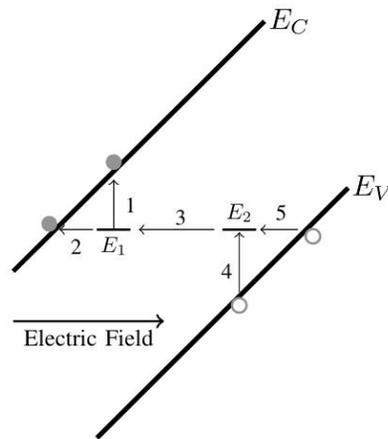
考虑深能级缺陷模型后对辐照探测器CV曲线的仿真

- 利用DLTS分析辐照后SiC的缺陷种类以及浓度，发现EH3缺陷在辐照后显著增加，是影响探测器性能的主要因素
- 通过对常量 g 的估算，在RASER中引入深能级补偿模型（DLCM），CV曲线验证了模型的合理性

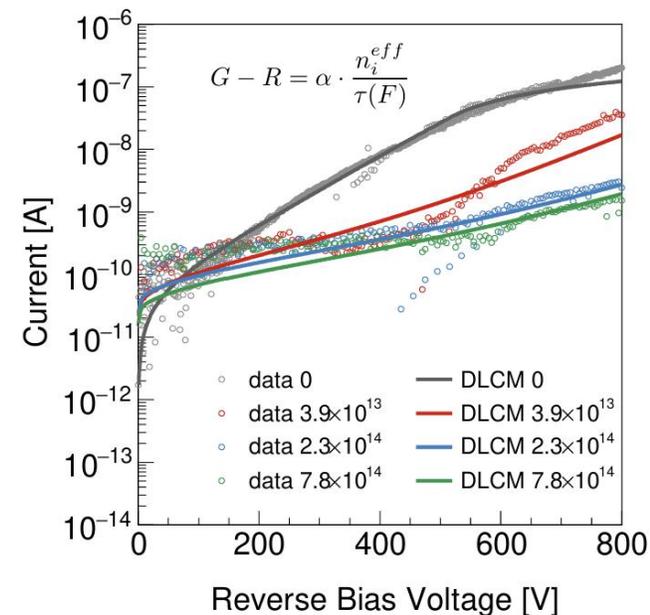
SiC辐照损伤研究



时间分辨光致发光（TRPL）测量辐照前后载流子寿命



路径1、4表示常规SRH复合路径
路径2、3、5表示电场作用下的隧穿过程

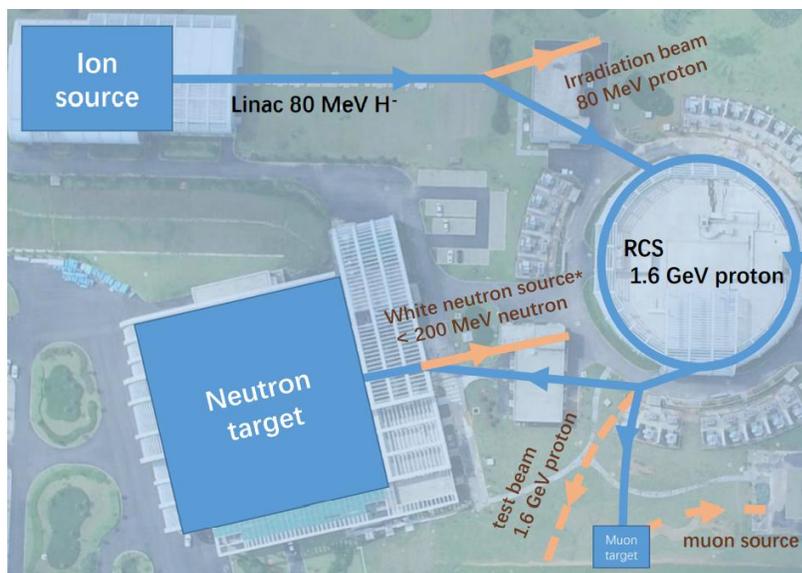


深能级补偿模型下辐照前后探测器的IV仿真

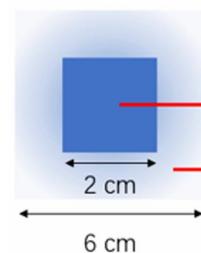
- 考虑隧道效应、载流子寿命与辐照剂量的关系、载流子浓度的调整，成功仿真了SiC探测器辐照前后的IV特性
- DLGM模型满足对SiC器件辐照前后性能的仿真需求，对评估抗辐照器件具有重要意义

应用 束流强度监测

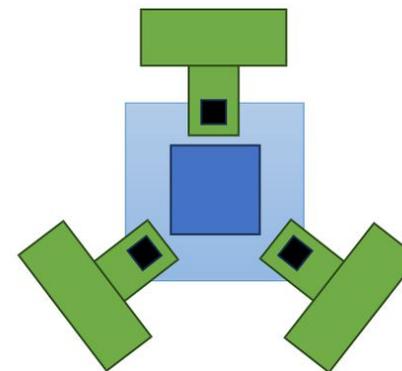
- 中国散裂中子源（CSNS）即将建立1.6GeV质子束线上，SiC探测器将用在束流周围作为束流监控系统实时反映束流位置、强度等信息



新建1.6GeV质子束流线



$6.75 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$
 $1 \times 10^{10} n_{eq}/cm^2$

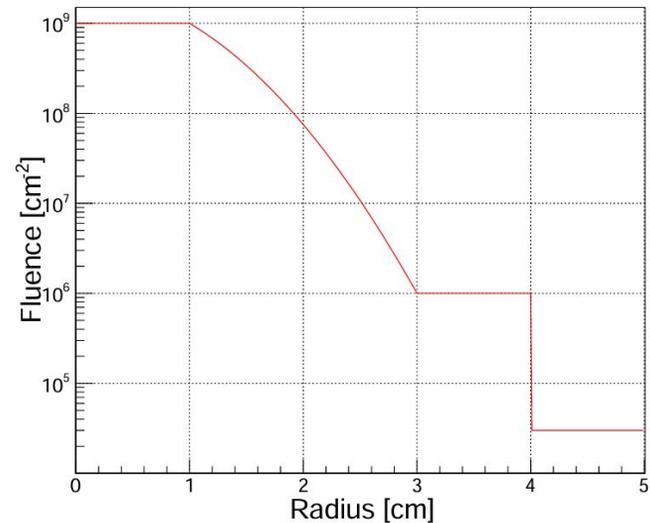
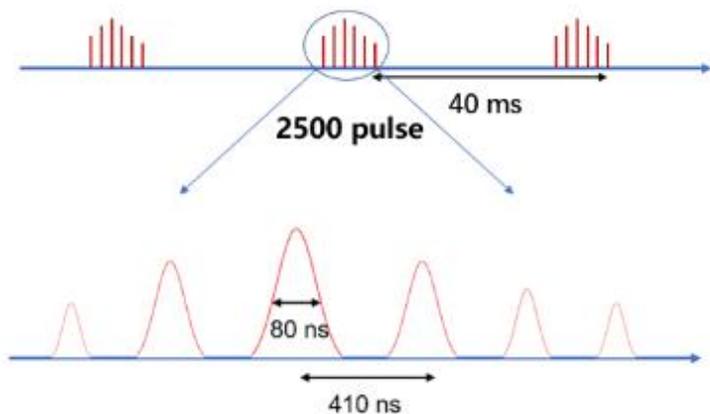


束流强度示意图（左）与探测器位置设计摆放（右）

- 数据传输方案：

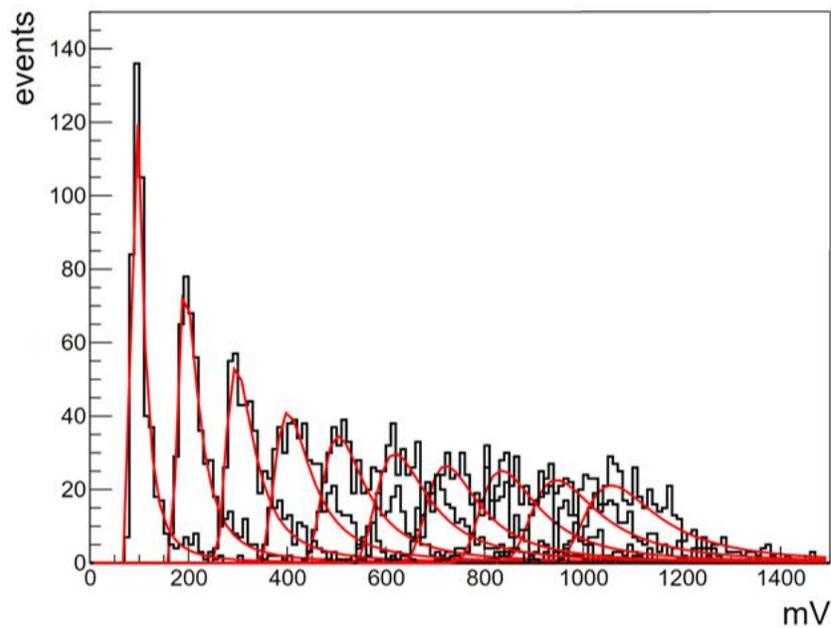
应用 束流强度监测

- $1e9/cm^2$:

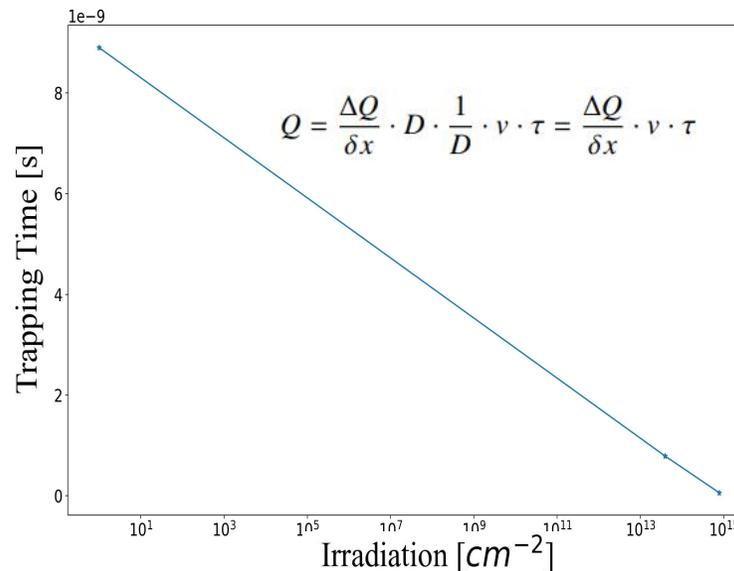


- 探测器放置位置r位于(3, 4)cm
- 每40ms一个束团，每个束团2500个pulse-> $6.25e4 pulse/s$
- $1e6/cm^2/s \rightarrow 2.5e5/0.25cm^2/s$, $4/0.25cm^2/pulse$ 每个放置在 $1e6$ 处探测器面积上每个pulse平均探测到4个粒子
- 对于 $1e9$ 流强，半径位置(3, 4)cm，平均每个pulse探测到4个粒子
- 对于 $1e6$ 流强，若束团结构与上述相同，中心区域，平均每个pulse探测到4个粒子
- 对于 $1e4$ 流强，若束团结构与上述相同，中心区域，平均每个pulse探测到0.04个粒子

应用 束流强度监测



入射粒子个数与幅值大小的关系

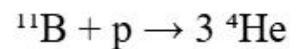


载流子俘获时间与辐照剂量

- 通过辐照实验证明了SiC探测器用于束流监控的可行性，对粒子数<3的情况分辨良好
- 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

应用 聚变强度监测

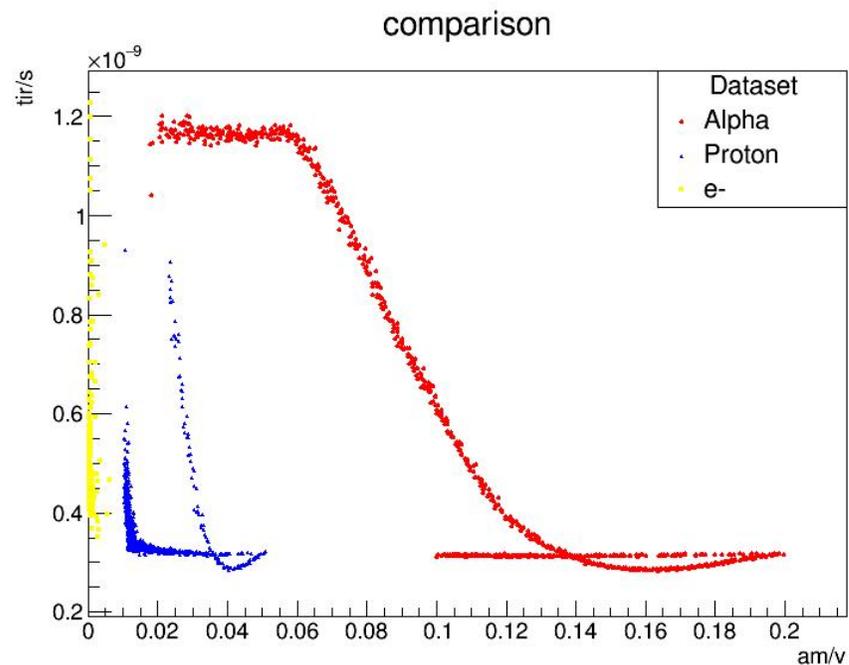
- 氢硼核聚变反应 强度检测



- 探测粒子: α 粒子
- 能量区间: 1-8MeV
- 背景粒子: X射线 10keV-10MeV
- 难点:

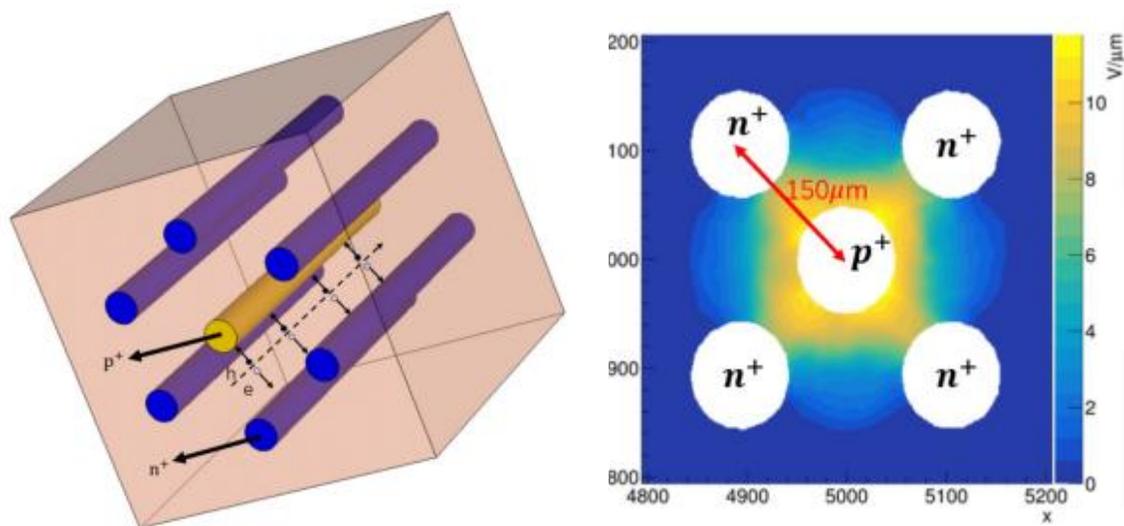
环境中电磁干扰较强;
 α 粒子辐照剂量的估算;
探测器阵列信号采集

- 能量: 与波幅正相关
- 种类: 波幅vs上升时间/脉冲宽度



3D探测器设计

- 结构优势：将探测器厚度与电极间距分离，同时兼顾减少漂移时间与提高信噪比，增强抗辐照性能和分辨性能



3D SiC探测器示意图（左）与RASER电场模拟（右）

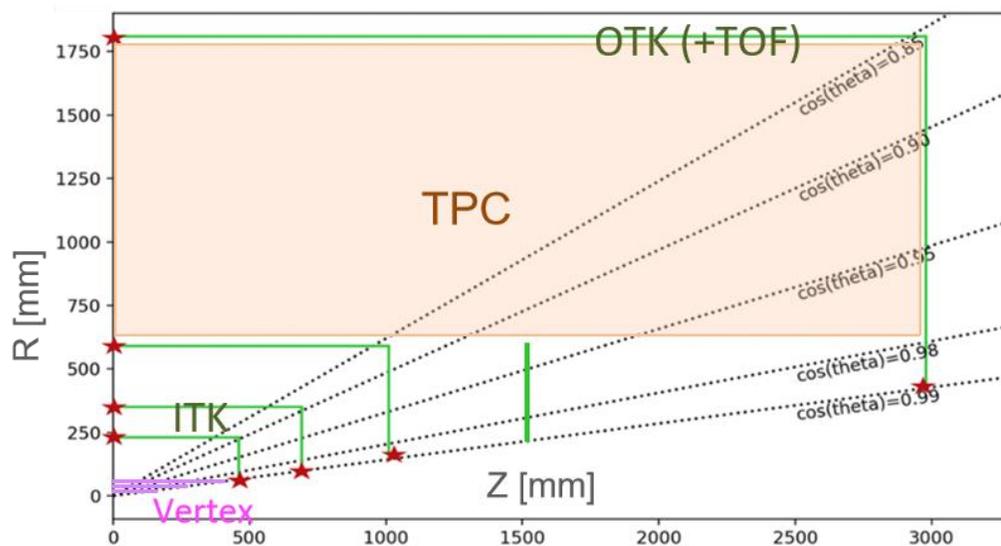
Table 1. The simulation parameters and results for planar 4H-SiC, 3D-4H-SiC-7E, and 3D-4H-SiC-5E detectors with 500 V bias voltage.

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

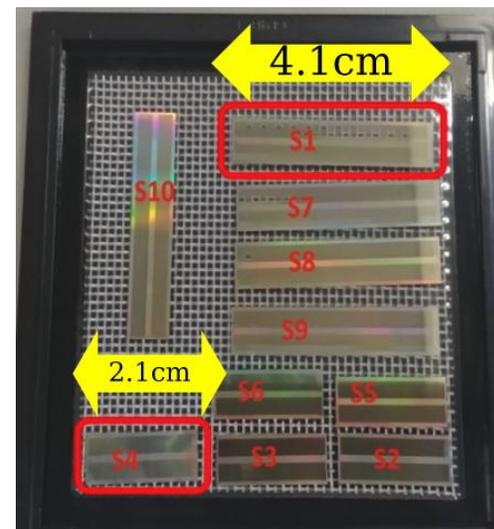
不同参数对3D SiC探测器时间分辨的影响

芯片级探测器开发

- 环形正负电子对撞机（CEPC）内部径迹探测器的方案之一：CMOS微条探测器
- 空间分辨：桶部 $\sigma_{\phi} < 10\mu\text{m}$ ， $\sigma_z < 50\mu\text{m}$ ，端盖 $\sigma_z < 100\mu\text{m}$ 。时间分辨几ns，区分23ns间隔的束团交叉
- 覆盖面积： $\sim 20\text{m}^2$
- 将硅微条探测器与专用集成电路（ASIC）集成，无需引线键合，有望降低成本，可以实现大规模生产，CMOS strip分辨好于 $5\mu\text{m}$ 、5ns



CEPC径迹探测器



CMOS strip探测器部分

总结与展望

- 开发团队与CERN DRD3保持良好沟通，在辐照损伤表征、模拟、宽禁带半导体材料研发等方面均有合作

1. WG1 Monolithic silicon technologies
2. WG2 Hybrid silicon technologies
3. WG3 Radiation damage characterization and sensor operation at extreme fluences
4. WG4 Simulations
5. WG5 Characterization techniques, facilities
6. WG6 Wide band-gap and innovative sensor materials
7. WG7 Interconnections and device fabrication
8. WG8 Dissemination and outreach

WG4 research goals <2027	
	Description
RG 4.1	Flexible CMOS simulation adaptable to different technology nodes and development of connections between tools for device-level simulation and electronic circuit design/validation
RG 4.2	Implementation of newly measured semiconductor properties into TCAD and MC simulations tools
RG 4.3	Definition of benchmark for validating the radiation damage models with measurements and different benchmark models.
RG 4.4	Developing of bulk and surface model for $10^{16} \text{cm}^{-2} < \Phi_{eq} < 10^{17} \text{cm}^{-2}$
RG 4.5	Collate solutions from different MC tools and develop an algorithm to include adaptive electric and weighting fields

CERN DRD3 Work Group工作重点

Input to EDP ESPP(European Strategy for Particle Physics)

DRD3-ESPP-2024

DRD3 collaboration

December 2024

General Strategic Recommendations (GSR)

GSR 3 - Detector Monte Carlo simulation packages which takes part also in the framework of DRD3 (AllPix2, Garfield++, **RASER**, KDetSim) are constantly improved to address the needs of each specific technology. The same is true for TB reconstruction software.

RASER仿真软件被CERN DRD3列入欧洲粒子物理战略的重要发展方向之一，得到国际认可

总结与展望

- 每年组织RASER Workshop面向感兴趣的学者，目标是通过为期3天左右的培训，实现某个具体探测场景的仿真 <https://indico.ihep.ac.cn/event/25833/>
- 持续发展、维护有可靠性的各种应用场景，协助方案可行性验证与最终实现

谢谢!