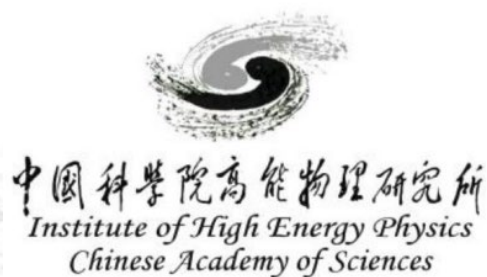


4H-SiC粒子探测器的研究潜力及其器件研发



Xiyuan Zhang^{1,2}, Keqi Wang³, Sen Zhao^{1,2}, Ziyi Li^{1,2}, Jiaxiang Chen⁴, Xinbo Zou⁴, Congcong Wang^{1,2}, Xin Shi^{1,2}

¹Institute of High Energy Physics, CAS

²State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics,

³Liaoning University

⁴Shanghai Technology University

4H-SiC 粒子探测器的研究潜力

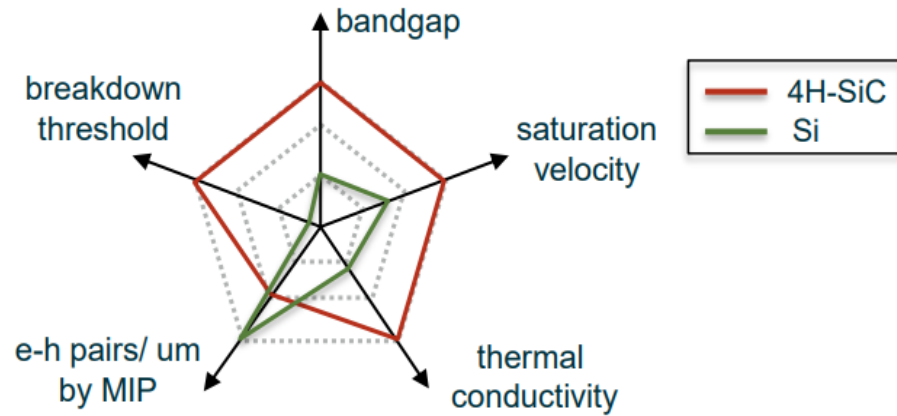
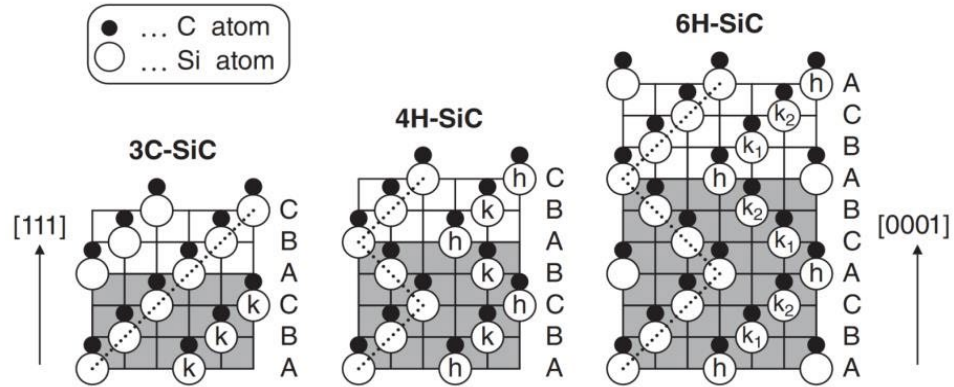
在众多构型的碳化硅(SiC)中, 4H-SiC因其带隙宽, 载流子漂移率高, 是最具潜力的抗辐照粒子探测器材料

优势:

- 禁带宽度介于硅和金刚石之间
- 高饱和载流子漂移速率 (响应速度快)
- 高击穿电场和高原子位移能 (有更高的抗辐照潜质)
- 高热导率 (无需制冷系统)
- 在辐照后暗电流不提升
- 对可见光不敏感

劣势:

- 各向异性
- 高电离能 (信号偏小)
- 外延生长厚度有限 (<150 μm)
- 仿真软件模型不完善



4H-SiC 粒子探测器的研究潜力

- SiC 材料在探测器上的应用已有近20年的历史[1][2]
- 近年来SiC因其在电力电子市场的广泛应用，其产能逐年增加



电动汽车/混动汽车

SiC战略市场

5G 电源/开关电源

太阳能逆变器

电动汽车充电桩

功率密度增加60%
能效提高1%

kW	充满电的时间	速度	描述
250	5-7 分钟	超快	超高直流非车载充电。相当于加油站加油。
44	25-35分钟	快	直流非车载充电
22	3小时	中等	3相交流充电, 车载充电
11	10小时	慢	单相交流充电, 车载充电

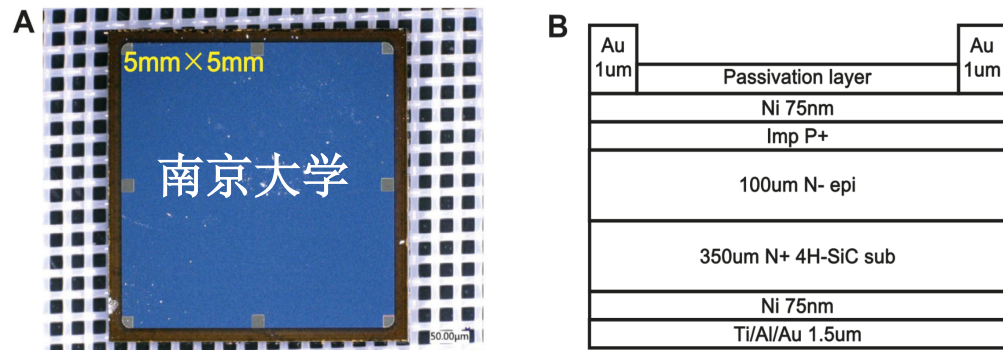
大的功率半导体用于电源转换

- 从SiC产业来看，器件厂家既有向下做到模块，也有向上做到外延甚至衬底；外延和衬底厂商也在相互交融
- 纵观全球，中国在SiC领域投资力度最大、项目建立最多
- 为国产研发SiC 粒子探测器提供了保障

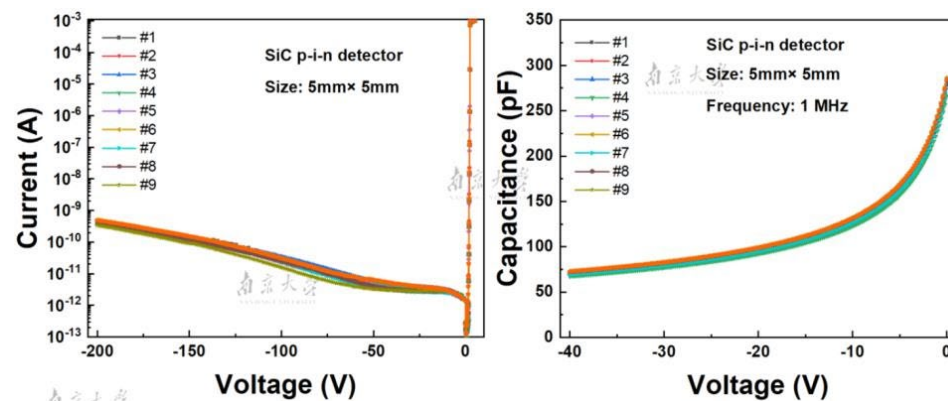
[1]10.1063/1.3457906
[2]10.1016/j.nima.2005.03.048

4H-SiC PIN 探测器的研究

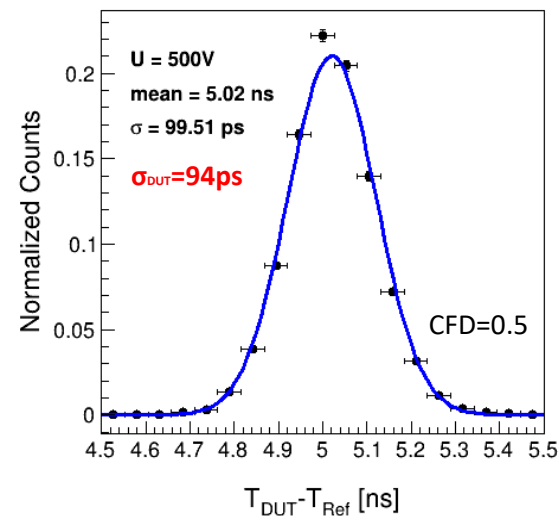
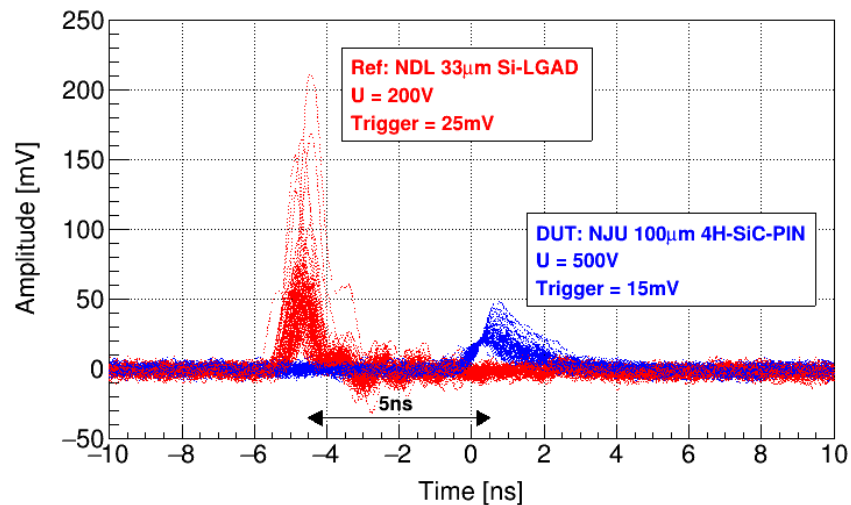
器件结构



IV&CV特性



粒子信号波形采样

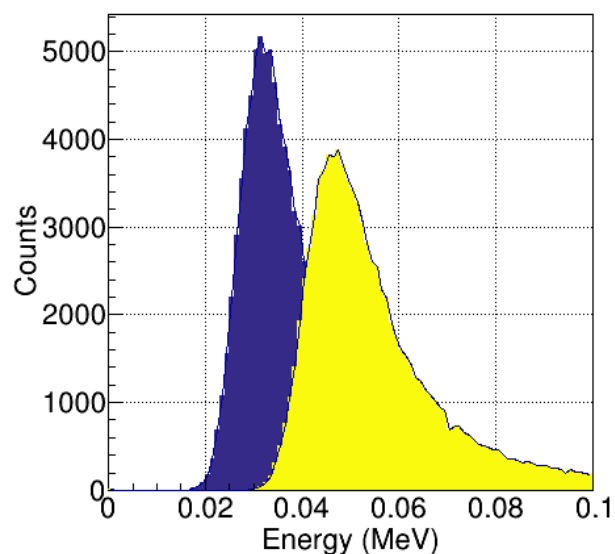


- 4H-SiC PIN 探测器的时间分辨可达 $\sigma_T = 94$ ps
- SiC 具有MIPs 探测的潜力

[10.3389/fphy.2022.718071](https://doi.org/10.3389/fphy.2022.718071)

Minimum Ionizing Particle (MIP) Detection of SiC

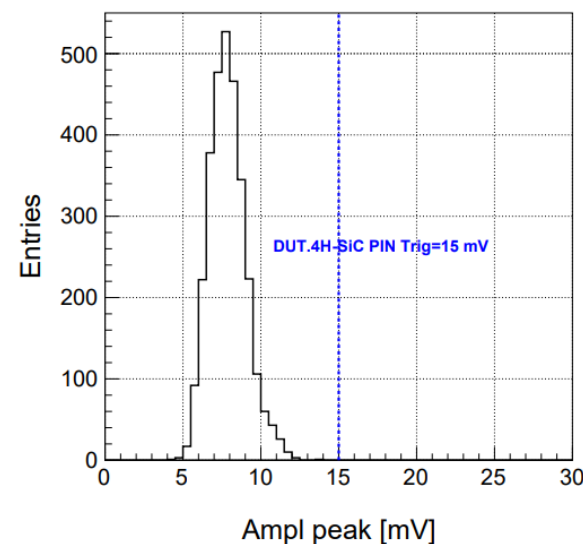
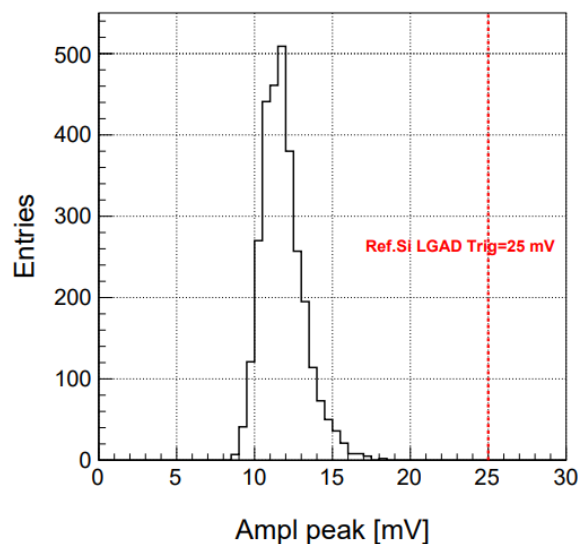
100 μ m Si & SiC 的能量沉积



Silicon: ~ 78 e-h pairs / μ m
(~ 3.6 eV / e-h pairs)

SiC: ~ 55 e-h pairs / μ m
(~ 7.8 eV / e-h pairs)

Si LGAD 和 4H-SiC PIN 的噪声峰值分布

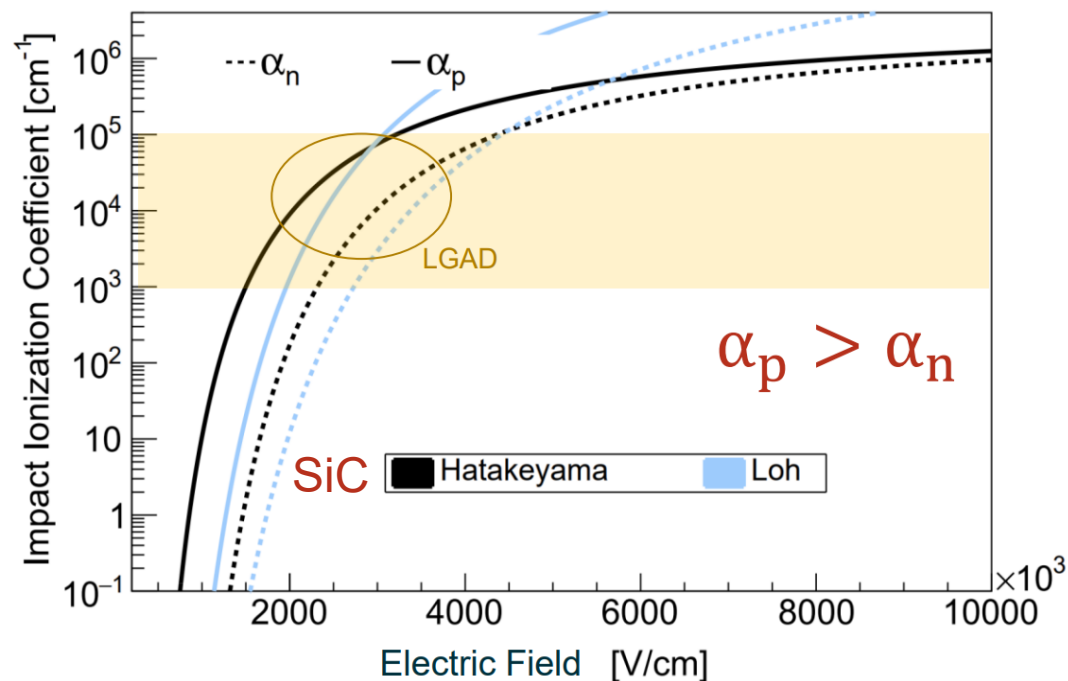
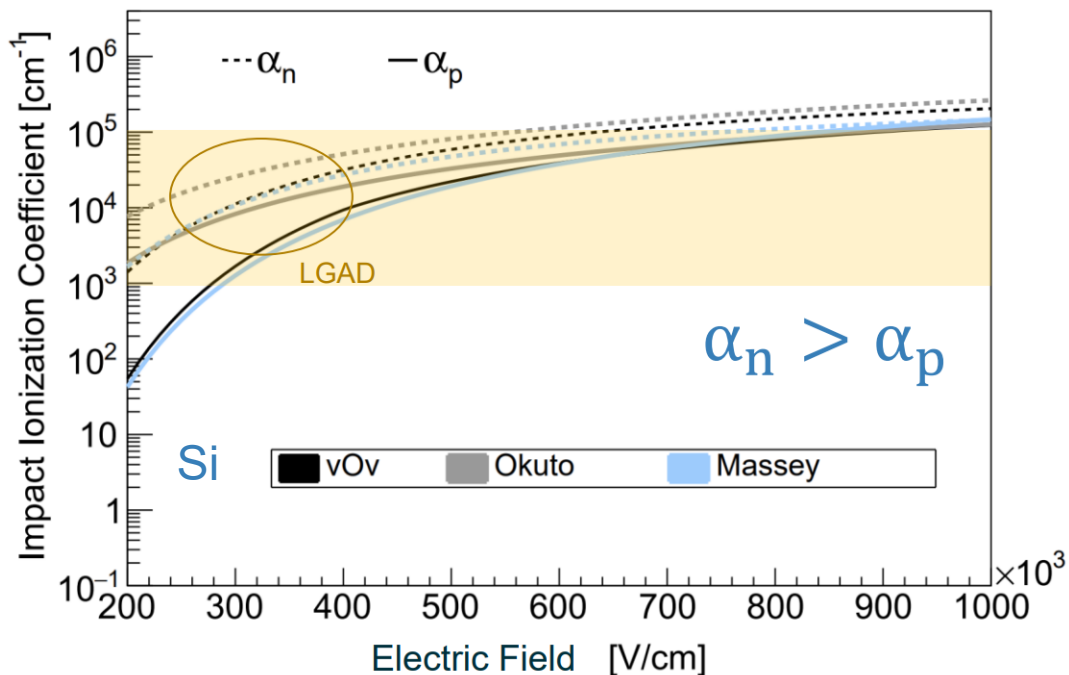


相同厚度的SiC和Si探测器，收集相同的MIP粒子，SiC探测器比Si探测器产生的电子空穴对少

4H-SiC LGAD 的噪声水平明显要比 Si LGAD 的要低，其触发值 (15mV) 低于Si LGAD (25mV)

- 尽管4H-SiC PIN 的噪声水平更低，但 MIP 粒子电荷信号较弱，对电子学要求更高
- 考虑通过设计 4H-SiC LGAD 来增大 MIP 粒子的信号

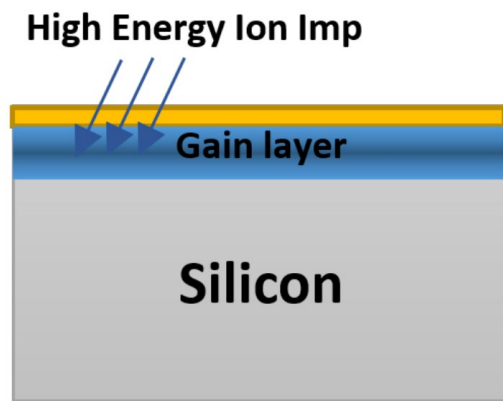
碰撞电离系数



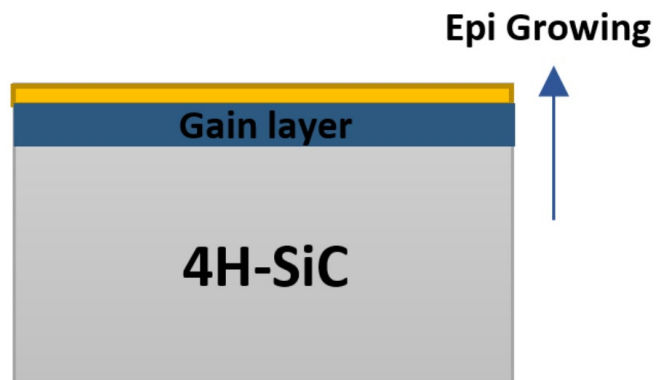
Si LGAD: $\alpha_n > \alpha_p$ 电子倍增为主导的 P 型 Si LGAD, 电场强度为 **0.3 MV/cm** ;

4H-SiC LGAD: $\alpha_n < \alpha_p$ 空穴倍增为主导的 N 型 4H-SiC LGAD, 电场强度为 **2 MV/cm** ;

器件外延生长与工艺加工

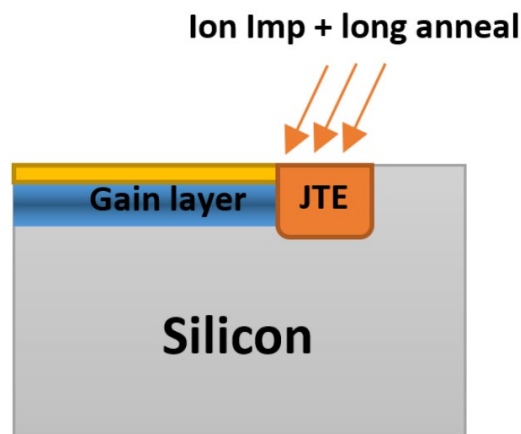


Si: 离子注入形成 $1\mu\text{m}$ 增益层与P层

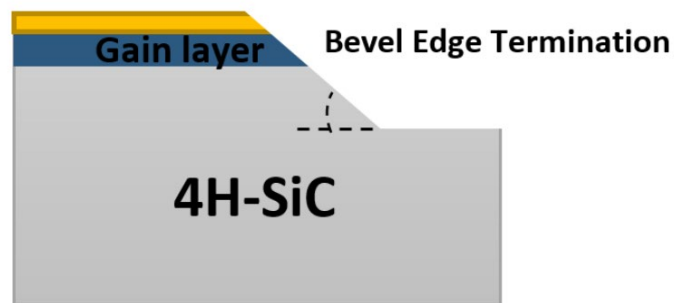


SiC: 全外延生长

SiC中深离子注入需要极高的离子注入能量，同时需要高温退火，易带来大量的缺陷



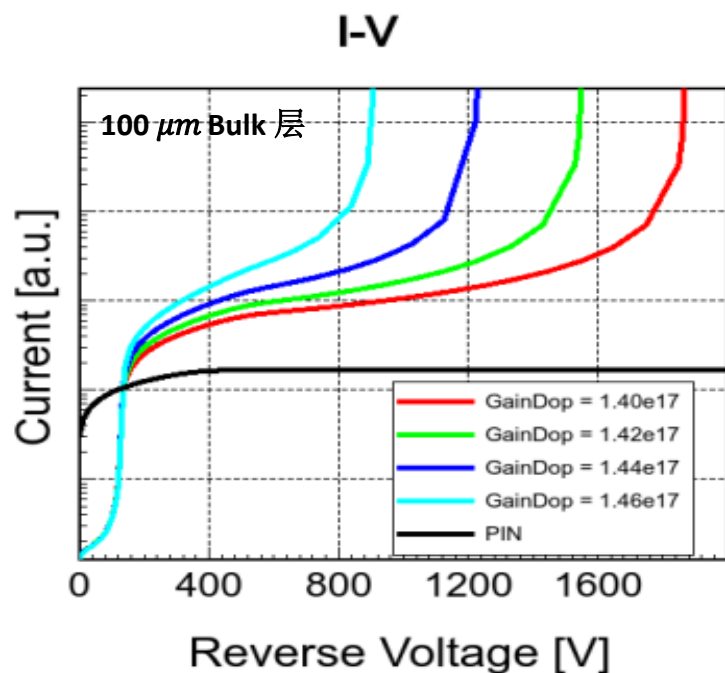
终端结 JTE



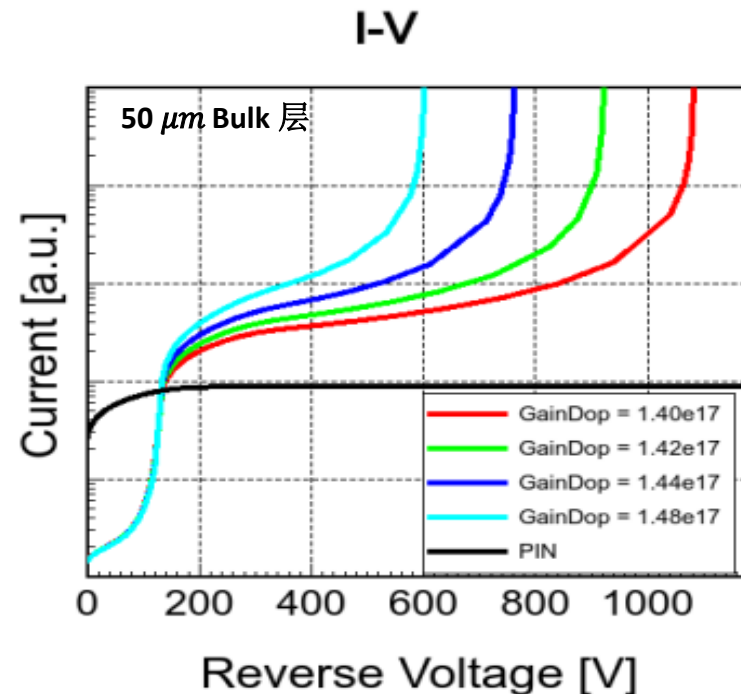
台面刻蚀终端结

灵敏区的设计

灵敏区掺杂浓度 $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

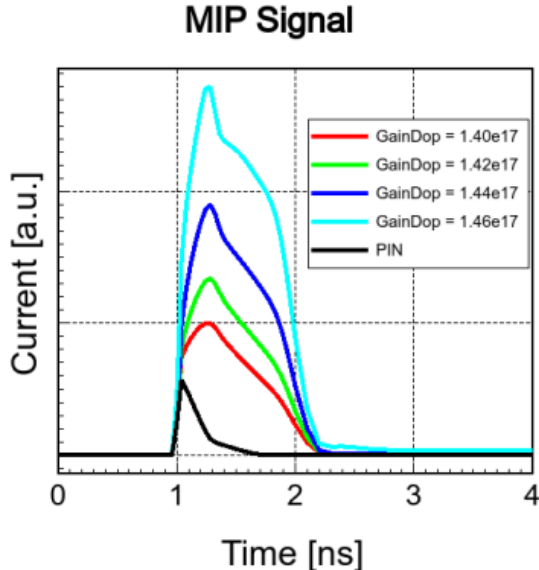
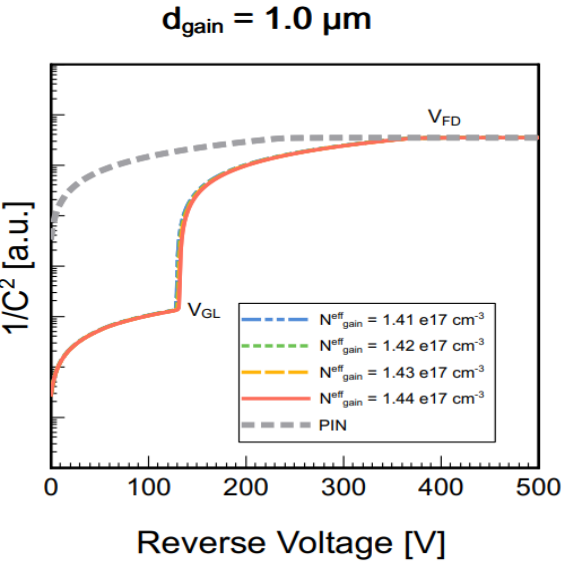
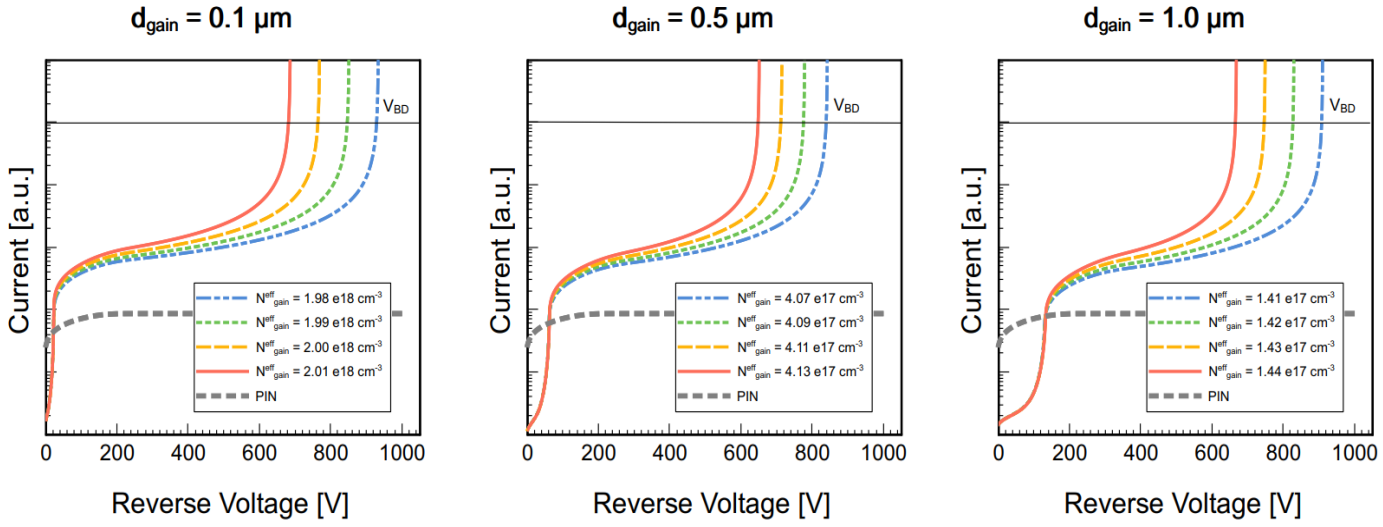


灵敏区掺杂浓度 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$



- 灵敏区越厚，MIP离子产生的电子-空穴对越多；灵敏区越薄，电子和空穴的收集时间越快，即探测器的响应速度越快
- 灵敏区利用率高(器件全耗尽)，灵敏区掺杂浓度越低，越容易全耗尽
- N型4H-SiC的最低掺杂浓度范围 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
- 50 μm 的灵敏区更满足需求

增益层的设计



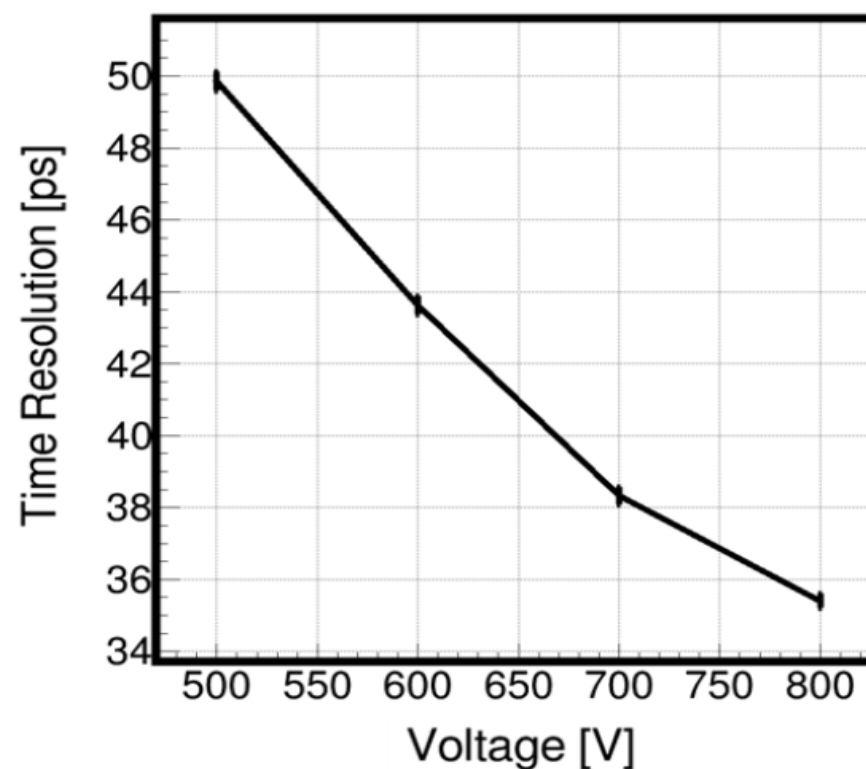
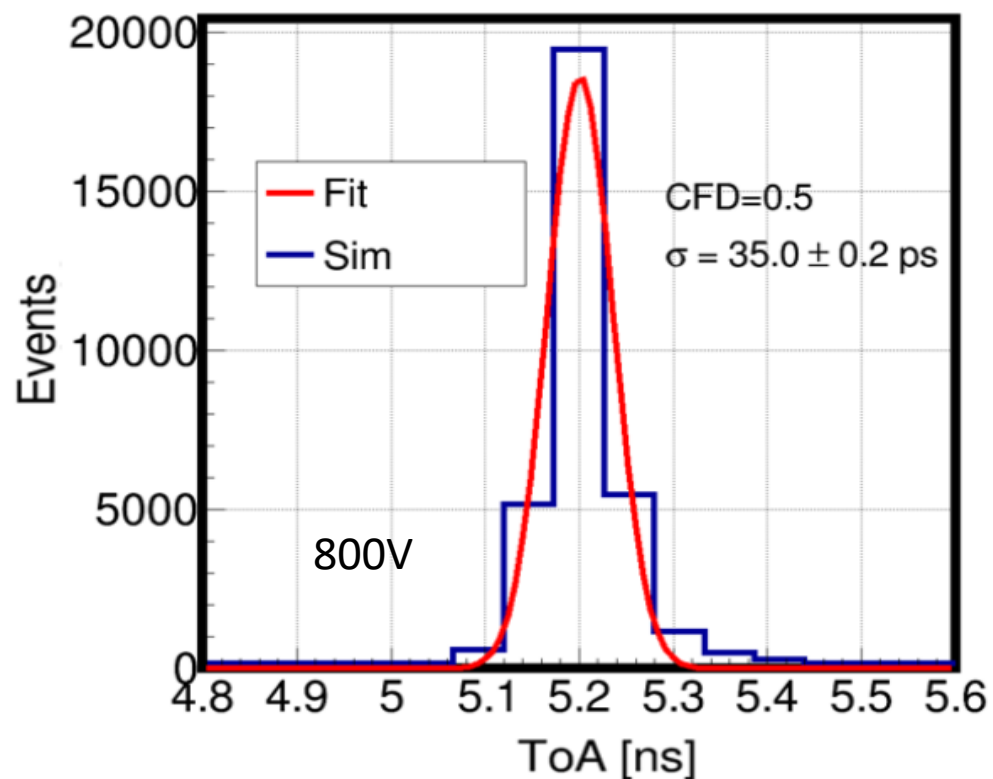
- 增益层掺杂浓度对击穿电压影响剧烈
- 增益层厚度对击穿电压影响不明显
- $1\mu\text{m}$ 增益层的掺杂浓度 $< 0.5\mu\text{m}$ 增益层的掺杂浓度，在工艺上更容易实现
- 增益层厚度 $1\mu\text{m}$ ，掺杂浓度 $1.41\text{e}17\text{-}1.44\text{e}17$ 更满足需求

$V_{\text{GL}} \sim 140\text{V}$
 $V_{\text{FD}} \sim 380\text{V}$
 $V_{\text{BD}} > 600\text{V}$
 Gain $\sim 4\text{-}20$

工作电压范围
 $U = 380\text{V} \sim 600\text{V}$

Design and Simulation of 4H-SiC Low Gain Avalanche Diode, 2023, Nucl. Instrum. Methods A, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168677>

时间分辨仿真



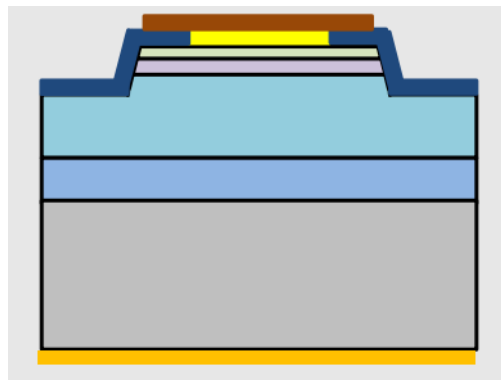
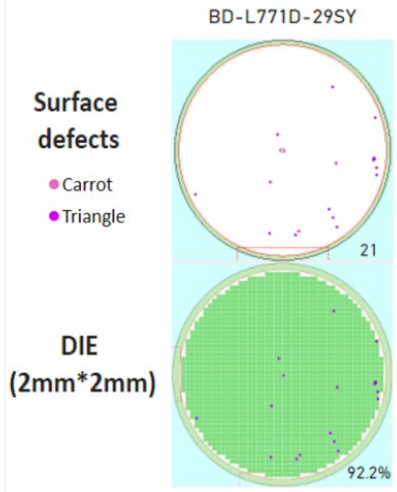
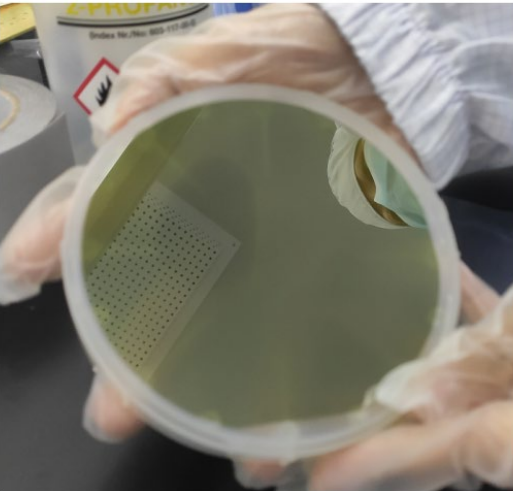
- 理想的4H-SiC LGAD 的时间分辨可达 35 ± 0.2 ps
- 明显优于4H-SiC PIN 器件($\sigma=94$ ps)
- 时间分辨率随着电压的增大而减小



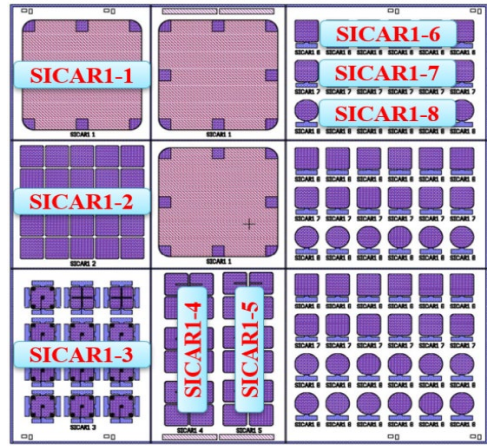
驱动4H-SiC LGAD粒子探测器的研发

Design of a novel 4H-SiC LGAD timing device, 2023, Radiation Detection Technology and Methods, DOI : 10.1007/s41605-023-00431-y.

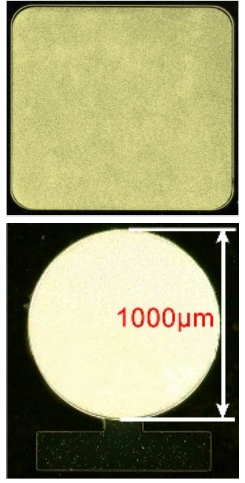
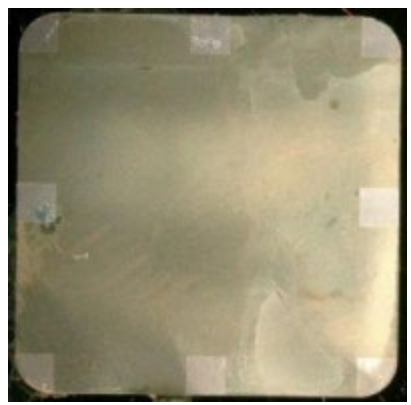
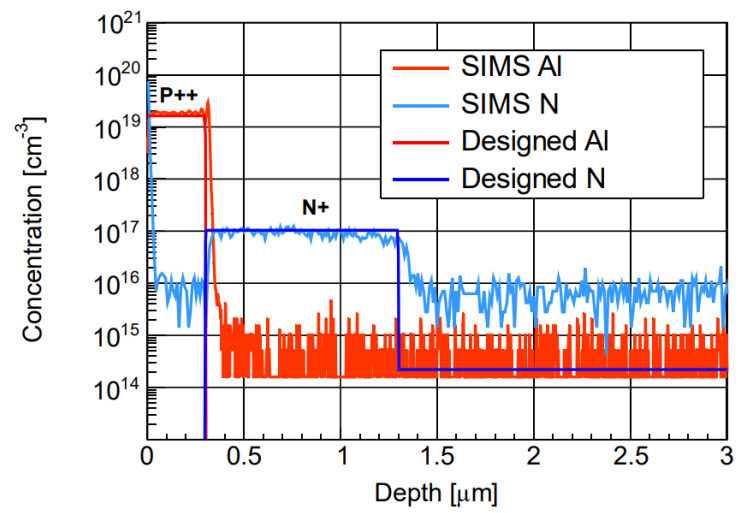
外延片与加工工艺



- N type & P type 欧姆接触
- 台面刻蚀终端



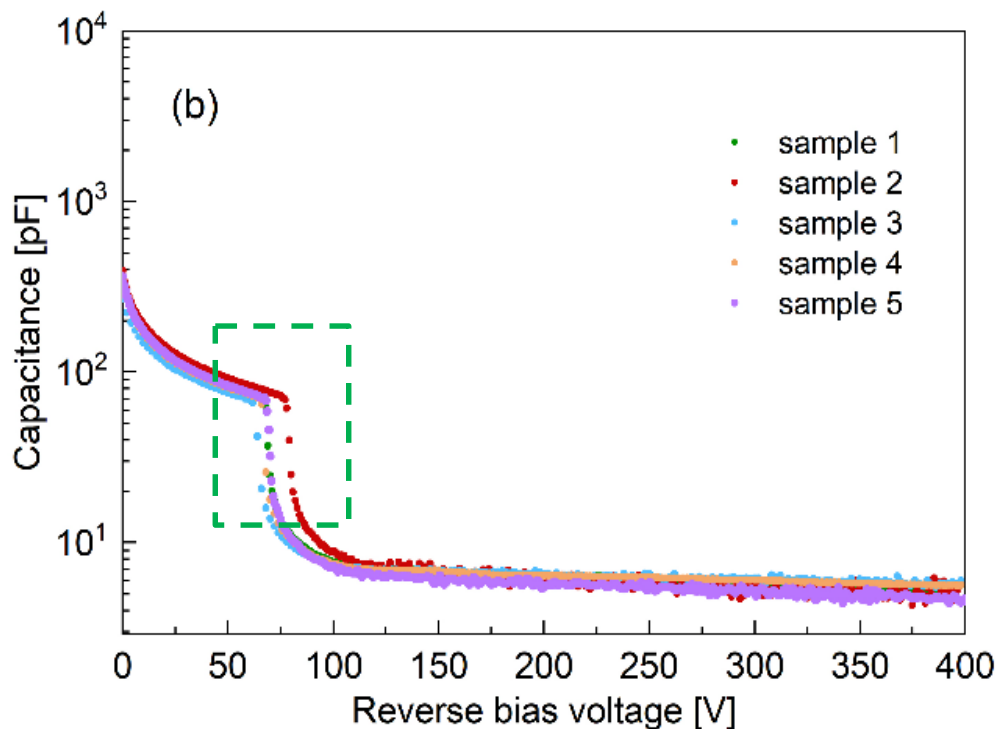
4H-SiC LGAD 掺杂浓度的设计和 SIMS 测量结果的比较



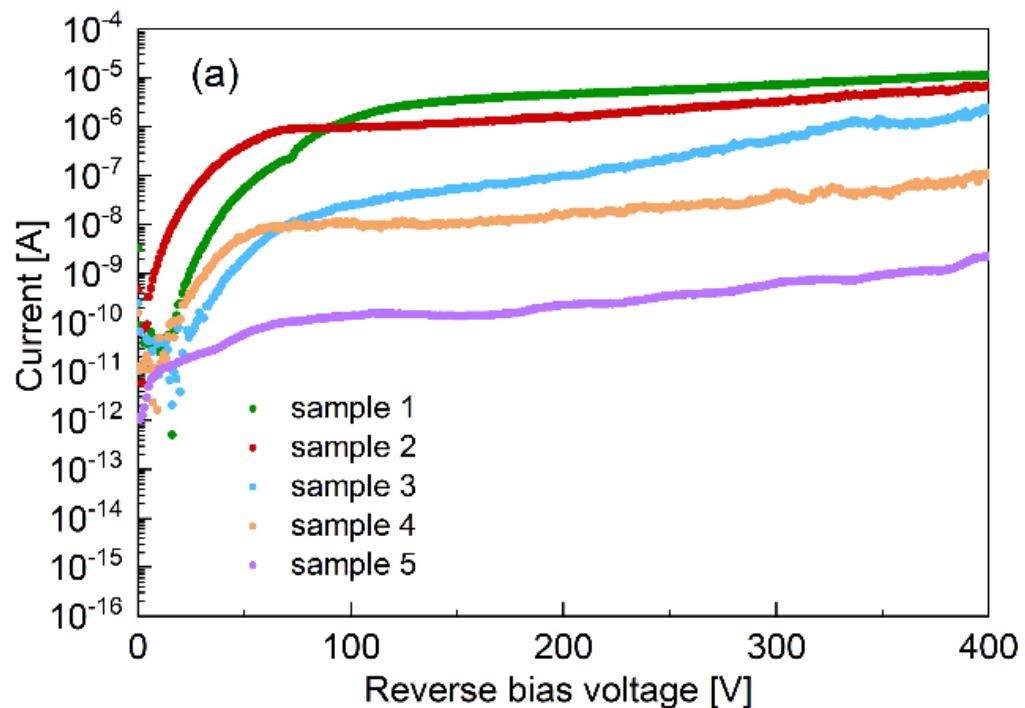
IV & CV 特性

LGAD 的设计要求: $V_{GL} < V_{FD} < V_{BD}$

LGAD的工作范围: $V_{FD} \sim V_{BD}$

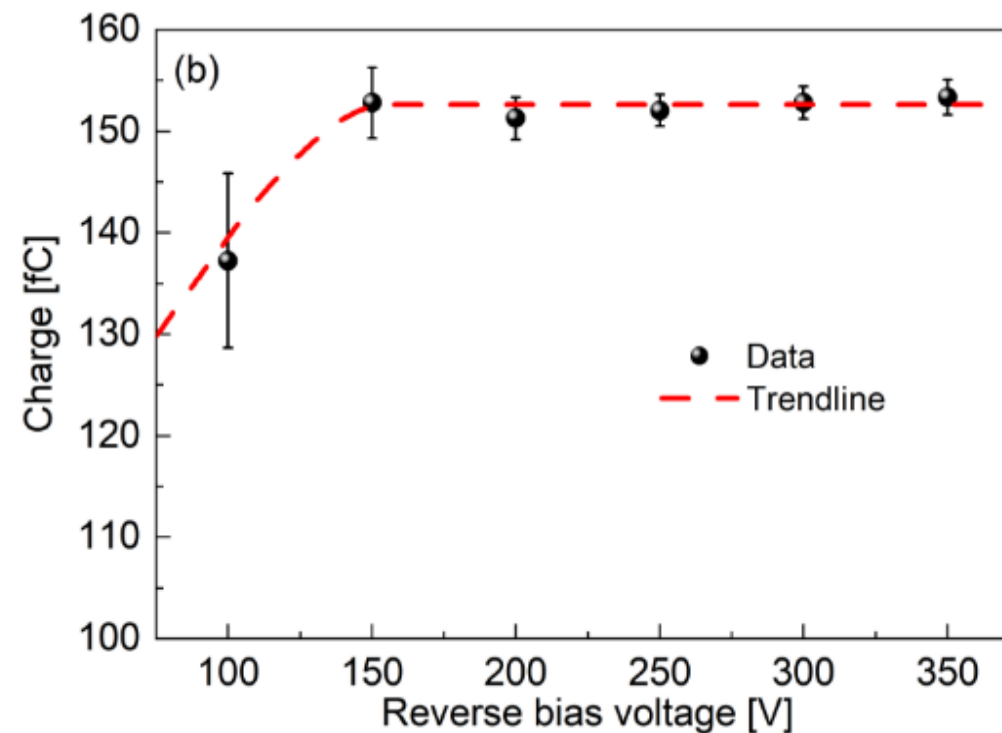
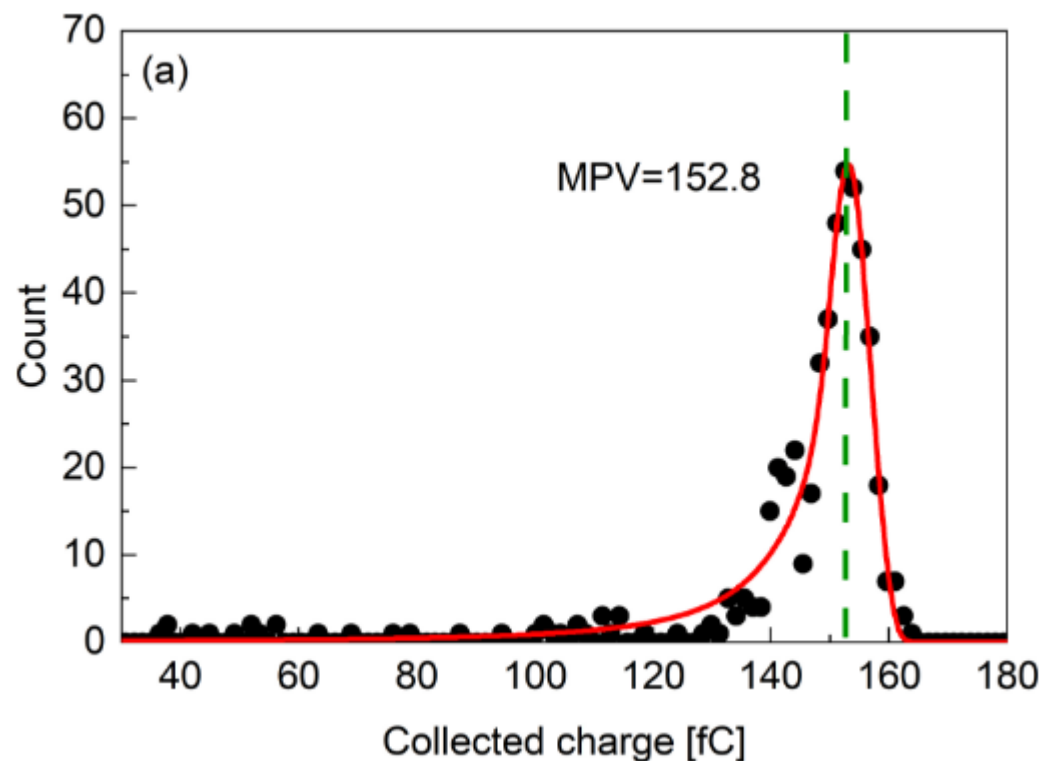


- $V_{GL} \sim 75V$
- $V_{FD} \sim 350V$



- 漏电流最低可达nA级别, 但一致性有待进一步优化
- 在400V没有发生击穿

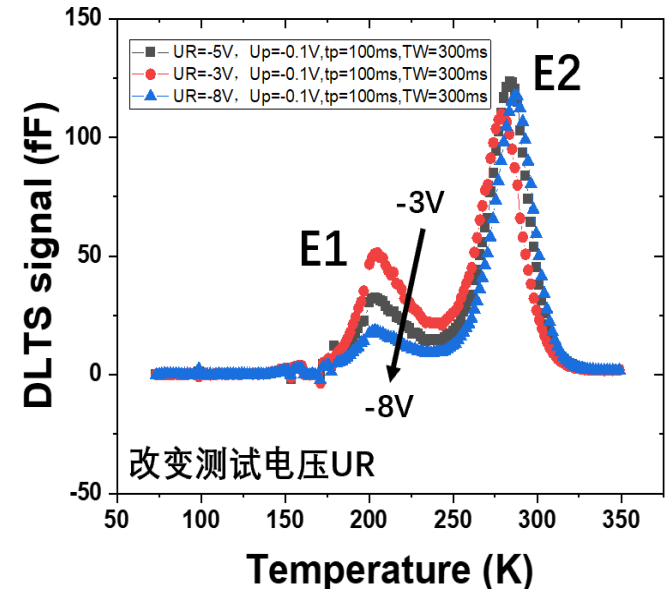
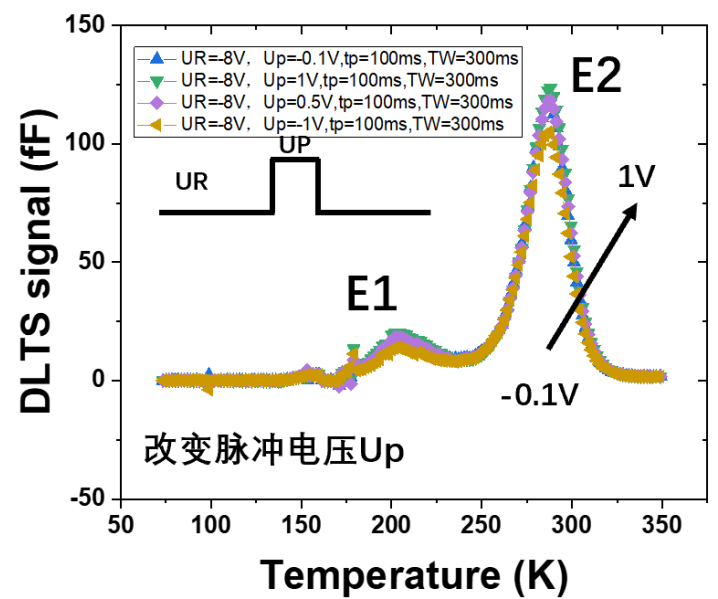
α 粒子电荷收集



- 偏压为150V时的电荷收集量~152.8fC
- 偏压为100V时的电荷收集量~137.5fC
- 150V ~ 350V 电荷收集趋于饱和

深能级缺陷表征 (上海科技大学合作)

深能级瞬态谱(DLTS)



Trap	Activation energy(eV)	Capture cross-section (cm ²)	Trap concentration NT (cm ⁻³)
E1	0.44±0.01	1.88E-14	4.78E+16
E2	0.63±0.01	1.07E-14	3.16E+17

- 电子陷阱对电子的影响
- 在75-350K范围内通过DLTS测试, 发现两个电子陷阱E1 (Ec~0.44eV), E2 (Ec~0.63eV)
- 其中E2比E1陷阱浓度大一个数量级, 捕获截面比E1略小
- 发现的两个电子陷阱E1和E2与报道的EH1和Z1/2 对应
- E2陷阱对电场敏感, 可能在N-区内且位于接近P区表面的物理位置。

总结

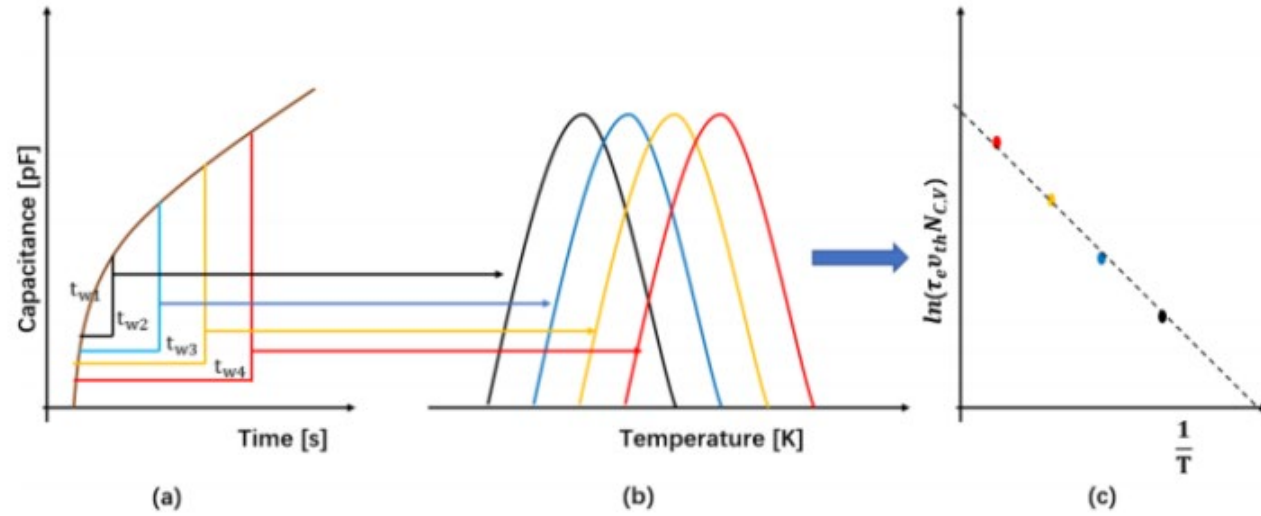
- 尝试不同的掺杂浓度和厚度，设计了满足 $V_{FD} < V_w < V_{BD}$ 要求的4H-SiC LGAD
- 仿真得到理想的4H-SiC LGAD 的时间分辨可达 $35 \pm 0.2\text{ps}$
- 实验得到了具有增益结构的LGAD器件，其器件的漏电流一致性有待提高
- 表征了两种深能级缺陷，与SiC材料中报道的Z1/2和EH1基本吻合

计划

- 进一步优化4H-SiC LGAD的设计与工艺
- 设计适合4H-SiC 的电子学测试板
- 表征辐照后的缺陷并研究缺陷对其电学性能，电荷收集效率以及时间分辨的影响

Thanks !

Backup

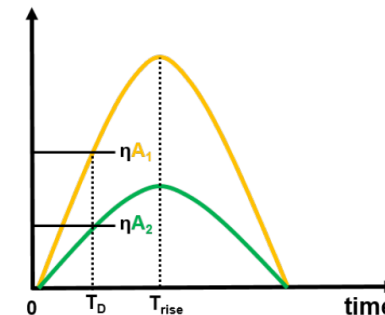
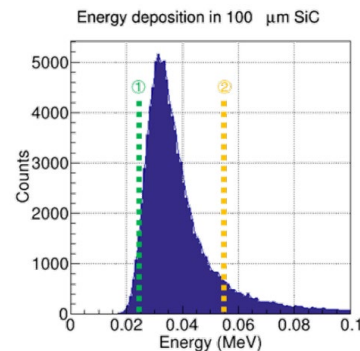


$$\tau_e = \frac{1}{N_c v_{th} \sigma_e} \exp\left(\frac{E_c - ET}{kT}\right)$$

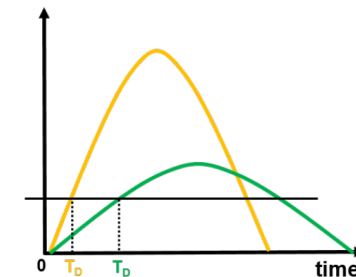
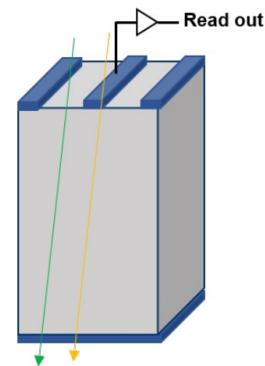
$$C(t) = C_{st} \left\{ 1 - \frac{NT \exp(-t/\tau_e)}{2N_D} \right\}$$

$$\sigma^2 = \sigma_{Ionization}^2 + \sigma_{Distortion}^2 + \sigma_{Jitter}^2 + \sigma_{TDC}^2$$

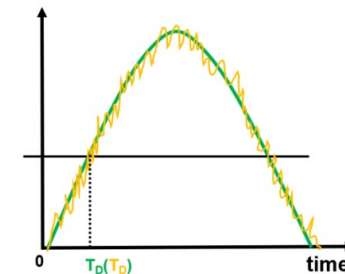
- $\sigma_{Ionization}$ 是指 MIP 粒子在探测器介质中电离过程的贡献



- $\sigma_{Distortion}$ 是指由于探测器本身内部电场的不均匀造成信号的畸变



- σ_{jitter} 主要来自于探测器和前端电子学的噪声贡献



- σ_{TDC} 是指由于模数转化后，离散化的数字信号失真，导致定时时刻移动引入的不确定性