

密级：公开

基于4H-SiC的高效率微结构 中子探测器研究

中国工程物理研究院

电子工程研究所

报告人：张莹

目录

1

研究背景

2

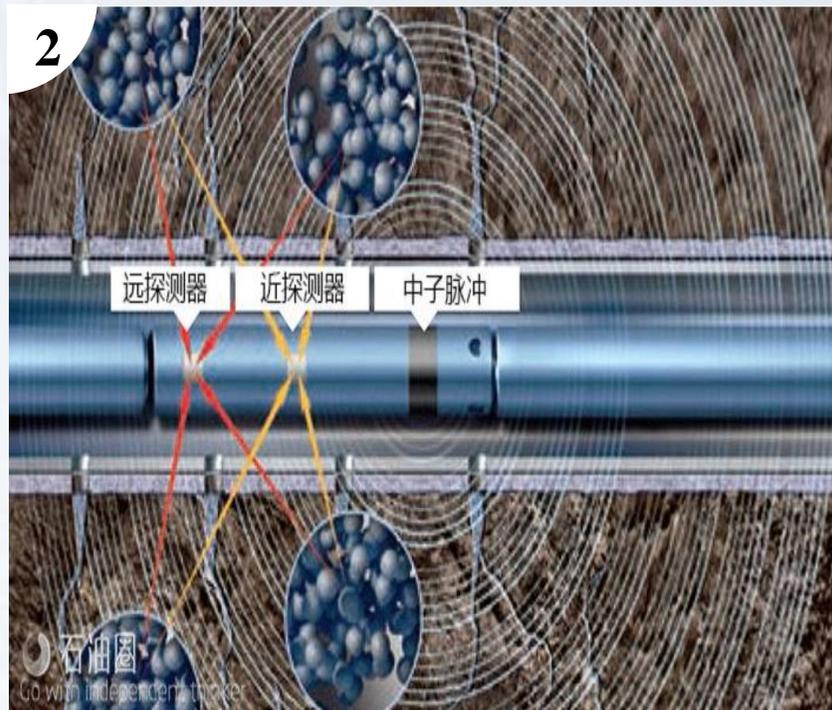
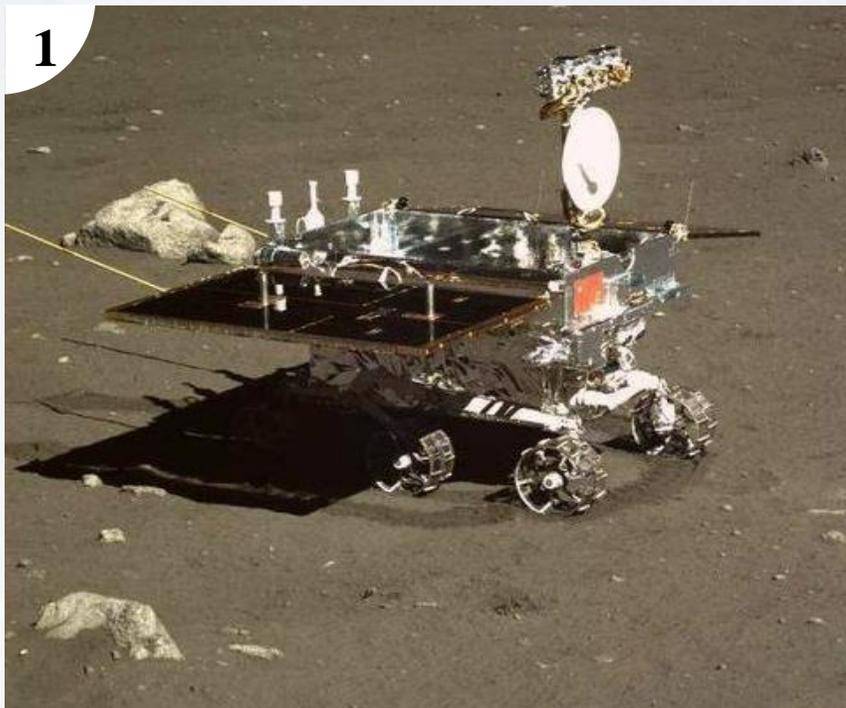
研究进展

3

后续工作



➤ 半导体探测器典型应用场景



1. 航空航天设备
2. 中子测井
3. 大型核科学装置
4. 核医疗
5. 核电设施

◆ 相较于传统的Ge/Si半导体探测器，**SiC/GaN探测器在耐辐照、抗温漂等方面有显著改善，引起广泛关注。**

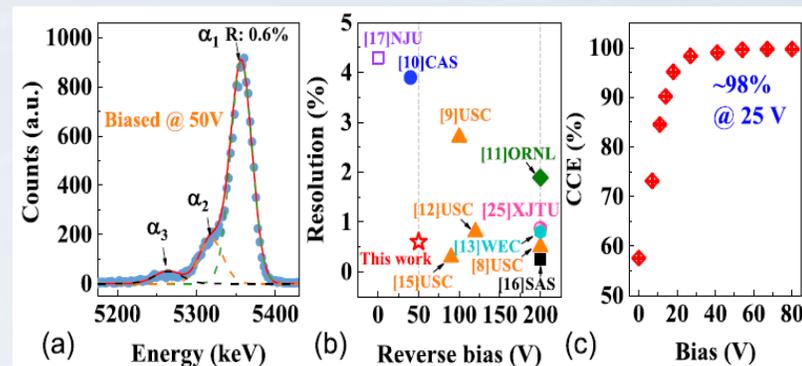
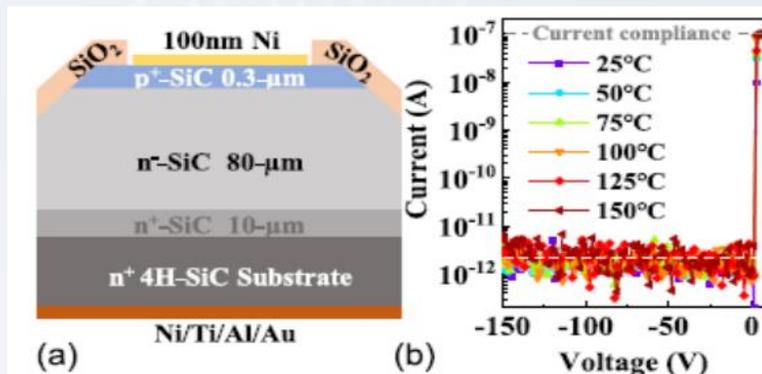


代表性平面结构SiC粒子探测器

国外: NIST、SNL、KSU, AIST, CERN

国内: 中科院、中电科、西北核、南大、西交、西电等

在平面型SiC粒子探测器领域成果显著，**能量分辨率、抗温漂、耐辐照**等指标表现优异。主要差距是**探测效率低**，目前见诸报道的中子探测器效率 < **1% @ 2Å**。



- ◆ 南京大学陆海教授团队研制的**低压SiC PIN**粒子探测器，耐高温至**150°C**， α 粒子能量分辨率**0.6%**，工作电压低至**25V** ①。

Detector name	Energy resolution (alpha energy)	Full width at half maximum	Projected value of energy resolution to 14 MeV neutrons
SiCD	4.30% (4.17 MeV)	179.31 keV	1.28%
SiCE	3.80% (4.69 MeV)	178.22 keV	1.27%
			En. Res. to 14 MeV Neut. (experiment)
SiC100	2.89% (4.3 MeV) [20]	124.7 keV [20]	2.7% [19]

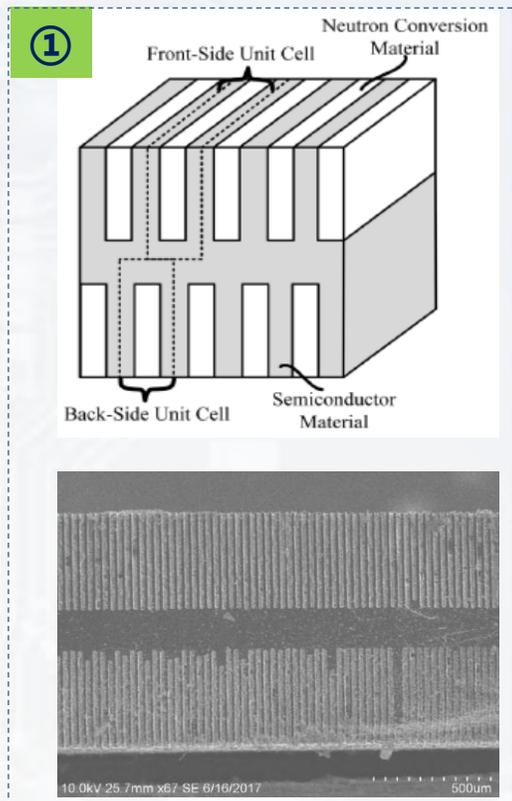
- ◆ 米兰比克卡大学M.H. Kushoro研制的**厚外延层 (250μm)** SiC中子探测器快中子能量分辨率达到**1.3%** ②。



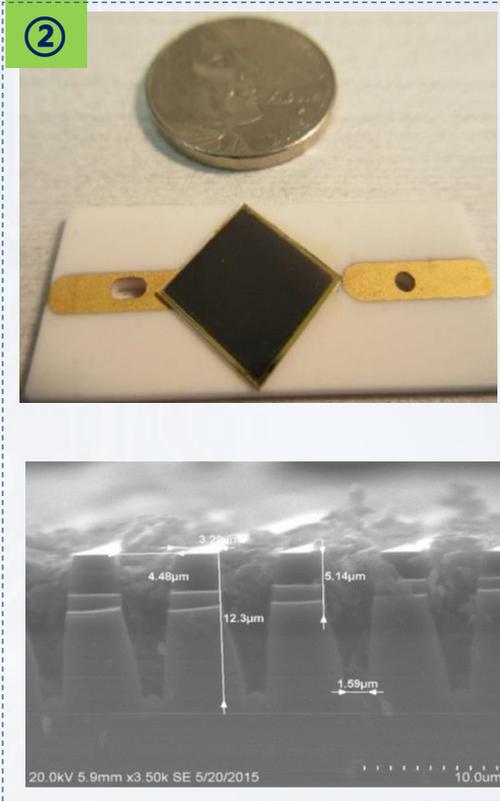
① Yang, Qunsi, et al., IEEE EDL, 43.12 (2022): 2161-2164

② Kushoro M H, et al. J. Inst, 2023, 18(03): C03007.

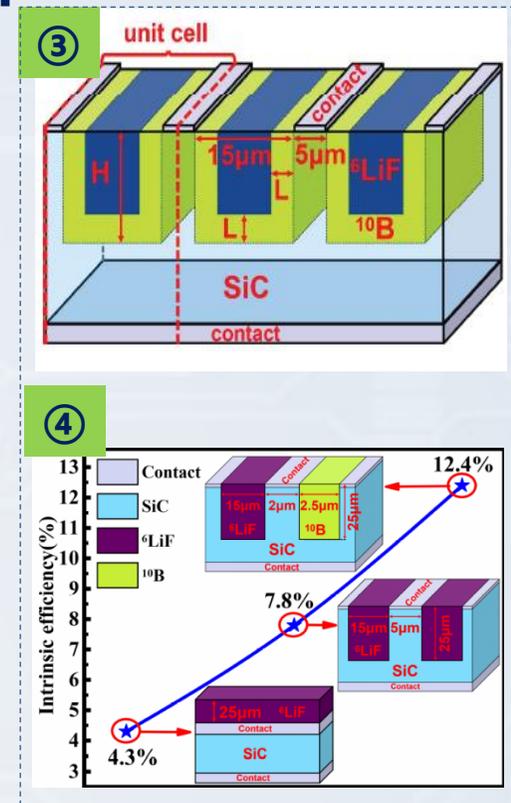
采用微结构中子探测器技术路线可显著提升探测效率



◆ S.L. Bellinger等人利用Si基材料，验证了微结构中子探测器较平面型探测器效率提升6-10倍，存在温漂效应。



◆ Cooper等人研制首款SiC微结构中子探测器样机，刻蚀深度 <math> < 20\mu\text{m}</math>，深宽比 <math> < 5</math>，漏电流 $10\text{nA}@100\text{V}$，探测效率2.28%。

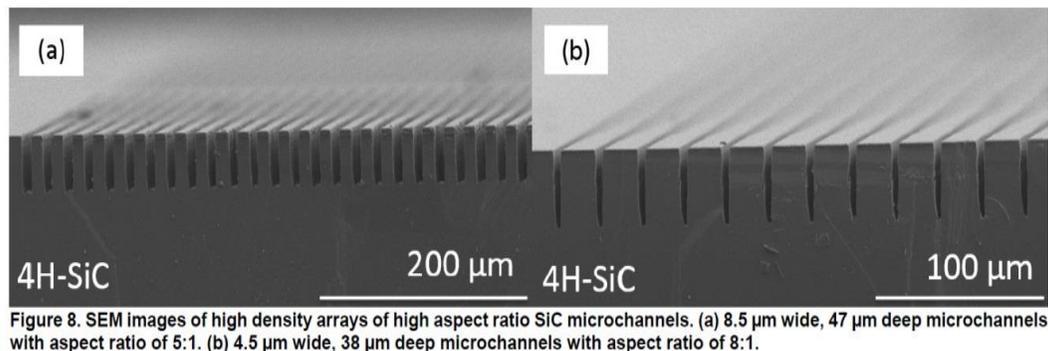


◆ 利用MC仿真手段，王颖团队证明通过调整转换材料结构，SiC沟槽深25µm时，中子探测器的效率可达12%以上，尚未完成样机研制。

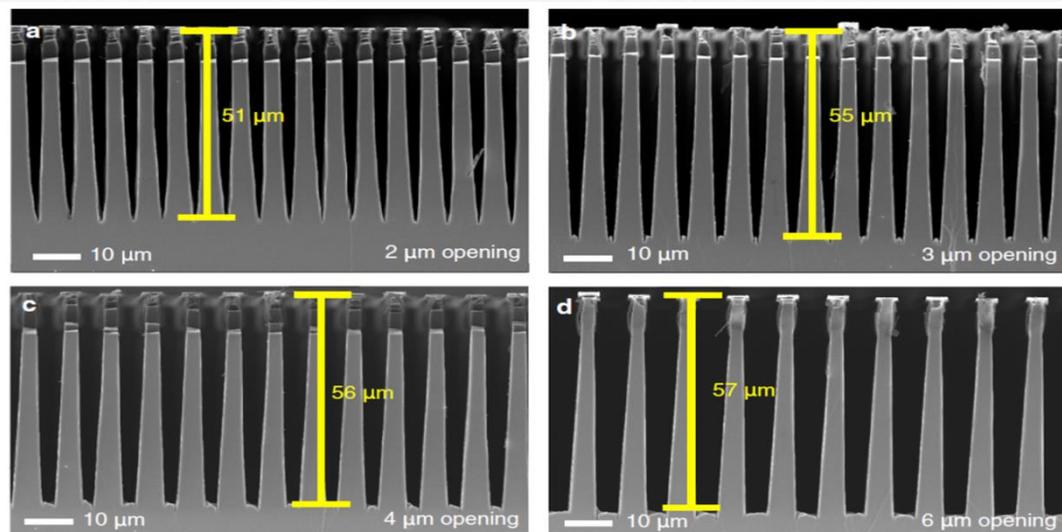
基于SiC宽禁带半导体材料的高效率微结构中子探测器研发工作方兴未艾。

① Ochs T R, et al. NIM A, 2020, 951: 163006. ② Cooper, Brian W. U.S. KSU. 2019. ③ Zhang L, et al. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(18): 20145-20155. ④ Zhang L, et al. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(5): 4302-4310.

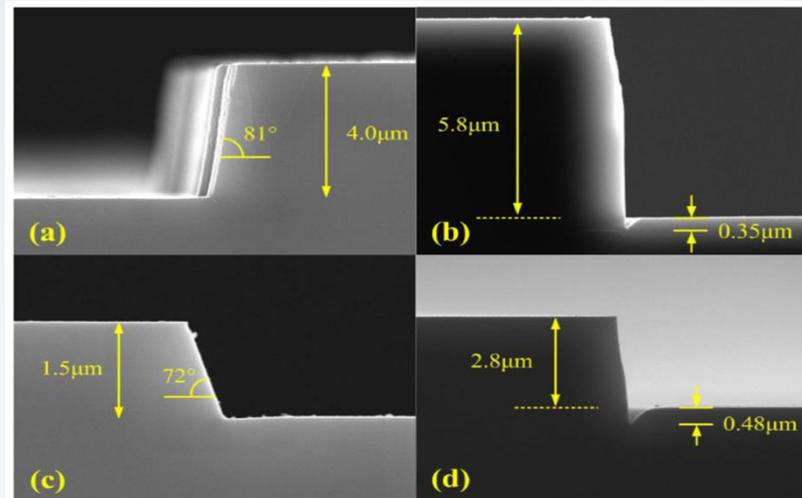
SiC深刻蚀是微结构中子探测器的核心技术



- ◆ **斯坦福大学**: (a) 宽8.5μm, 深47μm, (b) 宽4.5μm, 深38μm; 2017年, 该实验室SiC刻蚀能力超过50μm



- ◆ **美国海军实验室 (NRL)**: SiC刻蚀深度超过50μm



SiC材料质地坚硬, 化学性质稳定, **国内还没有成熟的高深宽比深沟槽加工技术 (> 50μm)**

- ◆ **西电**: SiC刻蚀深度≈10μm

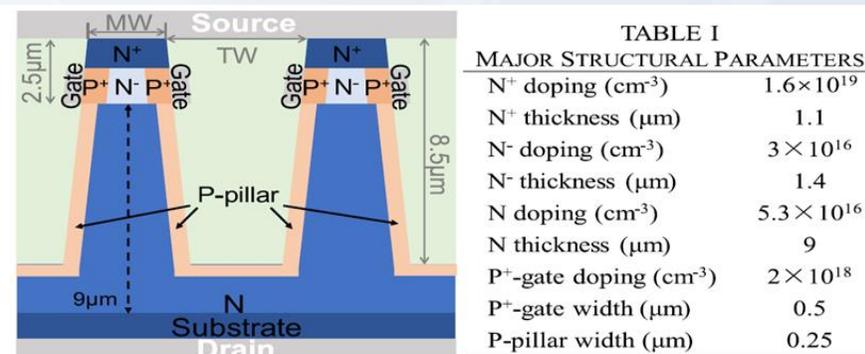


Fig. 1. Schematic cross-section of the SiC super-junction JFET structure (left); Epitaxy parameters (right).

- ◆ **浙大**: SiC刻蚀深度≈10μm

目录

1

研究背景

2

研究进展

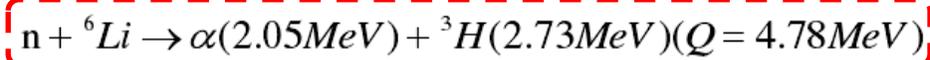
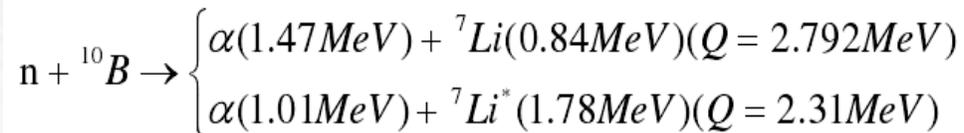
3

后续工作

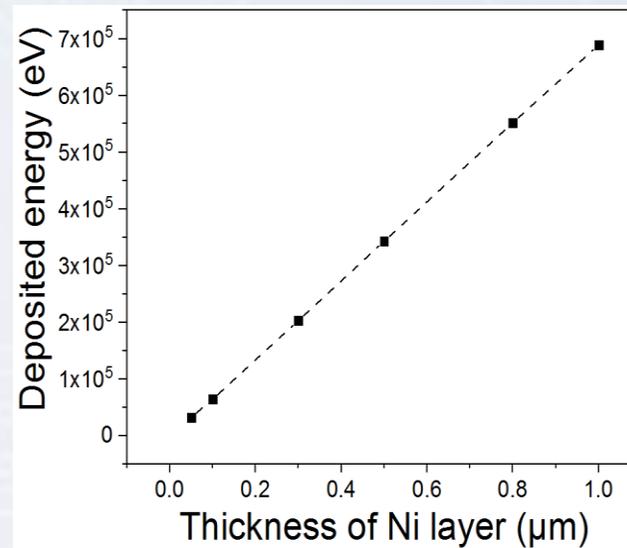
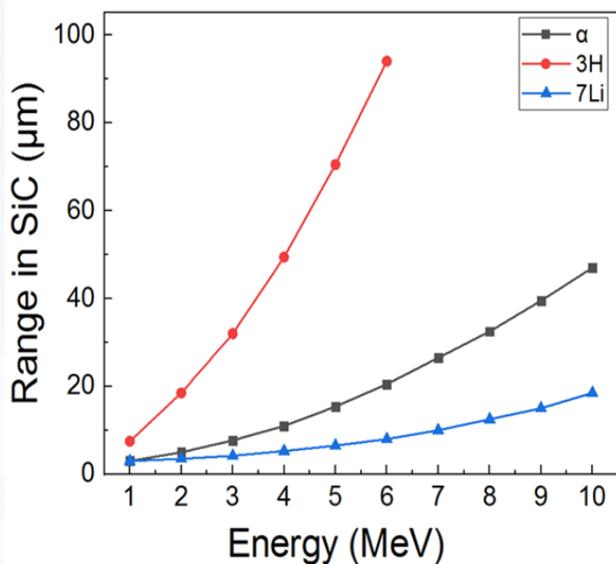


探测器物理设计

- 对比 ^{10}B 和 ^6Li 与中子发生核反应机制，优选 ^6LiF 作为中子转换材料



次级粒子能量更高，产生的电学信号幅度更高，利于信号探测以及中子伽马甄别。

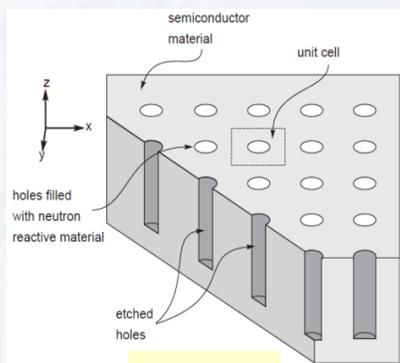


- 设计灵敏区厚度 $> 40\mu\text{m}$ ，即可满足 α 和 ^3H 两种次级粒子能量全部沉积的要求

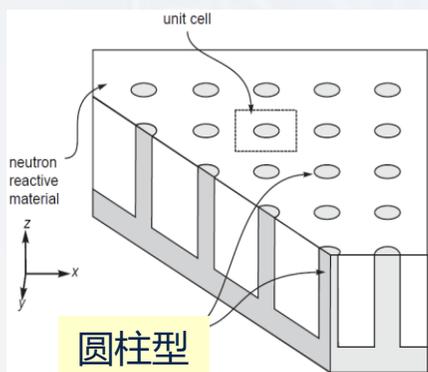
- 金属电极+PI保护层构成的探测“死区”，越薄越好

探测器物理设计

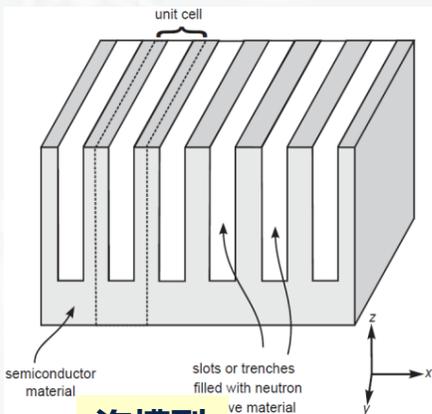
基于MC仿真，分析LLD(0~1MeV)对探测效率的影响规律，**沟槽型结构综合性能最优**



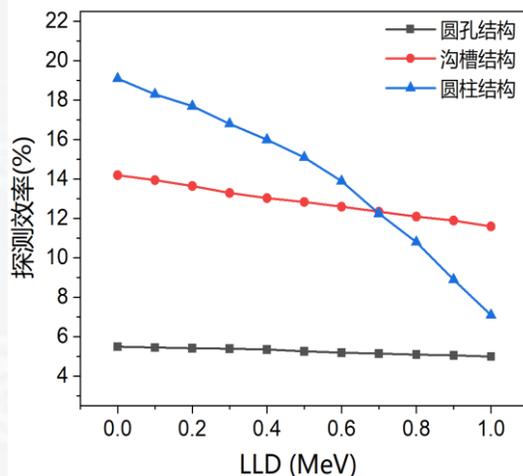
孔洞型



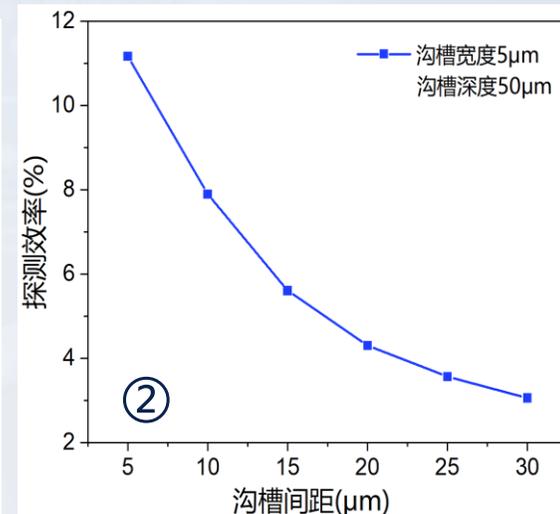
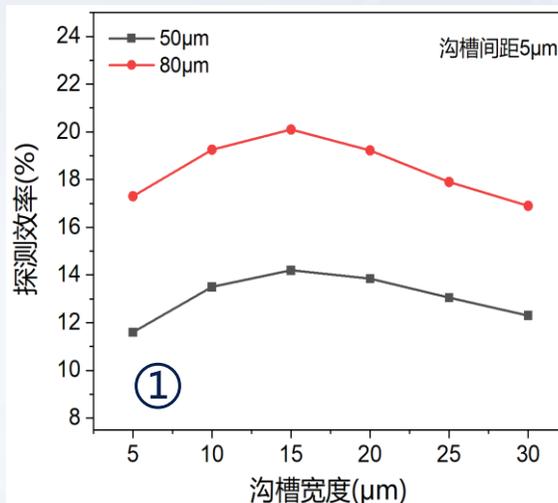
圆柱型



沟槽型



分析沟槽深度、沟槽宽度和沟槽间距对效率的影响规律，确定相关参数范围

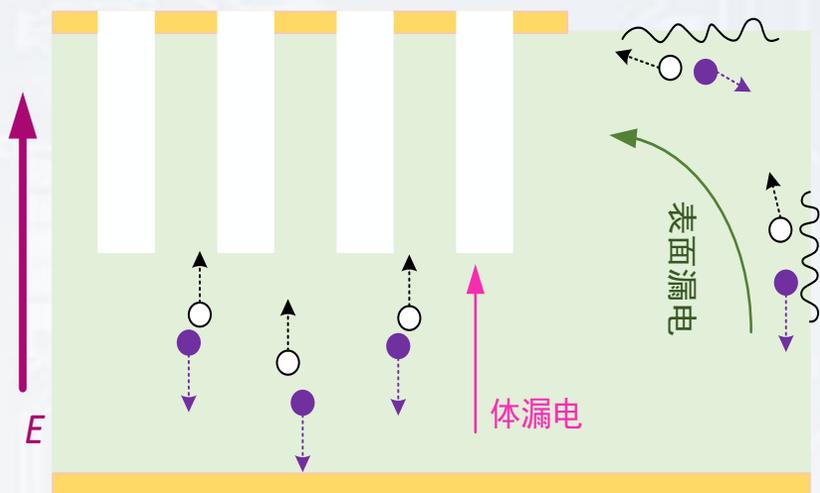


① 沟槽间距5μm，调整沟槽宽度（5μm~30μm），当沟槽宽度15μm时，探测效率出现极大值；

② 沟槽宽度5μm，调整沟槽间距（5μm~30μm），探测效率呈递减趋势；

◆ 根据仿真结果，指导工艺设计，限定沟槽深度50μm，沟槽宽度10μm~15μm，沟槽间距5μm~10μm。

漏电流抑制技术



选用缺陷密度较低的钝化工艺可抑制

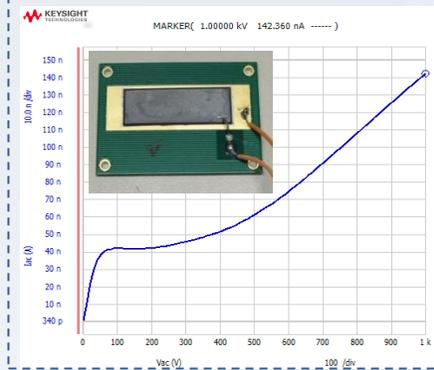
优化终端设计，调节边缘区域电场可抑制

表面漏电流：

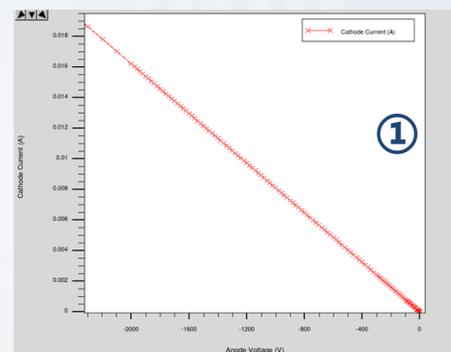
$$J_{Gen,S} = \int eGdx = \int \frac{eC_n C_p N_t (np - n_i^2)}{\tau_{SC} C_n (n + n_i) + C_p (p + p_i)} dx$$

体漏电流：

$$J_{Gen} = \frac{qW_D n_i}{\tau_{SC}}$$

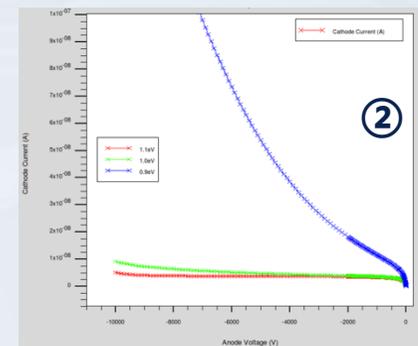


◆ 器件未做表面钝化，漏电流达到140nA@1000V



◆ 金属电极欧姆接触：漏电流 $\approx 6\text{mA}$ @1000V；

◆ 金属电极肖特基接触：势垒高度 $\leq 1\text{eV}$ 时，漏电流 $\approx 8\text{nA}$ @1000V；势垒高度 1.1eV 时，漏电流 $\approx 15\text{nA}$ @1000V。

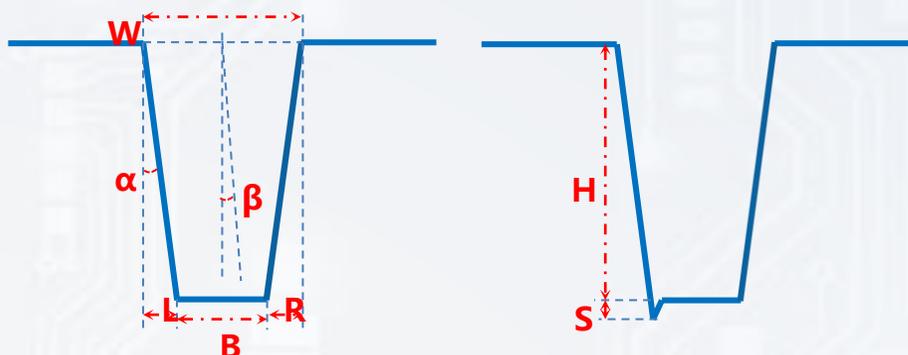


漏电流抑制措施：

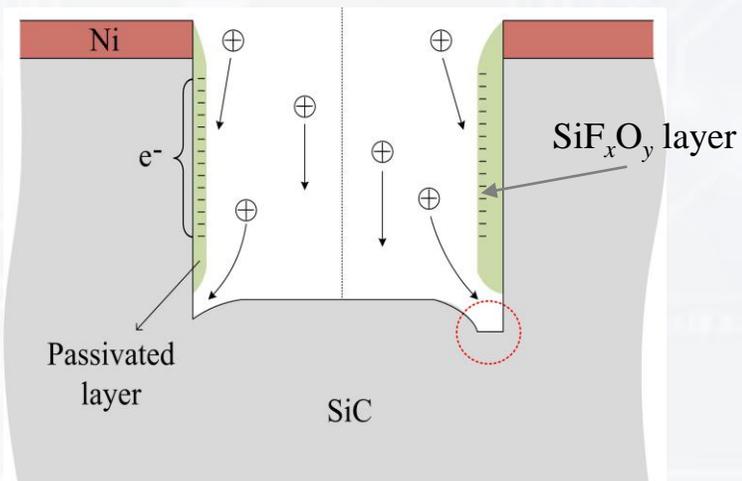
- ◆ 优化表面钝化工艺与终端设计
- ◆ 增加少子寿命
- ◆ 优选表面接触金属，调控肖特基势垒

关键工艺研究

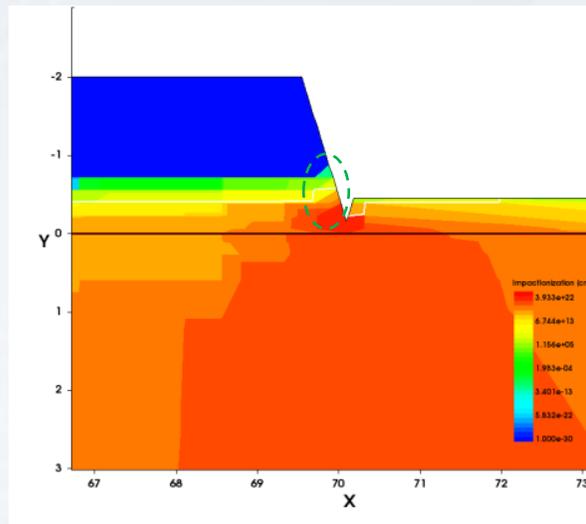
微沟槽形貌对探测器性能的影响机制研究



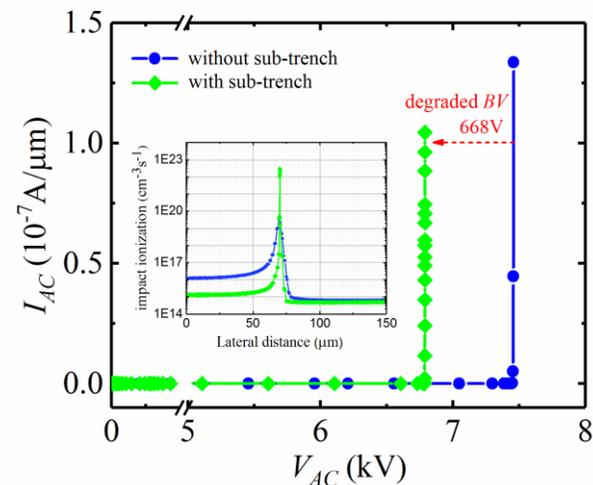
典型沟槽结构参数



底角微沟槽形成机理



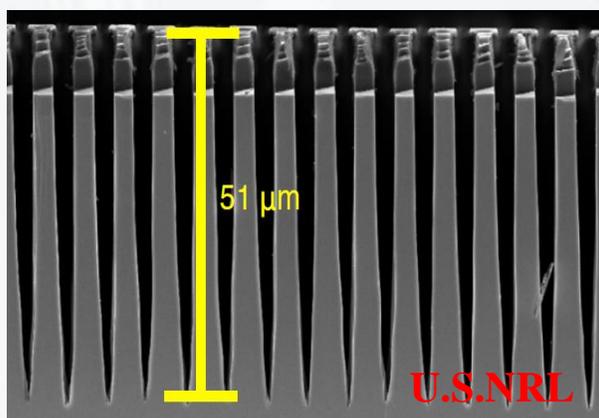
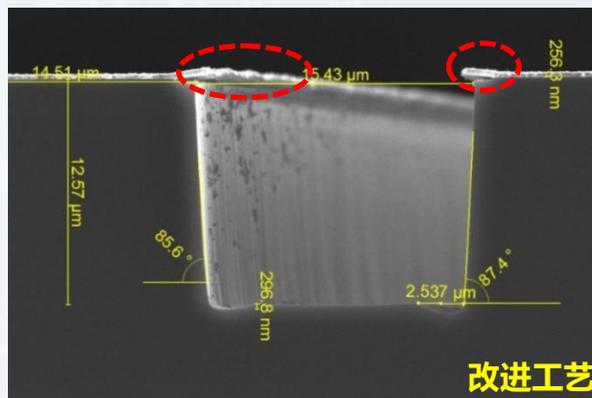
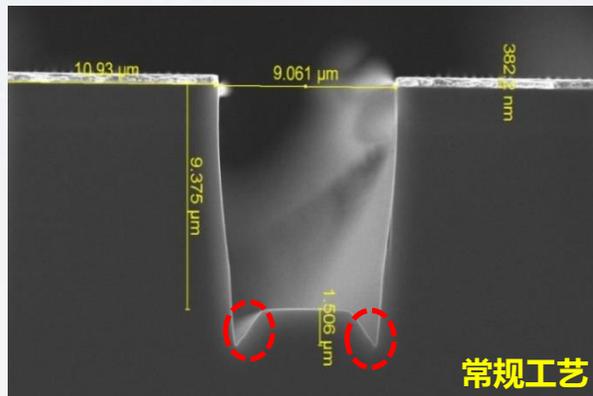
底角微沟槽导致击穿电压下降



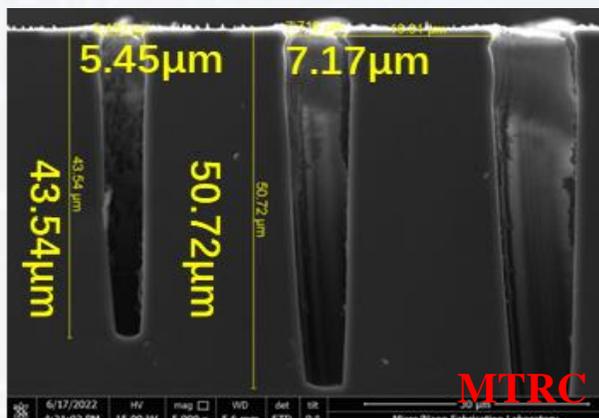
- S ——— 影响击穿电压和漏电流
- H、W ——— 影响探测效率
- B ——— 影响刻蚀深度

关键工艺研究

迭代优化，基本掌握50 μm 高深宽比SiC深刻蚀工艺

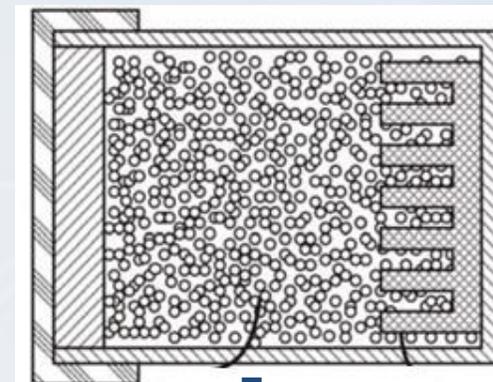


VS

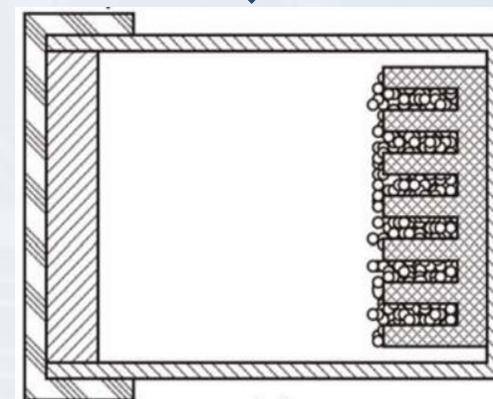


◆ 刻蚀深度 > 50 μm ，深宽比 > 5，沟槽形貌良好！

初步掌握基于液相离心法的6LiF粉末沟槽填充工艺



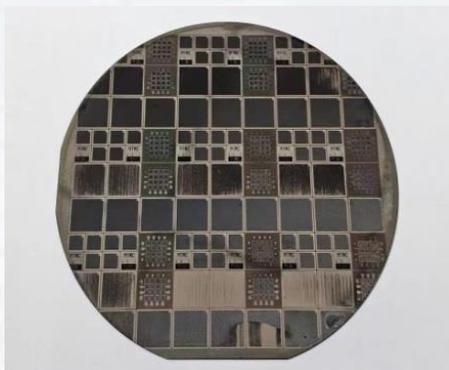
液相离心



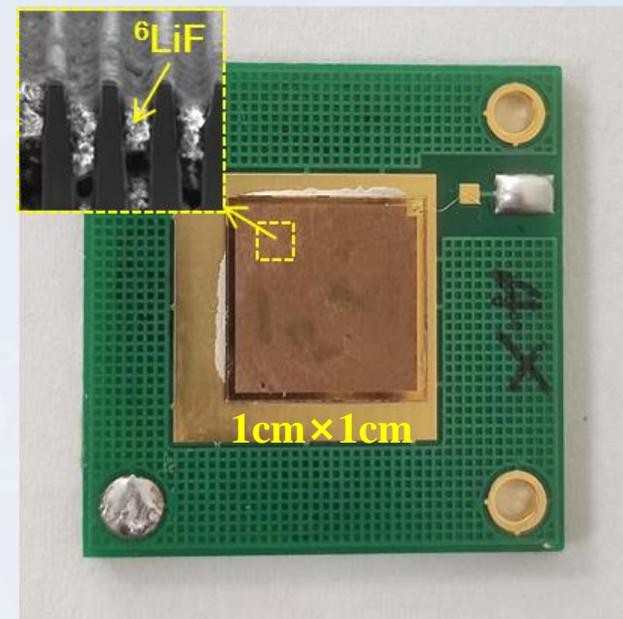
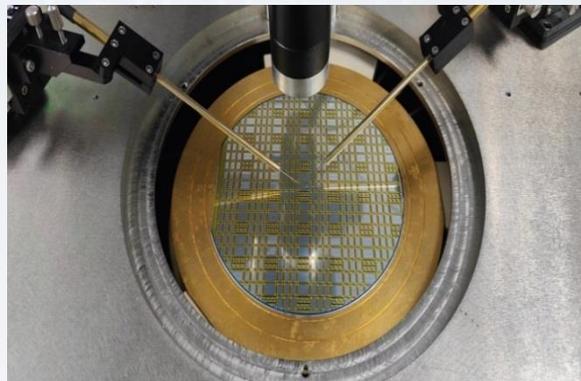
◆ 采用直径200nm的6LiF粉末，填充效率约50%，有进一步提升空间。

探测器性能测试

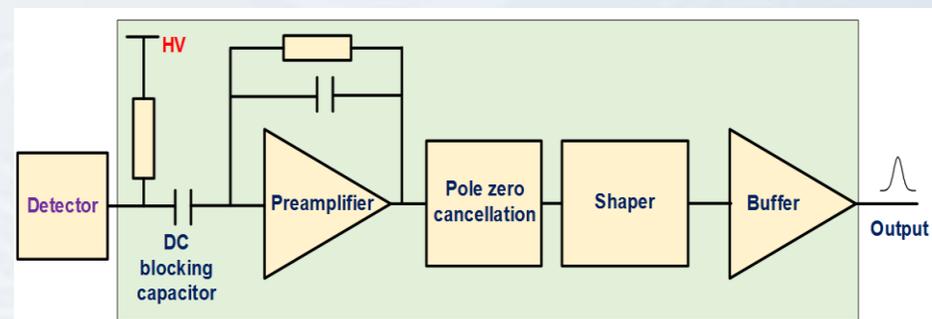
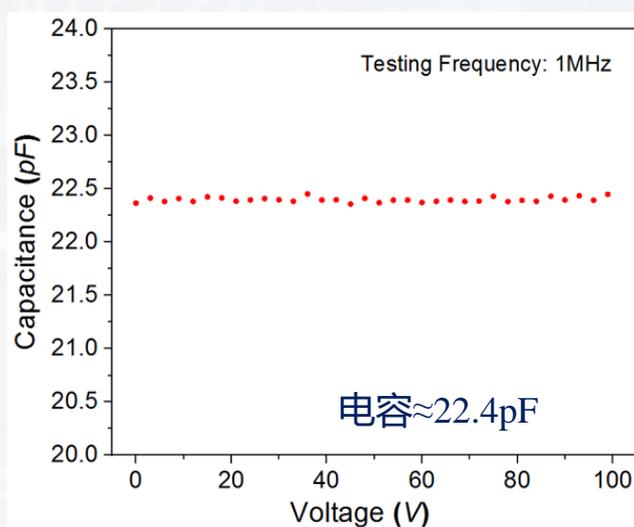
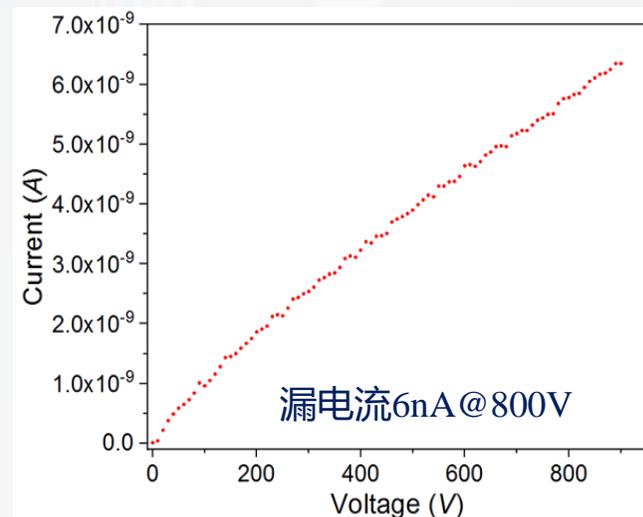
- 晶圆级测试, 漏电流 $6\text{nA}@800\text{V}$, 电容 $\approx 22.4\text{pF}$



SiC微结构中子探测器晶圆

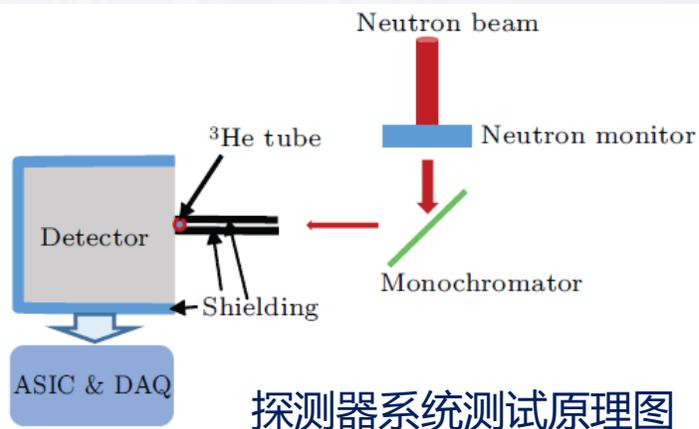
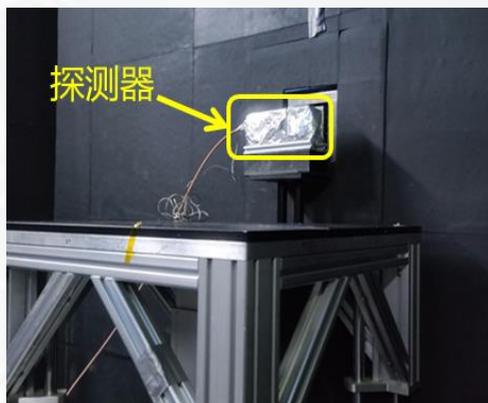
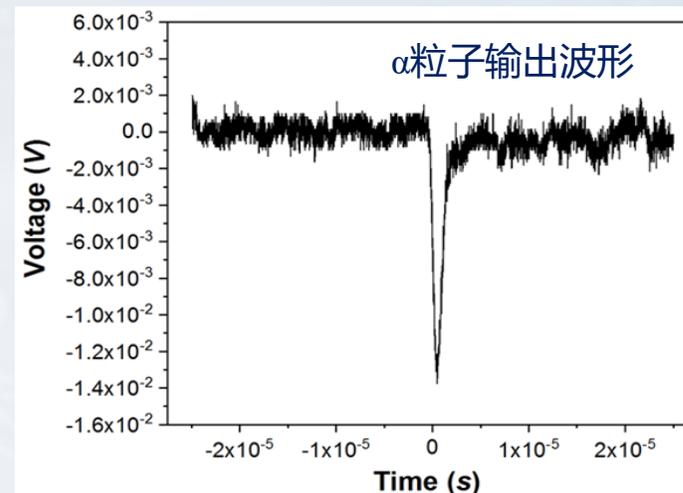
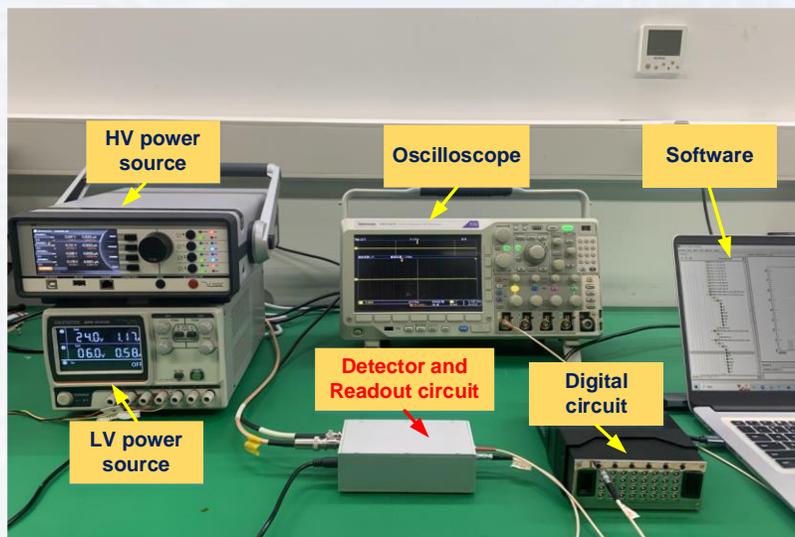


初版 $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ 微结构探测器样机



适用于微结构中子探测器的读出电路原理图

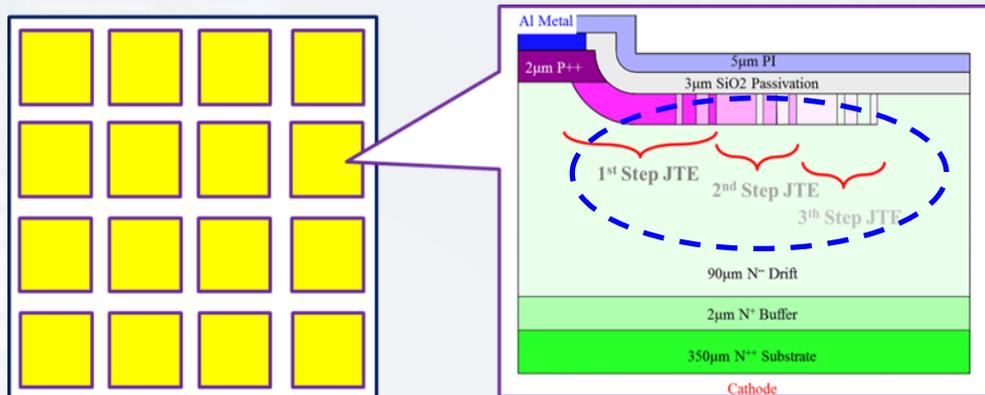
- 利用散列中子源科学平台，标定探测器性能，中子探测效率达到**3.28%**



探测效率:
$$\eta_{SD} = \frac{N_{SD}}{N_{^3He}} \times \eta_{^3He}$$

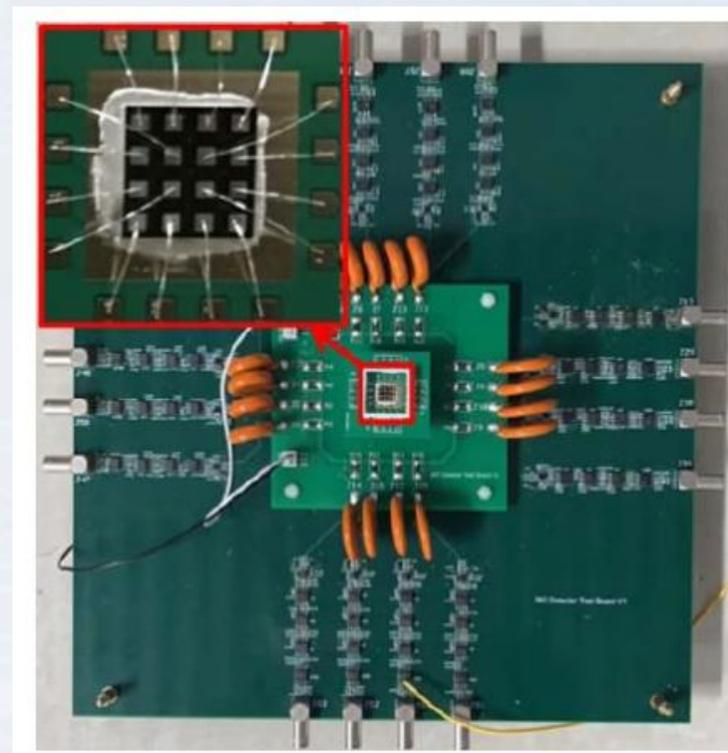
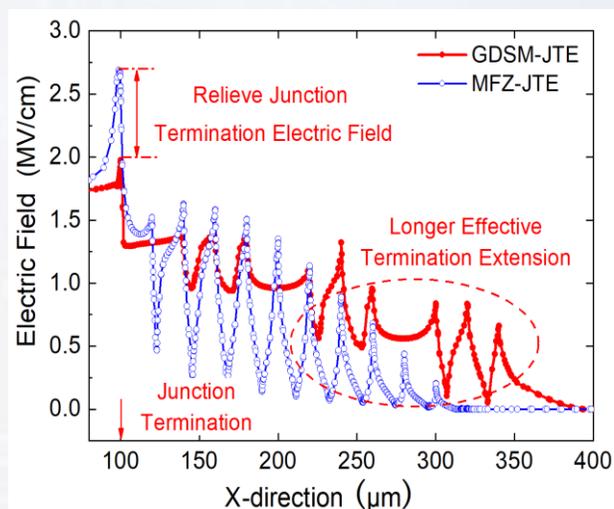
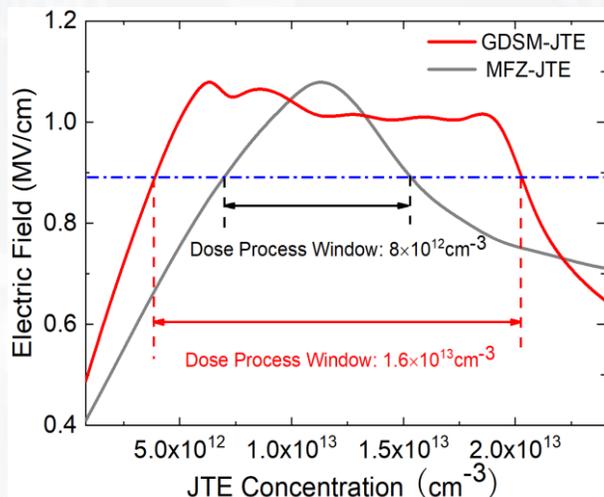
自主研发的4H-SiC微结构中子探测器效率**3.28%**，略高于U.S. KSU公开的**2.28%**的指标。①

平面型阵列结构4H-SiC粒子探测器

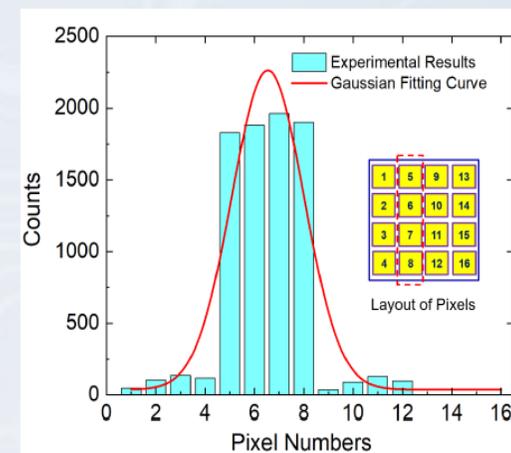
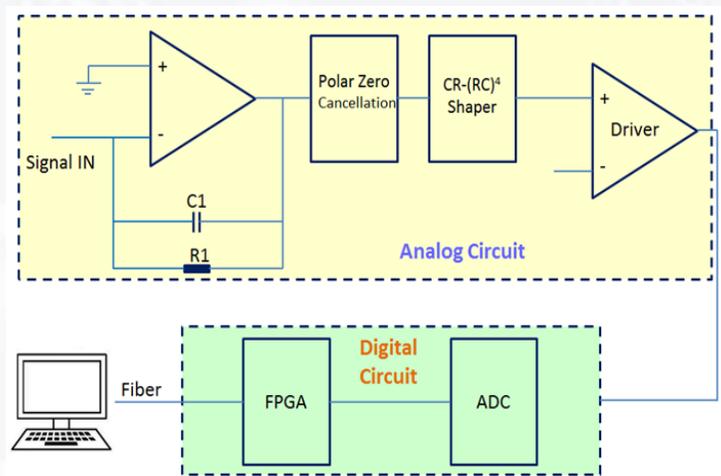
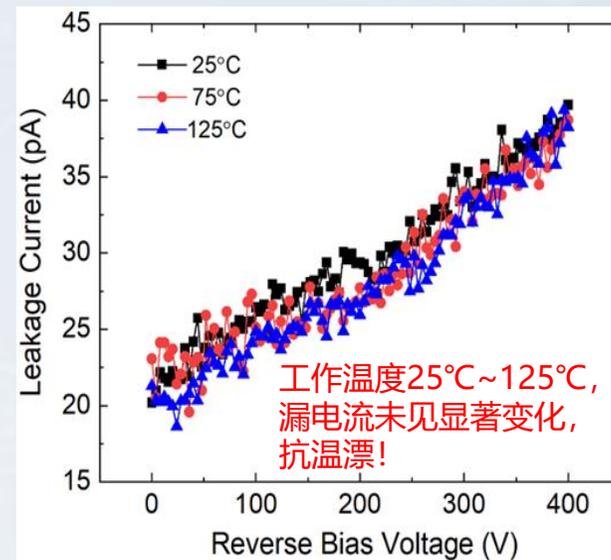
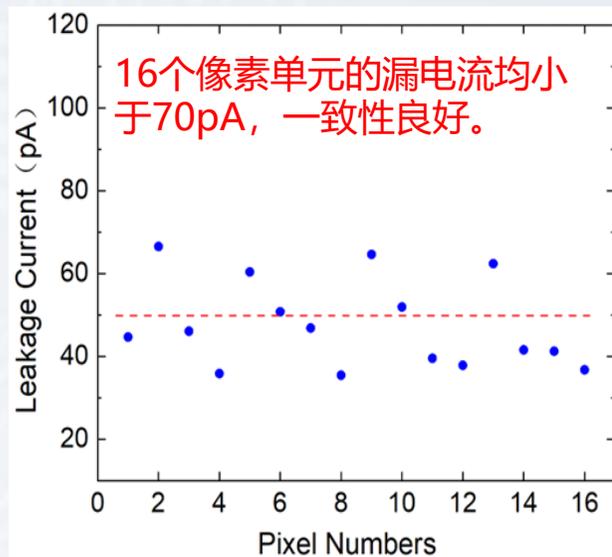
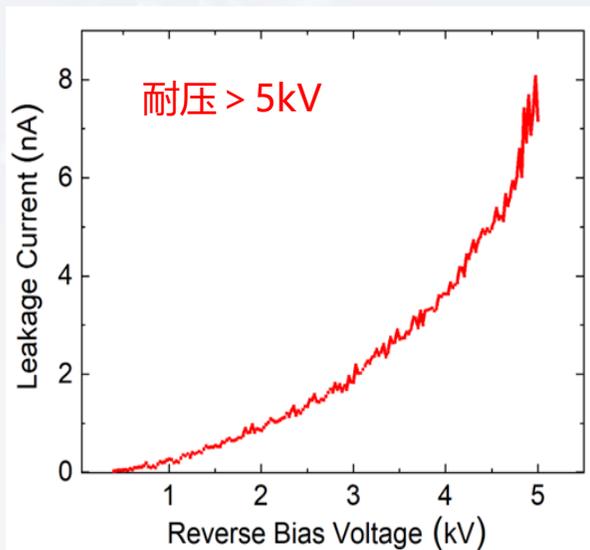


- 设计基于4H-SiC 的4×4 PiN阵列结构中子探测器，每个像素单元均有独立的终端结构，**抑制信号串扰。**

- 自主设计的GDSM终端结构较传统的MFZ终端结构具有更大的工艺窗口和更好的击穿电压抑制作用！



性能测试



目录

1

研究背景

2

研究进展

3

后续工作



- 反复迭代优化液相离心法填充工艺，提升填充效率，力争达到75%以上；
- 进一步优化SiC刻蚀工艺，在保证沟槽形貌以及深宽比的情况下，刻蚀深度80 μ m以上；
- 开展基于微结构的高效率探测器阵列研究，位置分辨不高于1mm，有源区占比大于80%。



谢谢!