

# 碳化硅Alpha粒子探测器研究

**贾玉萍，孙晓娟，黎大兵**

**发光学及应用国家重点实验室**

**中国科学院长春光学精密机械与物理研究所**

**2024年5月25日**

核辐射污染逐渐成为不可忽视的环境污染因素，适用于环境监测的便携式、高灵敏的辐射探测器研究至关重要。



2011年3月12日宣布，受地震影响，福岛第一核电站的放射性物质泄漏到外部  
2023年6月5日，福岛核电站开始核废水排海计划



高能物理领域的大科学装置的应用需求，对于辐射探测器的抗辐照能力提出了更高的要求。



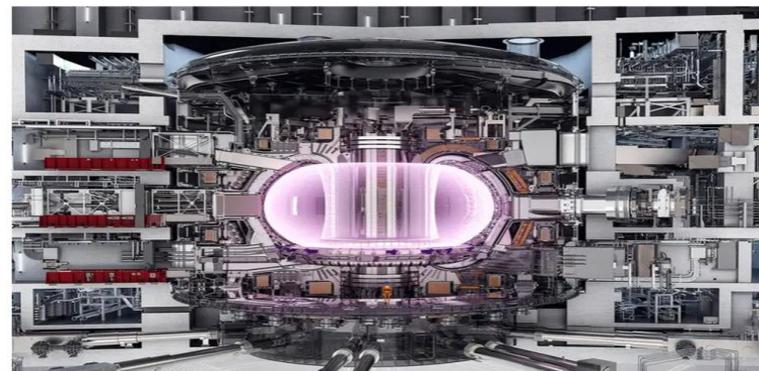
上海光源



北京怀柔光源



散裂中子源



热核聚变实验堆

## 研究背景

宽禁带半导体辐射探测器具有大的禁带宽度、高的位移能、高击穿场强、高热导率的优势。

类型	窄禁带		宽禁带			
	Si	Ge	4H-SiC	GaN	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Diamond
禁带宽度 (eV)	1.12	0.67	3.26	3.4	4.9	5.5
击穿电场 (MV/cm)	0.25	0.1	4	5	8	10
位移能 (eV)	12.8	14.4	21.8	19	-	35
电子迁移率 (cm <sup>2</sup> /v·s)	1450	3900	800	1000	300	1800
热导率 (W/cm·K)	1.5	0.6	4.9	1.3	0.27	20
介电常数	11.8	16	9.7	8.9	10	5.7

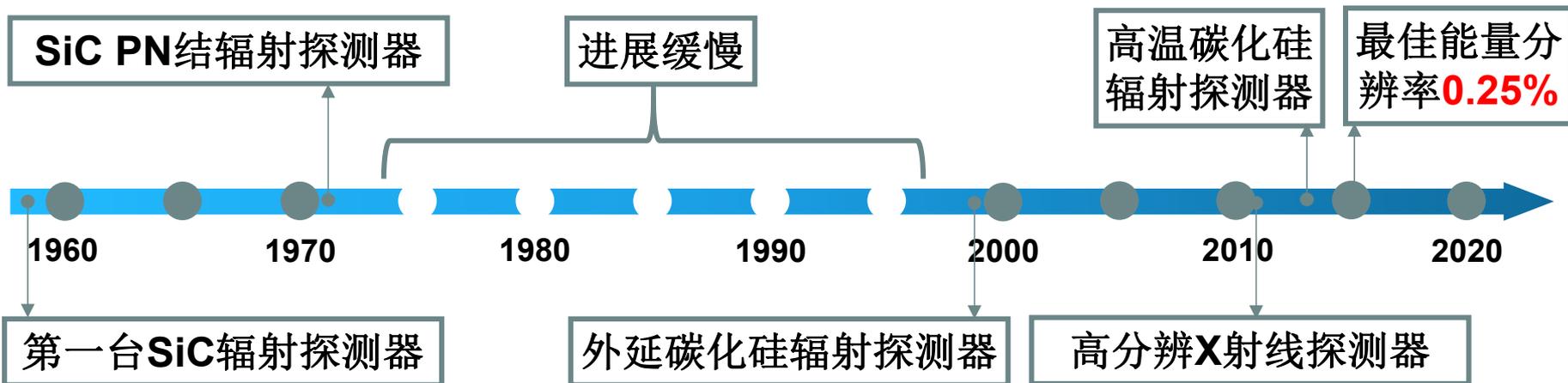
增加避光装置  
增加制冷装置  
及时检测更换

抗辐照能力强  
导热高

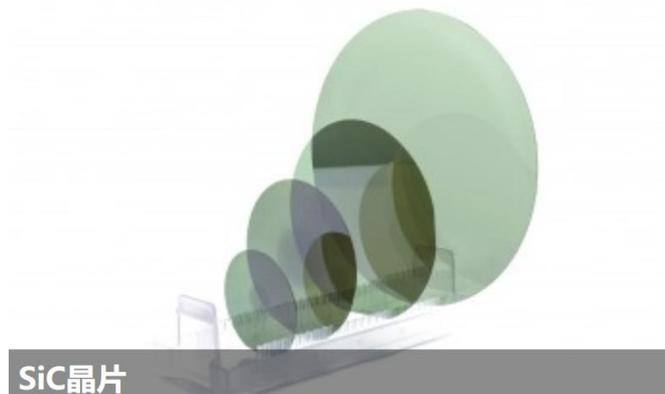


## 研究背景

伴随着国内碳化硅单晶及外延产业的发展，为进一步发展碳化硅辐射探测器奠定了材料基础。

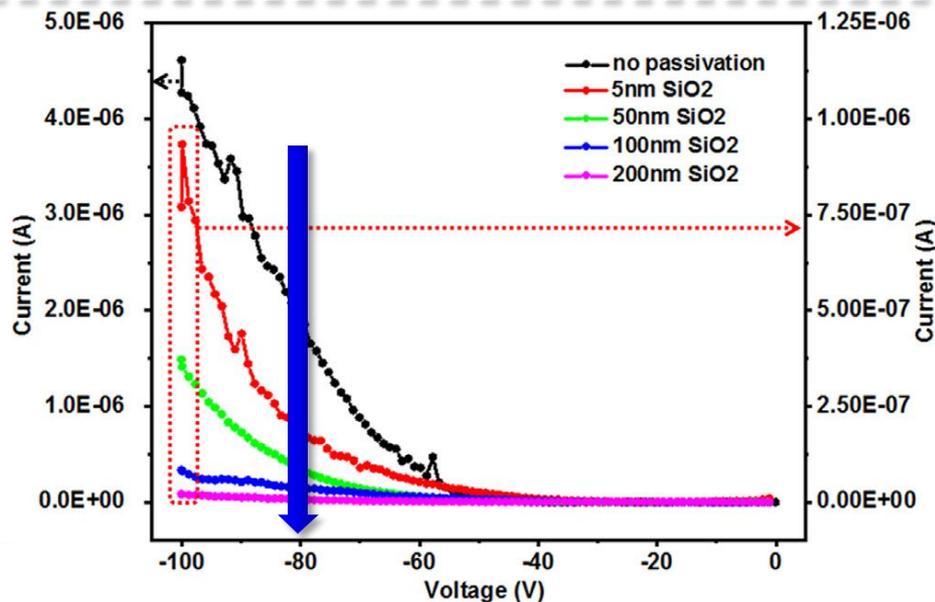
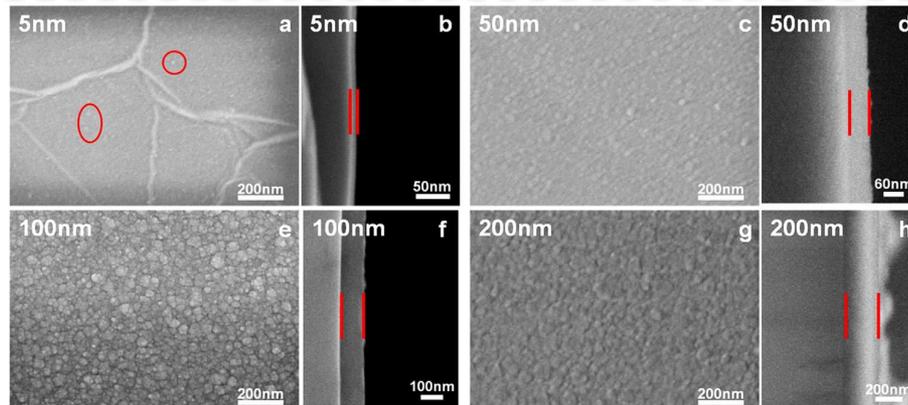
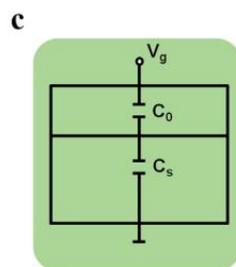
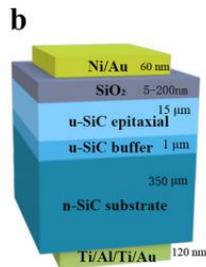
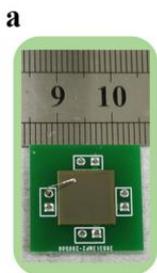


- 我国碳化硅产业与国际相当  
2inch、4inch、6inch碳化硅单晶晶片及外延片已实现产业



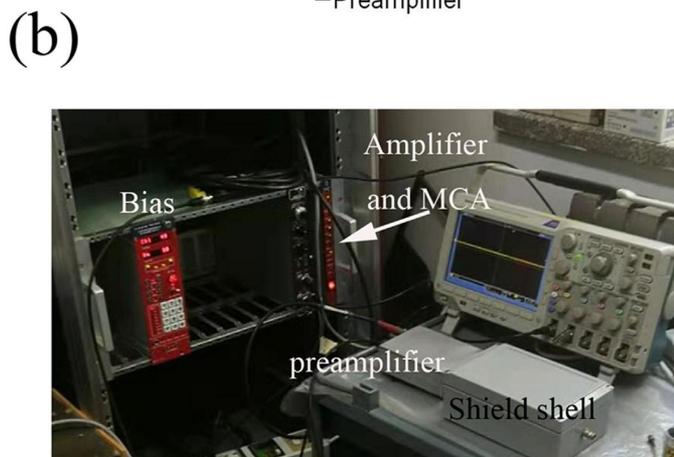
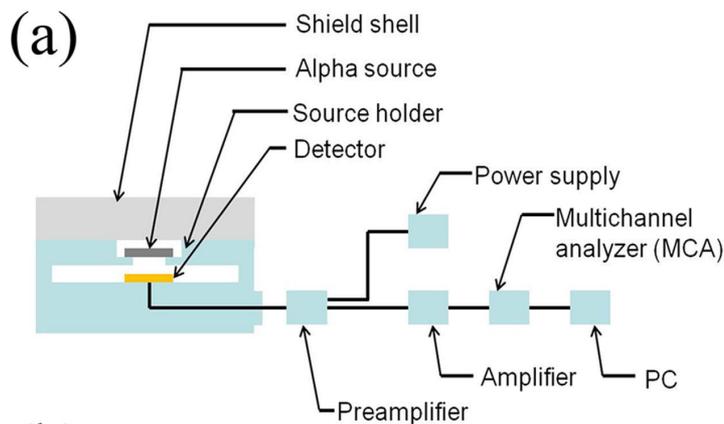
# 碳化硅Alpha探测

针对大面积碳化硅探测器的漏电问题，通过介电层抑制漏电，随介电层厚度增加漏电减小，最终实现漏电减小2个数量级。

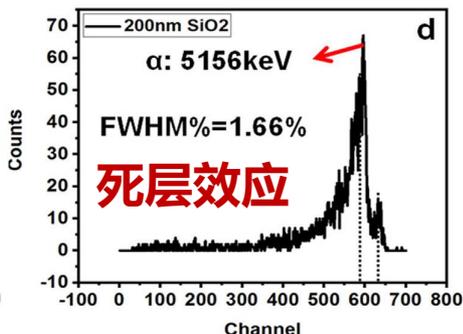
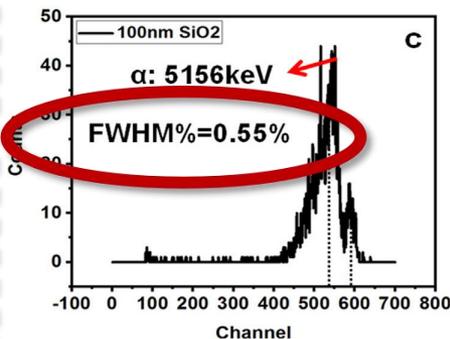
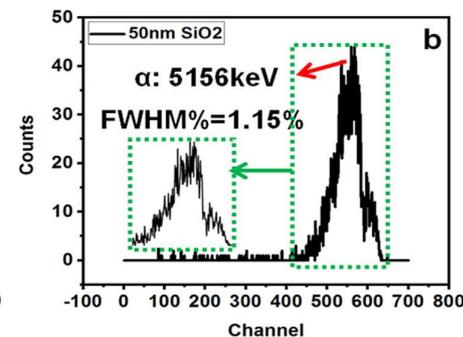
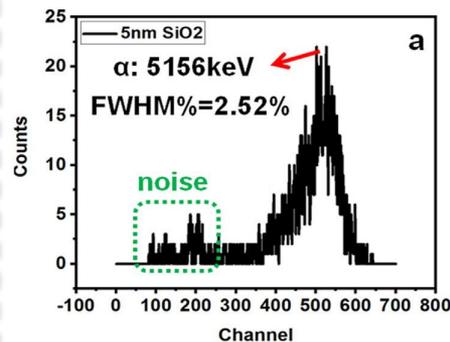


# 碳化硅Alpha探测

当选择适当的介电层厚度，在降低漏电的同时减小器件有效电容，提高电荷收集效率，实现<sup>239</sup>Pu和<sup>241</sup>Am粒子的分峰；能量分辨率0.55%@40V。

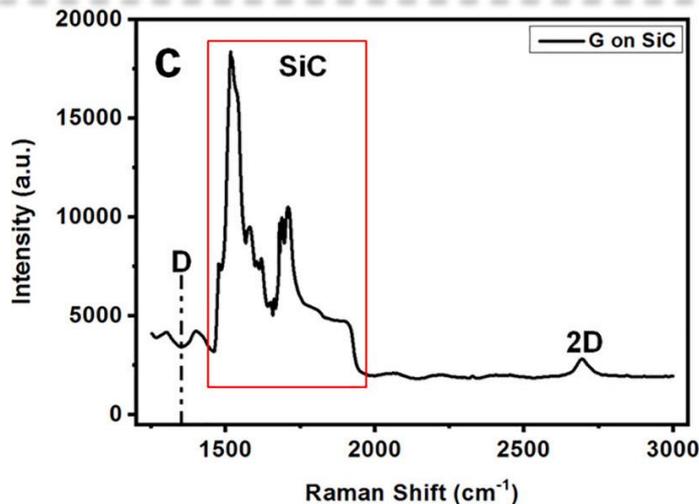
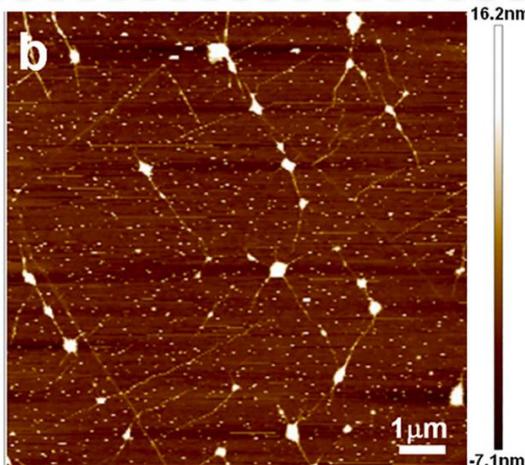
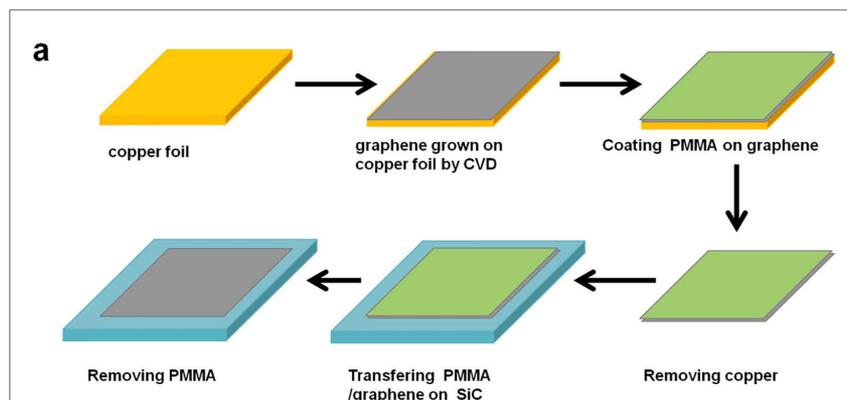
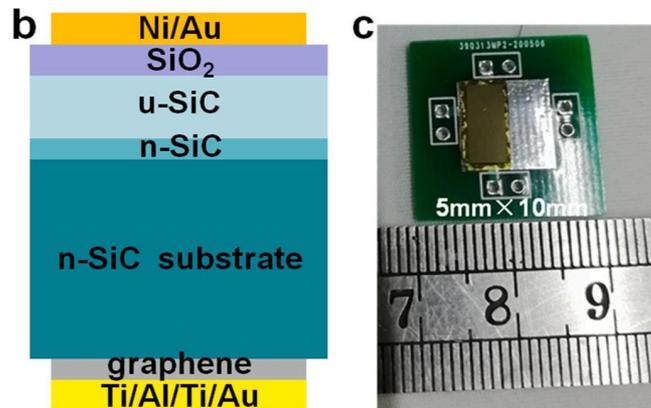


电荷收集效率  $\epsilon = \frac{Q_0}{Q} = \frac{Q_0}{Q_0 + Q_d} = \frac{(1+A)C_f}{C_d + (1+A)C_f}$



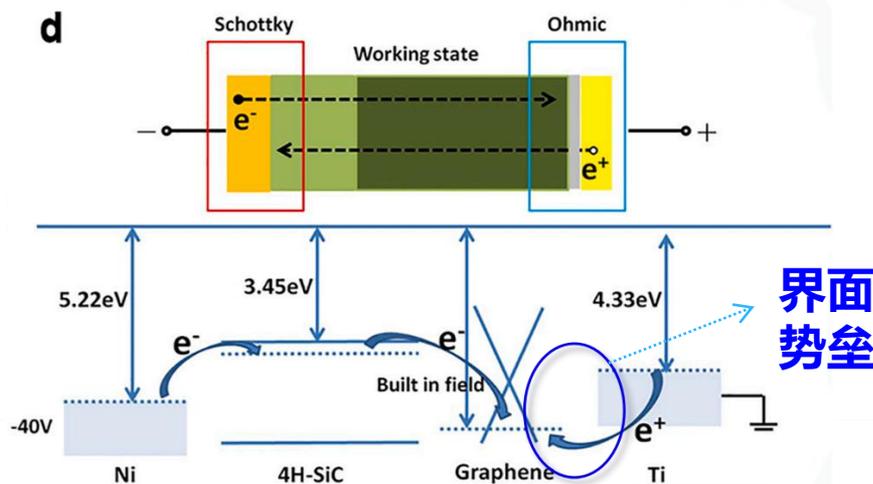
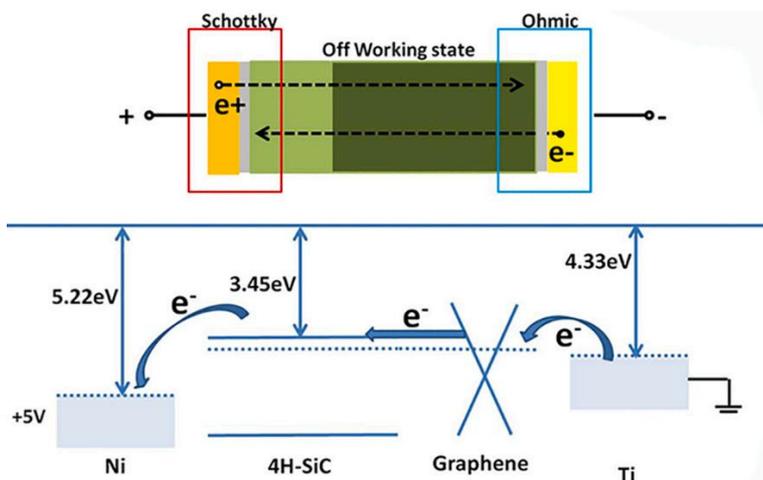
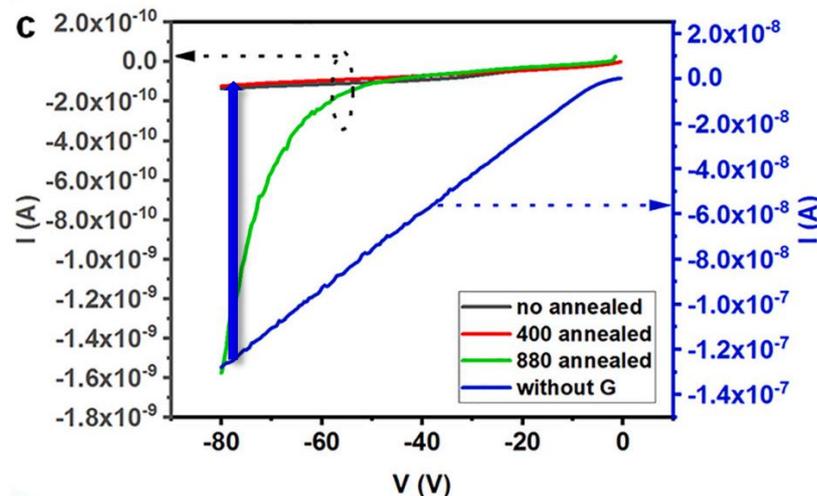
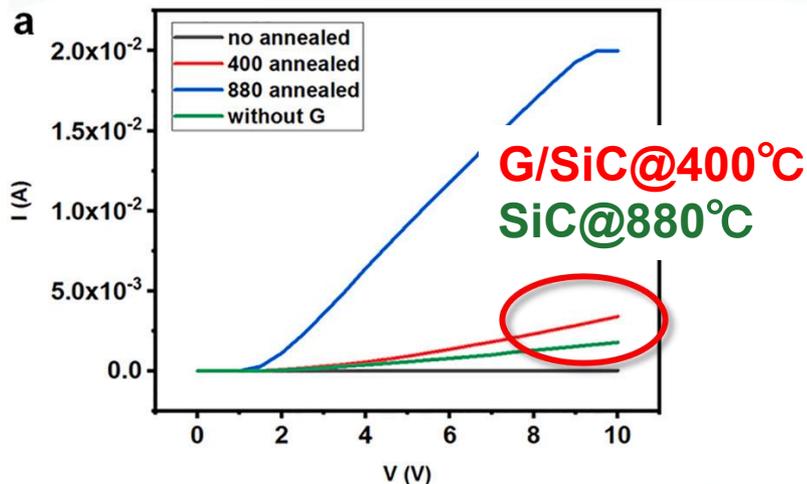
# 碳化硅Alpha探测

针对碳化硅欧姆接触工艺苛刻的问题，提出石墨烯辅助电极调控手段，在金属与碳化硅之间插入一层石墨烯。

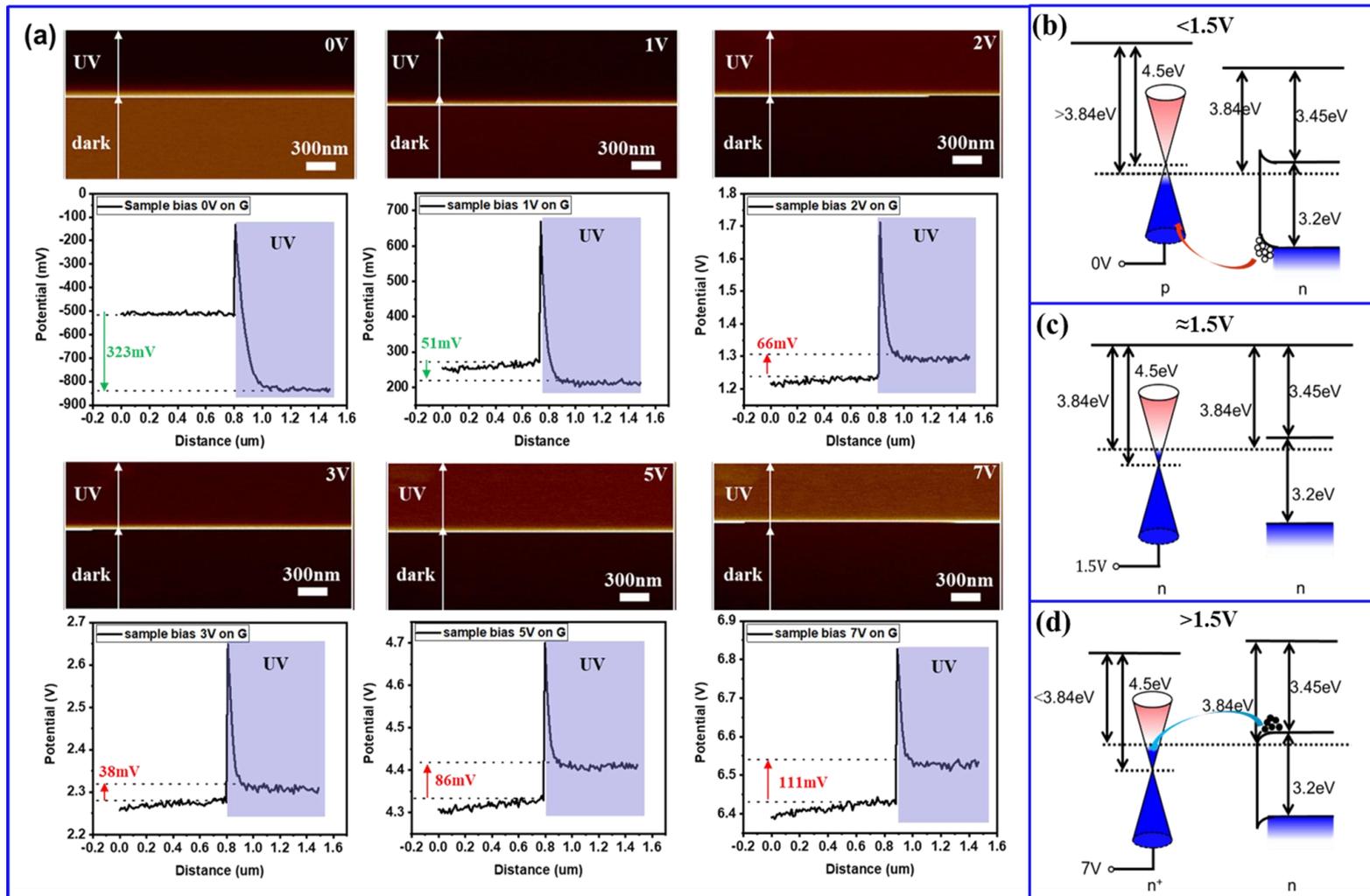


# 碳化硅Alpha探测

利用石墨烯的费米能级可调特性，并利用界面高浓度碳原子，优化碳化硅欧姆接触退工艺，并有效降低反向漏电流到 $10^{-10} \text{A} @ -80 \text{V}$ 。

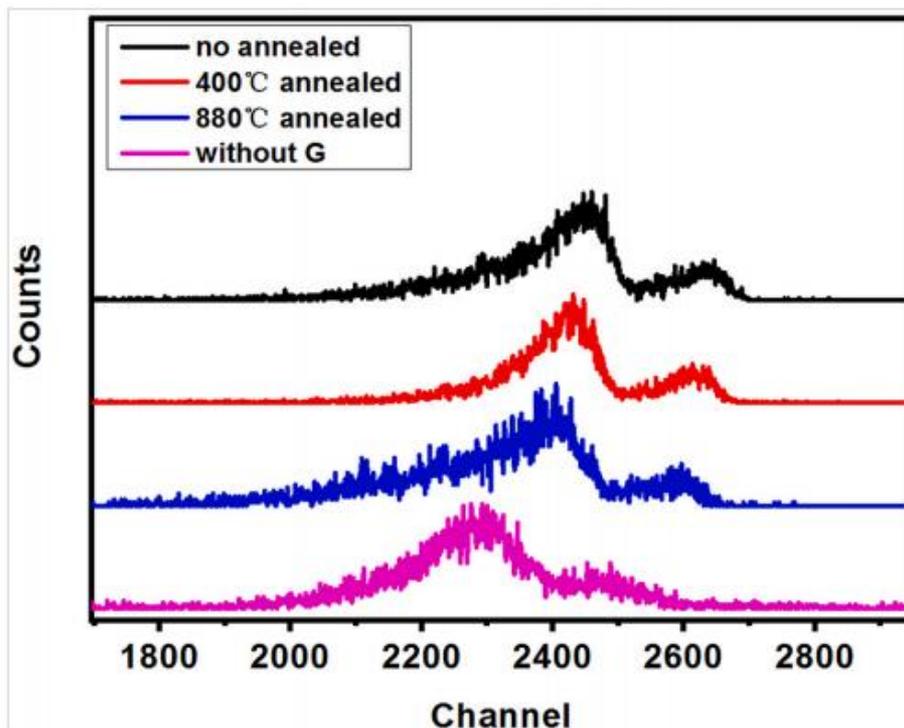


提出了一种UV辅助KPFM测试方法，从实验上观测到石墨烯的费米能级受外电场的调控作用，证明了石墨烯电极优化碳化硅探测器的理论。



## ➤ 碳化硅Alpha探测

- 利用石墨烯辅助电极的碳化硅辐射探测器有效提高了器件的能量分辨能力，在400°C退火时实现了最佳的能量分辨率。

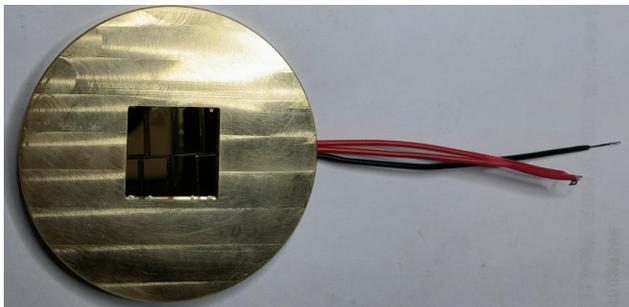


Corresponding parameters of the four devices.

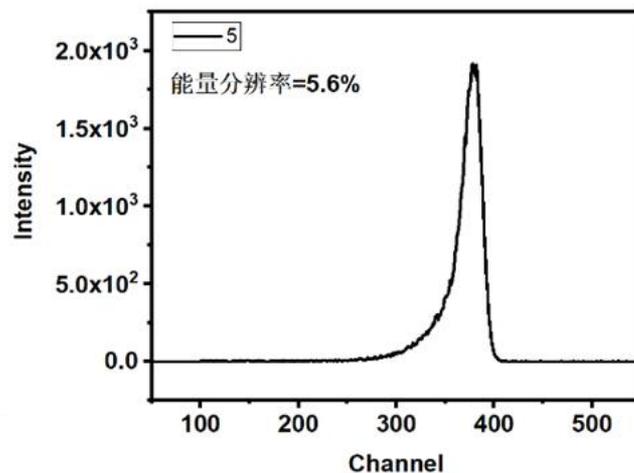
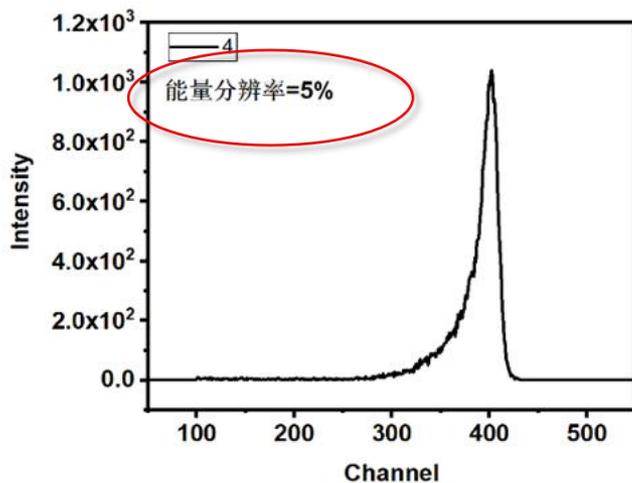
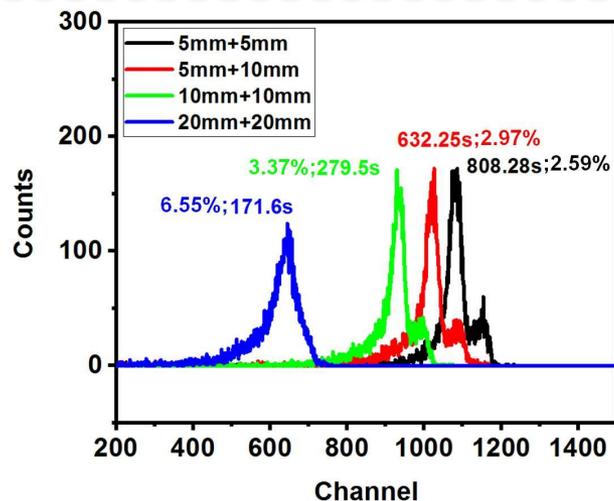
Detector@-40 V	No annealed	400 °C annealed	880 °C annealed	Without G
Peak@ <sup>239</sup> Pu	2434	2418	2382	2280
FWHM	106	94	108	136
FWHM%	4.4%	3.9%	4.5%	6%

# 碳化硅Alpha探测

- 设计 $2 \times 2 \text{cm}^2$ 碳化硅alpha辐射探测器，实现171s的计数为 10000；
- 最佳能量分辨率可以达到5%，实现大面积、高灵敏、快速成谱的碳化硅alpha辐射探测器



快速、高响应 $2 \times 2 \text{cm}^2$ 探测器



# 碳化硅Alpha探测

□ 2×2cm<sup>2</sup>碳化硅alpha辐射探测器，连续16天辐照过程中具有良好稳定性：  
 能量分辨率浮动范围<3.79%；信号峰位浮动范围<0.85%；  
 计数率浮动范围<1.28%。

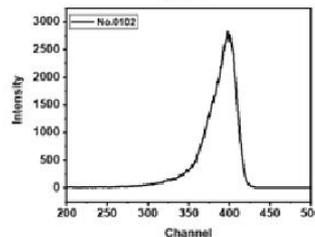
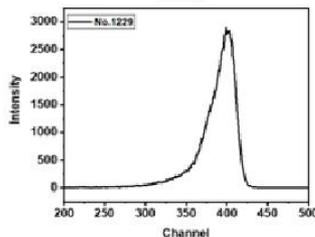
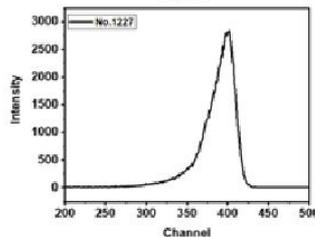
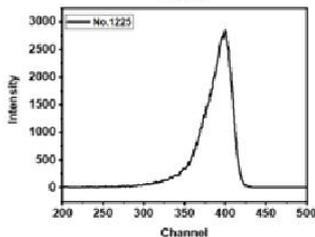
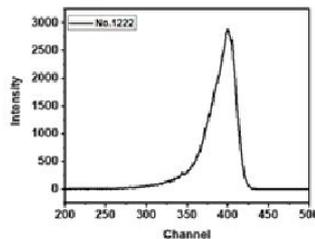
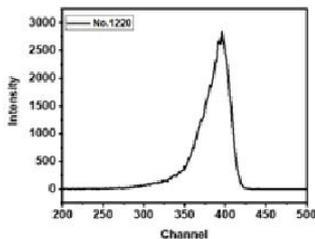
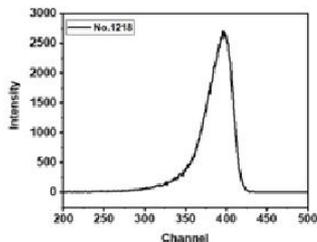


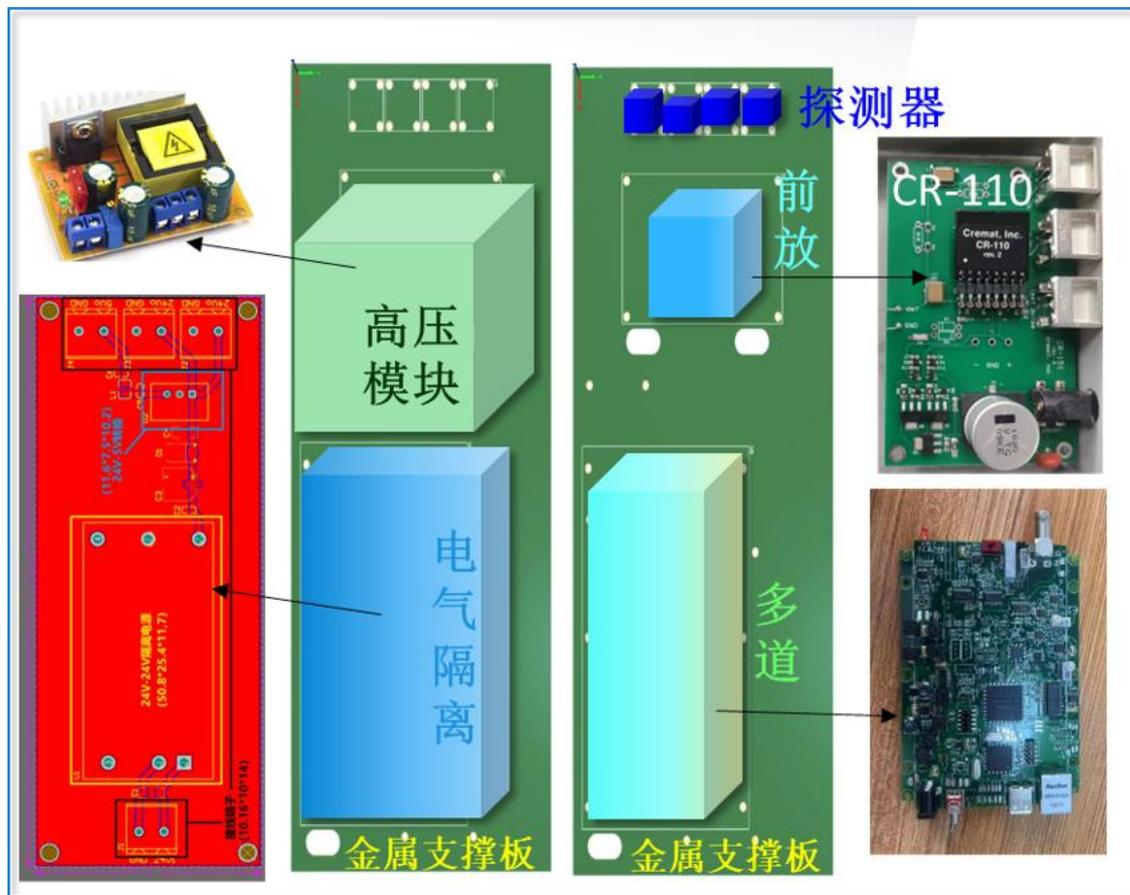
表 1: 16 天连续辐照碳化硅辐射探测器的探测性能实验数据

测试日期	12月18日	12月20日	12月22日	12月25日	12月27日	12月29日	01月02日	平均值
峰位	390	388	393	391	392	394	391	391.2857
能量分辨率	8.396%	8.284%	7.886%	8.121%	7.939%	7.813%	8.105%	8.0777%
计数率	1581.799	1592.985	1580.264	1602.869	1604.722	1594.51	1617.059	1596.315
能量分辨率相对平均值的浮动	3.79%	2.49%	-2.43%	0.53%	-1.74%	-3.39%	0.34%	--
峰位相对平均值的浮动	-0.33%	-0.85%	0.44%	-0.07%	0.18%	0.69%	-0.07%	--
计数率相对平均值的浮动	-0.92%	-0.21%	-1.02%	0.41%	0.52%	-0.11%	1.28%	--

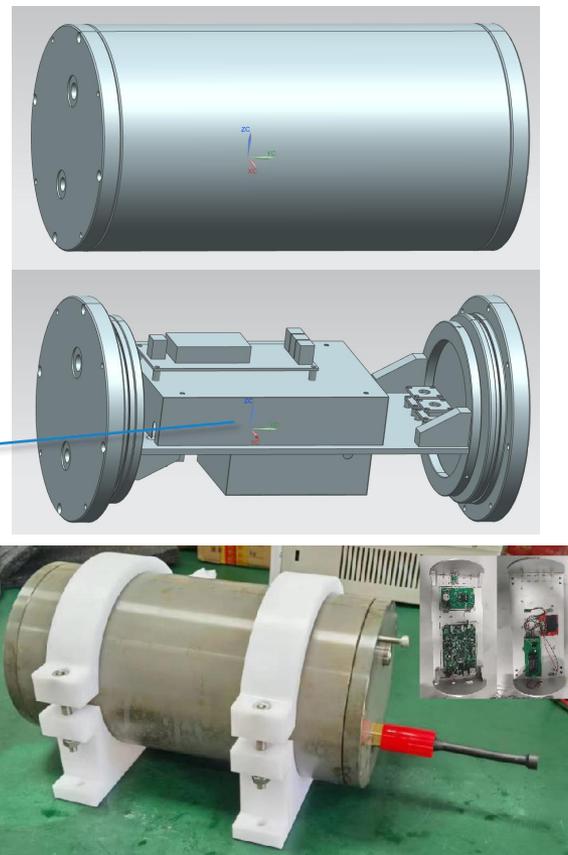
<sup>241</sup>Am，活度1E5/2pi

# 碳化硅探测系统

- 设计碳化硅Alpha/Gamma探测器系统，水密外壳尺寸 $\phi 164\text{mm} \times 319\text{mm}$ ，系统总体功耗约为5W。



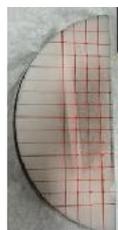
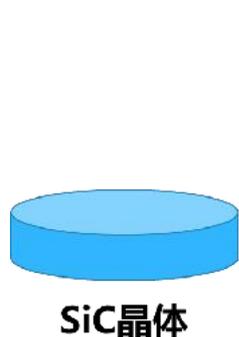
碳化硅辐射探测系统电路设计



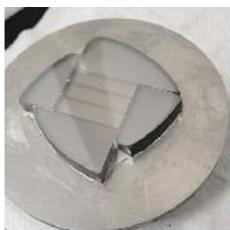
碳化硅辐射探测系统设计与实物图

# 碳化硅探测系统

□ 设计碳化硅Gamma探测器，并实现带电子学系统的封装探测系统，可以有效获得Gamma射线的探测。



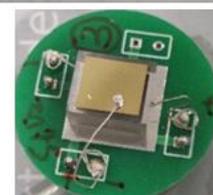
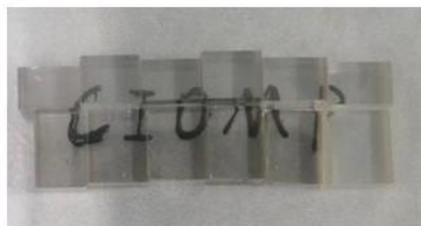
切割



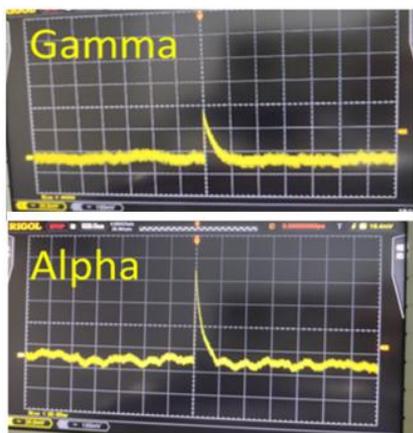
抛光

多次循环

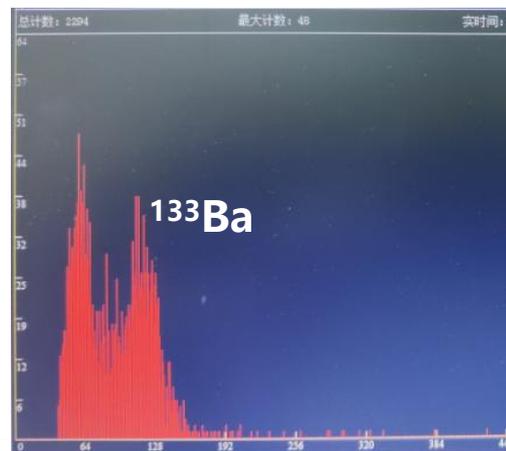
碳化硅块体加工



碳化硅块体探测器



实现Alpha和Gamma探测

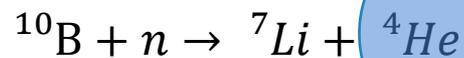
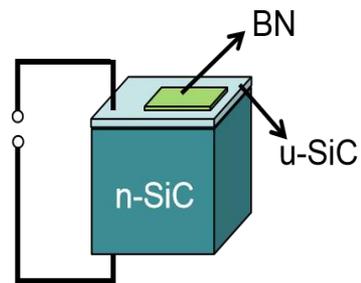
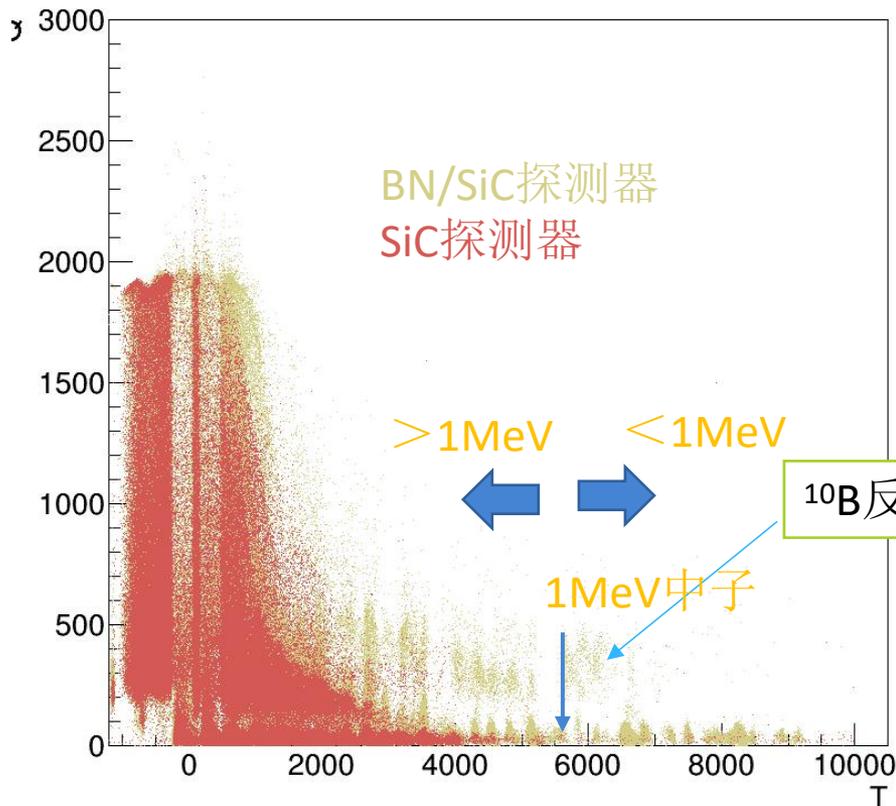


Gamma探测能谱

# 碳化硅中子探测

研制辐射探测探头，适用于散裂中资源科学中心白光中子束流监测，通过对比，可以明显看出热中子与 $^{10}\text{B}$ 的反应事件。

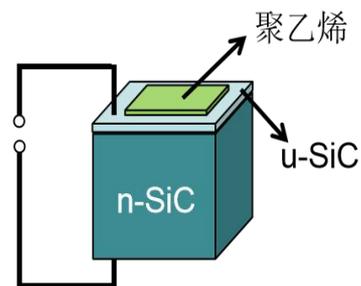
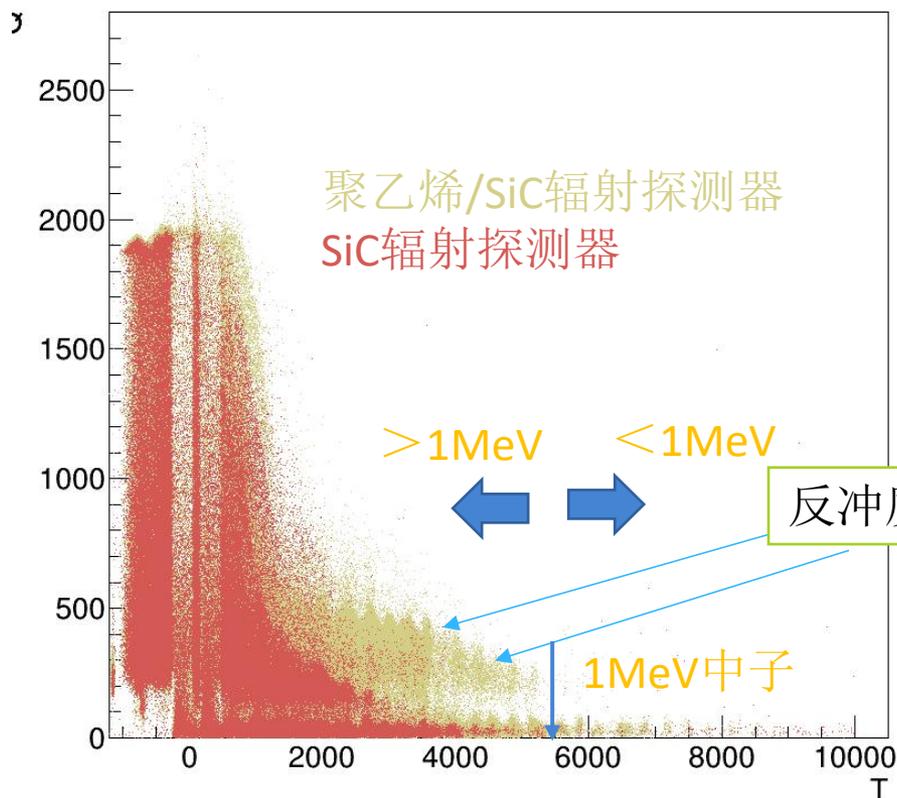
Q:T {channel==11&&T<1E4}



# 碳化硅中子探测

□ 研制辐射探测探头，适用于散裂中资源科学中心白光中子束流监测，通过对比，可以明显看出快中子与H的反应事件。

Q:T {channel==16&&T<1E4}



快中子与H原子反应产生反冲质子事件带，截止能量约1MeV

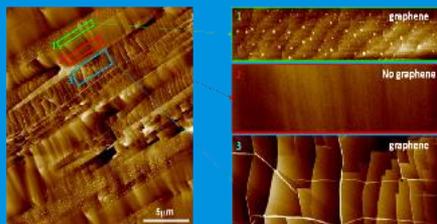
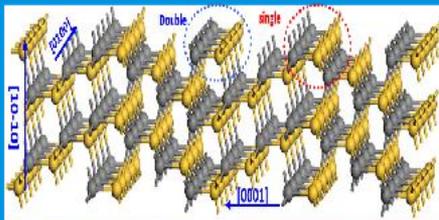
# 个人简介



贾玉萍

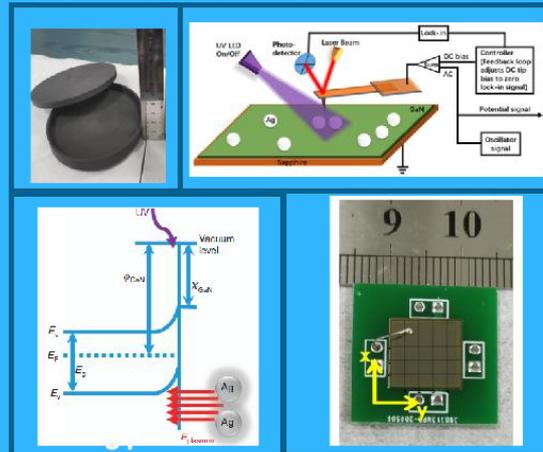
副研究员

## 碳化硅外延石墨烯生长



- 中科院物理所 陈小龙团队
- 碳化硅外延石墨烯的生长
  - 石墨烯电荷特性研究

## 设备 → 材料 → 物理 → 探测器



中科院长春光机所 黎大兵团队

- 碳化硅基辐射探测器
- 碳化硅基光电探测器



中国科学院  
长春光学精密机械与物理研究所

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences

## Li Group的全家福



贾玉萍  
中科院长春光机所



和衷共济  
携手共赢

➤ 致 谢

感谢聆听

