

# 宽禁带半导体探测器在白光中子束线的应用研究

蒋伟，牛梦臣，龙泽，郭宇航，夏晓川，樊瑞睿，梁红伟

中国科学院高能物理研究所&大连理工大学



第四届半导体辐射探测器研讨会 山东青岛 2024年5月23-26日



大连理工大学  
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

# 目 录

Contents

**01** 研究背景

**02** 宽禁带半导体探测器

**03** 性能测试及中子辐照

**04** 在Back-n的应用

# 对耐辐照半导体探测器的需求

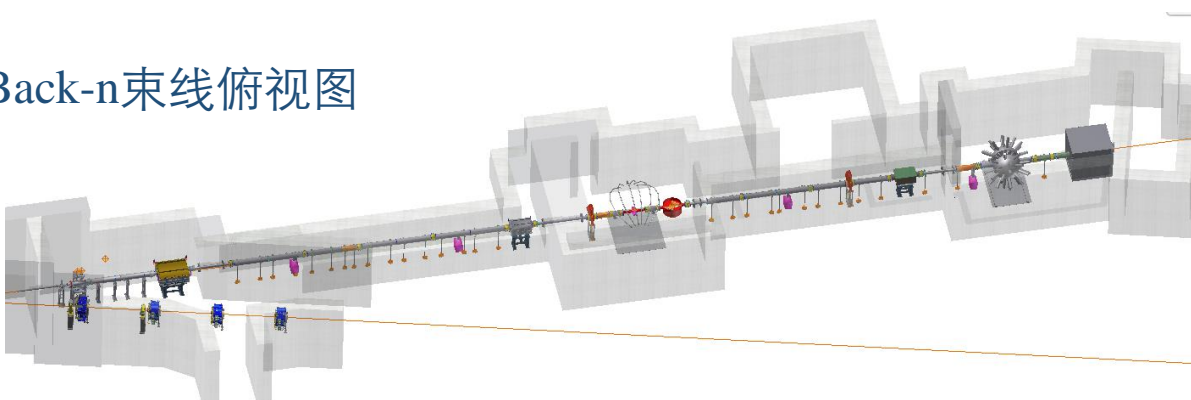
- 基于Back-n物理实验中零度角出射粒子探测

在中国散裂中子源反角白光中子束线(CSNS Back-n), 中子诱发轻带电粒子出射(n, lcp)反应截面小, 粒子能量低, 并且0度出射反应截面大, 直接测量有重要价值, Si-PIN探测器不适用于Back-n的零度角探测。探索利用耐辐照半导体探测器开展研究工作。

- 束流特征测量

束流监测, 需要耐辐照(Back-n、CSNS-II高能质子束线等)

Back-n束线俯视图



Shutter (mm)	Coll#1 (mm)	Coll#2 (mm)	ES#1 spot (mm)	ES#1 flux (n/cm <sup>2</sup> /s)	ES#2 spot (mm)	ES#2 flux (n/cm <sup>2</sup> /s)
Φ3	Φ15	Φ40	Φ15	1.27E5	Φ20	4.58E4
Φ12	Φ15	Φ40	Φ20	2.20E6	Φ30	7.81E5
Φ50	Φ50	Φ58	Φ50	4.33E7	Φ60	1.36E7
78×62	76×76	90×90	75×50	5.98E7	90×90	2.18E7

Back-n不同准直器模式下的流强(100kW)

# 宽禁带半导体探测器

多种半导体探测器材料的电学性能参数

Material	4H-SiC	Si	Ge	GaAs	GaN	Diamond
Atomic number	14/6	14	32	31/33	31/7	6
Bandgap energy, eV	3.3	1.1	0.66	1.4	3.4	5.5
Electron mobility, cm <sup>2</sup> /(V·s)	800~1000	1450	3900	≤8500	1000	1800~2200
Hole mobility, cm <sup>2</sup> /(V·s)	50~115	450	1900	≤400	30	1200~1600
Saturation drift velocity *10 <sup>7</sup> cm/s	2.0	1.0	0.6	1.2	2.5	2.7
Breakdown electric field strength MV/cm	3	0.5	0.1	0.6	4.1	10
Thermal conductivity (300K) W/(cm·K)	3.7	1.5	0.6	0.54	1.5	20
Electron-hole pair generation energy, eV	7.8	3.6	2.96	4.3	8.9	13
Relative dielectric constant	9.7	11.8	16.2	12.9	9.6	5.5
Threshold displacement energy, eV	21-35	12.8	14.4	-	10~20	43
Density, g/cm <sup>3</sup>	3.2	2.3	5.3	5.3	6.2	3.5
Melting point, K	2380	1420	917	1238	1050	4000

## 宽禁带半导体材料的优势

- 耐热、耐辐照能力
- 高的击穿场强
- 高的载流子漂移速率
- 小探测器电容
- 快响应速度
- 体积小，不需要冷却装置

- 高理论击穿场强和载流子漂移速度 —— 快速的信号传输；
- 高热导率和低本征载流子浓度 —— 较强的高温工作能力；
- 高原子离位阈能 —— 强抗辐照能力。
- 在强辐射环境与快速信号响应领域发挥重要作用

# 宽禁带半导体探测器

多种半导体探测器材料的电学性能参数

Material	4H-SiC	Si	Ge	GaAs	GaN	Diamond
Atomic number	14/6	14	32	31/33	31/7	6
Bandgap energy, eV	3.3	1.1	0.66	1.4	3.4	5.5
Electron mobility, cm <sup>2</sup> /(V·s)	800~1000	1450	3900	≤8500	1000	1800~2200
Hole mobility, cm <sup>2</sup> /(V·s)	50~115	450	1900	≤400	30	1200~1600
Saturation drift velocity *10 <sup>7</sup> cm/s	2.0	1.0	0.6	1.2	2.5	2.7
Breakdown electric field strength MV/cm	3	0.5	0.1	0.6	4.1	10
Thermal conductivity (300K) W/(cm·K)	3.7	1.5	0.6	0.54	1.5	20
Electron-hole pair generation energy, eV	7.8	3.6	2.96	4.3	8.9	13
Relative dielectric constant	9.7	11.8	16.2	12.9	9.6	5.5
Threshold displacement energy, eV	21-35	12.8	14.4	-	10~20	43
Density, g/cm <sup>3</sup>	3.2	2.3	5.3	5.3	6.2	3.5
Melting point, K	2380	1420	917	1238	1050	4000

## 宽禁带半导体材料的优势

- 耐热、耐辐照能力
- 高的击穿场强
- 高的载流子漂移速率
- 小探测器电容
- 快响应速度
- 体积小，不需要冷却装置

- 高理论击穿场强和载流子漂移速度 —— 快速的信号传输；
- 高热导率和低本征载流子浓度 —— 较强的高温工作能力；
- 高原子离位阈能 —— 强抗辐照能力。
- 在强辐射环境与快速信号响应领域发挥重要作用

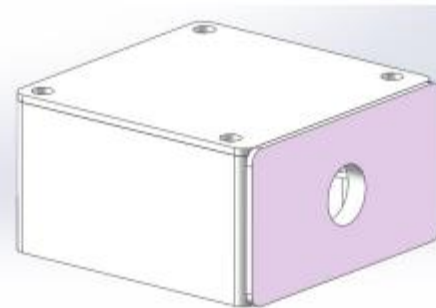
# 金刚石探测器



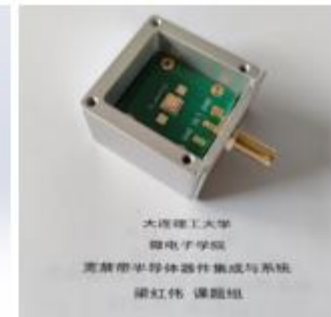
金刚石探测器结构



(a) 金刚石探测器的PCB板设计图

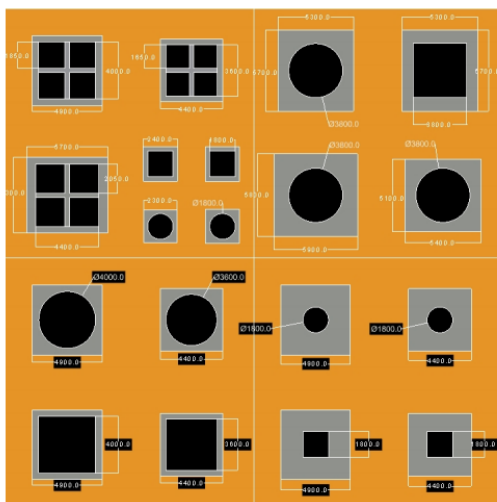


(b) 金刚石探测器的屏蔽盒设计图

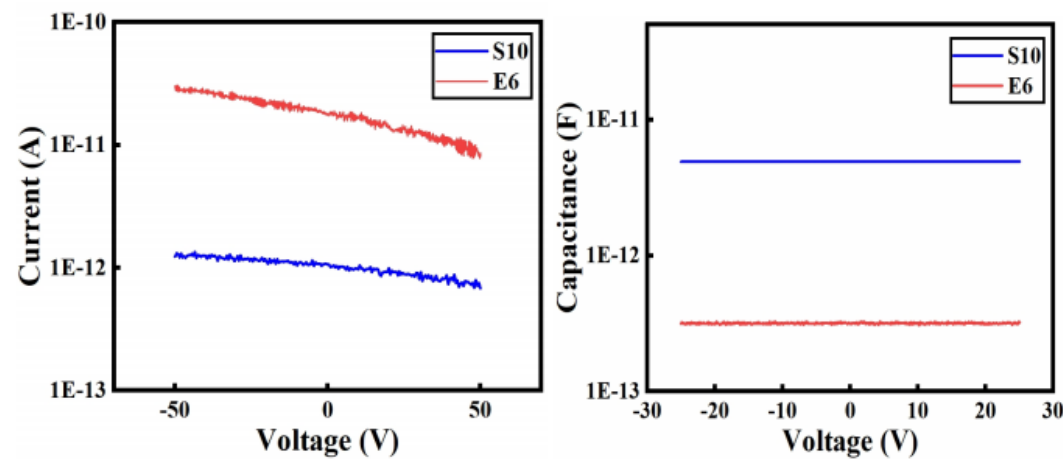


(c) 金刚石探测器封装实物图

## 金刚石探测器的封装

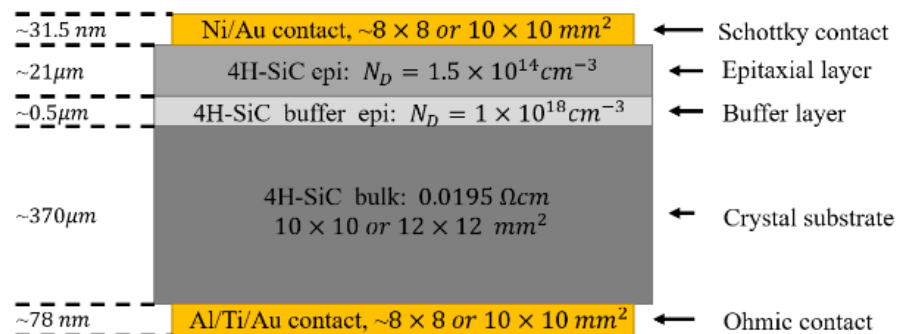


金刚石探测器金属化掩膜版



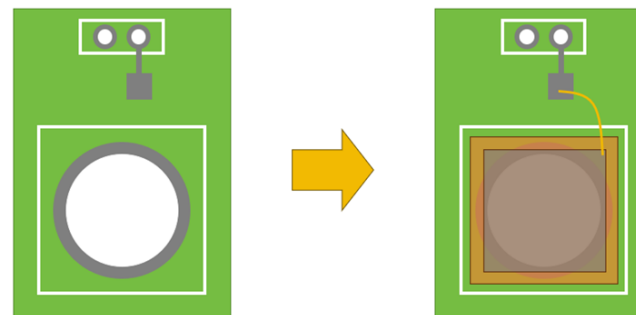
金刚石探测器的I-V、C-V曲线

# 4H-SiC探测器

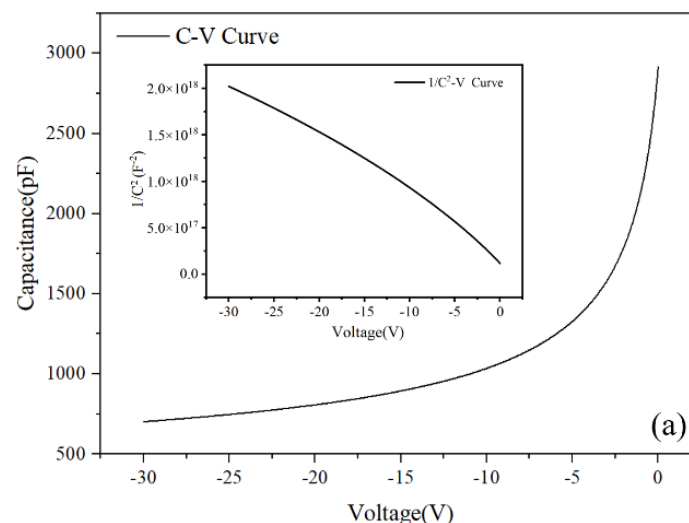


4H-SiC探测器的结构示意图

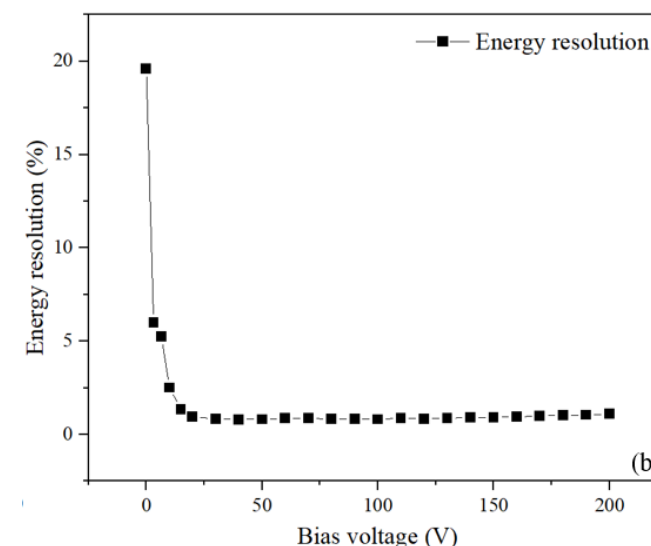
衬底为4H-SiC单晶，厚度为370 μm，电阻率为0.0195 Ωcm。在外延层上首先生长一层缓冲层，厚度约为0.5 μm，掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。在缓冲层上外延生长4H-SiC的外延材料，厚度为21 μm，掺杂浓度为 $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。样品尺寸分为10 mm\*10 mm和12 mm\*12 mm两种。外延层具有较高的晶体质量，无微管缺陷。



探测器封装



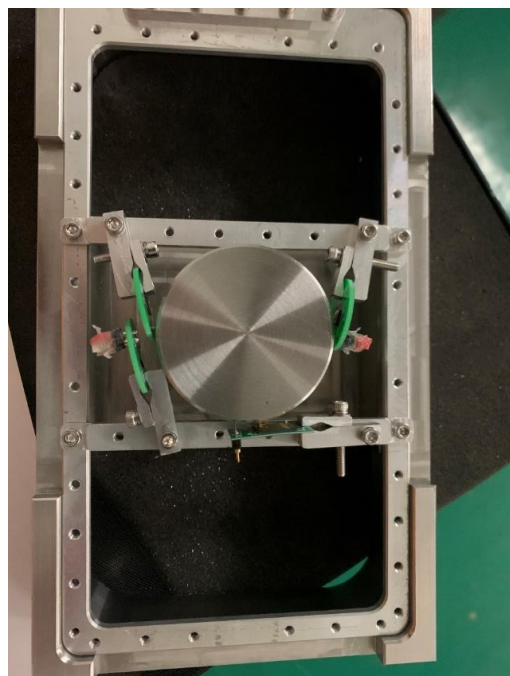
C-V曲线



4H-SiC探测器的α粒子能量分辨率

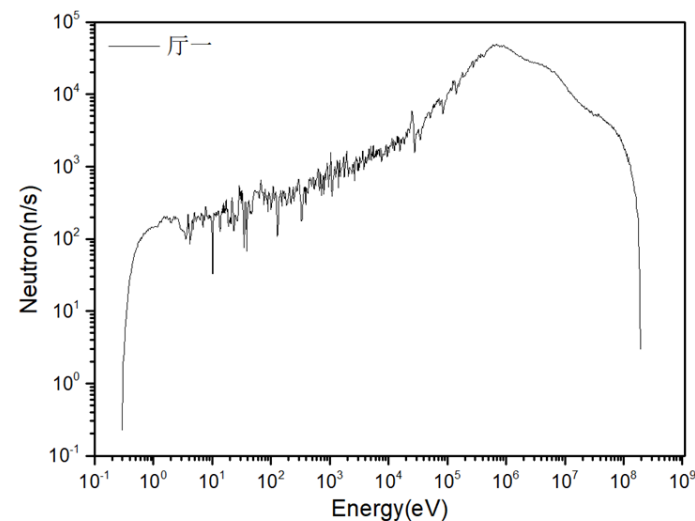
- -40 V至-200 V范围分辨率保持在1%以内。
- 最佳能量分辨率为0.798%
- 5.48 MeV α @<sup>241</sup>Am

# 中子辐照效应研究- 4H-SiC探测器



在CSNS Back-n中子辐照平台开展辐照

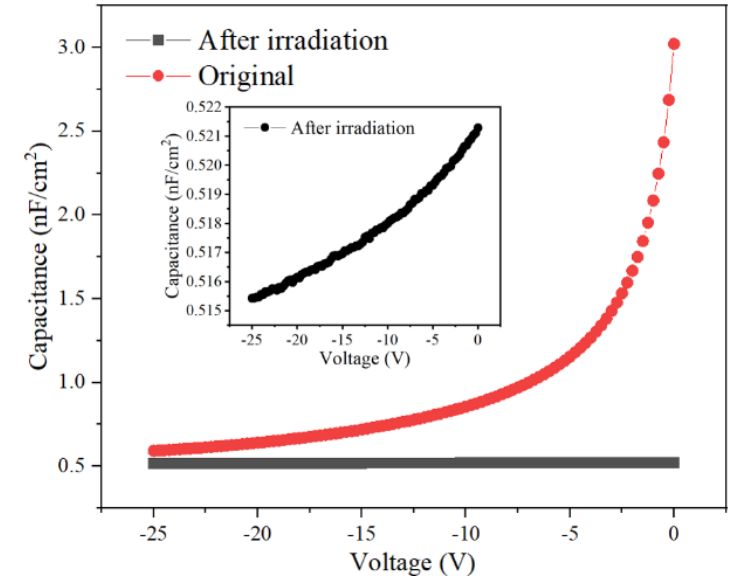
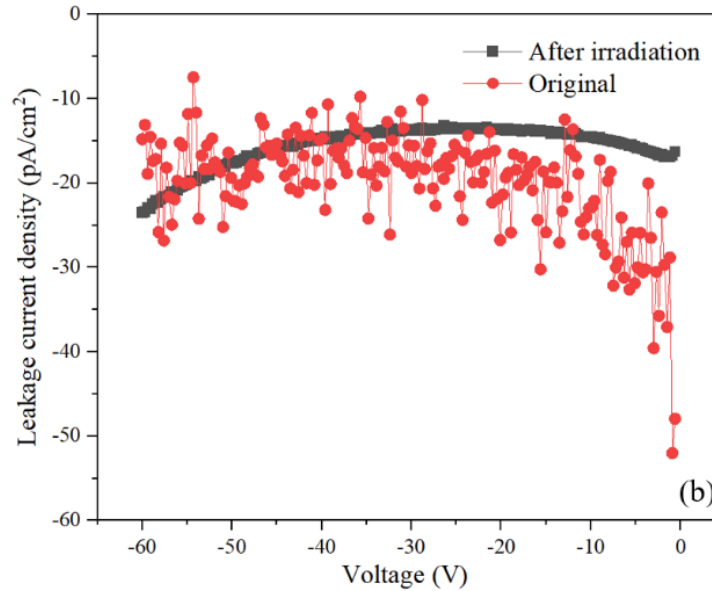
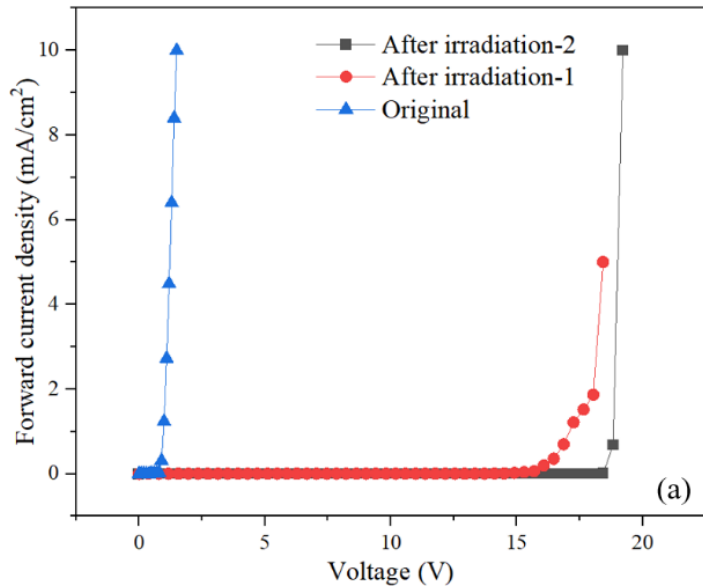
- 辐照时间：15天；
- 辐照位置的中子通量率：  $1.1 \times 10^8$  n/cm<sup>2</sup>/s；
- 总通量：  $1.24 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>；
- 辐照剂量： 1740.8 Gy；
- 1 MeV等效中子通量：  $1.33 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>。



CSNS Back-n中子能谱



## 电学性能退化



中子辐照前后的电学特性对比图

### ★ 中子辐照前:

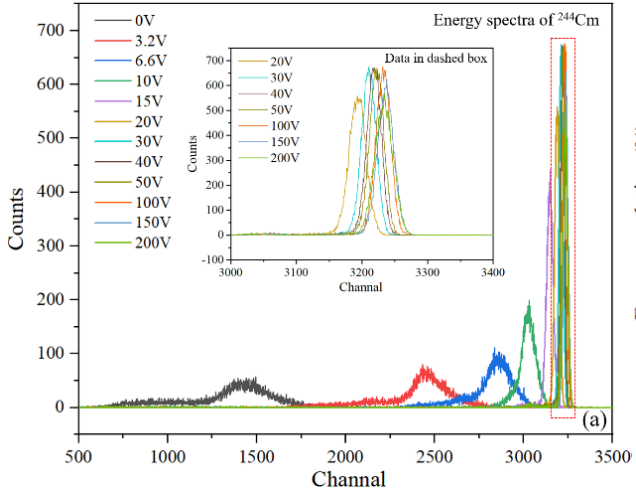
- 正向开启电压: 0.8 V;
- 理想因子: 1.04;
- 肖特基势垒高度: 1.24 eV;
- 极低反向漏电:  $-30 \text{ pA/cm}^2$  ;
- 平均载流子浓度:  $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ;
- 全耗尽电压: -60 V.

### ★ 中子辐照后:

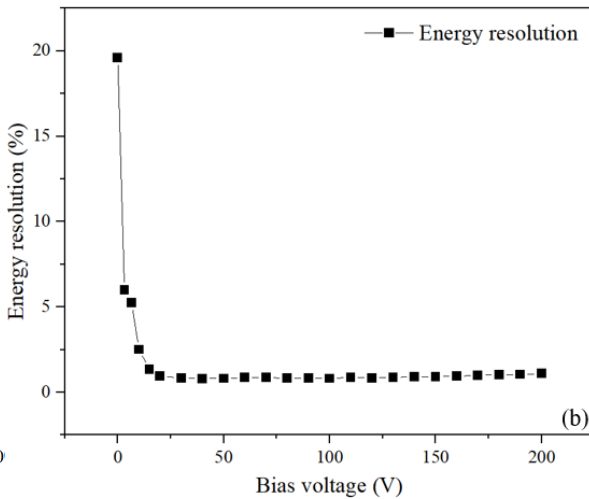
- 开启电压在**15 V以上**;
- 多次测量表现出不同的正向开启曲线;
- 反向漏电流没有明显变化;
- 器件的**电容不随偏压改变**;
- 探测器电容为:  $0.52 \text{ nF/cm}^2$ ;
- 等效的耗尽区宽度为:  $16.7 \text{ }\mu\text{m}$ .

# 中子辐照效应研究- 4H-SiC探测器

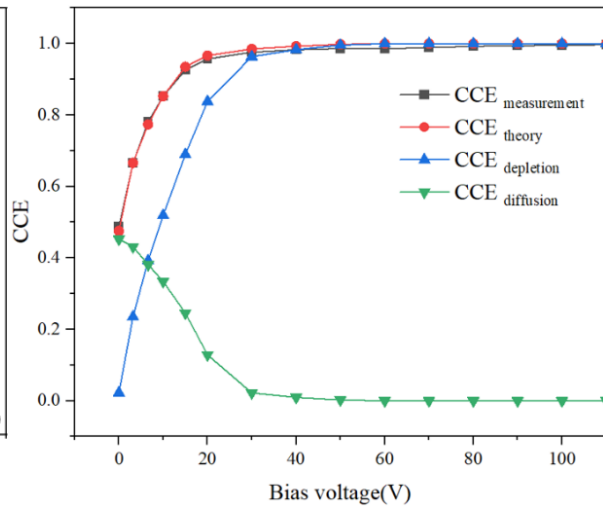
## 探测性能退化



探测器在不同偏置电压下的  $\alpha$  粒子能谱



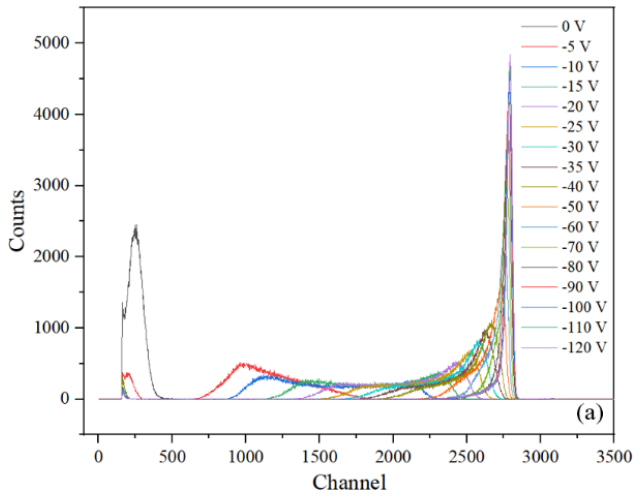
能量分辨率曲线



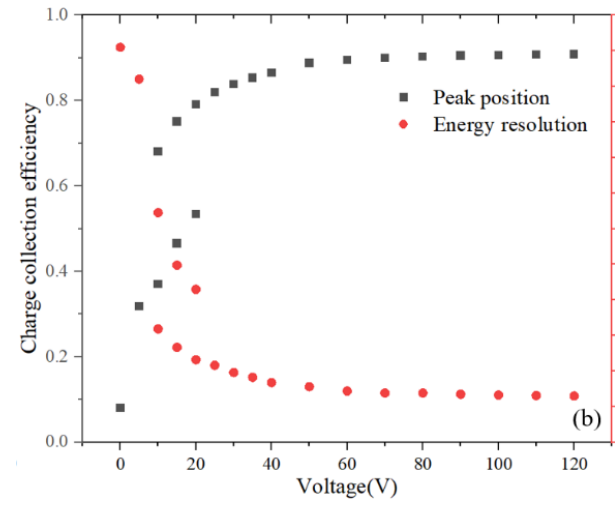
电荷收集效率曲线的测量与理论模型

### ★ 中子辐照前:

- 无偏置电压即可对 $\alpha$ 粒子有响应, 收集效率达到**45%以上**;
- 最佳能量分辨率为: **0.79%** (45.63 keV);
- 探测器的能量分辨率可以在**-20 V到-200 V**的范围内保持在**1%以下**;
- 电荷收集效率: **100%** (-60 V以上);
- 少数载流子扩散长度: 12.71  $\mu\text{m}$ .



辐照后的探测器能谱



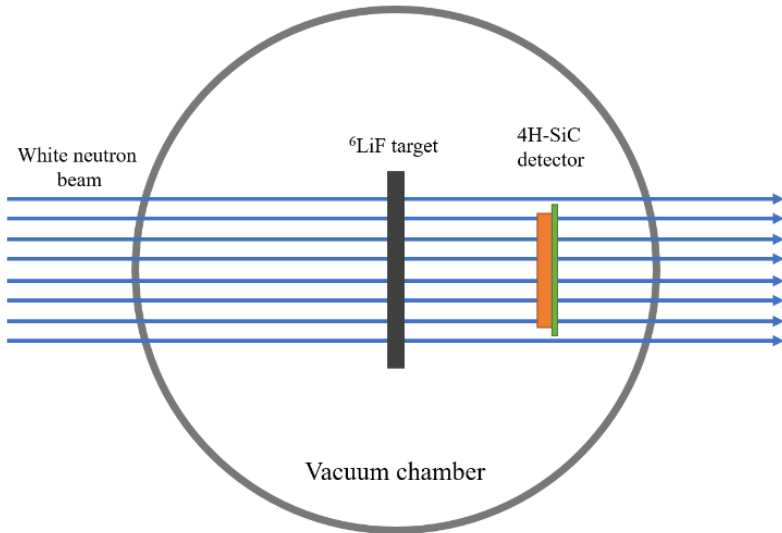
辐照后的能量分辨率和CCE曲线

### ★ 中子辐照后:

- 探测器仍能够在无偏压条件下对 $\alpha$ 粒子有响应(CCE=8%);
- 最佳能量分辨率: **1.49% @ -120 V**;
- 电荷收集效率: **90.8%** (-80 V以上);

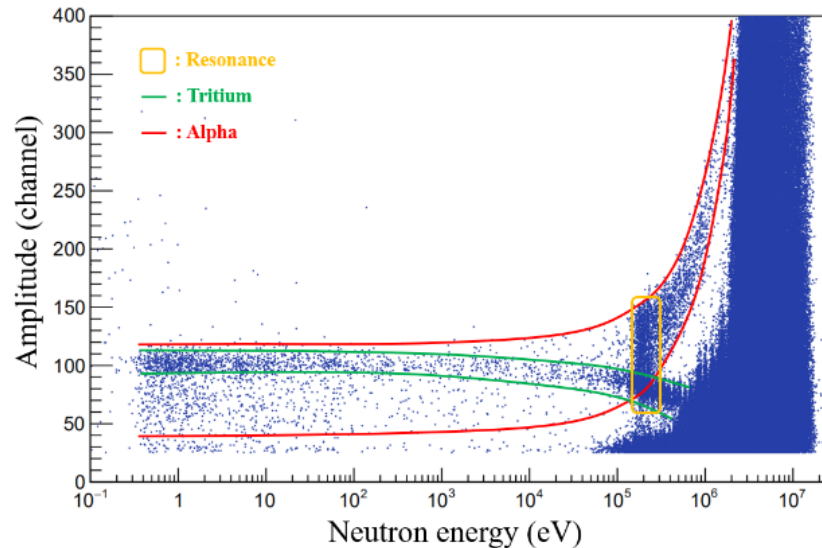
# 4H-SiC探测器在(n, lcp)反应测量中的应用

## ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反应零角度出射产物测量

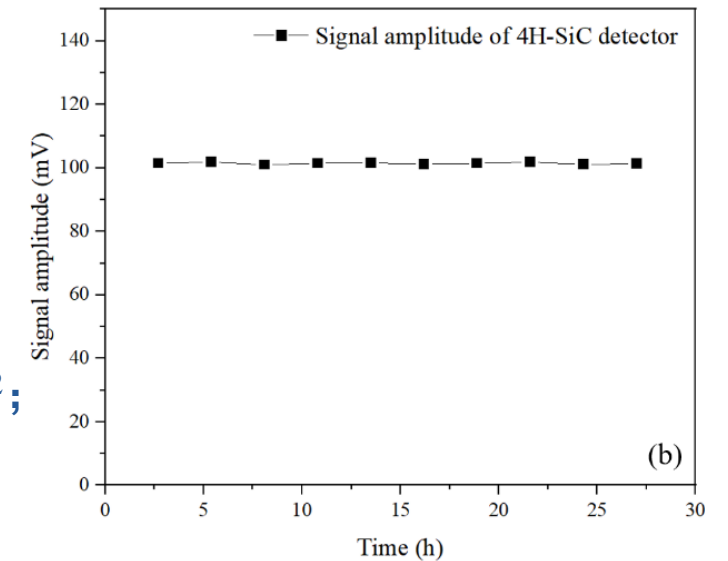
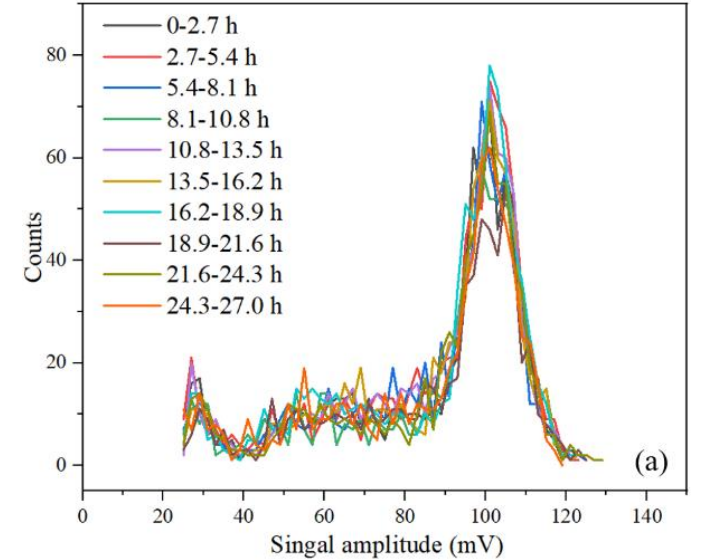


实验设置示意图

- 样品厚度  $130 \mu\text{g}/\text{cm}^2$
- 样品直径  $50 \text{ mm}$ ;
- 真空测试环境
- 0角度测量，测量时间27小时。
- 分辨 $\alpha$ 粒子和氚粒子的事件带;
- 中子辐照剂量为  $13.53 \text{ Gy}$ ;
- 等效  $1 \text{ MeV}$  中子通量为  $1.05 \times 10^{13} \text{ n}/\text{cm}^2$ ;
- 氚粒子信号幅度不随测量时间变化。



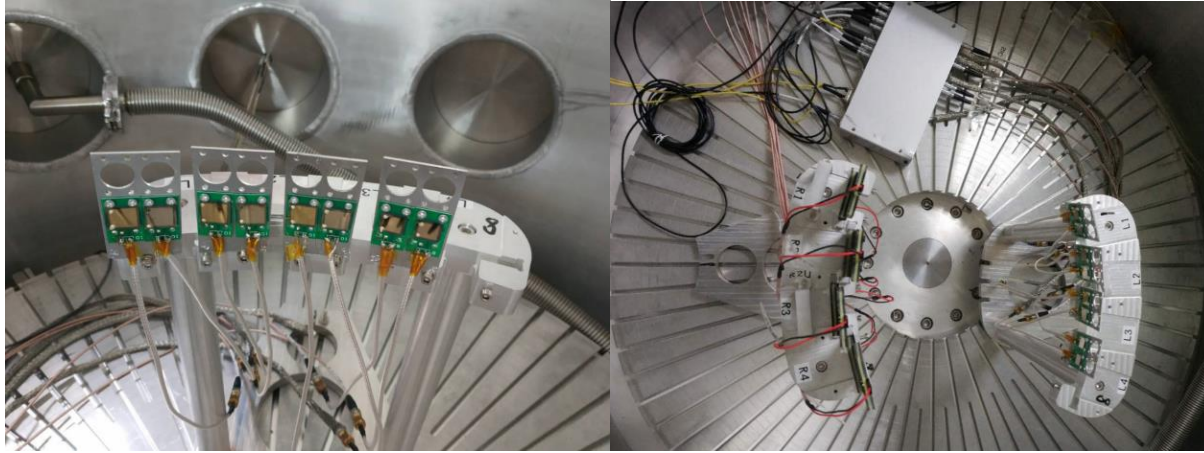
信号幅度-中子能量二维谱



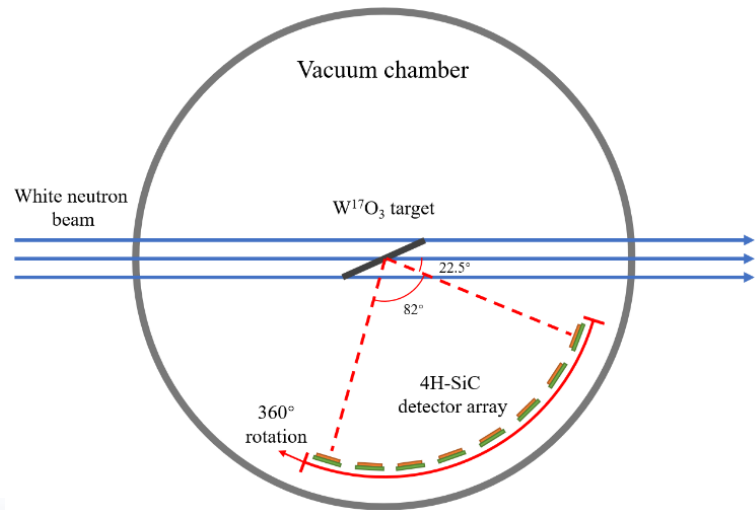
氚事件能谱随时间的变化

# 4H-SiC探测器在(n, lcp)反应测量中的应用

## $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 反应产物测量

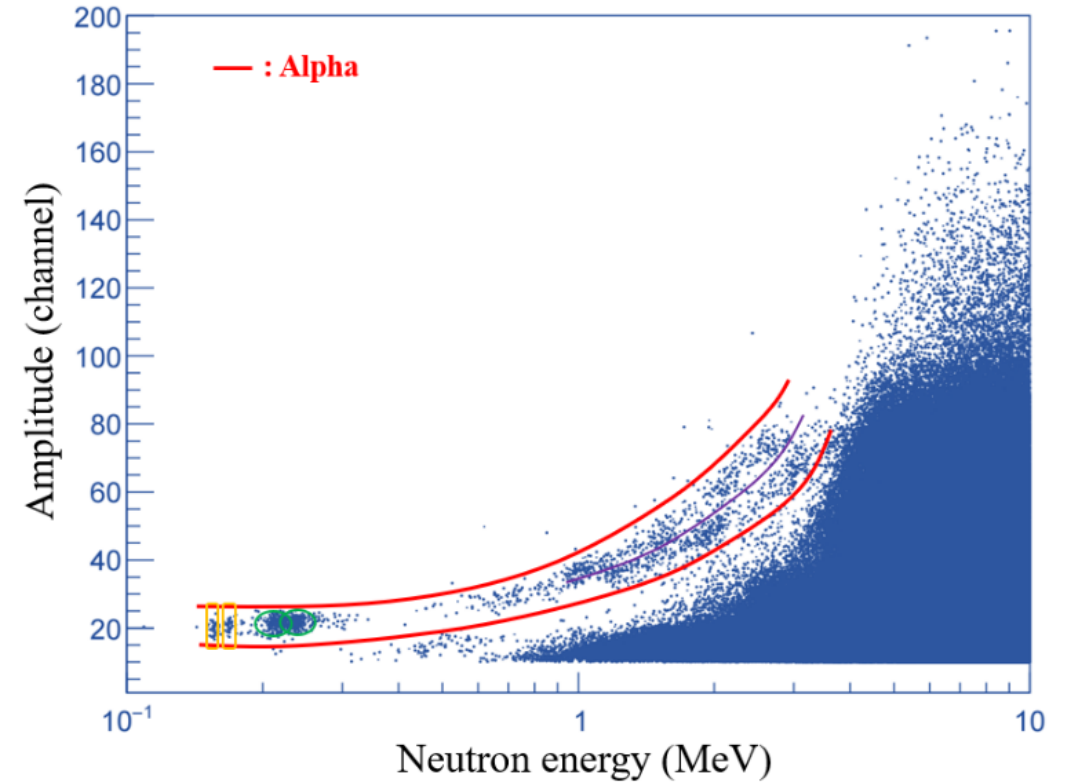


探测器阵列照片



实验设置示意图

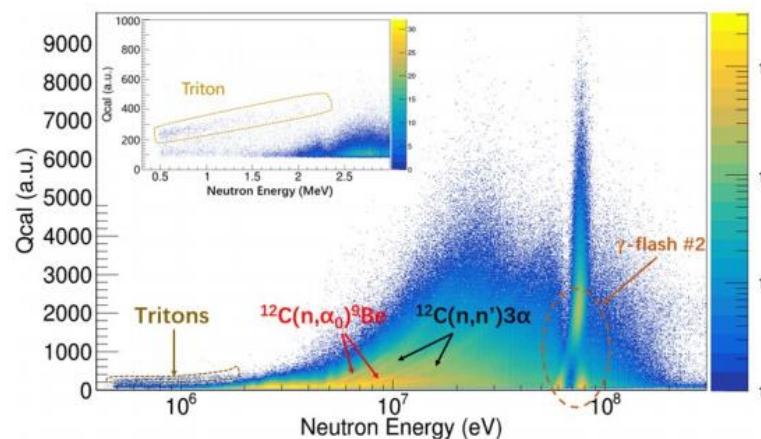
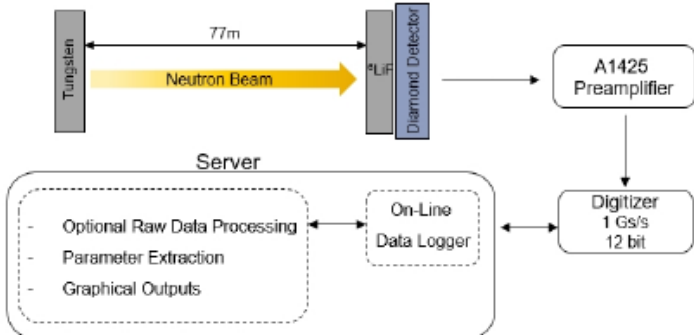
- $\text{W}^{17}\text{O}_3$  样品的厚度为 $200\sim 300\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ;
- 直径为 $50\ \text{mm}$ ;
- 探测器中心的角度范围在 $22.5^\circ$  至 $104.5^\circ$ 。



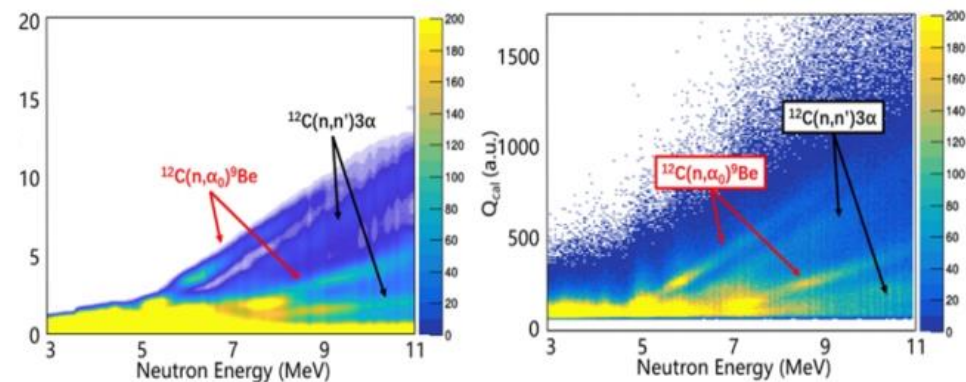
信号幅度-中子能量二维谱

- 双束团结构;
- 区分 $\alpha$ 粒子和 $\gamma$ -flash;
- 共振区的反应事件聚集;
- 长时间的测量稳定性。

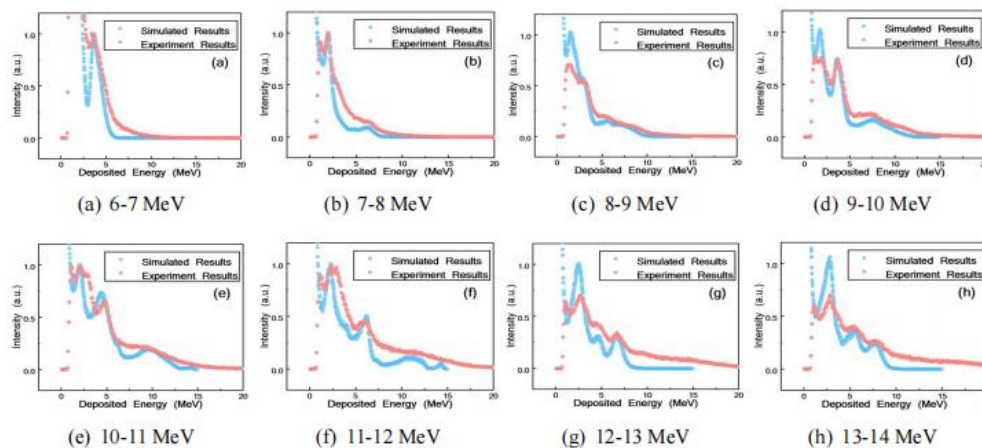
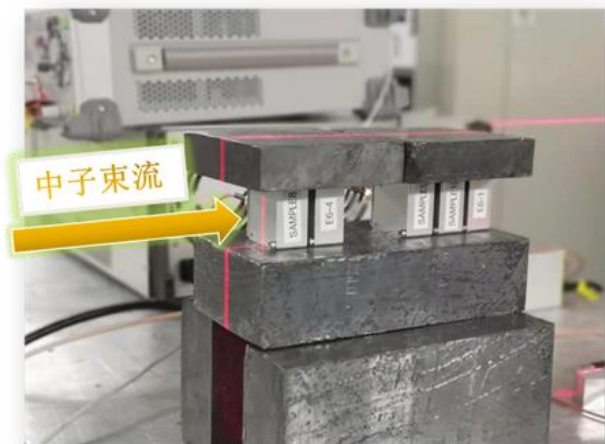
# 金刚石探测器在(n, lcp)反应测量中的应用



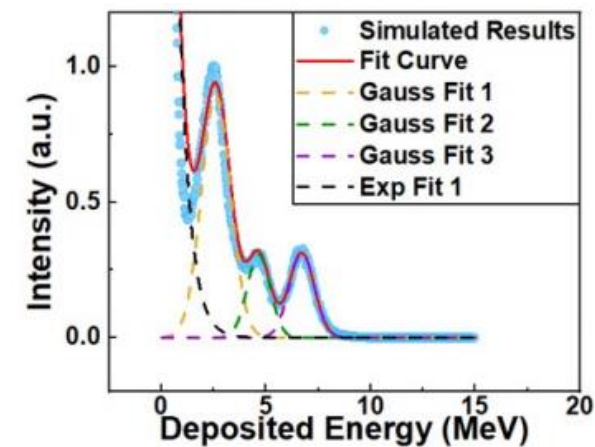
累计电荷量：中子能量二维谱



累计电荷量：中子能量二维谱模拟与实验结果对比



不同中子能量下 $Q_{cal}$ 谱的模拟（蓝色）与实验结果（红色）对比



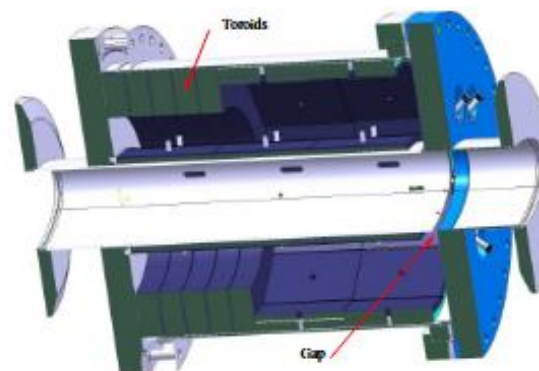
$Q_{cal}$ 谱的高斯拟合示意图

# 金刚石探测器测量 $\gamma$ -flash纵向分布研究

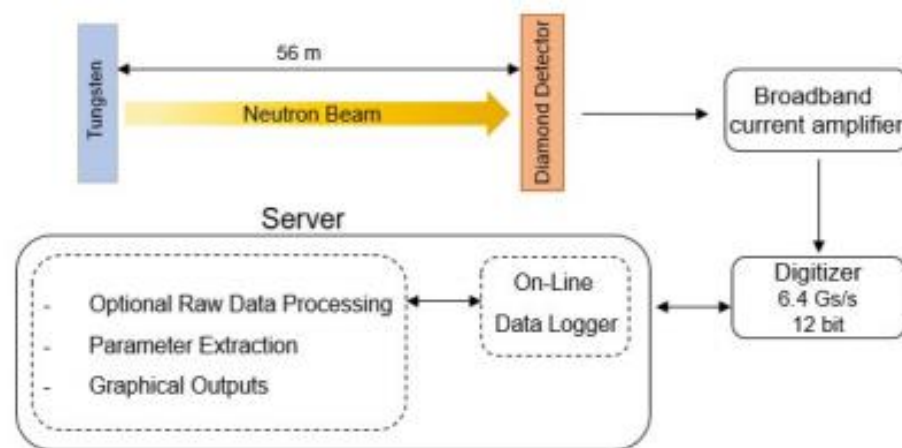
- $\gamma$ -flash 分布紧密反映了质子束的纵向轮廓，因此其研究对优化中子源性能和理解质子束特性至关重要
- $\gamma$ -flash 的直接测量使得可以研究目标材料在质子轰击前后的纵向分布变化



Bunch Shape Monitor (BSM)

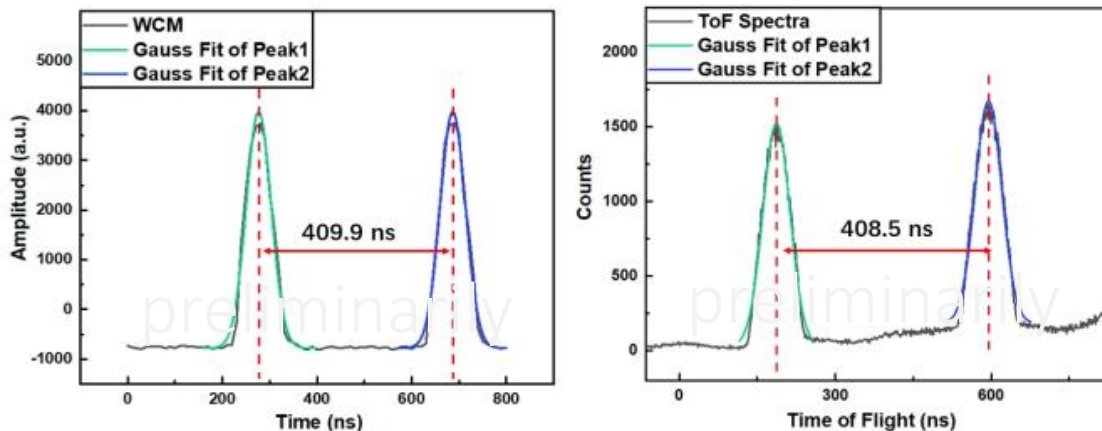


Wall Current Monitor (WCM) 剖面图



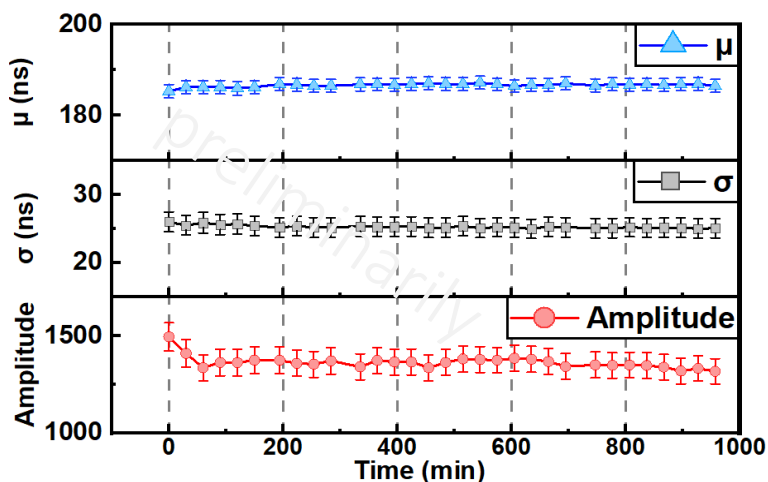
E6金刚石探测器测量 $\gamma$ -flash纵向分布的实验设置

# 金刚石探测器测量 $\gamma$ -flash纵向分布研究

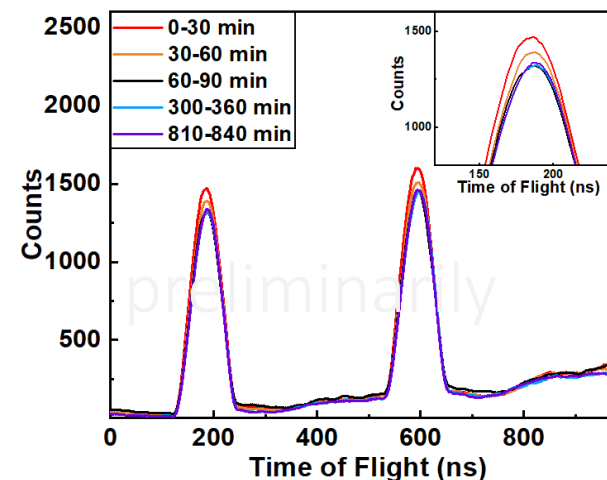


E6探测器不同参数随时间/中子剂量的变化图  
 时间差和  $\sigma$  的准确度分别约为 **99.66%** 和 **98.47%**

稳定性



30 min 内高斯拟合参数 (a)  $\mu$ , (b)  $\sigma$  和 (c) *Amplitude* 的稳定性

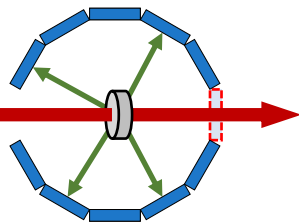


金刚石探测器在不同时间间隔下的飞行时间谱。插图提供了 Peak1 的放大视图。不同颜色的实线代表不同的累积时间

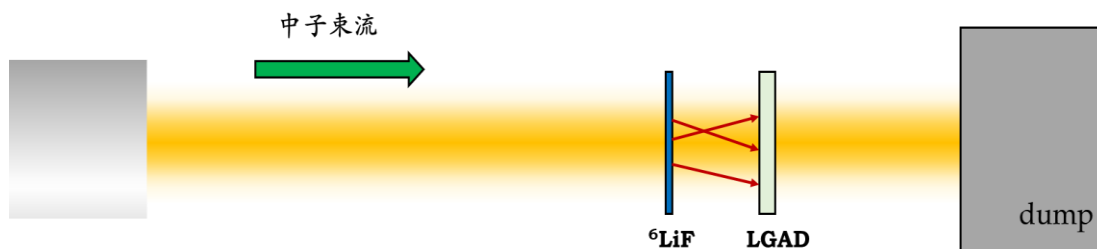
# LGAD探测器@Back-n测试

中子

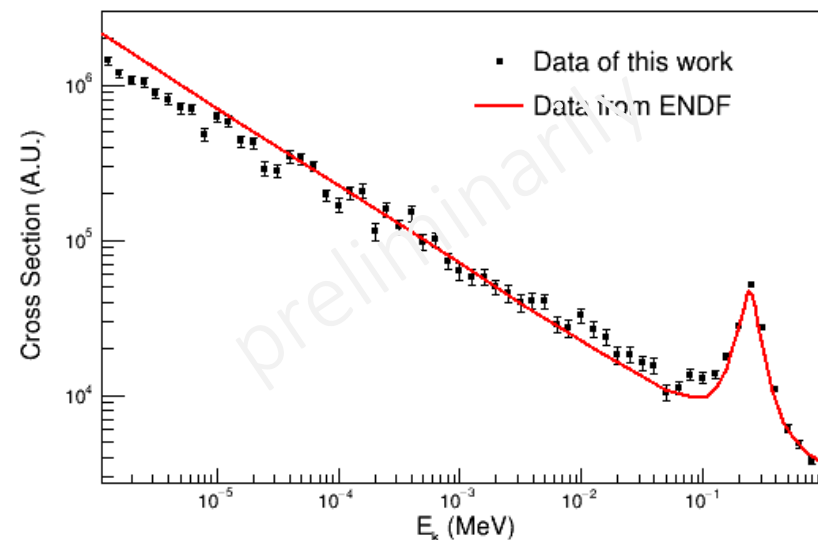
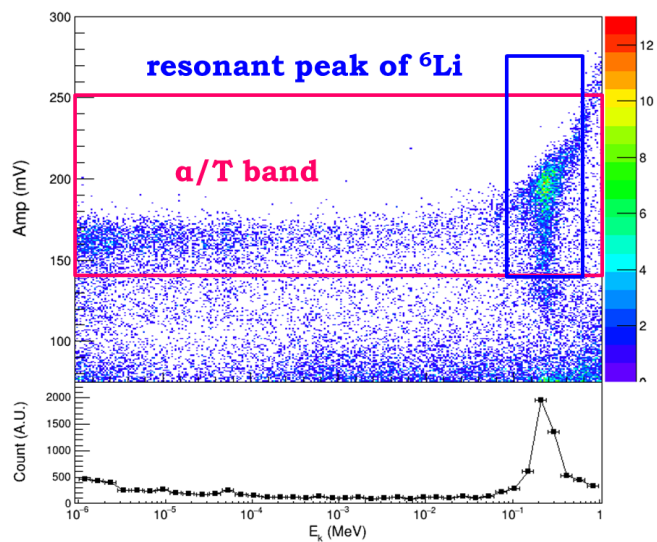
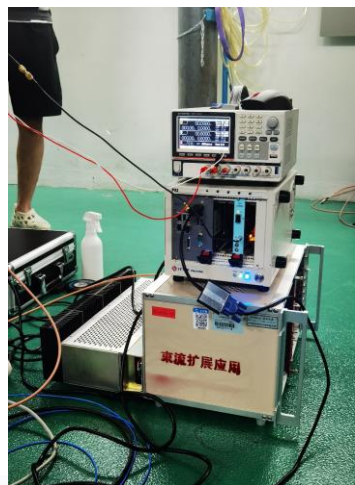
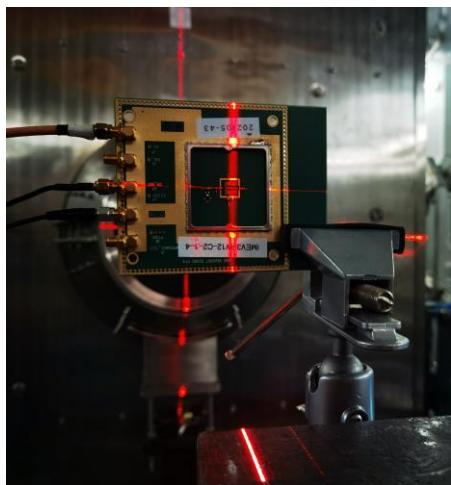
核数据角分布  
测量示意图



- 受限于探测器抗辐照性能，国际上束流0度方向的核数据测量严重不足。
- ADS，质子治疗等领域中，束流0度方向核数据至关重要。
- 本研究利用LGAD探测器+FROS电子学，搭建了一种“在束零度角”探测装置，并在Back-n上开展了测试。



- 经测试，该方案满足核数据零度角探测器需求。
- 本工作为Back-n上新型探测方法的前瞻性部署研究。





# 总结及展望

- ✓宽禁带半导体探测器适合应用于在反角白光中子束线开展物理实验测量及束流监测等；
- ✓本工作研究了金刚石探测器、4H-SiC探测器、LGAD探测器的性能、中子辐照效应，以及在CSNS Back-n的应用场景；
- ✓利用金刚石探测器、4H-SiC探测器开展了核反应截面测量等研究；
- ✓对于探测器的极化效应等还需进一步探索。



大连理工大学  
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Thanks!

