

2X2像素SiC带电粒子探测器研究

梁晓华

核探测与核电子学重点实验室

中国科学院高能物理研究所

20180426

主要内容

SiC宽禁带半导体材料特性

2X2像素SiC探测器研制与测试

SiC探测器抗辐照试验测试

读出电子学进展

未来的研究目标

SiC探测器的优势

序号	参数	影响
1	禁带宽度大 (3.26eV)	低漏电流和低噪声，耐高温
2	载流子迁移率寿命积大 ($\mu_e=20E6cm^2/s$)	高的电荷收集效率和能量分辨率
3	相对介电常数低 ($\epsilon_r=10$)	结电容小，从而附加噪声小
4	临界位移能高 ($E_d=22\sim35$)	辐照损伤小，耐辐照能力好
5	热导率大 (4.9W/cm.K)	自冷却能力高，高温操作特性好
6	晶格常数小 ($a=3.073\text{\AA}$, $C=10\text{\AA}$)	C-Si键能大，机械强度、硬度大
7	击穿电场高 (3E6V/cm)	高速，小型化器件。

宽禁带半导体探测器—优点：禁带宽度大（是硅的2~3倍，甚至更高）；击穿电场高（4倍以上）；电子饱和速度高（2倍左右）；本征温度高（2倍，暗电流小）；

可以用来制作高温、高速、低暗电流、大功率、小型化，抗辐照器件。适合场合自然就是极端的工作环境下的特殊工作场景：空间环境、加速器、核电站。

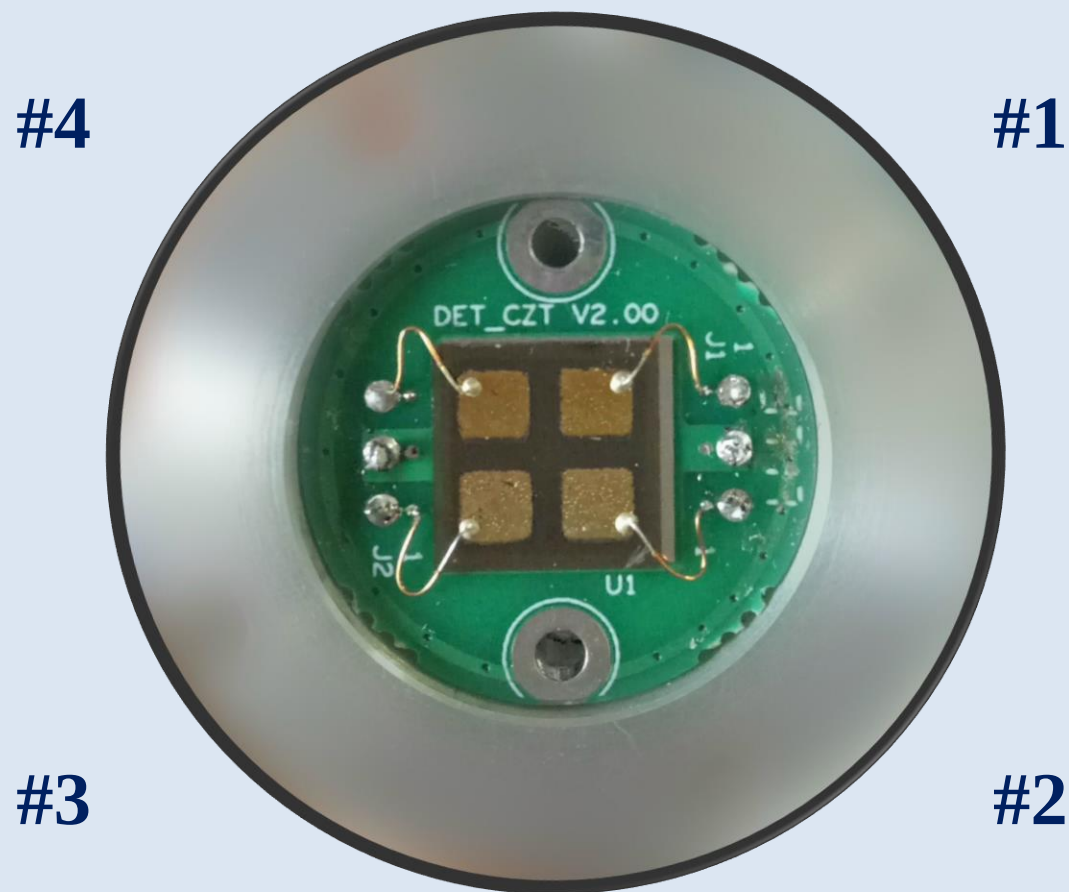
30umSiC与Si探测器全能峰效率

粒子种类	入射粒子能量	SiC	Si
电子 0.1~1MeV	100keV	60.16%	33.45%
	300keV	0.2254‰	0.016‰
质子 0.1~9MeV	100keV	90.80%	97.15%
	200keV	5.35%	7.94%
	300keV	0.27%	0.57%
	400keV	1.00‰	0.99‰
	500keV	1.03‰	0.48‰
α粒子 4~10MeV	4MeV	99.99%	99.94%
	5.4MeV	99.91%	99.74%
	6MeV	99.83%	5.614‰
	8MeV	0.672‰	0.154‰
X射线 1~9keV	1keV	99.88%	99.85%
	2keV	98.51%	97.66%
	3keV	98.81%	98.31%
	4keV	94.88%	94.53%
	5keV	81.02%	80.88%
	6keV	63.13%	63.16%
	7keV	47.42%	47.49%
	8keV	35.31%	35.46%
	9keV	26.58%	26.66%

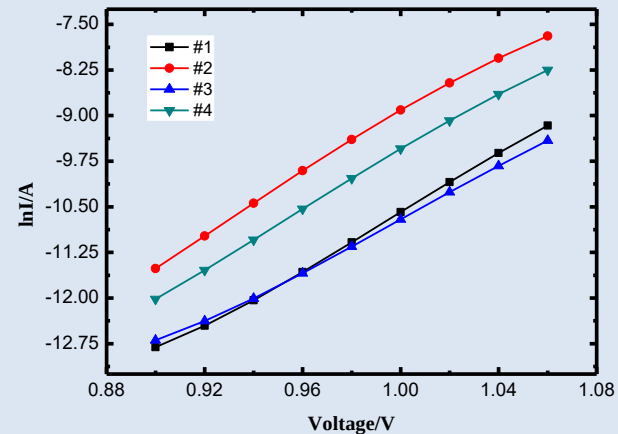
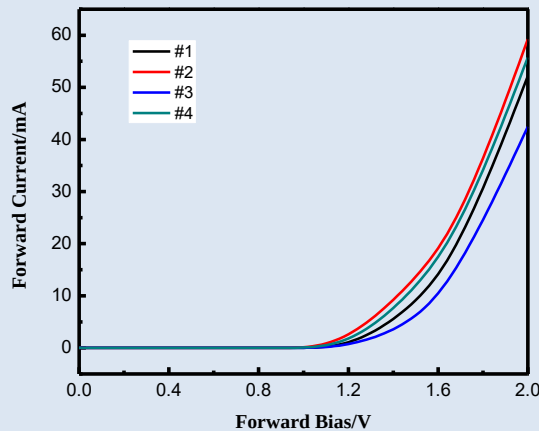
2X2像素SiC探测器

- 探测器结构：
10*10mm衬底，3*3mm/pixel 打线连接
- 探测器工艺：
4H-SiC晶体，371 μm 衬底，电阻率
0.0195 Ωcm ，化学气相沉积(CVD)外延，外延层厚度21 μm ，掺杂浓度 $1\text{E}14$ 电子，顶面肖特基接触，背面欧姆接触。

2X2像素SiC探测器



2X2像素SiC探测器



正向I-V曲线

在只考虑热电子发射机制的情况下，对肖特基势垒的I-V特性满足指数函数：

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{k_B T}\right) \left[\exp\frac{qV}{nk_B T} - 1 \right]$$

其中， n 为理想因子， ϕ_B 是势垒高度， A 为肖特基接触的电极面积， A^* 为有效Richardson系数， V 为电压， k 为玻尔兹曼常数， T 为绝对温度， q 为电子电荷。

2X2像素SiC探测器

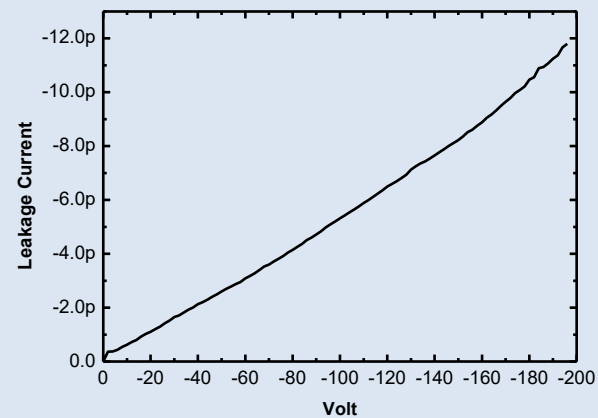
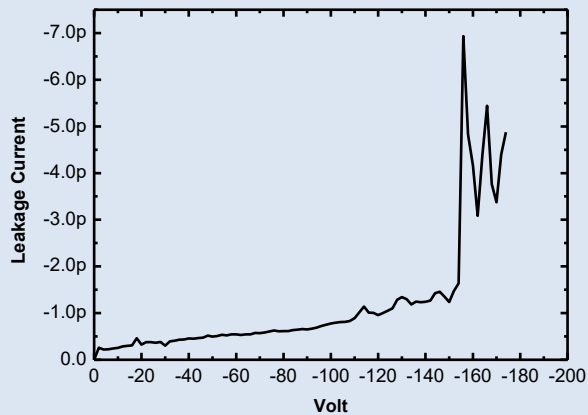
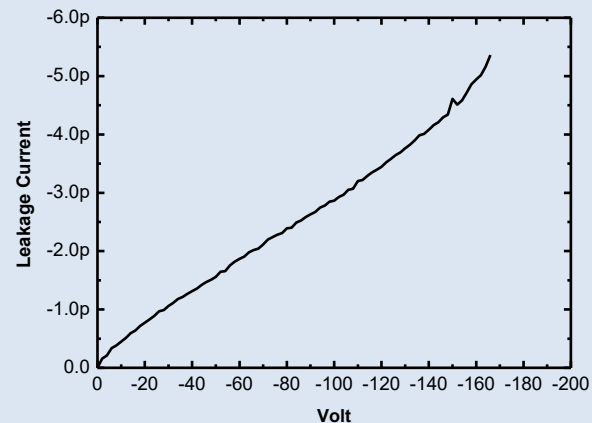
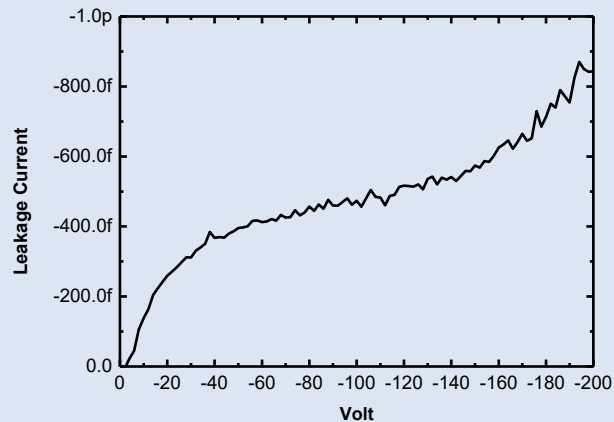
可以通过测量 $\ln I$ 随正向压降 V 的曲线得到探测器的理想因子 n 和势垒高度 ϕ_B 。

$$n = \frac{q}{kT} \left[\frac{\partial V}{\partial (\ln I)} \right]$$

$$\ln I = \ln AA^*T^2 - \frac{q\phi_B}{k_B T} + \frac{qV}{nk_B T}$$

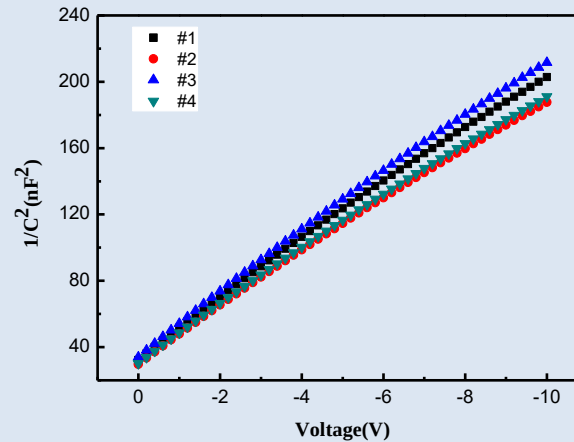
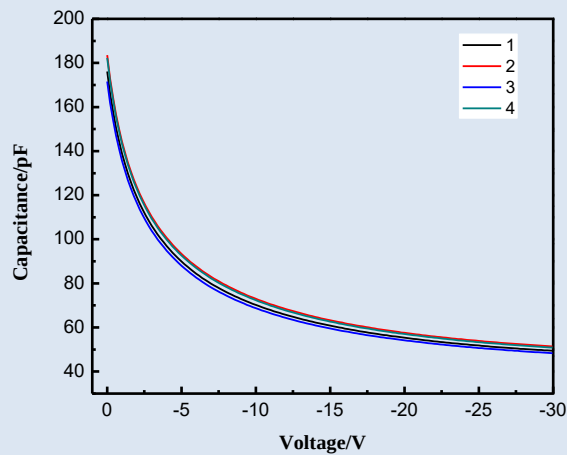
样品编号	理想因子 (n)	势垒高度 (ϕ_b)
#1	1.66	1.23eV
#2	1.57	1.23eV
#3	1.88	1.17eV
#4	1.61	1.23eV
说明	1<n<2	文献中为1.21eV

2X2像素SiC探测器



反向I/V曲线（起止电压：0V； 终止电压：-200V）

2X2像素SiC探测器

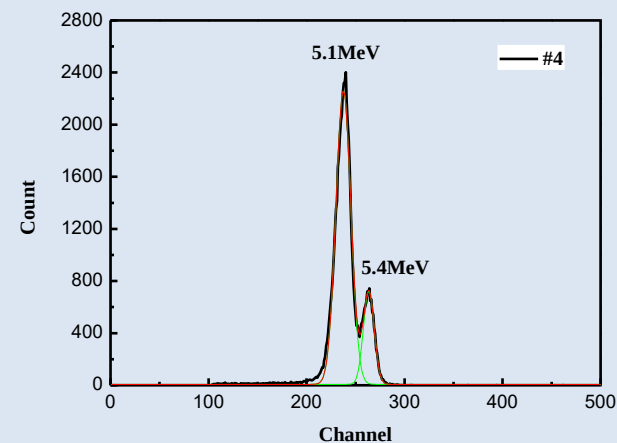
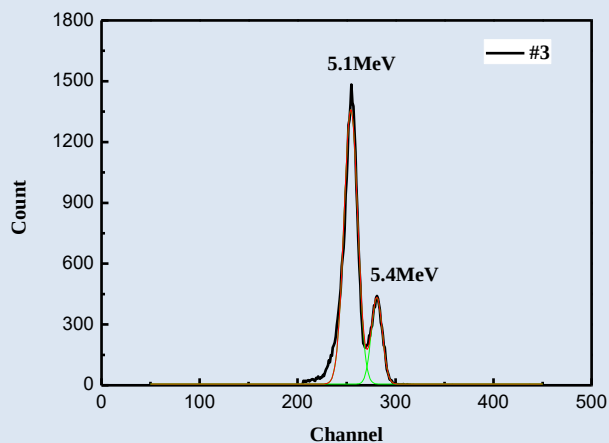
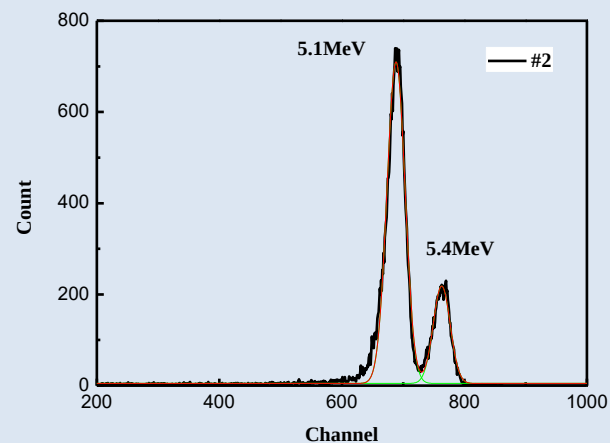
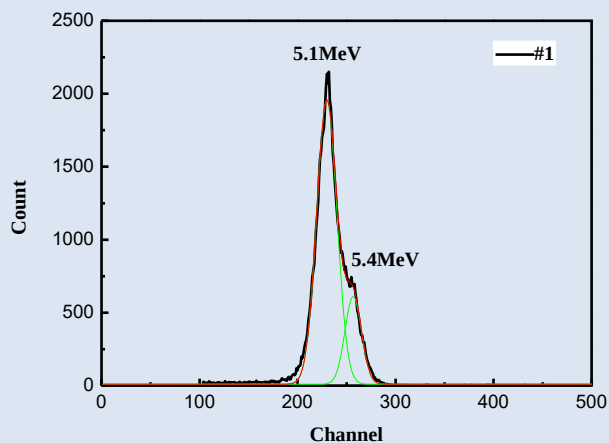


反向C-V特性测试

$$\frac{\partial (1/C^2)}{\partial V} = \frac{2}{qN_D\epsilon\epsilon_0}$$

样品编号	掺杂浓度 (N _D)	说明
#1	$1.05 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$	与制作工艺一致
#2	$1.14 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$	
#3	$1.01 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$	
#4	$1.12 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$	

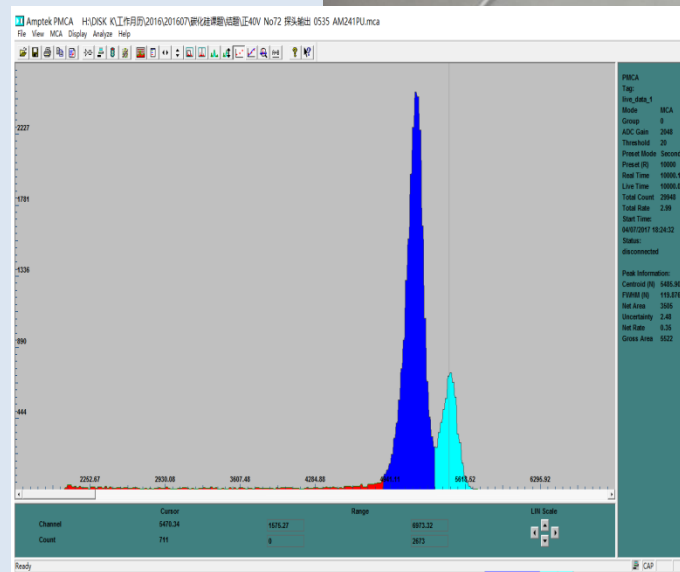
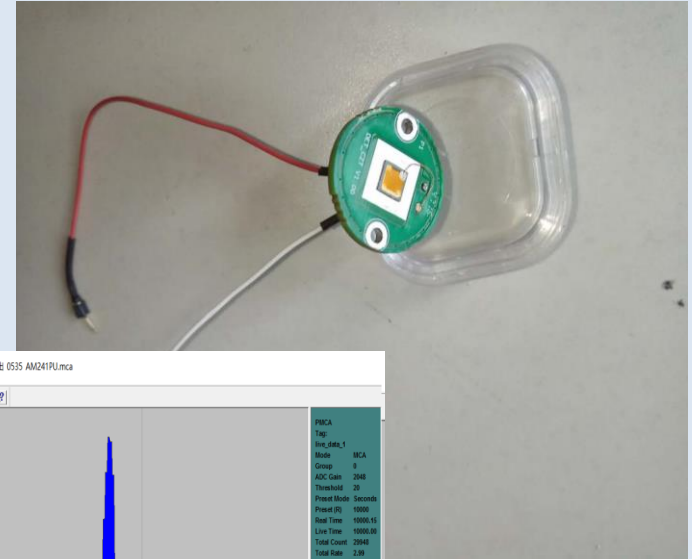
2X2像素SiC探测器



探测器能量分辨率

2X2像素SiC探测器

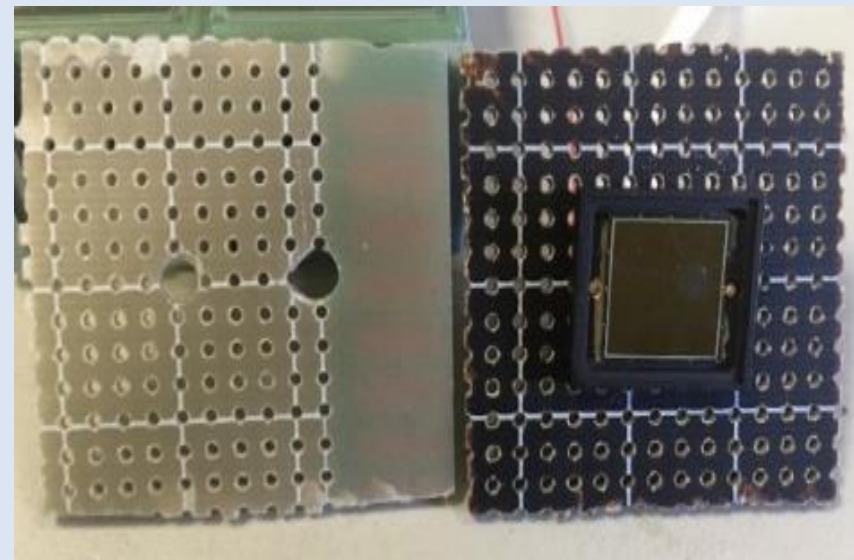
编号	辐射源	能量分辨率
#1	^{239}Pu (5.1MeV)	8.9%
	^{241}Am (5.4MeV)	6.5%
#2	^{239}Pu (5.1MeV)	4.2%
	^{241}Am (5.4MeV)	3.6%
#3	^{239}Pu (5.1MeV)	5.4%
	^{241}Am (5.4MeV)	4.0%
#4	^{239}Pu (5.1MeV)	6.4%
	^{241}Am (5.4MeV)	4.1%



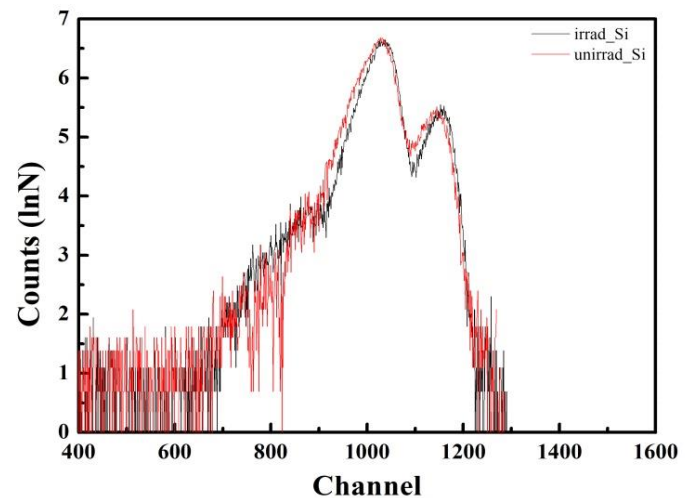
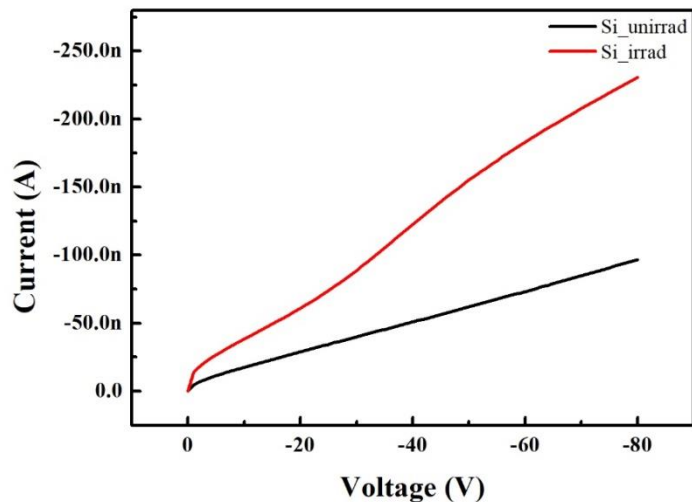
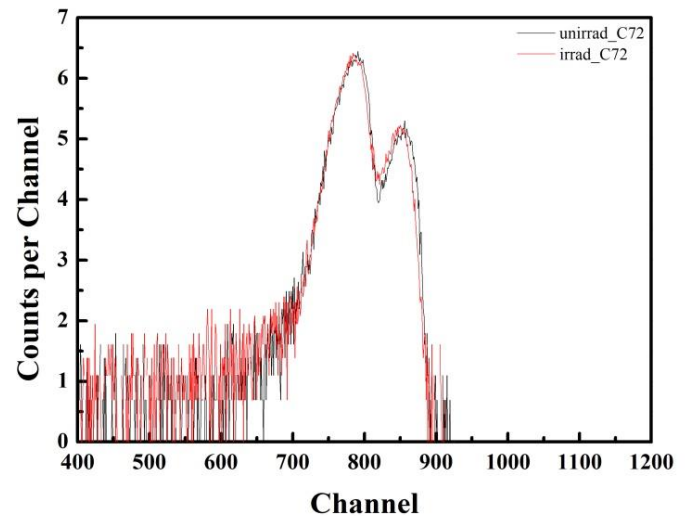
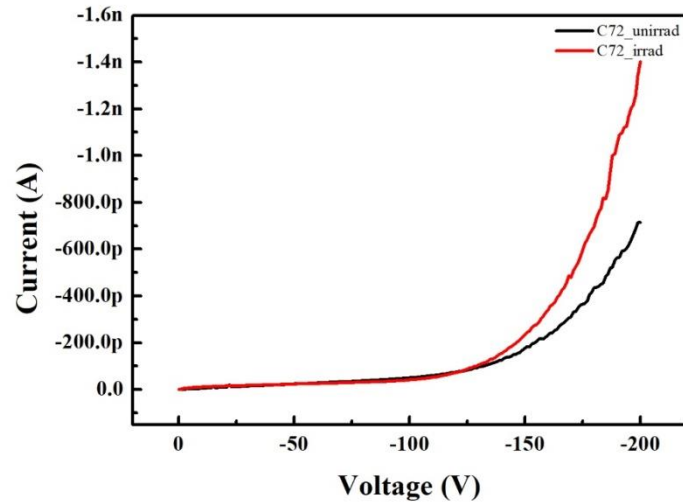
- 自研单路SiC探测器(5*5mm)FWHM=2.2%@5.486MeV
- 漏电流0.1nA

SiC探测器抗辐照试验

- 辐照源：
Co-60 (1.25MeV)
- 辐照剂量：
1MGy (103Mrad (Si))
- 剂量率：
 $\sim 300\text{rad (Si) /s}$



SiC探测器抗辐照试验



SiC探测器抗辐照试验

前	239Pu (5.15MeV)	241Am (5.48MeV)
样品	中心道址	中心道址
C72	785.19053	853.70614
Si	1020.59289	1142.73513

后	239Pu (5.15MeV)	241Am (5.48MeV)
样品	中心道址	中心道址
C72	782.56211	848.3608
Si	1062.10672	1189.3018

	Si		C72	
	5.1M	5.4M	5.1M	5.4M
Before	6.72	3.96	4.53	3.05
After	7.10	4.00	4.58	3.07

2X2像素SiC探测器----国外目前的状态

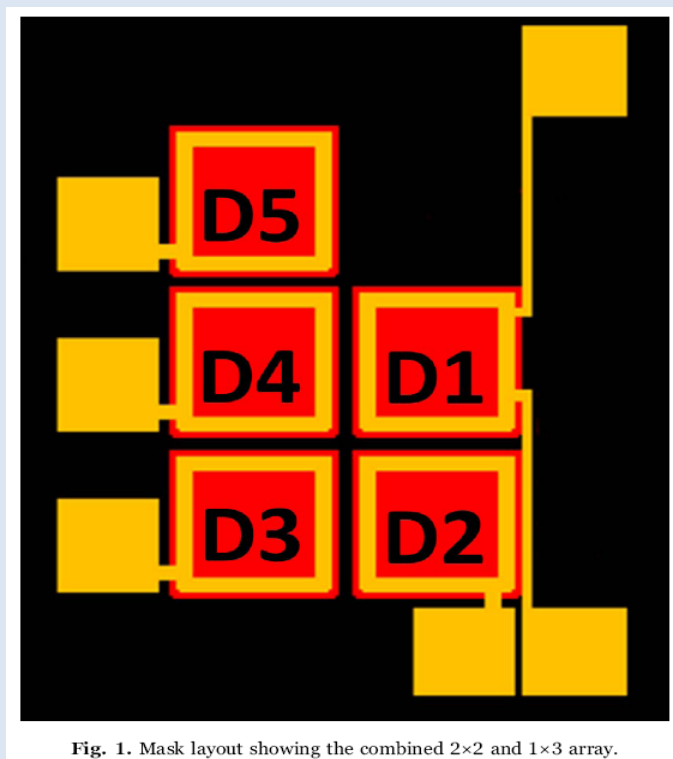


Fig. 1. Mask layout showing the combined 2×2 and 1×3 array.

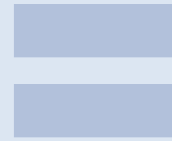
- 4H-SiC Schottky diode arrays for X-ray detection, G.Lioliou &, 2016.2
- 250um*250um/pixel, 350um衬底（76.2mm直径），20um外延层，漏电流0.1nA，FWHM=1.42keV@5.9KeV

电子学设计

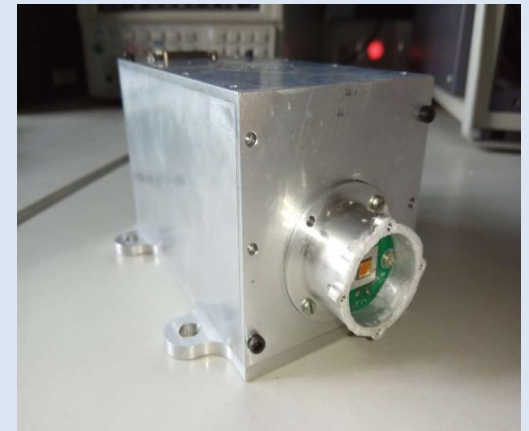
SiC探测器



电荷前放



探头

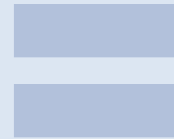


电子学设计

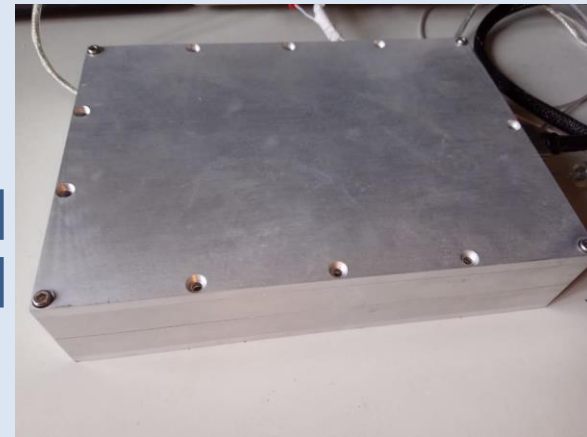
数采



电源+
通讯



电子
学箱



SiC带电粒子探测系统



电子学设计

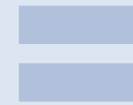
SiC探测器



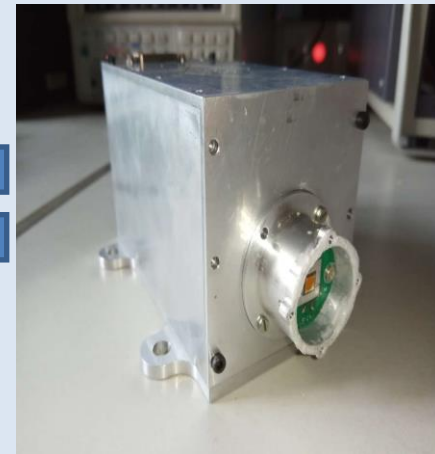
电荷前放



采集、
通讯、
电源



SiC辐射
探测器



电子学设计

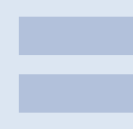
2X2像
素SiC探
测器



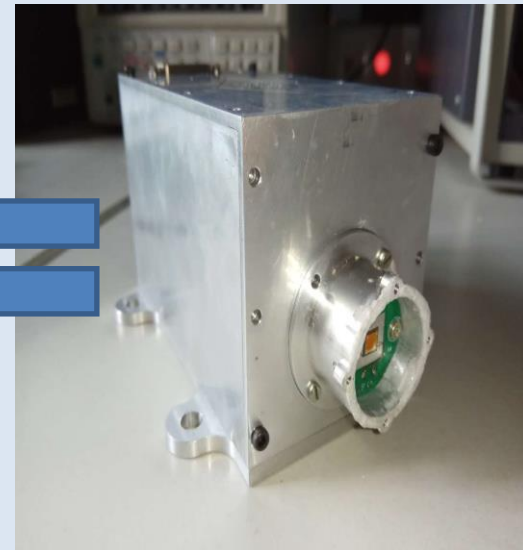
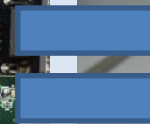
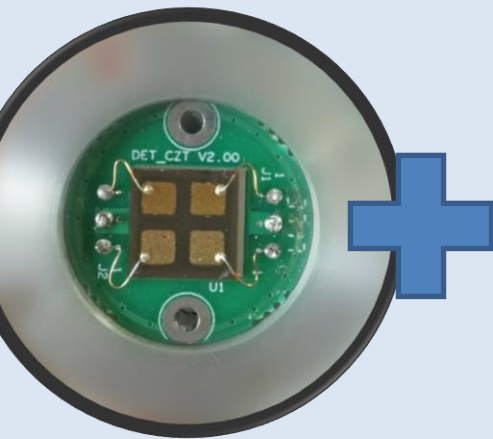
ASIC



采集、
通讯、
电源

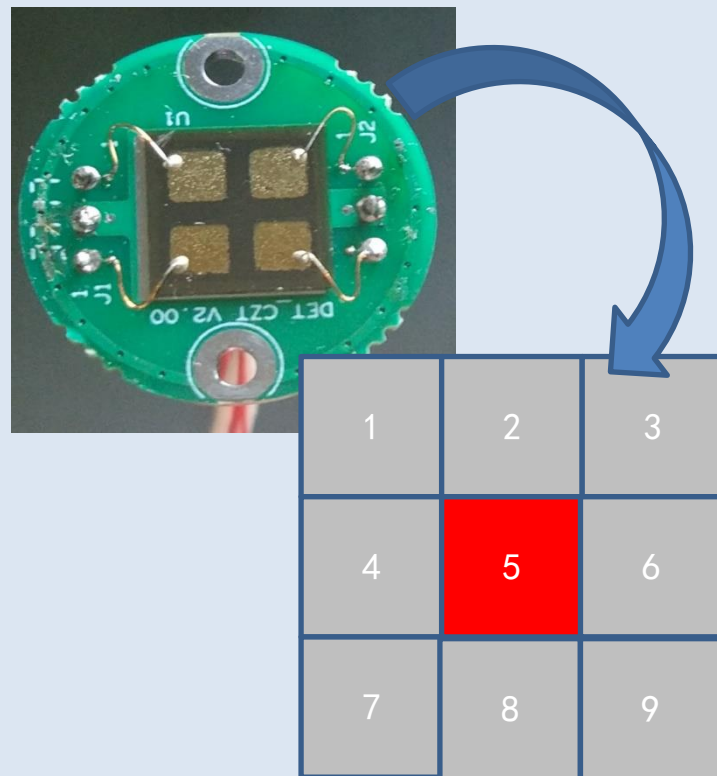


多像素
SiC辐射
探测器



未来的研究目标

- 制作基于SiC的中子探测器
- SiC探测器3X3像素阵列
- 采用离子注入工艺制作PIN结
- 继续完善读出电子学



2018年重点试验室课题：“PIN结碳化硅3x3像素探测器研究与中子探测应用”

结语

- 1、十分感谢核探测与核电子学国家重点实验室的经费支持！
- 2、非常希望与各位老师、同事多交流，为SiC新型探测器找到更多适用场景，促进研究。