



4H-SiC探测器的温度及辐照性能研究

张耀锋 杜园园 张春雷 曹李刚 兰小飞 黄永盛

Temperature and Radiation Performance of 4H-SiC Detector

ZHANG Yaofeng, DU Yuanyuan, ZHANG Chunlei, CAO Ligang, LAN Xiaofei, HUANG Yongsheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC08>

引用格式:

张耀锋, 杜园园, 张春雷, 曹李刚, 兰小飞, 黄永盛. 4H-SiC探测器的温度及辐照性能研究[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(1):486-490. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC08

ZHANG Yaofeng, DU Yuanyuan, ZHANG Chunlei, CAO Ligang, LAN Xiaofei, HUANG Yongsheng. Temperature and Radiation Performance of 4H-SiC Detector[J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(1):486-490. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC08

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度和偏压对4H-SiC FinFET器件单粒子瞬态效应的影响

Investigation of Temperature and Bias Voltage Dependence of Single Event Transient in 4H-SiC FinFET

原子核物理评论. 2023, 40(3): 454-458 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022107>

高能离子梯度多剂量辐照4H-SiC的微结构及硬度变化研究

Study on Microstructure and Hardness Changes of 4H-SiC Irradiated by High Energy Ion Gradient with Multiple Doses

原子核物理评论. 2022, 39(4): 533-538 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2022009>

用于中子位置灵敏探测器的SiPM性能研究

Study on the Performance of SiPM for the Neutron Position Sensitive Detector

原子核物理评论. 2023, 40(1): 66-72 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022108>

基于SiPM读出的塑料闪烁体探测器时间性能研究

Time Performance Study of Plastic Scintillator Detector with SiPM Readouts

原子核物理评论. 2020, 37(3): 749-756 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC53>

加速器驱动嬗变研究装置中关键材料的辐照损伤分析

Analysis of Irradiation Damage of Key Materials in China Initiative Accelerator Driven System

原子核物理评论. 2019, 36(4): 484-491 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.484>

CEE-TPC中GEM读出探测器传输性能实验研究

Experimental Research on Transmission Performance of GEM Readout Detector in CEE-TPC

原子核物理评论. 2020, 37(3): 765-770 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC46>

文章编号: 1007-4627(2024)01-0486-05

4H-SiC 探测器的温度及辐照性能研究

张耀锋^{1,2}, 杜园园³, 张春雷^{1,2,†}, 曹李刚^{1,2,†}, 兰小飞⁴, 黄永盛⁵

- (1. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875;
2. 北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京 100875;
3. 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室, 北京 100049;
4. 西华师范大学, 四川南充 637009;
5. 中山大学深圳校区, 广东深圳 518107)

摘要: 针对极端环境下耐高温和耐辐照半导体探测器的研制需求, 利用外延层厚度为 100 μm 的 4H-SiC 外延片通过欧姆接触和肖特基接触制备成肖特基二极管, 封装成肖特基二极管探测器。在 25 $^{\circ}\text{C}$ ~150 $^{\circ}\text{C}$ 的环境下, 测量探测器的 I - V 特性曲线。结果表明, 在温度 ≤ 105 $^{\circ}\text{C}$ 时, 漏电流曲线变化较小。当偏置电压为 -500 V 时, 温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 105 $^{\circ}\text{C}$, 漏电流的变化率为 0.33%/ $^{\circ}\text{C}$ 。利用北京大学化学系 ^{60}Co 放射源对探测器进行辐照, 对比总剂量 1 Mrad 的实验前、实验后的探测器 I - V 特性变化。结果表明, 辐照前后探测器的漏电流无明显变化。

关键词: SiC 探测器; 漏电流; 辐照损伤

中图分类号: O571.1; TL816⁺.2

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC08

0 引言

X 射线探测技术广泛地应用于国防、航天、医学及工农业生产、空间科学和安全检测等领域。随着核事业、空间探测研究的快速发展, 对以高温、强辐射为典型特征的极端环境下 X 射线探测器提出了极为苛刻的要求。以 SiC 为代表的第三代半导体材料具有宽带隙、抗辐照性能优越、高击穿场强等优势, 比目前成熟的 Si 探测器具有更好的耐高温和耐辐射性能, 适用于高温、强辐射等极端环境下的 X 射线探测工作^[1-7]。因此, 开展 SiC 探测器耐高温、抗辐射特性研究, 对于解决极端环境下 X 射线的探测问题、扩展 SiC 等新型探测器的应用领域具有重要的意义。

基于实际探测环境对于 SiC 探测器的需求, 本文拟开展 SiC 探测器的制备工作, 并对其耐高温性能和抗辐照特性进行定量的实验研究。测量在不同温度下 SiC 探测器的正向和反向的 I - V 特性, 在不同辐照剂量下测量 SiC 探测器辐照前、辐照中和辐照后的正向和反向的 I - V 特性, 从而确定探测器工作温度范围以及工作环境照射剂量。

1 探测器制备

基于 Cree 公司生产的研究级 4H-SiC 外延片制备 SiC 探测器。其外延层厚度为 100 μm , 衬底厚度为 360 μm , 外延层与衬底之间缓冲层的厚度为 1 μm , 衬底和缓冲层氮掺杂浓度均为 10^{18} cm^{-3} 。经高频电容-电压 (C - V) 测试得到外延层净掺杂密度 $N_D = 2.903 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。

制备 SiC 探测器的关键步骤是形成良好的欧姆接触, 即具有低的比接触电阻率和高稳定性, 从而得到低的反向漏电流。金属/SiC 欧姆接触的制备步骤包括: 清洗 SiC 外延片、光刻、淀积金属、剥离、退火、电学测试等。本研究中采用湿法处理来去除 SiC 半导体的表面态; 采用 L-TLM 模型设计的光刻掩模版进行光刻制备, 其中光刻工艺流程分为晶片预处理、涂胶、前烘、曝光、显影、后烘、去胶; 利用自行研制的四靶磁控溅射镀膜仪系统, 通过磁控溅射技术在 SiC 探测器衬底 C 面溅射 100 nm 厚的 Ni 膜实现金属沉积; 同时, 在超声清洗器中使用丙酮溶液去掉多余的金属, 并将表面多余的部分剥离, 然后在 N_2 气氛下进行快速高温退火处理, 最终得到欧姆电极。之后在欧姆电极表面蒸镀 6 μm 厚的 Au

收稿日期: 2023-06-25; 修改日期: 2023-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11605009); 计量与校准技术国防科技重点实验室开放课题 (JLKG2022001C003)

作者简介: 张耀锋 (1982-), 男, 河南三门峡人, 副教授, 博士, 从事核技术及应用方向研究; E-mail: zhangyf10@bnu.edu.cn

† 通信作者: 张春雷, Email: lei@bnu.edu.cn; 曹李刚, Email: Caolg@bnu.edu.cn

膜作为金属加厚层。采用与制备欧姆接触相似的处理工艺, 在外延层 Si 面溅射 100 nm 厚的 Ni 膜后并在 N_2 气氛下进行快速退火处理形成肖特基接触。

在电极制备完成后, 对 SiC 探测器进行封装。采用陶瓷 PCB 作为探测器基板, 背面欧姆接触通过 Ag 导电胶与 PCB 基板上的电极相连, 正面肖特基接触通过 25 μm 的金丝与 PCB 板的管脚通过超声波打焊相连。封装好的探测器如图 1 所示。

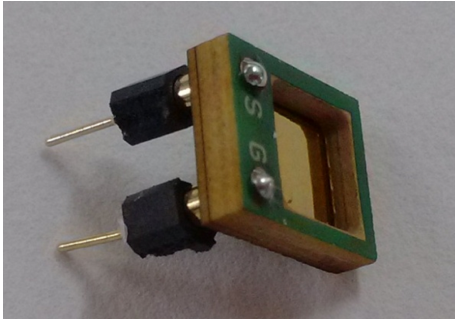


图 1 研制的 SiC 探测器实物图

2 探测器温度实验及辐照实验

利用制备好的 SiC 探测器开展温度实验和抗辐照性能实验。温度实验在环模箱中进行, 调节不同的温度, 在温度平衡后, 使用 Keithley6487 皮安表进行探测器的 I - V 特性曲线测量。辐照实验利用 ^{60}Co 放射源对探测器进行辐照, 在不同的剂量条件下测量探测器的漏电流。

2.1 探测器温度实验及结果讨论

利用制备好的探测器, 在实验室的环模箱中进行不同温度的 I - V 曲线测试实验, 以研究 SiC 探测器正反向 I - V 特性的变化趋势。在 25 $^{\circ}\text{C}$ ~150 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内调节环模箱的温度, 当温度平衡后, 测量 SiC 探测器的 I - V 曲线, 25 $^{\circ}\text{C}$ ~150 $^{\circ}\text{C}$ 的正向 I - V 曲线结果如图 2 所示。

对于一般的肖特基接触, I - V 关系^[1, 8-10]如下:

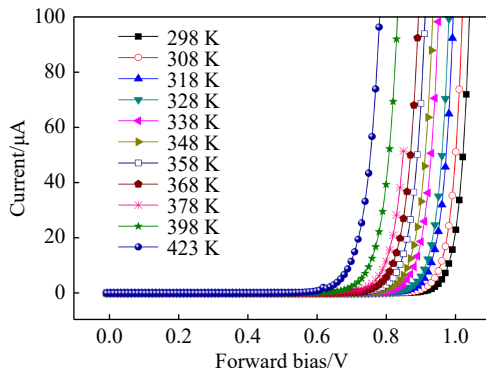


图 2 SiC 探测器在 25 $^{\circ}\text{C}$ ~150 $^{\circ}\text{C}$ 范围内的正向 I - V 曲线

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

其中: A 为肖特基接触的电极面积; A^* 为有效 Richardson 系数 (SiC 为 $146 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$); ϕ_B 为肖特基势垒高度; n 为理想因子; V 为电压; k_B 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; q 为电子电荷; R_s 为串联电阻。

在只考虑热电子发射机制的情况下, 当 $V > 3k_B T/q$, 可以忽略串联电阻 R_s 对电流特性的影响, 对肖特基势垒的 I - V 特性进行简化, 简化式为

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

得出理想因子的表达式为

$$n = \frac{q}{kT} \left[\frac{\partial V}{\partial (\ln I)} \right]. \quad (3)$$

对式 (2) 两边取对数得:

$$\ln I = \ln AA^*T^2 - \frac{q\phi_B}{k_B T} + \frac{qV}{k_B T}, \quad (4)$$

通过对 $\ln I$ - V 曲线拟合, 即可求出肖特基势垒高度 ϕ_B 。

根据式 (1), 计算拟合出不同温度下的肖特基势垒高度和理想因子, 结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 随着温度的升高, 肖特基势垒高度逐渐增加, 而理想因子逐渐减小, 说明在反向漏电流不显著增加的条件下, SiC 探测器的性能随温度升高不会明显变差。

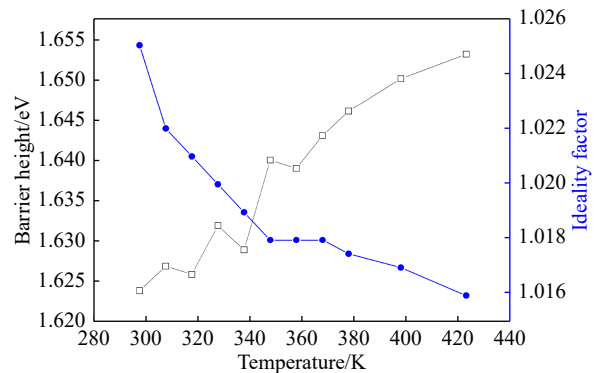
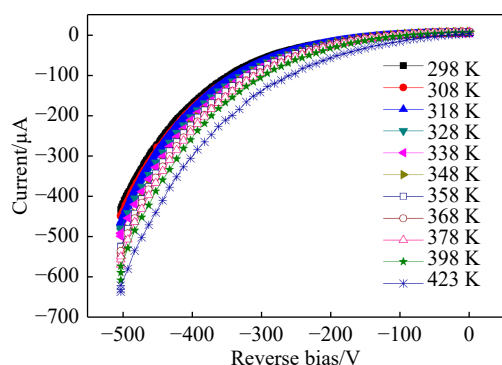


图 3 SiC 探测器的肖特基势垒高度和理想因子随温度的变化关系

25 $^{\circ}\text{C}$ ~150 $^{\circ}\text{C}$ 的反向 I - V 曲线结果如图 4 所示, 从反向 I - V 曲线可以看出, 在 ≤ 105 $^{\circ}\text{C}$ 的时候, 漏电流曲线几乎没有变化。如当偏置电压为 -500 V 时, 温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 上升到 105 $^{\circ}\text{C}$ 过程中, 漏电流的变化率为 0.33%/ $^{\circ}\text{C}$, 远小于 Si 半导体探测器的漏电流随温度的变化率。

结合不同温度下肖特基势垒高度、理想因子的分析和在 25 $^{\circ}\text{C}$ ~150 $^{\circ}\text{C}$ 范围内的反向 I - V 曲线的测试结果, 说明 SiC 探测器在 25 $^{\circ}\text{C}$ ~100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下均可以正常工作。

图 4 SiC 探测器在 25 °C~150 °C 范围内的反向 I - V 曲线

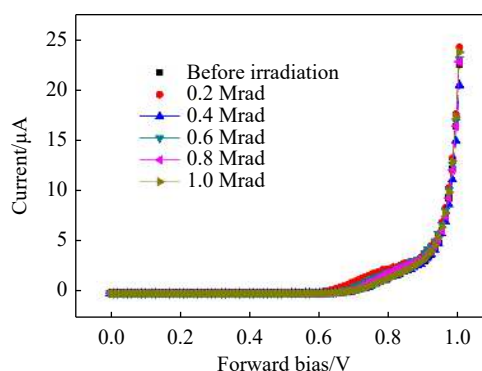
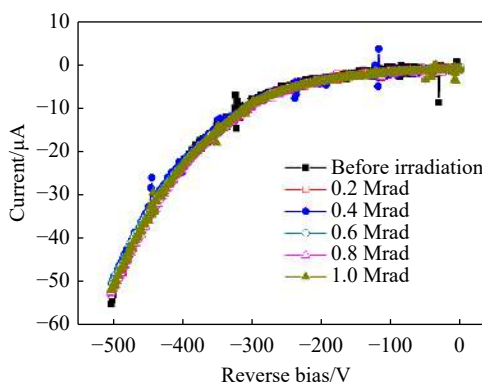
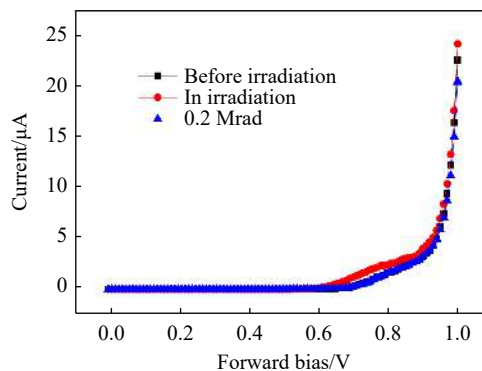
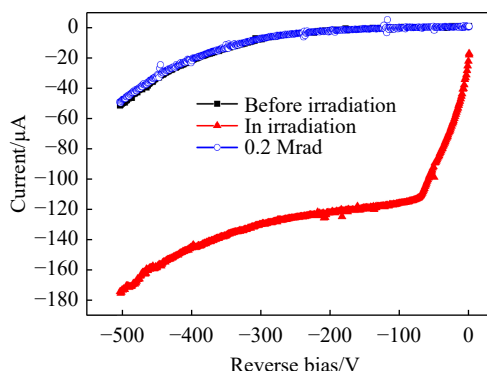
2.2 探测器辐照实验及结果讨论

不同探测器的耐辐照性能与费兰克尔缺陷有关。费兰克尔缺陷即当入射粒子与探测器相互作用后, 获得能量的探测器晶格原子会离开其固有位置, 作为新的受主和施主, 成为具有新能级的俘获中心, 但这将降低载流子的寿命, 使探测器收集的电荷量受到影响。当入射粒子累积到一定量后, 将会有辐照损伤效应产生。通常探测器的噪声将会增大, 最终能量分辨率将变差, 而能量分辨率是衡量探测器的关键指标。理论表明, 探测器晶体原子的离位能与形成费兰克尔缺陷的概率负相关, SiC 晶体的离位能是 Ge 晶体的 1.5 倍, 是 Si 晶体的 1.7 倍^[11], 所以理论上认为 SiC 探测器较 Ge、Si 探测器而言, 耐辐照性能会更好。

到目前为止, 国内外的不同研究团队也展开了关于 SiC 探测器抗辐照性能的理论 and 实验的相关研究^[12-21]。本辐照实验是在北京大学化学系完成的, 采用的辐照源是 ^{60}Co 源, 平均能量值为 1.25 MeV, 剂量率为 50 rad/s。辐照试验在室温下进行, 辐照过程中, 在不同的辐照剂量下对 SiC 探测器进行在线和离线的正反向 I - V 测试, 实验中最高累积总剂量为 1 Mrad。在线测量是指在 ^{60}Co 源辐照时测量 I - V 特性, 离线是指 ^{60}Co 源关停时测试。

不同累积总剂量下正反向 I - V 曲线结果如图 5 和图 6 所示, 从图中可以看出, 在不同总剂量辐照后, 探测器的正反向电流没有明显变化, 探测器的势垒高度和理想因子经过 1 Mrad 辐照后, 均没有变化, 显示了 SiC 探测器良好的抗 γ 辐照特性。

在辐照过程中, 对探测器漏电流也进行了监测。图 7 和图 8 分别是 γ 射线辐照过程中, SiC 探测器的正向和反向 I - V 特性曲线, 从图中可以看出, γ 射线辐照前和辐照累积剂量为 0.2 Mrad 后探测器的正向 I - V 特性没有明显变化, 而 γ 射线辐照中和辐照前后探测器的反向漏电流则差别较大。这是因为 γ 射线辐照时, 在 SiC 材

图 5 不同累积总剂量下 SiC 探测器的正向 I - V 特性图 6 不同累积总剂量下 SiC 探测器的反向 I - V 特性图 7 辐照过程中 SiC 探测器的正向 I - V 特性, 分别对应辐照前、辐照中和累积剂量为 0.2 Mrad图 8 辐照过程中 SiC 探测器的反向 I - V 特性, 分别对应辐照前、辐照中和累积剂量为 0.2 Mrad

料中均匀地激发电子空穴对, 此时器件的反向漏电流主要由两部分构成, 一部分为器件的反向漏电流, 又称暗电流; 另一部分为辐照生电流, 后者可以等效为辐照在耗尽区和一个少子扩散长度以内的中性区中产生的空穴电流。从图8可以看出, 辐照前后探测器产生的辐照生电流没有明显的变化, 可知辐照后SiC外延层中的少子寿命没有明显的退化, 即耗尽区中的复合电流没有变化。但对于辐照中的反向漏电流, 随着反向偏压逐渐增大, 在-80 V处出现拐点。而对于正向 I - V 特性曲线来说, 施加的正向电压较小, 材料中产生的电子空穴对运动很慢, 很难被收集, 因此辐照生电流较小, 辐照中和辐照停止后的 I - V 曲线几乎重合。

3 总结

利用外延层厚度为100 μm 的外延片, 完成了金属/SiC的欧姆接触和肖特基接触; 利用陶瓷PCB电路板, 通过超声波打线实现了SiC探测器的封装。进行了不同温度下的实验, 结果表明, 随着温度的升高, 肖特基势垒高度逐渐增加, 理想因子逐渐减小, 说明在反向漏电流不显著增加的条件下, SiC探测器的性能随温度升高不会明显变差。利用 ^{60}Co 放射源进行了探测器 γ 辐照实验, 在不同的辐照剂量下对SiC探测器进行正反向 I - V 测试, 实验最高累积剂量为1 Mrad。实验结果表明, 在最高剂量为1 Mrad的辐照下, 实验前后探测器的漏电流无明显的变化; 但是在辐照过程中, 探测器漏电流明显增加, 主要贡献为辐照生电流。

参考文献:

- [1] BERTUCCIO G, CACCIA S, PUGLISI D, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2011, 652: 193.
- [2] DU Yuanyuan, ZHANG Chunlei, CAO Xuelei. *Acta Physica Sin*, 2016, 65(20): 207301. (in Chinese)
(杜园园, 张春雷, 曹学蕾. *物理学报*, 2016, 65(20): 207301.)
- [3] LAUKKANEN J, LÄMSÄ V, SALMINEN A, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2005, 538: 496.
- [4] LOSURDO M, BRUNO G, BROWN A, et al. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 4011.
- [5] KARATAS Ş, ALTINDAL Ş, ÇAKAR M. *Phys B*, 2005, 357(3-4): 386.
- [6] BERTUCCIO G, CASIRAGHI R, CETRONIO A, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2004, 518(1-2): 433.
- [7] JIANG Yong, WU Jian, WEI Jianjun, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, 47(4): 664. (in Chinese)
(蒋勇, 吴健, 韦建军, 等. *原子能科学技术*, 2013, 47(4): 664.)
- [8] LIU Jie, HAO Yue, FENG Qian, et al. *Acta Phys Sin*, 2007, 56(6): 3483. (in Chinese)
(刘杰, 郝跃, 冯倩, 等. *物理学报*, 2007, 56(6): 3483.)
- [9] GUPTA S K, AZAM A, AKHTAR J. *Phys B*, 2011, 406(15-16): 3030.
- [10] GÜLNAHAR M. *Superlattices and Microstruct*, 2014, 76: 394.
- [11] JIN Gen, CHEN Faguo, YANG Yapeng et al. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2010, 30(7): 909. (in Chinese)
(靳根, 陈法国, 杨亚鹏, 等. *核电子学与探测技术*, 2010, 30(7): 909.)
- [12] MAVA F, BERTUCCIO G, CAVALLINI A, et al. *Meas Sci Technol*, 2008, 19: 102001.
- [13] KAŽUKAUSKAS V, JASIULIONIS R, KALENDRA V, et al. *Semicond*, 2007, 41(3): 345.
- [14] MOSCATELLI F. *Nucl Instr and Meth A*, 2007, 583(1): 157.
- [15] KAŽUKAUSKAS V, JASIULIONIS R, KALENDRA V, et al. *Diam Relat Mater*, 2007, 16: 1058.
- [16] NAVA F, VITTONI E, VANNI P, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2003, 505(3): 645.
- [17] ZHANG Lin, HAN Chao, MA Yongji, et al. *Acta Phys Sin*, 2009, 58(4): 2737. (in Chinese)
(张林, 韩超, 马永吉, 等. *物理学报*, 2009, 58(4): 2737.)
- [18] LIU Linyue, OUYANG Xiaoping, ZHANG Xianpeng, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(10): 1987. (in Chinese)
(刘林月, 欧阳晓平, 张显鹏, 等. *原子能科学技术*, 2022, 56(10): 1987.)
- [19] GUO Ziyu, LI Mingfu, LI Li, et al. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2014, 34(5): 618. (in Chinese)
(郭子瑜, 李明富, 李莉, 等. *核电子学与探测技术*, 2014, 34(5): 618.)
- [20] WU Jian, LI Meng, JIANG Yong, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2015, 771: 17.
- [21] TIAN Yinan, LI Ronghua, LI Jian, et al. *J Phys D: Appl Phys*, 2023, 56: 355110.

Temperature and Radiation Performance of 4H-SiC Detector

ZHANG Yaofeng^{1,2}, DU Yuanyuan³, ZHANG Chunlei^{1,2,†}, CAO Ligang^{1,2,†}, LAN Xiaofei⁴, HUANG Yongsheng⁵

(1. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Physics and Astronomy, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China;

5. School of Science, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, Guangdong, China)

Abstract: Schottky diodes are fabricated using 100 μm thick 4H-SiC epitaxial wafers with Ohmic and Schottky contacts, and packaged as SiC detectors to meet the requirements of high temperature and radiation environments. The current-voltage (I - V) curves are measured in the range of 25 to 150 $^{\circ}\text{C}$. The experimental results show that the leakage current changes very little when the temperature is less than or equal to 105 $^{\circ}\text{C}$. The change rate of leakage current is 0.33%/ $^{\circ}\text{C}$, when the reverse bias is -500 V and the temperature rises from 25 to 105 $^{\circ}\text{C}$. The SiC detector is irradiated by ^{60}Co source in Peking University. The I - V characteristics of the SiC detector are compared before and after the irradiation experiment with total dose of 1 Mrad. The experimental data indicates that the leakage current has almost no significant change.

Key words: SiC detector; leakage current; radiation damage

Received date: 25 Jun. 2023; **Revised date:** 20 Dec. 2023

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11605009); Opening Foundation of National Defense Science and Technology Key Laboratory of Metrology and Calibration Techniques(JLKG2022001C003)

† Corresponding author: ZHANG Chunlei, E-mail: lei@bnu.edu.cn; CAO Ligang, E-mail: Caolg@bnu.edu.cn