

中子辐射导致的 SiC 功率器件漏电增加特性研究*

彭超† 雷志锋 张战刚 何玉娟 马腾 蔡宗棋 陈义强‡

(工业和信息化部电子第五研究所, 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广州 511370)

(2023 年 6 月 13 日收到; 2023 年 7 月 3 日收到修改稿)

基于 14 MeV 中子辐照研究了碳化硅 (silicon carbide, SiC) 肖特基势垒二极管 (Schottky barrier diode, SBD) 和金属氧化物半导体场效应晶体管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 器件的位移损伤退化特性. 结果表明: 总注量为 $1.18 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 的中子辐照不会引起 SBD 正向 I - V 特性的明显退化, 但会导致反向漏电流出现显著增大. 通过深能级瞬态谱测试发现中子辐照在 SiC 中引入的缺陷簇形成了能级位置 $E_C - 1.034 \text{ eV}$ 处的缺陷. 该深能级缺陷可能导致 SiC 漂移层费米能级向禁带中央移动, 引起了肖特基势垒的降低, 最终导致反向漏电流的增大. 此外, 中子辐照也会导致 SiC MOSFET 栅漏电增大. 对应栅电压 $V_{gs} = 15 \text{ V}$ 时, 辐照后器件栅电流比辐照前增大了近 3.3 倍. 中子辐照在氧化层中引入的施主型缺陷导致辐照前后 MOSFET 器件的栅氧导电机理发生了变化. 缺陷对载流子越过栅氧化层势垒有辅助作用, 从而导致栅漏电的增加. 深能级瞬态谱测试结果表明中子辐照还会导致 MOSFET 器件沟道附近 SiC 材料中本征缺陷状态的改变, 同时形成了新的 Si 空位缺陷能级, 但这些缺陷不是导致器件性能退化的主要原因.

关键词: 碳化硅功率器件, 中子辐照, 位移损伤, 深能级瞬态谱**PACS:** 61.80.-x, 61.80.Jh, 85.30.-z**DOI:** 10.7498/aps.72.20230976

1 引言

碳化硅 (silicon carbide, SiC) 材料具有禁带宽、击穿场强高、热导率高、耐高温等优势, 使得其在高功率应用领域极具优势^[1-3]. 此外, 得益于其宽禁带和高临界位移能, SiC 材料还具有优良的抗电离辐射和抗位移损伤辐射性能, 因此 SiC 基功率器件在航天电子系统中有重要应用需求. 在空间应用中, 辐射环境是影响 SiC 功率器件可靠性的关键因素. 国内外针对 SiC 功率器件的电离辐射效应开展了深入研究, 已有大量文献报道了辐射导致的 SiC 功率器件的单粒子烧毁 (single event burnout, SEB)^[4-9] 和总剂量退化^[10-12]. 可见, 尽管 SiC 材料

在理论上具有优良的抗电离辐射性能, 但基于 SiC 材料的器件仍然存在电离辐射失效风险. 目前关于 SiC 功率器件的位移损伤辐射效应的研究相对较少, SiC 器件能否充分发挥 SiC 材料在抗位移损伤方面的优势还存在疑问, 其抗位移损伤性能有待进一步评估. Hazdra 等^[13] 针对 SiC 肖特基二极管 (Schottky barrier diode, SBD) 开展了注量达 $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的 1 MeV 中子辐照, 发现辐照引入的点缺陷对器件阻断和动态特性的影响可以忽略不计, 但会导致导通电阻的显著增大. Omotoso 等^[14] 研究发现注量为 $8.9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 的 α 离子辐照会导致 SiC SBD 器件理想因子和串联电阻的显著增大, 经过 300 °C 退火后又能大幅恢复. Yang 等^[15] 的研究表明注量为 $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 的 Si 离子辐照会在

* 国家自然科学基金 (批准号: 12075065, 62274043)、广东省基础与应用基础研究基金 (批准号: 2021B1515120043)、广东省重点研发计划 (批准号: 2022B0701180002) 和广州市科技计划 (批准号: 202201010868) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pengchaoceprei@qq.com

‡ 通信作者. E-mail: yiqiang-chen@hotmail.com

SiC SBD 器件中引入高密度深能级缺陷, 导致器件肖特基势垒降低、载流子浓度降低. Chao 等^[16]报道了中子位移损伤引起的有效载流子浓度降低导致 SiC MOSFET 器件的性能退化.

基于此, 本文以 SiC SBD 和金属氧化物半导体场效应晶体管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 器件为对象, 利用 14 MeV 中子辐照进一步探索位移损伤辐射导致的性能退化特性. 结合电容深能级瞬态谱 (capacitance deep level transient spectrum, C-DLTS) 技术表征中子辐射在器件引入缺陷的微观特征, 从微观机制上解释 SiC 功率器件的退化行为.

2 实验描述

试验样品包括 Cree 公司的 SiC MOSFET (C2M0080120D, 额定电压 1200 V, 额定电流 36 A) 以及泰科天润公司的三款 SiC 结势垒肖特基 (junction barrier Schottky, JBS) 二极管 (G3S06505A, 650 V, 5 A; G3S12005A, 1200 V, 5 A; G3S17005A, 1700 V, 5 A). SiC MOSFET 器件采用 TO-247-3

封装, 所有 JBS 二极管均采用 TO-220AC 封装. 试验用 SiC 器件表面形貌和纵切截面分别如图 1 和图 2 所示.

中子辐照在中国原子能科学研究院的 14 MeV 单能中子源上进行. 器件安装在测试板上, 调整测试板的位置保证中子垂直入射到待测器件. 由于中子的穿透性很强, 所有器件均采用带封装辐照. 每款器件均选用 3 件样品开展辐照试验. 辐照过程中, 所有样品均处于无偏置状态. 选用的中子注量率为 $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 累积中子总注量为 $1.18 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. 根据 Geant4 仿真^[17,18]可计算 14 MeV 中子在 SiC 材料中的非电离能损 (non-ionization energy loss, NIEL) 为 $1.758 \times 10^{-7} \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$. 当中子总注量达到 $1.18 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, 可计算辐照过程中的总位移损伤剂量为 $2.07 \times 10^4 \text{ MeV}/\text{mg}$.

辐照前后, 通过 Keysight B1500A 半导体参数分析仪对全部样品的 $I-V$ 特性曲线进行测试. $I-V$ 特性曲线在室温下进行. 基于 $I-V$ 特性曲线提取的器件肖特基势垒、理想因子等参数均为 3 件样品的平均值. 同时, 每款器件选取一件样品开展了辐照前后 C-DLTS 测试, 该测试基于 PhysTech 公司

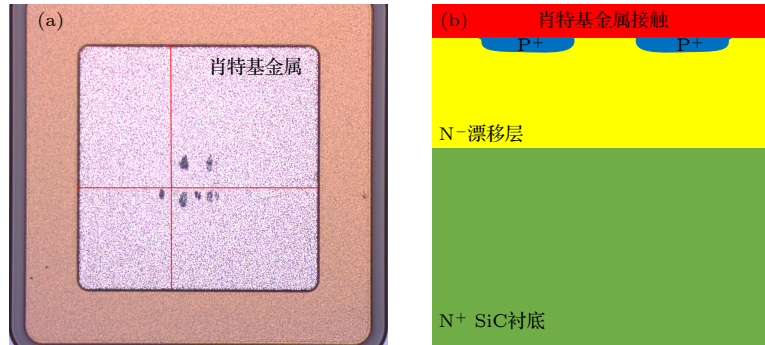


图 1 试验用 SiC 结势垒肖特基二极管器件 (a) 表面形貌的光学显微镜图; (b) 截面示意图

Fig. 1. SiC JBS diode used in our experiment: (a) Optical microscope diagram of surface morphology; (b) diagram of cross-section.

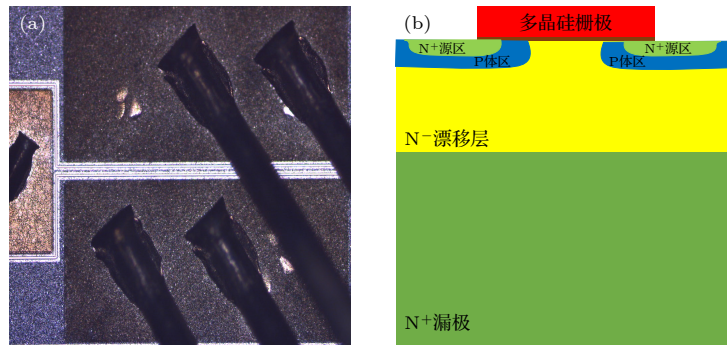


图 2 试验用 SiC MOSFET 器件 (a) 表面形貌的光学显微镜图; (b) 截面示意图

Fig. 2. SiC MOSFET used in our experiment: (a) Optical microscope diagram of surface morphology; (b) diagram of cross-section.

的 FT1230 HERA-DLTS 测试系统开展. 对于 JBS 器件, 重点针对肖特基结开展深能级瞬态谱测试和分析, 获取其缺陷特性. 测试过程中阳极接低电位, 阴极接高电位. DLTS 测试过程中设定的主要参数为: 反向偏压 $V_R = -10$ V, 脉冲电压 $V_P = 0$ V, 测试周期 $T_W = 100$ ms, 脉冲宽度 $T_P = 1$ ms. 对于 MOSFET 器件, 重点针对栅电容开展深能级瞬态谱测试和分析, 获取其缺陷特性. 测试过程中栅极接高电位, 源极和漏极接低电位. DLTS 测试过程中设定的主要参数为: 反向偏压 $V_R = 0$ V, 脉冲电压 $V_P = 6$ V, 测试周期 $T_W = 4$ ms, 脉冲宽度 $T_P = 1$ ms. 深能级瞬态谱测试中的温度扫描范围均为 50—450 K.

3 实验结果及讨论

3.1 中子辐射导致的 SiC JBS 器件退化

3.1.1 I - V 特性退化

图 3—5 显示了 3 款 SiC 二极管中子辐照前后

的正向和反向 I - V 特性, 其中 V_{Anode} 为阳极电压, I_{Anode} 为阳极电流. 可以看到, 辐照后二极管的正向电流有轻微的增加, 而反向电流 (绝对值) 的增加更明显. 对应反向偏压为 -50 V 时, 辐照后额定电压为 650 V, 1200 V 和 1700 V 的器件反向电流分别为辐照前的 5.2 倍、11.6 倍和 4.0 倍. SiC 肖特基势垒二极管的正向电流传输满足热电子发射模型, 其正向电流密度可表示为

$$J_{\text{forward}} = AT^2 e^{-\phi_B/(kT)} \left[e^{qV/(nkT)} - 1 \right], \quad (1)$$

其中, A 为有效理查逊常数, 对于 4H-SiC, $A = 146$ A/(cm²·K²); T 为温度 (K); ϕ_B 为肖特基势垒高度 (eV); n 为理想因子; V 为正向偏压; k 为玻尔兹曼常数; V 为器件正向电压; q 为单位电荷量. 利用 (1) 式对肖特基二极管正向电流进行拟合, 可提取每款器件辐照前后的肖特基势垒 ϕ_B 和理想因子 n , 如表 1 所列. 辐照前后, 3 款器件的理想因子几乎保持不变, 肖特基势垒均出现了 0.01 eV 左右的降低.

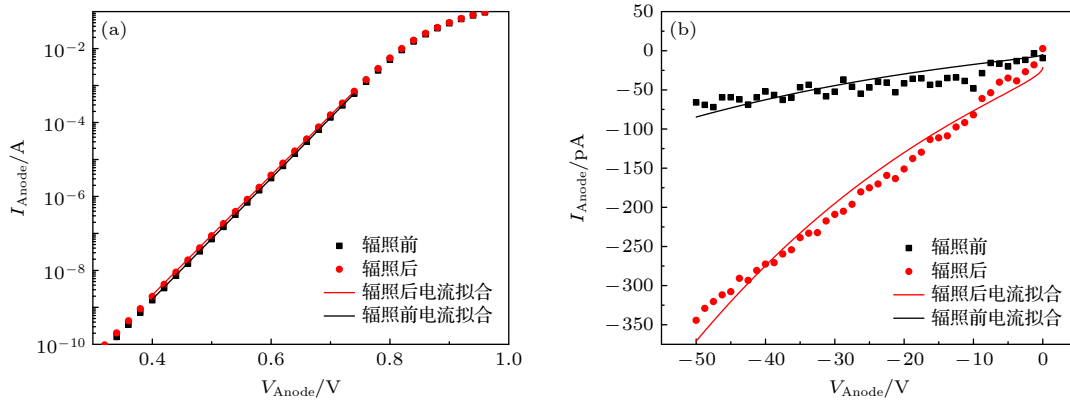


图 3 额定电压为 650 V 的二极管辐照前后正向 (a) 和反向 (b) I - V 特性

Fig. 3. Forward (a) and reverse (b) I - V characteristics of 650 V SiC diode before and after irradiation.

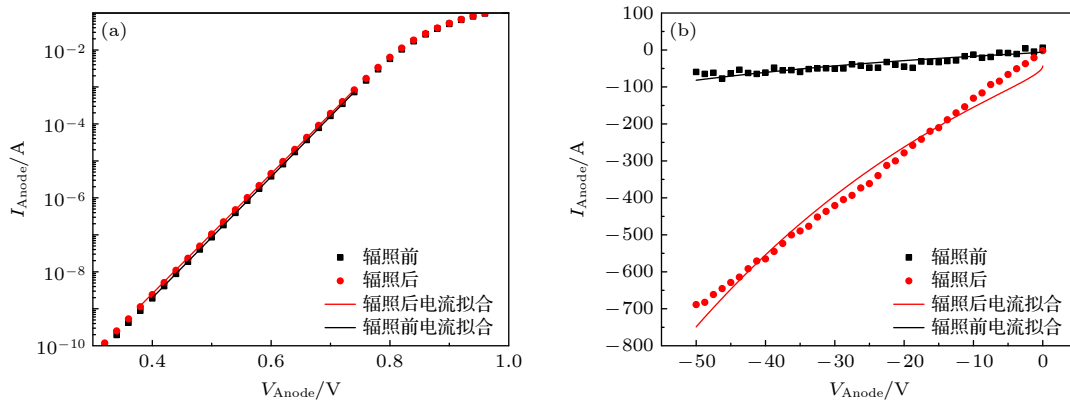


图 4 额定电压为 1200 V 的二极管辐照前后正向 (a) 和反向 (b) I - V 特性

Fig. 4. Forward (a) and reverse (b) I - V characteristics of 1200 V SiC diode before and after irradiation.

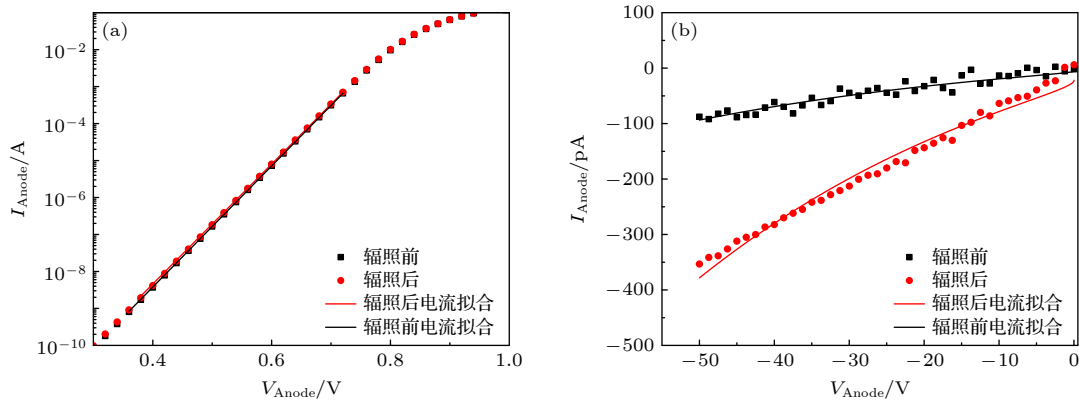

 图 5 额定电压为 1700 V 的二极管辐照前后正向 (a) 和反向 (b) I - V 特性

 Fig. 5. Forward (a) and reverse (b) I - V characteristics of 1700 V SiC diode before and after irradiation.

 表 1 根据 I - V 特性提取的二极管肖特基势垒高度

 Table 1. Schottky barrier height of SiC diodes extracted by I - V characteristics.

器件	650 V 器件		1200 V 器件		1700 V 器件	
	辐照前	辐照后	辐照前	辐照后	辐照前	辐照后
肖特基势垒 Φ_{B0}/eV	1.224	1.214	1.220	1.209	1.203	1.194
理想因子 n	1.02	1.03	1.02	1.03	1.02	1.03

SiC 肖特基势垒二极管的反向电流传输满足热电子场发射模型, 其反向电流密度可表示为^[19]

$$J_{\text{reverse}} = -AT^2 e^{-\phi_B/(kT)} \times e^{C_T E_s^2}, \quad (2)$$

$$\phi_B = \phi_{B0} - q\sqrt{q|E_s/4\pi\epsilon_s|}, \quad (3)$$

其中, C_T 为隧穿系数, 约为 $8 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{V}^2$; ϕ_{B0} 对应反向电场为零时的肖特基势垒高度; E_s 为肖特基结表面电场强度; ϵ_s 为 SiC 介电常数. 根据 (2) 式可知, 反向电流 (绝对值) 反比于肖特基势垒高度, 正比于肖特基结电场强度. 辐照后器件肖特基势垒高度降低了 0.01 eV, 会导致反向电流增大

1.5 倍左右, 这小于实际观察到的反向电流增大量. 因此, 中子辐照导致的反向电流增大有一部分也可能来源于肖特基结附近电场强度的增大.

3.1.2 辐射损伤缺陷表征

图 6 为 1700 V 额定电压的二极管中子辐照前后的深能级瞬态谱测试结果. 深能级瞬态谱上的每一个信号峰对应一个缺陷能级. 在 50—450 K 的温度扫描范围内, 辐照前的 DLTS 谱上观察到两个正信号峰, 分别标记为 DT₁ 和 DT₂. 其对应两个本征的多子缺陷中心. 根据 DLTS 谱的峰值位置

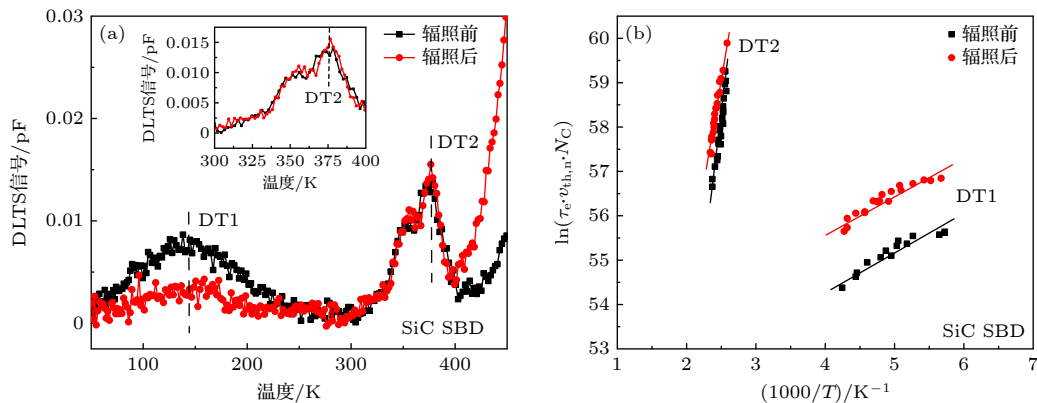


图 6 (a) 额定电压为 1700 V 的二极管辐照前后的深能级瞬态谱特性, 其中内嵌图为温度 300—400 K 之间曲线的放大图; (b) 阿伦尼乌斯曲线

Fig. 6. (a) DLTS spectra of 1700 V SiC diode before and after irradiation, the inset graph is the enlarged curve between 300—400 K; (b) Arrhenius plot.

可拟合得到缺陷中心的发射时间常数随温度的变化关系, 即阿伦尼乌斯曲线, 可表示为

$$\ln(\tau_e v_{th,n} N_C) = \frac{E_C - E_T}{k} \frac{1}{T} - \ln(X_n \sigma_n), \quad (4)$$

其中, N_C 为导带底有效状态密度, $v_{th,n}$ 为电子热速度, τ_e 为缺陷俘获电子的热发射时间常数, X_n 为熵因子, σ_n 为缺陷俘获截面, E_C 为导带能级, E_T 为缺陷能级. 根据 (4) 式, 由阿伦尼乌斯曲线的斜率可以计算得到缺陷能级 E_T , 由曲线与 y 轴的截距可计算得到俘获截面 σ_n . 基于阿伦尼乌斯曲线进行拟合, 可提取辐照前器件的缺陷信息, 如表 2 所列. 缺陷 DT_1 能级位置为 $E_C - 0.071$ eV. 根据能级位置判断该缺陷为占据晶格位置的氮杂质缺陷^[14,20]. 该缺陷接近导带顶, 为浅能级缺陷, 其对器件性能的影响要远小于缺陷 DT_2 . 缺陷 DT_2 能级位置为 $E_C - 0.864$ eV, 俘获截面为 $2.19 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$, 其对应 SiC 器件中的 $RD_{1/2}$ 缺陷. 该本征缺陷为高能离子注入引入的缺陷^[21].

中子辐照后的 DLTS 谱上仍然观察到两个正信号峰. 但中子辐照导致 DT_2 峰值强度增加, 其对应的缺陷能级由 $E_C - 0.864$ eV 变为 $E_C - 1.034$ eV, 更接近于禁带中心, 俘获截面由 $2.19 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ 增大为 $8.34 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$. 该缺陷能级对应 EH4 缺

陷, 为中子辐照导致的缺陷簇^[13,22,23]. 该缺陷同样在 5 MeV 的质子辐照 (总剂量 10^{12} cm^{-2})^[22] 以及 2.5 MeV 的电子辐照 (总剂量 10^{14} cm^{-2})^[23] 中被观察到. 中子辐照引入的 EH4 缺陷可能是导致二极管辐照后电特性退化的主要原因. 该缺陷引起了肖特基势垒的降低, 最终导致反向饱和电流的增大. 值得注意的是, 中子辐照后 DT_1 峰值强度减弱. 这与辐照后 SiC 漂移层中费米能级降低相关. 图 7 显示了 DLTS 测试过程中 SiC 二极管的能带示意图. 在辐照前的 DLTS 测试过程中, 二极管上施加一个反偏电压 V_R . 对于 n 型漂移层中的多子浅能级缺陷 E_T , 其在费米能级 E_F 以下的部分被电子填充, 而在空间电荷区内 E_T 能级位于 E_F 以上的部分无电子填充. 随后二极管上加一个正向电压脉冲 V_F . 空间电荷区内缺陷能级 E_T 降到 E_F 以下, 缺陷能级被电子填充. 在正向脉冲移除恢复反向偏压的瞬间, 空间电荷区内缺陷能级 E_T 重新上升到 E_F 之上, 但缺陷上填充的电子仍然来不及释放. 中子辐照后会在器件内部引入更深能级的 EH4 缺陷, 导致费米能级 E_T 向禁带中央移动. 此时开展 DLTS 测试时, 在加正向脉冲电压期间只有部分缺陷能级被电子填充. 因此导致了 DLTS 测试得到的 DT_1 缺陷峰值强度减弱.

表 2 基于深能级瞬态谱提取的 SiC 二极管辐照前后的缺陷信息

Table 2. Trap information of SiC diode extracted by DLTS before and after irradiation.

	缺陷类型					
	缺陷 DT_1			缺陷 DT_2		
	能级 $E_C - E_T/\text{eV}$	缺陷密度/ cm^{-3}	俘获截面/ cm^2	能级 $E_C - E_T/\text{eV}$	缺陷密度/ cm^{-3}	俘获截面/ cm^2
辐照前	0.071	8.60×10^{13}	2.55×10^{-23}	0.864	3.29×10^{12}	2.19×10^{-15}
辐照后	0.052	8.09×10^{13}	3.21×10^{-23}	1.034	3.47×10^{12}	8.34×10^{-13}

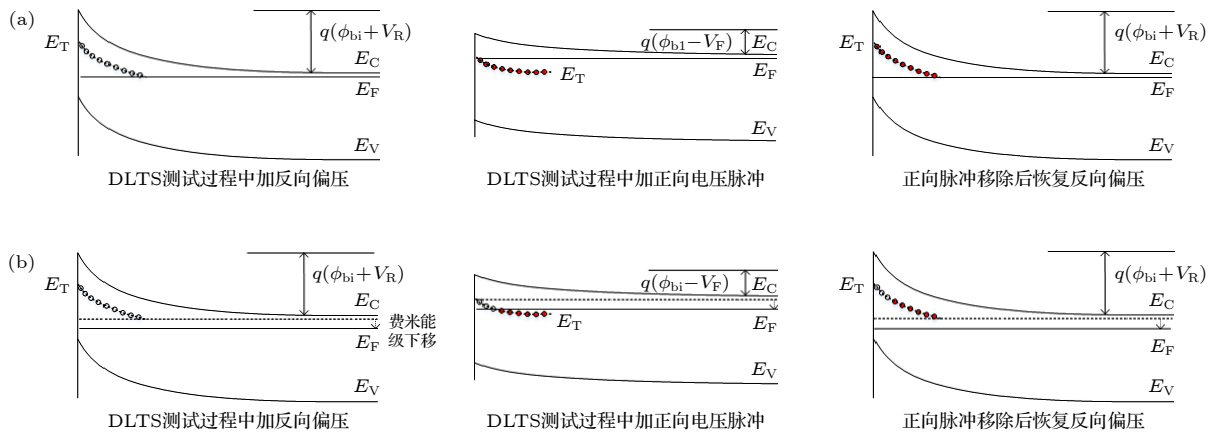


图 7 DLTS 测试过程中 SiC 二极管的能带示意图 (E_V 为价带能级) (a) 辐照前; (b) 辐照后.

Fig. 7. Schematic diagram of the energy band of SiC diode during DLTS testing process: (a) Pre-irradiation; (b) after-irradiation.

3.2 中子辐射导致的 SiC MOSFET 器件退化

3.2.1 I - V 特性退化

图 8(a) 显示了 14 MeV 中子辐照前后 SiC MOSFET 的 I - V 特性曲线. 当辐照总注量达到 $1.18 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, 器件的转移特性有轻微负向漂移, 栅电流出现了明显增大. 对应栅电压 $V_{\text{gs}} = 15 \text{ V}$ 时, 辐照后器件栅电流比辐照前增加了近 3.3 倍. 根据 Frenkel-Poole 发射理论, MOS 栅电流与电压的平方根满足如下指数关系 [24]:

$$I_{\text{g}} \propto V_{\text{gs}} \exp \left[\frac{q}{kT} (2\sqrt{q/(4\pi\epsilon_i d)} \sqrt{V_{\text{gs}} - \phi_{\text{B}}}) \right], \quad (5)$$

其中, ϵ_i 为氧化层介电常数, d 为氧化层厚度, ϕ_{B} 为氧化层势垒高度. 利用 (5) 式对辐照后 MOSFET 器件栅电流进行拟合, 吻合很好, 如图 8(b) 所示. 这说明辐照后栅电流满足 Frenkel-Poole 导电特性. 因此可推断中子辐照可能在 SiC MOSFET 的

氧化层中或氧化层界面附近引入了额外的施主型缺陷, 如图 9 所示. 这些缺陷对载流子通过势垒层具有辅助作用, 从而导致辐照后栅电流增大. 中子辐射引入的缺陷在俘获电子后呈中性, 其俘获的电子可以越过一个较低的势阱后进入导带参与导电. 当 MOSFET 器件栅端加一个正向偏压后, 氧化层中的势垒进一步降低, 使得缺陷俘获的电子更容易跃迁到导带, 从而使得栅电流随着栅氧电场增加而增加, 如图 9(c) 所示. 当施主型缺陷俘获的电子进入导带后, 在氧化层中留下带正电的缺陷, 从而导致器件的转移特性出现了负向漂移.

3.2.2 辐射损伤缺陷表征

图 10 为辐照前后 SiC MOSFET 器件的深能级瞬态谱测试结果. 针对栅电容的深能级瞬态谱测试结果反映的是沟道附近 SiC 耗尽层中的缺陷特性. 在辐照前的 SiC MOSFET 的深能级瞬态谱中出现了明显的正信号峰 MT_1 , 其对应一个多子

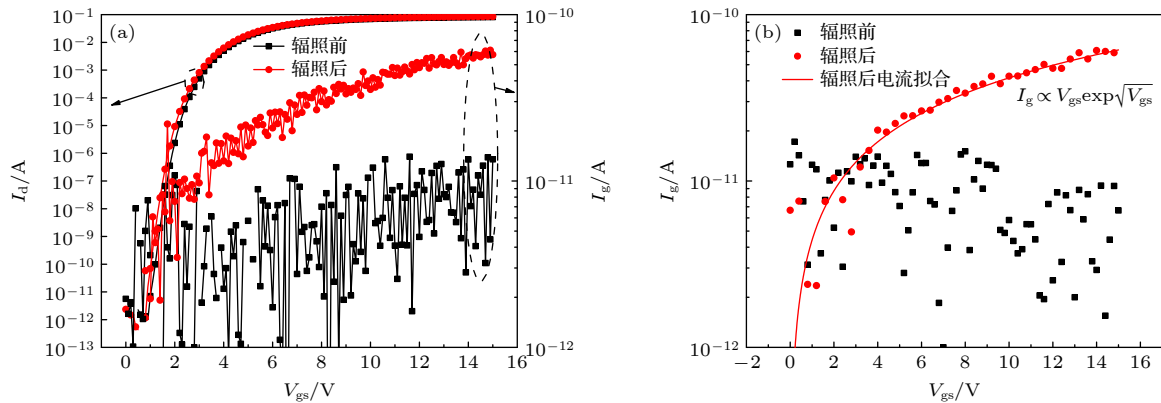


图 8 (a) SiC MOSFET 器件辐照前后的转移特性和栅电流特性, 测试条件为源端电压 $V_{\text{s}} = 0 \text{ V}$, 漏端电压 $V_{\text{d}} = 0.1 \text{ V}$; (b) 辐照后 SiC MOSFET 器件栅电流拟合, 测试条件 $V_{\text{d}} = V_{\text{s}} = 0 \text{ V}$

Fig. 8. (a) Transfer and gate-current characteristics of SiC MOSFET before and after irradiation (test condition, $V_{\text{s}} = 0 \text{ V}$, $V_{\text{d}} = 0.1 \text{ V}$); (b) gate current fitting of SiC MOSFET after irradiation (test condition $V_{\text{d}} = V_{\text{s}} = 0 \text{ V}$).

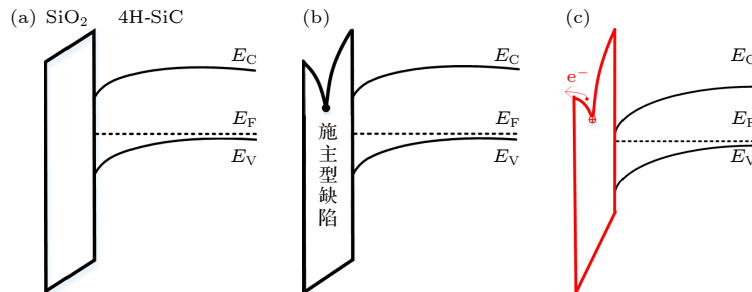


图 9 (a) 辐照前未加栅偏压下的 SiC MOSFET 器件能带图; (b) 辐照后未加栅偏压下的 SiC MOSFET 器件能带图; (c) 辐照后加正栅偏压下的 SiC MOSFET 器件能带图

Fig. 9. (a) Energy band diagram of SiC MOSFET without gate bias before irradiation; (b) energy band diagram of SiC MOSFET without gate bias after irradiation; (c) energy band diagram of SiC MOSFET with positive gate bias after irradiation.

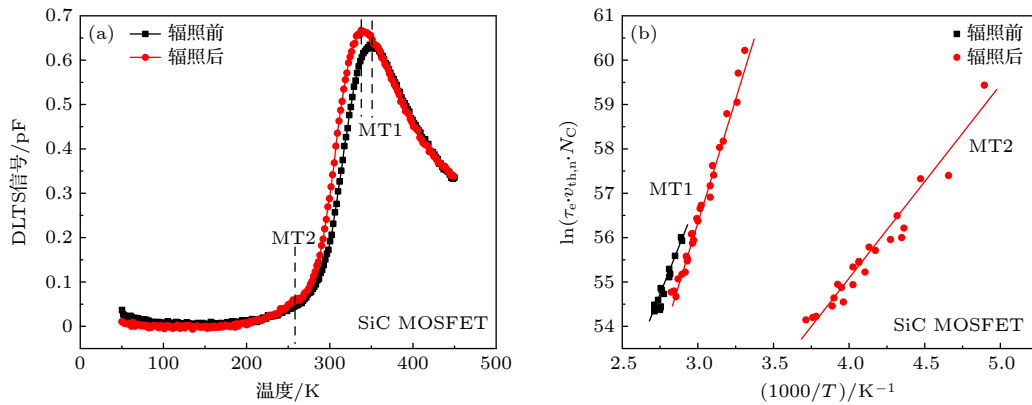


图 10 (a) 辐照前后 SiC 功率 MOSFET 器件的深能级瞬态谱; (b) 阿伦尼乌斯曲线
Fig. 10. (a) DLTS spectrums of SiC MOSFET before and after irradiation; (b) Arrhenius plot.

表 3 基于深能级瞬态谱提取的 SiC MOSFET 辐照前后的缺陷信息
Table 3. Trap information of SiC MOSFET extracted by DLTS before and after irradiation.

	缺陷类型					
	缺陷 MT ₁			缺陷 MT ₂		
	能级 $E_C - E_T$ /eV	缺陷密度/cm ⁻³	俘获截面/cm ²	能级 $E_C - E_T$ /eV	缺陷密度/cm ⁻³	俘获截面/cm ²
辐照前	1.112	1.42×10^{14}	8.60×10^{-9}	—	—	—
辐照后	0.980	1.59×10^{14}	2.82×10^{-10}	0.376	1.34×10^{13}	6.31×10^{-17}

缺陷中心. 基于阿伦尼乌斯曲线拟合, 可提取辐照前器件的缺陷信息见表 3. 该缺陷能级位置 $E_C - 1.112$ eV. 中子辐照后的 DLTS 谱上观察到两个正信号峰, 分别标记为 MT₁ 和 MT₂. 相比于辐照前, 中子辐照导致 MT₁ 峰向低温区漂移, 同时峰值强度增大, 这反映了缺陷密度的增大, 而其对应的缺陷能级由 $E_C - 1.112$ eV 变为 $E_C - 0.980$ eV. 辐照后的缺陷能级变得比本征缺陷更浅且密度增加有限, 不会对 SiC MOSFET 器件的性能产生较大影响. 此外, 中子辐射在 MOSFET 器件中引入一个新的缺陷 MT₂, 其能级位置为 $E_C - 0.376$ eV. 该缺陷能级对应于 Si 空位缺陷, 这说明中子辐照在 SiC 中引入了额外的 Si 空位. 但该新增缺陷的密度很低, 远小于器件中的本征缺陷密度, 预期也不会影响器件电学性能. 因此, SiC 有源区中的缺陷不是导致 MOSFET 器件性能退化的主要原因.

4 结 论

本文针对 SiC 肖特基二极管和 MOSFET 器件开展了 14 MeV 中子辐照试验. 当中子总注量达到 1.18×10^{11} cm⁻² 时 (对应总位移损伤剂量为 2.07×10^4 MeV/mg), 未观察到二极管正向 I - V 特性有明

显退化, 但反向漏电流出现了显著增大. 深能级瞬态谱的测试结果表明, 中子辐照导致的缺陷簇在器件内形成了深能级缺陷 EH4, 其缺陷能级 $E_C - 1.034$ eV. 该缺陷导致了 n 掺杂漂移层中费米能级向禁带中央移动, 引起了肖特基势垒的降低, 最终导致二极管反向漏电流的增大. 对于 SiC MOSFET 器件, 中子辐照后的转移特性未出现明显退化, 但栅电流有明显增加. 辐照后器件的栅氧化层导电满足 Frenkel-Poole 发射特性. 这表明辐照前后 MOSFET 器件的栅氧导电机制发生了变化, 中子辐照在氧化层中引入的额外缺陷对载流子越过栅氧化层势垒有辅助作用, 从而导致了栅漏电的增加.

参考文献

- [1] Casady J B, Johnson R W 1996 *Solid State Electron.* **39** 1409
- [2] Kimoto T, Cooper J A 2014 *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications* (Singapore: John Wiley & Sons) p16
- [3] Zhang L, Xiao J, Qiu Y Z, Cheng H L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 056106 (in Chinese) [张林, 肖剑, 邱彦章, 程鸿亮 2011 物理学报 **60** 056106]
- [4] Zhang H, Guo H X, Pan X Y, Lei Z F, Zhang F Q, Gu Z Q, Liu Y T, Ju A A, Ouyang X P 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 162401 (in Chinese) [张鸿, 郭红霞, 潘霄宇, 雷志锋, 张凤祁, 顾朝桥, 柳奕天, 琚安安, 欧阳晓平 2021 物理学报 **70** 162401]

- [5] Yu C H, Wang Y, Bao M T, Li X J, Yang J Q, Tang Z H 2021 *IEEE Trans. Electron Dev.* **68** 5034
- [6] Yu C H, Wang Y, Li X J, Liu C M, Luo X, Cao F 2018 *IEEE Trans. Electron Dev.* **65** 5434
- [7] McPherson J A, Kowal P J, Pandey G K, Chow T P, Ji W, Woodworth A A 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 474
- [8] Ball D R, Hutson J M, Javanainen A, Lauenstein J M, Galloway K F, Johnson R A, Alles M L, Sternberg A L, Sierawski B D, Witulski A F, Reed R A, Schrimpf R D 2020 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **67** 22
- [9] Peng C, Lei Z F, Zhang Z G, He Y J, Chen Y Q, Lu G G, Huang Y 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 176101 (in Chinese) [彭超, 雷志锋, 张战刚, 何玉娟, 陈义强, 路国光, 黄云 2022 物理学报 **71** 176101]
- [10] Steffens M, Höffgen S K, Poizat M 2017 *17th European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (RADECS)* Geneva, Switzerland, October 2–6, 2017 p1
- [11] Akturk A, McGarrity J M, Potbhare S, Goldsman N 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 3258
- [12] Zhang C X, Zhang E X, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Dhar S, Ryu S H, Shen X, Pantelides S T 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2925
- [13] Hazdra P, Záhřava V, Vobecký J 2014 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **327** 124
- [14] Omotoso E, Meyer W E, Auret F D, Paradzah A T, Legodi M J 2016 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **371** 312
- [15] Yang J, Li H, Dong S, Li X 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 2042
- [16] Chao D S, Shih H Y, Jiang J Y, et al 2019 *Jap. J. Appl. Phys.* **58** SBBD08
- [17] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al 2003 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **506** 250
- [18] Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 270
- [19] Baliga B J (translated by Han Z S, et al) 2013 *Fundamentals of Power Semiconductor Devices* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp99–101 (in Chinese) [巴利加 著 (韩邦生 等 译) 2013 功率半导体器件基础 (北京: 电子工业出版社) 第 99–101 页]
- [20] Castaldini A, Cavallini A, Polenta L, Nava F, Canali C, Lanzieri C 2002 *Appl. Surf. Sci.* **187** 248
- [21] Dalibor T, Pensl G, Matsunami H, Kimoto T, Choyke W J, Schoner A, Nordell N 1997 *Phys. Stat. Sol. (a)* **162** 199
- [22] Alfieri G, Mihaila A, Nipoti R, Puzanghera M, Sozzi G, Godignon P, Millán J 2017 *Materials Science Forum* **897** 246
- [23] Alfieri G, Monakhov E V, Svensson B G, Hallén A 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 113524
- [24] Sze S M, Ng K K (translated by Geng L, Zhang R Z) 2008 *Physics of Semiconductor Devices* (Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press) pp173–176 (in Chinese) [施敏, 伍国珏 著 (耿莉, 张瑞智 译) 2008 半导体器件物理 (西安: 西安交通大学出版社) 第 173–176 页]

Study on characteristics of neutron-induced leakage current increase for SiC power devices^{*}

Peng Chao[†] Lei Zhi-Feng Zhang Zhan-Gang He Yu-Juan
Ma Teng Cai Zong-Qi Chen Yi-Qiang[‡]

(*Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, the Fifth Electronics Research
Institute of the Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 511370, China*)

(Received 13 June 2023; revised manuscript received 3 July 2023)

Abstract

In this paper, the displacement damage degradation characteristics of silicon carbide (SiC) Schottky barrier diode (SBD) and metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) are studied under 14-MeV neutron irradiation. The experimental results show that the neutron irradiation with a total fluence of $1.18 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ will not cause notable degradation of the forward I - V characteristics of the diode, but will lead to a significant increase in the reverse leakage current. A defect with energy level position of $E_c - 1.034 \text{ eV}$ is observed after irradiation by deep level transient spectroscopy (DLTS) testing, which is corresponding to the neutron-induced defect cluster in SiC. This deep level defect may cause the Fermi level of n-type doping drift region to move toward the mid-gap level. It ultimately results in the decrease of the Schottky barrier and the increase of the reverse leakage current. In addition, neutron-induced gate leakage increase is also observed for SiC MOSFET. The gate current corresponding to $V_{gs} = 15 \text{ V}$ after irradiation increases nearly 3.3 times that before irradiation. The donor-type defects introduced by neutron irradiation in the oxide layer result in the difference in the conductivity mechanism of gate oxygen between before and after irradiation. The defects have an auxiliary effect on carrier crossing the gate oxide barrier, which leads to the increase of gate leakage current. The defects introduced by neutron irradiation are neutral after capturing electrons. The trapped electrons can cross a lower potential well and enter the conduction band to participate in conduction when the gate is positively biased, thus causing the gate current to increase with the electric field increasing. After electrons captured by donor-type defects enter the conduction band, positively charged defects are left from the gate oxide, leading to the negative shift of the transfer characteristics of SiC MOSFET. The results of DLTS testing indicate that the neutron irradiation can not only cause the intrinsic defect state of SiC material to change near the channel of MOSFET, but also give rise to new silicon vacancy defects. However, these defects are not the main cause of device performance degradation due to their low density relative to the intrinsic defect's.

Keywords: silicon carbide power device, neutron irradiation, displacement damage, deep level transient spectrum

PACS: 61.80.-x, 61.80.Jh, 85.30.-z

DOI: 10.7498/aps.72.20230976

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12075065, 62274043), the Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2021B1515120043), the Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2022B0701180002), and the Science and Technology Program of Guangzhou, China (Grant No. 202201010868).

[†] Corresponding author. E-mail: pengchaoceprei@qq.com

[‡] Corresponding author. E-mail: yiqiang-chen@hotmail.com

中子辐射导致的SiC功率器件漏电增加特性研究

彭超 雷志锋 张战刚 何玉娟 马腾 蔡宗棋 陈义强

Study on characteristics of neutron-induced leakage current increase for SiC power devices

Peng Chao Lei Zhi-Feng Zhang Zhan-Gang He Yu-Juan Ma Teng Cai Zong-Qi Chen Yi-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 186102 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230976

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230976>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管器件中子位移损伤效应及机理

Neutron-induced displacement damage effect and mechanism of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor

物理学报. 2020, 69(20): 207301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200714>

InP中子位移损伤效应的Geant4模拟

Geant4 simulation of neutron displacement damage effect in InP

物理学报. 2022, 71(8): 082401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211722>

中子对碲锌镉辐照损伤模拟研究

Simulation study of neutron radiation damage to cadmium zinc telluride

物理学报. 2022, 71(22): 226102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221195>

质子在碳化硅中不同深度的非电离能量损失

Non-ionization energy loss of proton in different regions in SiC

物理学报. 2018, 67(18): 182401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181095>

空间重离子入射磷化铟的位移损伤模拟

Simulation of displacement damage in indium phosphide induced by space heavy ions

物理学报. 2021, 70(17): 172401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210303>

氮化镓在不同中子辐照环境下的位移损伤模拟研究

Simulated research on displacement damage of gallium nitride radiated by different neutron sources

物理学报. 2020, 69(19): 192401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200064>