

双沟槽 SiC 金属-氧化物-半导体型场效应管重离子单粒子效应

李洋帆¹⁾ 郭红霞^{2)†} 张鸿¹⁾³⁾ 白如雪¹⁾ 张凤祁²⁾
马武英²⁾ 钟向丽¹⁾ 李济芳¹⁾ 卢小杰¹⁾

1) (湘潭大学材料科学与工程学院, 湘潭 411105)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

3) (工业和信息化部第五研究所, 电子元器件可靠性物理及其应用技术国家重点实验室, 广州 510610)

(2023 年 9 月 6 日收到; 2023 年 9 月 26 日收到修改稿)

本文针对第四代双沟槽型碳化硅场效应晶体管开展了不同源漏偏置电压下 208 MeV 锗离子辐照实验, 分析了器件产生单粒子效应的物理机制. 实验结果表明, 辐照过程中随着初始偏置电压的增大, 器件漏极电流增长更明显; 在偏置电压为 400 V 时, 重离子注量达到 9×10^4 ion/cm², 器件发生单粒子烧毁, 在偏置电压为 500 V 时, 重离子注量达到 3×10^4 ion/cm², 器件发生单粒子烧毁, 单粒子烧毁阈值电压在器件额定工作电压的 34% (400 V) 以下. 对辐照后器件进行栅特性测试, 辐照过程中偏置电压为 100 V 的器件泄漏电流无明显变化; 200 V 和 300 V 时, 器件的栅极泄漏电流和漏极泄漏电流都增大. 结合 TCAD 仿真模拟进一步分析器件单粒子效应微观机制, 结果表明在低偏压下, 泄漏电流增大是因为电场集中在栅氧化层的拐角处, 导致了氧化层的损伤; 在高偏压下, 辐照过程中 N⁻外延层和 N⁺衬底交界处发生的电场强度增大, 引起显著的碰撞电离, 由碰撞电离产生的局域大电流密度导致晶格温度超过碳化硅的熔点, 最终引起单粒子烧毁.

关键词: 双沟槽 SiC 金属-氧化物-半导体型场效应管, 重离子辐照, 单粒子烧毁

PACS: 61.82.Fk, 71.55.Eq, 73.20.-r, 85.30.Tv

DOI: 10.7498/aps.73.20231440

1 引言

作为第三代半导体材料, SiC 材料具有禁带宽、击穿电场大、饱和漂移速度快和热导率高等优异性能, 可以用来制备抗辐射、大功率、高频和高温器件^[1-3]. 相比于 Si 基器件, 同等性能下, SiC 基器件可以做到成本更低, 尺寸更小以及寿命更长, 因此 SiC 基器件更能满足新一代航天器对大功率、高频等性能方面的要求, 有望在空间和航天领域中扮演重要角色^[4-6]. 然而, SiC 金属-氧化物-半导体型场效应管 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET) 在空间领域的应

用处于验证阶段, 由于空间环境中存在大量的高能重离子, SiC MOSFET 经重离子辐照后会发生单粒子泄漏电流 (single event leakage current, SELC)、单粒子栅穿 (single event gate rupture, SEGR) 或单粒子烧毁 (single event burnout, SEB)^[7], 显著影响器件的工作.

近年来, 许多团队通过实验和仿真研究了重离子辐照下 SiC MOSFET 的退化和烧毁机制. Martinella 等^[8,9]通过重离子辐照 SiC MOSFET 的实验发现在低偏置电压下, 被测器件的泄漏电流路径是从漏极到栅极, 涉及栅氧化层的损伤; 而在高偏置电压下, 泄漏电流路径主要是从漏极到源极, 这是由于碳化硅晶格的改变. Witulski 等^[10]通过

† 通信作者. E-mail: guohongxia@nint.ac.cn

不同 LET 值的重离子实验发现器件 SEB 阈值电压会随入射离子 LET 值的增大而显著降低, 当 $\text{LET} > 10 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时, SiC MOSFET 的 SEB 阈值电压几乎为器件额定最大工作电压的一半. Ball 等^[11]通过仿真模拟重离子入射 SiC MOSFET 器件, 发现离子入射诱导产生高局域态能量脉冲导致器件性能退化或者烧毁; 同时该团队^[12]通过实验对比和仿真模拟发现, 更厚的外延层、更低掺杂浓度可以显著增大器件 SEB 阈值电压.

目前商用的 SiC MOSFET 分为平面栅型和沟槽型两种结构^[13], 在相同元胞尺寸下, 双沟槽型碳化硅 MOSFET (double-trench MOSFET, DT-MOSFET) 相比于传统平面栅型碳化硅 MOSFET (vertical double-diffused MOSFET, VDMOSFET), 具有更高的沟道迁移率、更低的比导通电阻以及更大的电流密度, 优异的性能使得 SiC DTMOSFET 具有更广阔的应用前景^[14-17]. 然而, 目前大多数研究都是针对 SiC VDMOSFET 的单粒子效应, 关于 SiC DTMOSFET 的单粒子效应研究较少. Zhou 等^[18]通过 TCAD 模拟了不同 LET 值的重离子轰击 SiC DTMOSFET 器件敏感区, 研究其单粒子效应机理, 该团队^[19]还进行 SiC DTMOSFET 的 2005 MeV Ta 离子重离子实验, 实验结果表明其 SEB 阈值电压不超过其额定电压的 42%. Cheng 等^[20]借助 TCAD 模拟仿真软件研究了 3 种不同结构的槽栅型 SiC MOSFET 的单粒子效应, 发现 DTMOSFET 结构由于较深的源极深沟槽结构, 有助于快速收集离子入射后碰撞产生的载流子, 从而 SEB 阈值电压更高. 关于 SiC DTMOSFET 的单粒子效应研究缺乏更多的实验验证, 因此对 SiC DTMOSFET 的重离子实验有必要进一步开展和

深入全面研究.

本文利用 208 MeV Ge 离子对碳化硅双沟槽 MOSFET 开展重离子辐照实验. 在辐照实验过程中, 实时监测了漏极电流和烧毁瞬间脉冲电流. 并在辐照实验后, 对器件进行了静态参数测试和栅特性测试. 结合 TCAD 工具, 模拟了不同偏置电压下重离子入射器件, 发现沿离子入射路径上的 N⁻外延层和 N⁺衬底交界处温度超过了碳化硅的熔点, 这可能是导致器件发生 SEB 的原因.

2 实验信息

本次实验选用的是 Rohm 公司生产的第四代双沟槽型碳化硅场效应晶体管 SCT4060 KR, 其额定电流为 26 A, 导通电阻为 62 mΩ. 实验器件的单元结构如图 1(a) 所示, 在每个栅极沟槽的两个侧壁上都有沟道, 两侧都有一个源极沟槽, 延伸到漂移区, 更好地保护栅极氧化物. 在重离子实验前对器件进行了去封装处理, 以确保重离子能入射到器件的有源区, 并进行静态参数的测试, 以确保器件具有良好的电学性能.

利用中国原子能科学研究院的 HI-13 串列加速器进行重离子实验, 选取能量为 208 MeV 的 Ge 离子, 其作用在器件表面的 LET 值为 $37.3 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$. 图 1(b) 为实验中使用的测试电路示意图, Keithley 两台数字万用表分别监测和记录漏极电流和栅极电流, 示波器接入阻值为 0.01Ω 的电阻两端, 用于捕获和存储器件烧毁瞬间的脉冲电流. 为了研究辐照损伤与源漏偏置电压的关系, 在辐照过程中, 器件的栅极电压 V_g 设置为 0 V, 以确保器件处于关闭状态, 漏极电压 V_{DSirr} 设置为 100, 200, 300, 400 和 500 V.

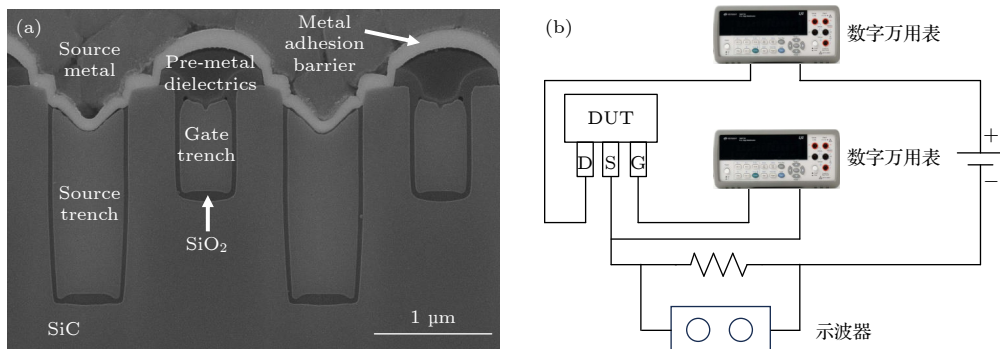


图 1 (a) SiC DTMOSFET 单元结构图; (b) 重离子实验电路原理图

Fig. 1. (a) SiC MOSFET cell structure; (b) schematic diagram of heavy ion experiment.

在重离子辐照实验中, 如果器件发生烧毁或者器件漏极电流持续增大, 注量累积到 $2 \times 10^6 \text{ ion/cm}^2$ 时, 则停止辐照. 图 2 为不同偏置电压下 SiC DT-MOSFET 的 SELC 和 SEB. 如图 2(a) 所示, 当 V_{DSirr} 为 100, 200, 300 V 时, 漏极电流随重离子入射逐渐增大, 达到 $2 \times 10^6 \text{ ion/cm}^2$ 的注量时, 电流未达到限制电流, 重离子入射到器件后产生的损伤导致漏极电流持续增长; 而在 V_{DSirr} 为 400 和 500 V, 重离子入射到器件后在注量分别达到 9×10^4 和 $3 \times 10^4 \text{ ion/cm}^2$ 时, 漏极电流骤增到限制电流, 见图 2(b), 器件发生单粒子烧毁, 器件源漏之间的电阻由数兆欧降到数百欧, 从而导致器件电流瞬间上升, 通过示波器可以捕获到这一电流的变化,

如图 2(c) 所示, V_{DSirr} 为 400 V 时, 示波器捕获到的烧毁瞬间脉冲电流, 脉冲电流宽度为纳秒级别, 最大脉冲电流为 4 A 左右, 500 V 同样出现此现象. 换言之, 双沟槽 SiC MOSFET 的 SEB 阈值电压小于其额定电压的 34%.

3 实验结果与分析

3.1 辐照前后 SiC MOSFET 静态参数测试

器件在辐照实验中表现出不同程度的退化, 这也导致其电学性能受到不同程度的损害. 图 3 给出了在辐照过程中的不同初始偏置电压下, 器件在辐照前后的传输特性曲线和输出特性曲线. 未烧

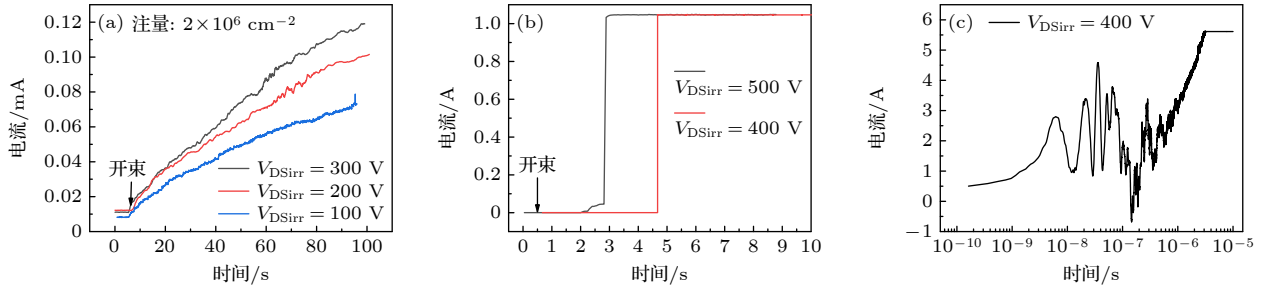


图 2 辐照过程 (a) 漏极电流监测; (b) 烧毁电流监测; (c) 脉冲电流

Fig. 2. During irradiation: (a) Leakage current monitoring; (b) burn-out current monitoring; (c) pulse current monitoring.

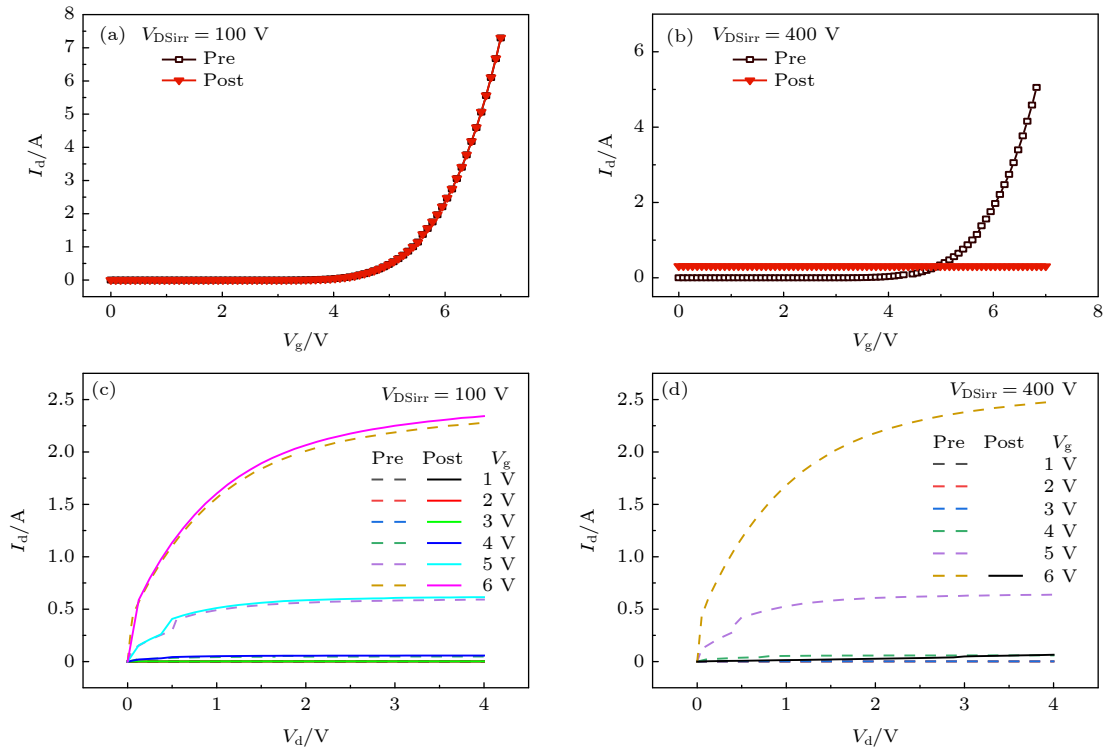


图 3 辐照前后 SiC MOSFET 转移特征曲线和输出特征曲线

Fig. 3. Transfer characteristic curve and output characteristic curve of SiC MOSFET before and after irradiation.

毁器件以图 3(a), (c) 中辐照过程中初始偏置电压为 100 V 为例, 器件的阈值电压在辐照后出现了较小的负向偏移, 漂移了 0.06 V, 然而, $V_g = 6$ V 时的输出特性曲线显示漏极电流上升约 77.51 mA; 其余偏压下变化见表 1, 其退化程度与初偏压呈正相关. 烧毁器件以图 3(b), (d) 中辐照过程中偏置电压为 400 V 为例, 该器件在受到辐射后完全丧失其功能.

表 1 辐照前后 SiC MOSFET 阈值电压偏移量和电流变化量

Table 1. Threshold voltage offset and current change of SiC MOSFET before and after irradiation.

辐照过程中初始偏置条件	$\Delta V_{th}/V$	$\Delta I_d/mA$
100 V	-0.06	77.51
200 V	-0.09	78.73
300 V	-0.16	80.56

3.2 栅特性测试

进行辐照后栅特性测试. 栅压从 0 V 扫描到 10 V, 源-漏短接, 测量栅极电流和漏极电流, 用于进一步确定辐照对器件造成损伤. 如图 4 所示,

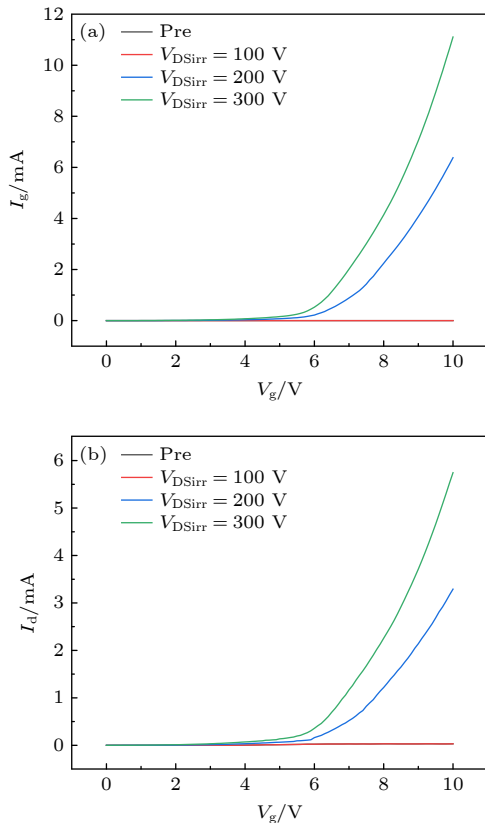


图 4 辐照后 (a) 栅极泄漏电流特性; (b) 漏极泄漏电流特性

Fig. 4. After irradiation: (a) Gate leakage currents characteristics; (b) drain leakage currents characteristics.

辐照过程中初始偏置电压为 100 V 的被辐照器件泄漏电流与辐照前几乎无变化, 说明栅氧层并未受到损伤. 辐照过程中偏置电压大于 200 V 后, 被辐照的器件栅极泄漏电流的增长速度随着偏压的增大而增大, 说明其栅氧层的损伤也随之加深, 其泄漏电流退化程度与初始偏压呈正相关. 器件虽然没有发生 SEB, 但因为泄漏电流的增大, 出于安全考虑也将不能在实际中正常使用.

3.3 实验分析

通过双沟槽型碳化硅 MOSFET 重离子辐照前后静态参数的对比发现, 其阈值电压负漂, 泄漏电流增长. N 沟道 MOSFET 的阈值电压 V_{th} 数学模型为^[21]

$$V_{th} = \frac{q}{C_{OX}} (N_{it} - N_{ot}) + C_{OX} (4\epsilon_s q N_A \phi_{Fp})^{\frac{1}{2}} + 2\phi_{Fp} + \varphi_{MS}, \quad (1)$$

$$\phi_{Fp} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}, \quad (2)$$

其中 C_{OX} 为氧化层特征电容, N_{ot} 为氧化层陷阱电荷面密度, N_{it} 为界面态陷阱电荷面密度, ϵ_s 为 SiC 的介电常, N_A 为 P 型基区的有效掺杂浓度, ϕ_{Fp} 为准费米势, φ_{MS} 为金属-半导体的功函数差, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, n_i 为 SiC 的本征载流子浓度.

N 沟道 MOSFET 的饱和区的电流数学模型为^[21]

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2, \quad (3)$$

其中 μ_n 为沟道载流子迁移率, W 和 L 分别为沟道的宽度和长度.

本文中, 阈值电压的负漂主要是由于重离子入射到器件在栅氧化层中产生电子-空穴对, 在栅氧化层中电子的迁移率明显高于空穴, 受到电场的作用, 电子快速向漏极移动, 而空穴缓慢移动, 在这个过程中会被栅氧化层的本征缺陷俘获, 导致栅氧化层陷阱电荷面密度 N_{ot} 增大, 同时在 SiC/SiO₂ 界面附近由重离子入射产生的空穴也可能在电场的作用下隧穿或者跃迁到氧化层被深能级缺陷俘获形成陷阱电荷, 最终阈值电压 V_{th} 降低^[22]. 由于阈值电压的负向漂移, 会导致器件 SiC/SiO₂ 界面处的 P 型基区更容易形成反型层, 在较低的栅压下器件就能开启, 这解释了器件辐照后的输出特征

曲线电流会出现了增长现象. 同时空穴在 SiC/SiO₂ 界面处积累, 与源-漏偏压共同作用, 导致栅氧化层中的电场增大, 进而导致栅氧化层出现损伤, 导致栅应力测试中的栅电流增大, 其与源-漏偏压呈正相关^[19].

4 数值仿真

根据图 1(a) 扫描电子显微镜的分析结果, 利用 TCAD 仿真工具建立了 SiC DTMOSFET 的二维模型, 其栅极沟槽的深度和宽度为 1 μm 和 0.5 μm, 源极沟槽深度和宽度为 1.8 μm 和 0.7 μm. 在进行二维结构仿真的过程中, 定性分析器件单粒子效应, 在模拟中添加了基本模型 (包括和掺杂、温度相关的 SRH 复合模型、俄歇复合模型、迁移率模型和不完全电离模型等^[23]), 此外还添加了重离子入射模型和热力学模型. 其中重离子入射器件产生电子-空穴对的产生率^[24]可由公式 (4) 计算:

$$G(l, w, t) = G_{\text{LET}}(l) R(w, l) T(t), \quad (4)$$

其中, $R(w, l)$ 和 $T(t)$ 是描述电子-空穴对产生率的时空分布函数, $G_{\text{LET}}(l)$ 是与入射粒子 LET 有关的 LET 产生密度, w 和 l 为入射粒子的轨迹半径和长度.

本文根据入射路径上经过不同区域为条件, 选择了 5 种不同入射路径, 如图 5 所示, 入射点为路径 A 经过多晶硅栅极中心、氧化层、外延层, 最终进入衬底; 路径 B 经过多晶硅栅极边缘、氧化层、外延层, 最终进入衬底; 路径 C 经过 N⁺源区、P 基区、外延层, 最终进入衬底; 路径 D 经过 N⁺源区、P-

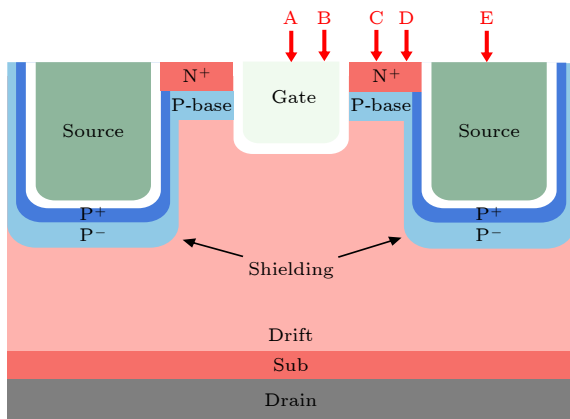


图 5 离子入射位置示意图

Fig. 5. Diagram of ion strike positions.

屏蔽层、外延层, 最终进入衬底; 路径 E 经过源极沟槽、P⁺屏蔽层、P 屏蔽层、外延层, 最终进入衬底.

4.1 栅氧化层损伤仿真模拟

图 6 为 $V_{\text{DSirr}} = 200$ V, $\text{LET} = 37.3$ MeV·cm²/mg 时, 不同位置入射器件栅氧化层电场强度随时间的演化过程. 仿真结果表明, 随着入射位置远离栅极中央, 栅氧化层中的电场强度逐渐变小. 由图 7 观察到, 离子从路径 A、路径 B 和路径 C 入射, 在栅氧化层拐角处都存在一个较大的电场强度, 并且从路径 B 入射时, 其栅氧化层拐角处电场强度最大. 这是离子入射到器件中产生电子-空穴对, 空穴在栅氧化层的拐角处产生严重的堆积效应所导致. 较大的电场强度使器件的栅氧化层形成潜在损伤, 形成泄漏电流通道, 这种损伤机制解释了辐照后的器件在栅特性测试中栅极泄漏电流增大.

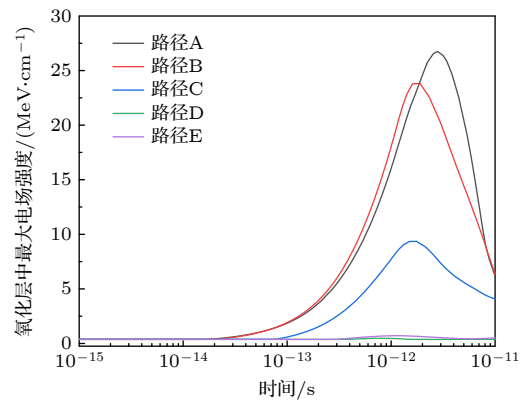


图 6 $V_{\text{DSirr}} = 200$ V 时, 不同位置入射器件最大栅氧化层电场强度随时间的演化过程

Fig. 6. Evolution of maximum oxide electric field at different strike positions with simulation time at $V_{\text{DSirr}} = 200$ V.

4.2 单粒子烧毁仿真模拟

碳化硅平面栅场效应晶体管的单粒子烧毁是由于其内部晶格温度高于其材料的熔点 (3000 K) 所导致^[25,26]. 因此在本文中, 将仿真模拟中器件内部晶格温度超过 3000 K 时所施加的源漏偏置电压定义为器件 SEB 的阈值电压.

从图 8 可以看到, 离子从路径 A 入射到器件后不同时刻器件内部的晶格温度情况, 在重离子入射到器件后的 N⁺外延层和 N⁺衬底处产生一个明显的高温点, 该点的晶格温度随着时间增大, 在

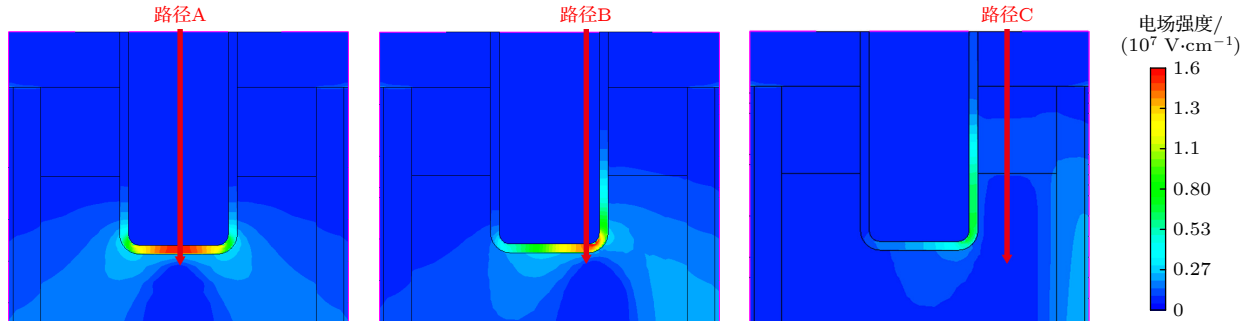
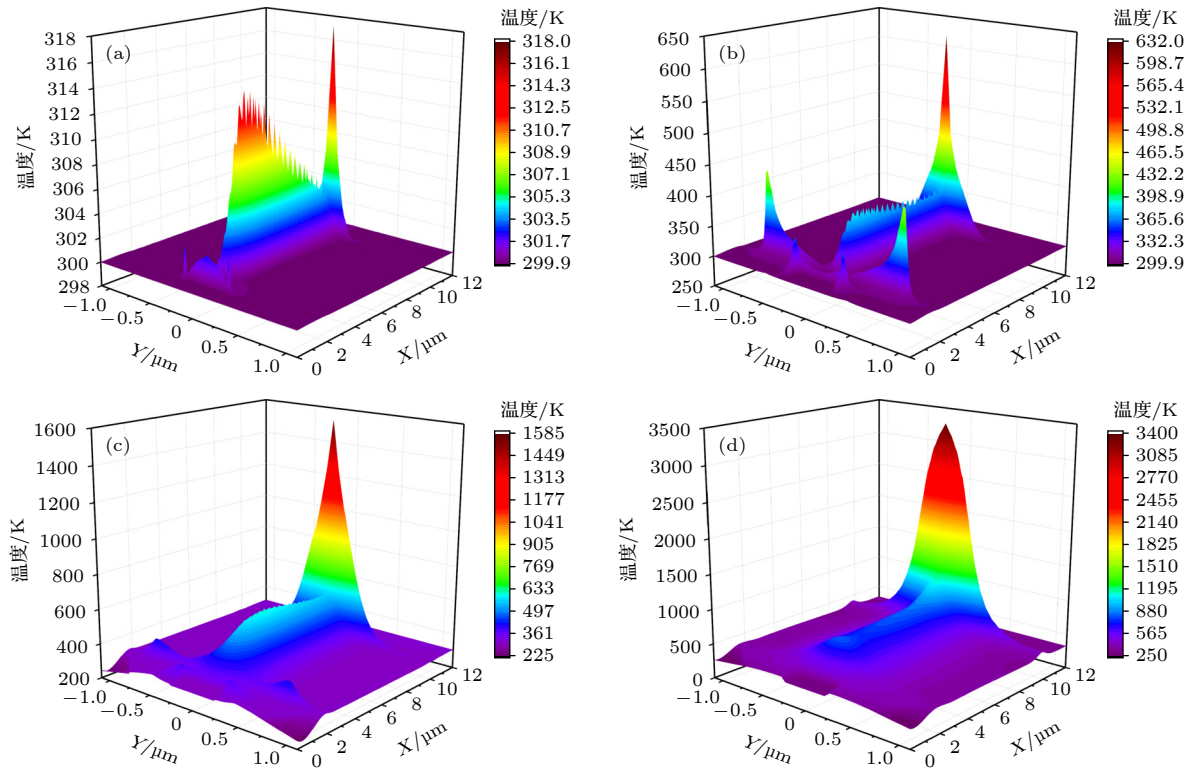
图7 $V_{\text{DSirr}} = 200 \text{ V}$ 时, 重离子入射器件栅氧化层中电场强度分布图Fig. 7. The distribution of electric field in gate oxide under heavy ion strike at $V_{\text{DSirr}} = 200 \text{ V}$.

图8 重离子入射 (a) 1 ps, (b) 10 ps, (c) 100 ps 和 (d) 1 ns 后器件内部晶格温度分布图

Fig. 8. The distribution of lattice temperature in device after heavy ion incident of (a) 1 ps, (b) 10 ps, (c) 100 ps, and (d) 1 ns.

$t = 1 \text{ ns}$ 时, 达到最大值. 图9为沿离子入射路径的碰撞电离率和电场强度随深度的变化情况, 重离子入射器件后产生电子-空穴对, 电子在电场作用下向漏极移动, 使得该处电场强度进一步增大, 引起显著的碰撞电离, 在N-外延层和N⁺衬底处碰撞电离率高达 $3.25 \times 10^{27} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 电离出更多的电子-空穴对, 电子在电场作用下继续被加速移动, 在局域产生大电流密度, 使得瞬时关态电流大大增加, 由热功率公式 $P = UI$, 局域大电流密度导致其晶格温度超过 SiC 材料的熔点, 发生单粒子烧毁事件.

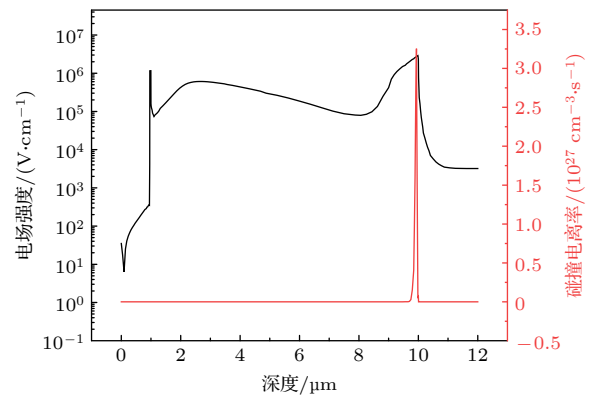


图9 沿离子入射路径电场强度和碰撞电离率的分布情况

Fig. 9. Evolutions of impact ionization and electronic intensity along the ion track.

5 结 论

本文研究了不同源漏偏置电压下双沟槽型碳化硅场效应晶体管的重离子单粒子效应. 实验结果表明, 与平面栅结构相比, 当辐照过程中偏置电压较低时, 双沟槽 SiC MOSFET 未出现泄漏电流通, 当辐照过程中偏置电压大于 200 V 时, 辐照引起的泄漏电流在漏极到栅极和漏极到源极之间分配; 结合 TCAD 仿真模拟, 泄漏电流增大是由于栅氧化层拐角处高电场强度引起的损伤; 栅氧化层拐角处是沟槽型结构的敏感区域. 当 LET 值为 $37.3 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 双沟槽型碳化硅场效应晶体管的 SEB 阈值电压在 400 V 以下, 重离子入射到器件后, 在 N⁻外延层和 N⁺衬底处的局域大电场强度和大电流密度导致晶格温度超过 SiC 的熔点, 引发单粒子烧毁事件. 这为宇航用碳化硅功率器件的辐照效应机理研究和应用提供了一定的参考和支撑.

参考文献

- [1] Dimitrijević S, Jamet P 2003 *Microelectron. Reliab.* **43** 225
- [2] Zeng Z, Zhang X, Miao L J 2019 *10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia Busan, Korea, May 27–30, 2019* p2139
- [3] Zhang L, Xiao J, Qiu Y Z, Cheng H L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 551 [张林, 肖剑, 邱彦章, 程鸿亮 2011 物理学报 **60** 551]
- [4] Liu X Y, Li C Z, Luo Y H, Chen H, Gao X X, Bai Y 2020 *Acta Electron. Sin.* **48** 2313 [刘新宇, 李诚瞻, 罗烨辉, 陈宏, 高秀秀, 白云 2020 电子学报 **48** 2313]
- [5] Wang J, Zhao T F, Li J, Huang A Q, Callanan R, Husna F, Agarwal A 2008 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **55** 1798
- [6] Liu J W, Lu J, Tian X L, Chen H, Bai Y, Liu X Y 2020 *Electron. Lett.* **56** 1273
- [7] Kuboyama S, Kamezawa C, Satoh Y, Hirao T, Ohyama H 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2379
- [8] Martinella C, Natzke P, Alia R G, Kadi Y, Niskanen K, Rossi M, Jaatinen J, Kettunen H, Tsibizov A, Grossner U, Javanainen A 2022 *Microelectron. Reliab.* **128** 114423
- [9] Martinella C, Ziemann T, Stark R, Tsibizov A, Voss K O, Alia R G, Kadi Y, Grossner U, Javanainen A 2020 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **67** 1381
- [10] Witulski A F, Ball D R, Galloway K F, Javanainen A, Lauenstein J-M, Sternberg A L, Schrimpf R D 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1951
- [11] 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
- [12] Ball D R, Galloway K F, Johnson R A, Alles M L, Sternberg A L, Witulski A F, Reed R A, Schrimpf R D, Hutson J M, Lauenstein J M 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **68** 1430
- [13] Liu C C, Guo G, Li Z M, Zhang F Q, Chen Q M, Han J H, Yang X Y 2022 *Nucl. Tech.* **45** 3 [刘翠翠, 郭刚, 李治明, 张付强, 陈启明, 韩金华, 杨新宇 2022 核技术 **45** 3]
- [14] Pappis D, Zacharias P 2017 *19th European Conference on Power Electronics and Applications* Warsaw, Poland, September 11–14, 2017 p1
- [15] Sato I, Tanaka T, Hori M, Yamada R, Toba A, Kubota H 2021 *Electr. Eng. Jpn.* **214** e23323
- [16] Sampath M, Morissette D T, Cooper J A 2018 *Mater. Sci. Forum* **924** 752
- [17] Gu C Q, Guo H X, Pan X Y, Lei Z F, Zhang F Q, Zhang H, Ju A A, Liu Y T 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 166101 (in Chinese) [顾朝桥, 郭红霞, 潘霄宇, 雷志峰, 张凤祁, 张鸿, 嵇安安, 柳奕天 2021 物理学报 **70** 166101]
- [18] Zhou X T, Tang Y, Jia Y P, Hu D Q, Wu Y, Xia T, Gong H, Pang H Y 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 2312
- [19] Wang L H, Jia Y P, Zhou X T, Zhao Y F, Wang L, Li T D, Hu D Q, Wu Y, Deng Z H 2022 *Microelectron. Reliab.* **137** 114770
- [20] Cheng G D, Lu J, Zhai L Q, Bai Y, Tian X L, Zuo X X, Yang C Y, Tang Y D, Chen H, Liu X Y 2022 *Microelectronics* **52** 466 [成国栋, 陆江, 翟露青, 白云, 田晓丽, 左欣欣, 杨成樾, 汤益丹, 陈宏, 刘新宇 2022 微电子学 **52** 466]
- [21] Tang C Q, Wang D W, Gong M, Ma Y, Yang Z M 2021 *Electron. Packag.* **21** 080402 (in Chinese) [唐常钦, 王多为, 龚敏, 马瑶, 杨治美 2021 电子与封装 **21** 080402]
- [22] Wang J X, Wu H, Wang Y W, Li Y P, Wang Y, Yang F 2016 *Smart Grid* **4** 1078 (in Chinese) [王敬轩, 吴昊, 王永维, 李永平, 王勇, 杨霏 2016 智能电网 **4** 1078]
- [23] Zhou X T, Pang H Y, Jia Y P, Hu D Q, Wu Y, Tang Y, Xia T, Gong H, Zhao Y F 2020 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **67** 582
- [24] Zhou X T, Pang H Y, Jia Y P, Hu D Q, Wu Y, Zhang S D, Li Y, Li X Y, Wang L H, Fang X Y, Zhao Y F 2021 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **68** 4010
- [25] Cheng Y Z 2021 *M. S. Thesis* (Hangzhou: Hangzhou Dianzi University) [程有忠 2021 硕士 (杭州电子科技大学)]
- [26] Wang Y, Lin M, Li X J, Wu X, Yang J Q, Bao M T, Yu C H, Cao F 2019 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **66** 4264

Heavy ion single event effect in double-trench SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistors

Li Yang-Fan¹⁾ Guo Hong-Xia^{2)†} Zhang Hong¹⁾³⁾ Bai Ru-Xue¹⁾
 Zhang Feng-Qi²⁾ Ma Wu-Ying²⁾ Zhong Xiang-Li¹⁾
 Li Ji-Fang¹⁾ Lu Xiao-Jie¹⁾

1) (*School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

2) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

3) (*State Key Laboratory of Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component, China Electronic Product Reliability and Environmental Research Institute, Guangzhou 510610, China*)

(Received 6 September 2023; revised manuscript received 26 September 2023)

Abstract

In this paper, experiments on 208 MeV Ge ion irradiation with different source-drain bias voltages are carried out for the double-trench SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistors, and the physical mechanism of the single event effect is analyzed. The experimental results show that the drain leakage current of the device increases more obviously with the increase of the initial bias voltage during irradiation. When the bias voltage is 400 V during irradiation, the device has a single event burned at a fluence of 9×10^4 ion/cm², and when the bias voltage is 500 V, the device has a single event burned at a fluence of 3×10^4 ion/cm², so when the LET value is 37.3 MeV·cm²/mg, the SEB threshold of DUT does not exceed 400 V, which is lower than 34% of the rated operational voltage. The post gate-characteristics test results show that the leakage current of the device with a bias voltage of 100 V does not change significantly during irradiation. When the bias voltage is 200 V, the gate leakage and the drain leakage of the device both increase, so do they when the bias voltage is 300 V, which is positively related to bias voltage. In order to further analyze the single particle effect mechanism of device, the simulation is conducted by using TCAD tool. The simulation results show that at low bias voltage, the heavy ion incident device generates electron-hole pairs, the electrons are quickly swept out, and the holes accumulate at the gate oxygen corner under the effect of the electric field, which combines the source-drain bias voltage, leading to the formation of leakage current channels in the gate oxygen layer. The simulation results also show that at high bias voltage, the electrons generated by the incident heavy ion move towards the junction of the N⁻ drift layer and the N⁺ substrate under the effect of the electric field, which further increases the electric field strength and causes significant impact ionization. The local high current density generated by the impact ionization and the load large electric field causes the lattice temperature to exceed the melting point of silicon carbide, causing single event burnout. This work provides a reference and support for studying the radiation effect mechanism and putting silicon carbide power devices into aerospace applications.

Keywords: SiC double-trench metal-oxide-semiconductor field-effect transistors, heavy ion irradiation, single event burnout

PACS: 61.82.Fk, 71.55.Eq, 73.20.-r, 85.30.Tv

DOI: [10.7498/aps.73.20231440](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231440)

† Corresponding author. E-mail: guohongxia@nint.ac.cn



双沟槽SiC 金属-氧化物-半导体型场效应管重离子单粒子效应

李洋帆 郭红霞 张鸿 白如雪 张凤祁 马武英 钟向丽 李济芳 卢小杰

Heavy ion single event effect in double-trench SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistors

Li Yang-Fan Guo Hong-Xia Zhang Hong Bai Ru-Xue Zhang Feng-Qi Ma Wu-Ying Zhong Xiang-Li
Li Ji-Fang Lu Xiao-Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 026103 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231440

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231440>

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

U型槽刻蚀工艺对GaN垂直沟槽型金属-氧化物-半导体场效应晶体管电学特性的影响

Effect of U-shape trench etching process on electrical properties of GaN vertical trench metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2020, 69(9): 098501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191850>

绝缘体上硅金属氧化物半导体场效应晶体管中辐射导致的寄生效应研究

Radiation induced parasitic effect in silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2018, 67(21): 216102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181372>

短沟道金属-氧化物半导体场效应晶体管的散粒噪声模型

Shot noise model of the short channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2020, 69(17): 177102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200497>

纳米尺度金属-氧化物半导体场效应晶体管沟道热噪声模型

A channel thermal noise model of nanoscaled metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2020, 69(5): 057101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191512>

空间用GaN功率器件单粒子烧毁效应激光定量模拟技术研究

Research on Single Event Burnout of GaN power devices with femtosecond pulsed laser

物理学报. 2022, 71(13): 136102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212297>

一个圆柱形双栅场效应晶体管的物理模型

A physical model of cylindrical surrounding double-gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2021, 70(15): 157302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202156>