

文章编号: 2095-4980(2022)09-0884-13

SiC JBS 二极管和 SiC MOSFET 的空间辐照效应及机理

张 鸿¹, 郭红霞^{*2}, 顾朝桥¹, 柳奕天¹, 张凤祁², 潘霄宇², 琚安安¹, 刘 晔¹, 冯亚辉¹

(1.湘潭大学 材料科学与工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2.西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 基于第六代 650 V 碳化硅结型肖特基二极管(SiC JBS Diode)和第三代 900 V 碳化硅场效应晶体管(SiC MOSFET), 开展 SiC 功率器件的单粒子效应、总剂量效应和位移损伤效应研究。20~80 MeV 质子单粒子效应实验中, SiC 功率器件发生单粒子烧毁(SEB)时伴随着波浪形脉冲电流的产生, 辐照后 SEB 器件的击穿特性完全丧失。SiC 功率器件发生 SEB 时的累积质子注量随偏置电压的增大而减小。利用计算机辅助设计工具(TCAD)开展 SiC MOSFET 的单粒子效应仿真, 结果表明, 重离子从源极入射器件时, 具有更短的 SEB 发生时间和更低的 SEB 阈值电压。栅-源拐角和衬底-外延层交界处为 SiC MOSFET 的 SEB 敏感区域, 强电场强度和高电流密度的同时存在导致敏感区域产生过高的晶格温度。SiC MOSFET 在栅压偏置($U_{GS}=3$ V, $U_{DS}=0$ V)下开展钴源总剂量效应实验, 相比于漏压偏置($U_{GS}=0$ V, $U_{DS}=300$ V)和零压偏置($U_{GS}=U_{DS}=0$ V), 出现更严重的电学性能退化。利用中电电压法分析发现, 栅极偏置下氧化层内的垂直电场提升了陷阱电荷的生成率, 加剧了阈值电压的退化。中子位移损伤会导致 SiC JBS 二极管的正向电流和反向电流减小。在漏极偏置下进行中子位移损伤效应实验, SiC MOSFET 的电学性能退化最严重。该研究为空间用 SiC 器件的辐射效应机理及抗辐射加固研究提供了一定的参考和支撑。

关键词: 碳化硅结型肖特基二极管; 碳化硅场效应晶体管; 单粒子烧毁; 计算机辅助设计; 总剂量效应; 位移损伤效应

中图分类号: TN31

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021444

Radiation effects of SiC JBS diodes and SiC MOSFETs

ZHANG Hong¹, GUO Hongxia^{*2}, GU Zhaoqiao¹, LIU Yitian¹, ZHANG Fengqi², PAN Xiaoyu²,
JU Anan, LIU Ye¹, FENG Yahui¹

(1.School of Material Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China;

2.Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

Abstract: Based on the sixth-generation 650 V SiC Junction Barrier Schottky(SiC JBS) diode and the third-generation 900 V Silicon Carbide Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect-Transistor(SiC MOSFET), the single event effect, total dose effect and displacement damage effect of SiC power devices are studied. In the 20~80 MeV proton single event effect experiment, the Single Event Burnout (SEB) of SiC power device is accompanied by the generation of wave-shaped pulse current, and the breakdown characteristics of SEB devices are completely lost after irradiation. The accumulated proton fluence that induces SEB in SiC power devices decreases with the increase of bias voltage. In the single event effect simulation of SiC MOSFET, when heavy ions are incident on the device from the source, there exit a shorter SEB occurrence time and a lower SEB threshold voltage. The gate-source corner and the substrate-epitaxial layer junction are SEB sensitive regions of SiC MOSFET. The coexistence of strong electric field strength and high current density leads to excessive lattice temperature in the sensitive regions. When studying Co⁶⁰ source total dose effect for SiC MOSFETs at gate bias ($U_{GS}=3$ V, $U_{DS}=0$ V), more serious electrical characteristics degradation occurs compared to at drain bias($U_{GS}=0$ V, $U_{DS}=300$ V)

收稿日期: 2021-12-30; 修回日期: 2022-04-26

*通信作者: 郭红霞 email:guohxnint@126.com

and zero voltage bias ($U_{GS}=U_{DS}=0$ V). Using the middle-band voltage method, it is found that the vertical electric field in the oxide layer under gate bias increases the generation rate of trapped charges and exacerbates the degradation of threshold voltage. The neutron displacement damage leads to the reduction of forward and reverse currents in SiC JBS diodes. The neutron displacement damage effect experiments are carried out under the drain bias, and the electrical characteristics of SiC MOSFET are degraded the most significantly. This work provides a certain reference and support for the research on the radiation effect mechanism and radiation hardening of SiC devices for space application.

Keywords: SiC Junction Barrier Schottky diode; Silicon Carbide Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect-Transistor; Single Event Burnout; Technology Computer Aided Design; total dose effect; displacement damage effect

随着生产工艺逐渐成熟和生产成本的逐渐降低, SiC 功率器件的优势日益凸显。相比于硅基功率器件, SiC 器件的使用能明显地降低整体功耗, 减小系统体积, 以及增大功率密度。同为宽禁带半导体的氮化镓功率器件在工作温度、散热性能、导通电阻等方面相比于硅基器件也具有较大优势, 但碳化硅器件具有更高的工作电压, 更适合在大功率环境中使用。目前在电动汽车的车载充电器、直流变压器以及电机驱动中都开始使用碳化硅功率器件。SiC 器件的优势也使其在深空探测方面具有巨大的应用潜力。SiC 器件优异的耐高温性能, 能够大幅减少航天器附加的降温装置而带来的额外成本^[1-2]。

空间环境中存在的各种射线和粒子, 会对 SiC 器件的性能产生影响。空间环境中的辐照效应可以大致分为三大类: 总剂量效应、单粒子效应、位移损伤。SiC 器件的辐照效应严重制约了其在空间领域的应用。目前商用的 SiC 器件主要为中低压的二极管和 MOSFET, SiC 器件的辐照效应研究也主要集中于这 2 种器件。SiC 二极管的结构比较简单, 无论是肖特基接触还是欧姆接触都属于金属-半导体接触, 本征的界面缺陷较少。由于氧化层的存在, SiC MOSFET 具有较强的总剂量效应敏感性。利用 γ 射线和 X 射线等, 研究者对 SiC MOSFET 的总剂量效应展开了一系列研究, 分析了 SiC MOSFET 的退化现象和退化机理^[3-9]。总剂量效应最终可以归结于界面效应, 而位移损伤效应则是体效应。无论是从实验还是理论, 研究者们对 SiC 器件的位移损伤效应及机理都开展了研究^[10-14]。单粒子效应会导致 SiC 器件出现漏电流增大, 严重时发生单粒子栅穿和单粒子烧毁^[15-20]。材料的改变导致 SiC 器件的辐照效应不同于硅基器件, SiC 器件本身的结构变化和工艺改进等也影响着 SiC 器件的辐照效应与辐照机理研究。伴随着器件更新换代, 新一代的器件具有更优异的性能, 在应用中更能够发挥 SiC 器件的优势。目前在 SiC 器件的单粒子效应研究中缺乏对器件敏感性系统的研究, SiC 器件的质子单粒子效应也缺少足够的数据支撑。在 SiC 器件的总剂量效应研究中, 对于器件正常工作时的不同工作状态, 其最恶劣工作偏置尚不明确。SiC 材料较高的热导率使得 SiC 器件在高温环境中应用时具有较大的优势, SiC 器件在高温下的总剂量效应及退化效应有待系统的研究。现有的研究表明 SiC 器件具有较强的抗位移损伤效应能力, 不同类型和不同工作状态下的 SiC 器件在极端中子辐照条件下的位移损伤效应有待研究。

基于现有的研究, 利用 CREE 公司制造的第六代 650 V SiC JBS 二极管和第三代 900 V SiC MOSFET, 开展了单粒子效应、总剂量效应和位移损伤效应研究。单粒子效应研究方面, 利用西安 200 MeV 质子反应装置, 开展了 SiC MOSFET 和 SiC JBS 二极管的质子单粒子效应实验, 同时基于蒙特卡罗模拟和计算机辅助设计(TCAD)仿真开展了 SiC MOSFET 单粒子效应敏感性的多尺度模拟研究。利用钴源装置, 开展了不同温度、不同偏置电压和不同剂量下的 SiC MOSFET 总剂量效应研究。利用脉冲中子反应堆, 开展了不同偏置条件下的 SiC JBS 二极管和 SiC MOSFET 的位移损伤效应研究。

1 SiC 器件单粒子效应

1.1 SiC 器件的质子单粒子效应

本文选用的 CREE 公司制造的第六代 650 V SiC JBS 二极管和第三代 900V SiC MOSFET, 2 种 SiC 器件的基本结构如图 1 所示。SiC MOSFET 的阈值电压约为 2.1 V, 击穿电压约为 1 300 V, 额定电流为 23 A。SiC JBS 二极管的击穿电压约为 800 V, 额定电流为 10 A。2 种 SiC 器件都是垂直沟道器件。

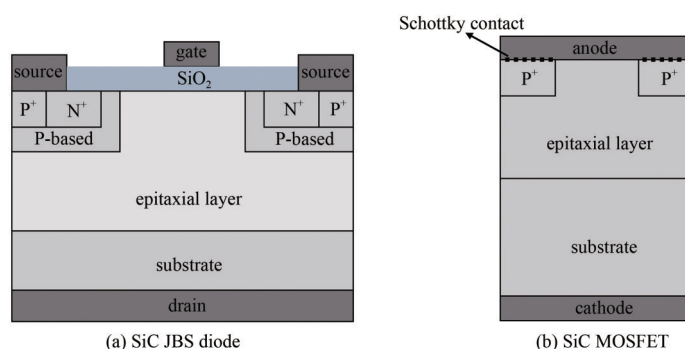


Fig.1 Schematic diagram of SiC device

图1 SiC 器件结构示意图

空间环境中的质子入射 SiC 功率器件, 可能导致器件发生退化甚至烧毁。基于 CREE 公司制造的第六代 650 V JBS SiC 二极管和第三代 900 V SiC MOSFET, 在西安质子脉冲反应堆上开展了 SiC 器件的质子单粒子效应研究^[21]。利用降能片对初始质子束做降能处理, 可以实现 20 MeV, 40 MeV, 60 MeV, 80 MeV 和 100 MeV 一系列质子能量下的 SiC 器件单粒子效应研究。质子单粒子效应实验中的质子注量率在 $1 \times 10^7 \sim 9 \times 10^8 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 粒子束斑为 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 的正方形。在质子实验中对 SiC 器件施加不同偏置电压如图 2 所示, 在施加偏置电压的同时进行单粒子烧毁实时监测。质子本身在穿过 SiC 器件时, 能量沉积较少, 即使是核反应产生次级粒子, 其线性传输能量 (Line Energy Transfer, LET) 值也较低。因此, 实验中选取偏置电压都大于器件额定电压的 50%。使用高压直流电源 U_{DC} 对 SiC 功率器件施加偏置电压。电容 C 用于防止过大的电流脉冲损坏直流电压源, 保护电阻 R_{protect} 用于限制最大直流电流, 电容和保护电阻大小分别为 $0.01 \mu\text{F}$ 和 $200 \text{ k}\Omega$ 。电阻 R_2 和 R_3 与实验器件并联, 2 个电阻的阻值分别为 $100 \text{ M}\Omega$ 和 $200 \text{ k}\Omega$ 。器件未烧毁时, 可用示波器测得电阻 R_3 两端有一定电压, 一旦器件发生烧毁, 电阻 R_2 和 R_3 所在的支路发生短路。通过设置示波器下降沿触发可以捕获失效事件的发生, 同时将示波器另一通道接入阻值为 1Ω 的电阻 R_1 两端, 可以捕获并存储烧毁时器件的瞬态脉冲电流。数字万用表根据电流大小可自动调节量程, 且具有较高的测量精确度, 用于监测烧毁时电流跨越多个数量级的变化。实验时施加的电压偏置最大接近 1000 V , 为了防止电阻烧坏选用的电阻要求有足够大的功率。所有器件的质子辐照实验均在室温下进行。不同偏置电压下 SiC JBS 二极管和 SiC MOSFET 的单粒子烧毁情况如图 3 所示, SiC 器件烧毁前漏电流均小于 $1 \mu\text{A}$, 发生单粒子烧毁时, 电流瞬间增大至保护电阻限制电流, 偏置电压快速转移到保护电阻上。

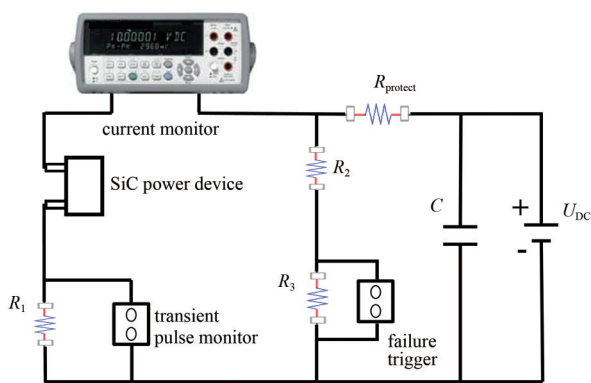


Fig.2 Test circuit diagram of proton irradiation experiment
图2 质子辐照实验测试电路图

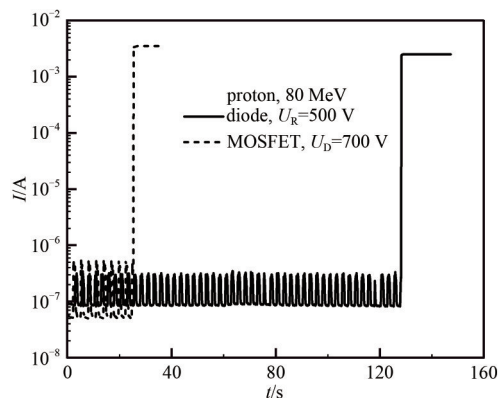


Fig.3 The SEB real-time current of two kinds of SiC devices
图3 两种 SiC 器件的单粒子烧毁实时电流变化

万用表的精确度无法满足监测器件瞬态电流的要求, 示波器的高分辨力可以用于监测瞬态电流。烧毁发生时检测到 SiC JBS 二极管和 SiC MOSFET 的瞬态脉冲电流如图 4 所示。图中 SiC JBS 二极管发生烧毁时其脉冲电流持续的时间约为 $5 \mu\text{s}$, 脉冲电流呈波浪形且峰值逐渐减小。SiC JBS 二极管的偏置电压为 500 V 时其脉冲电流最大接近 10 A 。SiC MOSFET 发生烧毁时具有和 SiC JBS 二极管类似的瞬态脉冲电流。SiC MOSFET 具有更高的偏置电压, 在发生烧毁时其脉冲电流峰值更大。

击穿特性是功率器件的重要特性之一。对单粒子烧毁的器件进行电学特性测试。SiC JBS 二极管和 MOSFET 击穿特性如图 5 所示。发生单粒子烧毁后 SiC 器件均丧失击穿特性, 不再具备应有的开关特性。

图 2 所示的测试电路中, 利用 $200 \text{ k}\Omega$ 的电阻限制电路电流, 防止电流过大损坏电源。图 6 为设计的保护电路, 期望阻止 SiC 器件发生单粒子烧毁。图 6(a)中将保护电阻增大至 $10 \text{ M}\Omega$, 图 6(b)中添加电感充当大电阻, 并将 R_2 改为电容。图 6(a)所示方法在 SiC 器件中子单粒子效应实验中可以起到保护作用^[22]。将质子注量率调整至质子装置最小值, 约 $1 \times 10^7 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 利用图 6 所示电路开展 SiC JBS 二极管和 SiC MOSFET 质子单粒子效应实验。在同样的偏置条件下, SiC 器件的烧毁累积注量与原测试电路的烧毁累积注量相同。同时, 利用图 6 所示电路测试得到的烧毁瞬态脉冲电流与图 2 所示测试电路测试的结果基本一致, 如图 7 所示。电感测试电路中由于通道电压量程设置问题, 导致峰值未能显示, 但脉冲电流整体趋势和原电路测试结果一致。中子和质子引起单粒子烧毁主要靠核反应产生的次级离子与器件材料相互作用。不同于初级重离子的长程且连续, 核反应产生的次级离子主要在器件局部区域运动并沉积能量, 这也导致了质子和中子的 LET 值较低。进一步地, 质子和中子诱发 SiC 器件发生单粒子烧毁的偏置电压较高, 一旦核反应发生, 其产生的能量沉积足以导致单粒子烧毁。所以, 目前在中子和质子辐照实验中, 未发现类似重离子辐照的漏电流增长现象。实验选用的 SiC JBS 二极管和 SiC MOSFET, 其有源区面积都不超过 0.02 cm^2 , 芯片有源区入射的质子数少于 2×10^9 个。在实验选取的 5 种质子能量

下, 当SiC JBS二极管和SiC MOSFET的实验偏置电压分别为400 V和600 V时, 辐照过程中2种器件的电流没有明显变化。在 $1 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$ 的累积质子注量下, 辐照前后2种碳化硅器件的电学性能也没有发生变化。20~100 MeV的质子, 其能量足够穿过碳化硅器件, 其电离能量损失和非电离能量损失主要来自次级离子, 而且非电离能量损失只占次级离子能量损失的很小一部分。20~100 MeV的质子入射硅时, 大约每 10^5 个质子才有一个可能与硅发生核反应^[23], 碳化硅被认为比硅具有更好的抗辐射性能。当偏置电压不足以引起单粒子烧毁时, 核反应次级离子产生的电离能量损伤会引起瞬态电流变化, 但由于瞬态脉冲电流峰值和脉宽都较小, 且实验中为了避免噪声波动引起误触发, 示波器设置的触发电流较高, 台式万用表的监测分辨力达不到微秒级, 故在低偏置电压实验中未观察到电流变化。在累积质子注量为 $1 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$ 时, 2种碳化硅器件受到的质子位移损伤是有限的, 因此2种器件的电学性能都未发生改变。

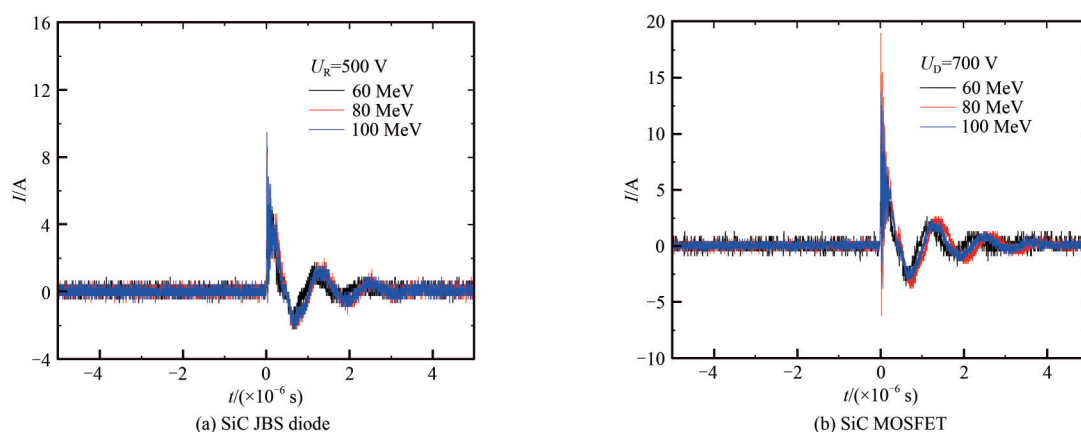


Fig.4 Transient pulse current when SEB occurs

图4 烧毁发生时的瞬态脉冲电流

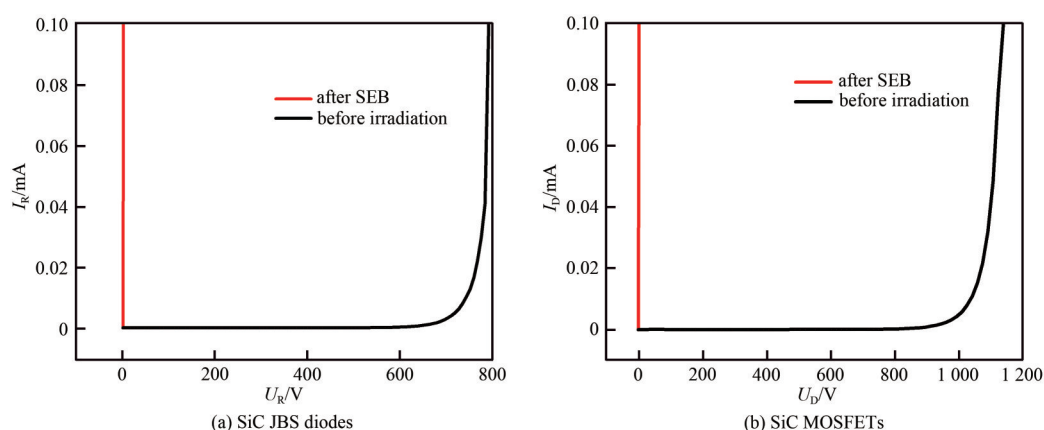


Fig.5 Changes in reverse characteristics of silicon carbide devices after burnout

图5 SiC器件烧毁后反向特性的变化

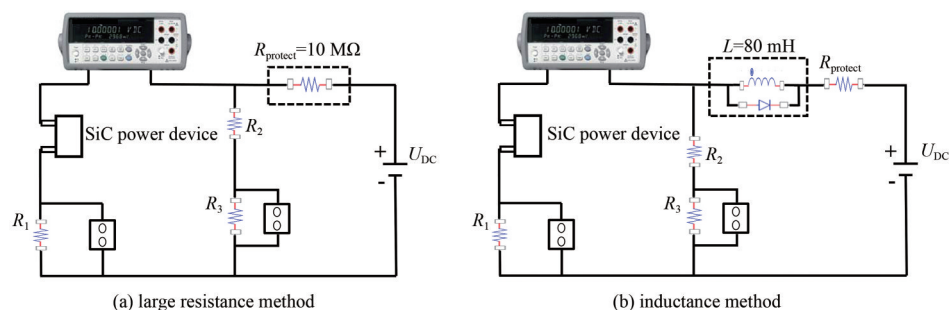


Fig.6 SEB test circuit

图6 单粒子烧毁测试电路

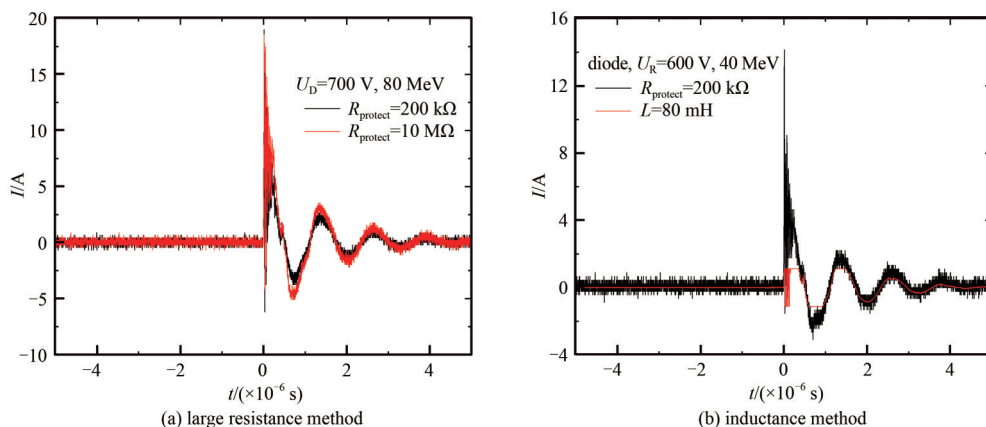


Fig.7 SEB transient pulse current
图7 单粒子烧毁瞬态脉冲电流

1.2 SiC MOSFET 单粒子效应敏感性仿真

高能质子和中子引起的 SiC 器件的退化和烧毁主要是由高能质子和中子与器件材料发生核反应产生的次级离子导致的。为了直观地分析 SiC 器件的单粒子效应敏感性，在单粒子效应敏感性研究中选用重离子作为入射粒子。目前国内重离子源种类多样且能量范围广泛，但 SiC 器件元胞只有几微米到十几微米，对重离子微束装置分辨力要求较高，同时重离子微束实验成本过高。采用计算机仿真对 SiC 器件的单粒子效应敏感性开展多尺度的模拟研究。对比了不同能量、不同种类的重离子在 SiC 器件中的能量沉积种类和来源，电离能量损失占主要部分^[24]。SiC 器件在无偏置电压下进行重离子辐照，在 $1 \times 10^7 \text{ n/cm}^2$ 的重离子累积剂量下器件的电学性能没有任何变化。偏置电压在单粒子烧毁和漏电流增长过程中起至关重要的作用。利用 TCAD 模拟得到不同电压下 SiC 器件外延层的电场，并将电场引入蒙特卡罗模拟。电场只有在重离子射程末端其能量较低时能略微地影响其运行轨迹，在高剂量的重离子致损伤缺陷研究中可能会产生明显的影响。从单粒子烧毁角度来看，电场对能量沉积的产生和分布影响不大。

利用蒙特卡罗方法模拟得到重离子能量损失的时间和空间分布^[25]。重离子和次级电子的能量损失被综合考虑，以得到较为精确的电荷分布作为器件仿真输入文件。如图 8 所示，利用蒙特卡罗模拟得到 SiC 材料中的能量沉积密度分布。图中是 1 000 个初始位置和方向相同的重离子的模拟结果。随着入射深度的增加，重离子运动方向有略微偏移，但较高的能量沉积主要集中在 500 nm 的半径范围内。SiC 中的能量沉积密度最大接近 $1 \times 10^{16} \text{ MeV/cm}^3$ 。

器件仿真利用 TCAD 工具展开，建立 SiC MOSFET 的二维器件模型如图 9 所示，仿真器件的额定电压为 900 V。在模拟中主要考虑器件的电热特性，首先修正了 SiC 材料的热容、热阻参数^[26-28]。模拟不同入射位置下器件的电热响应。位置 1 是直接进入 SiC 外延层；位置 2 是穿过沟道后进入外延层；位置 3 是穿过源极 N 型区，再进入沟道 P 型区，最后进入外延层；位置 4 是类似体二极管的路径，由沟道 P 型区进入外延层。

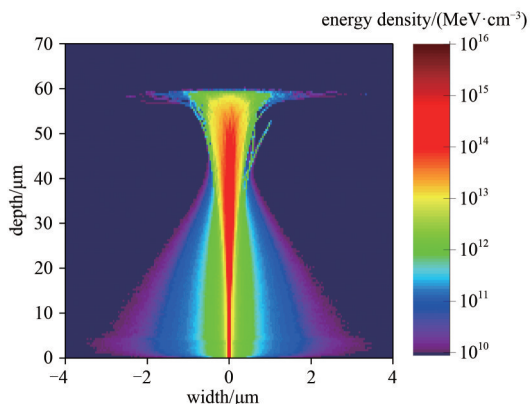


Fig.8 Energy deposition density distribution in silicon carbide
图8 SiC 中的能量沉积密度分布

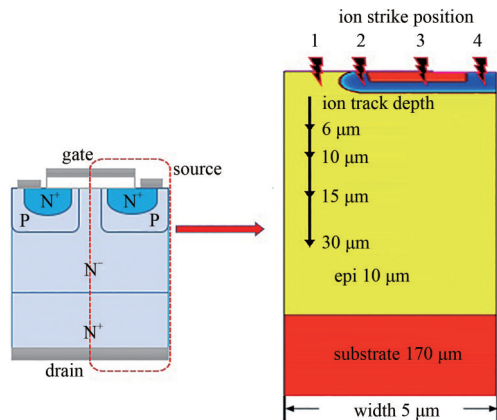


Fig.9 Schematic diagram of TCAD simulation of silicon carbide MOSFET
图9 SiC MOSFET 的 TCAD 模拟示意图

不同入射位置下 SiC 材料的晶格温度时间和空间分布如图 10 和图 11 所示。高偏置电压下晶格不同入射位置都能达到临界烧毁温度 T_c , 随偏置电压的降低不同入射位置的差异出现。器件内部的初始烧毁位置有可能出现在栅源交界处, 也可能在衬底与外延层的交界处。图 12 是不同入射深度下的 SiC MOSFET 的电热响应。入射深度明显影响了器件内部的电热响应, 入射深度的减小对应着在皮秒量级内电荷沉积的量减少, 瞬时电流密度也随之减小。而偏置电压的减小, 意味着器件内部的电场强度减小。另一方面 LET 值的减小也和入射深度减小类似, 最终导致电流密度降低。而电流密度和电场强度在局部区域过大, 引起热功率过高, 无法及时耗散, 这可能是导致器件烧毁出现的原因^[29]。从位置 3 入射的重离子直接穿过了器件源漏导通时的完整电流路径, 这导致从位置 3 入射时相比其他 3 种入射位置具有较强的电热效应。

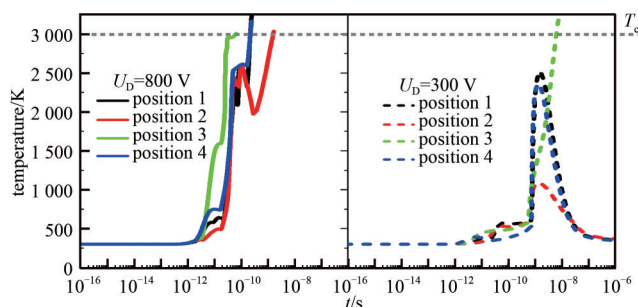


Fig.10 Change of lattice temperature with time at different incident positions

图 10 不同入射位置下晶格温度随时间的变化

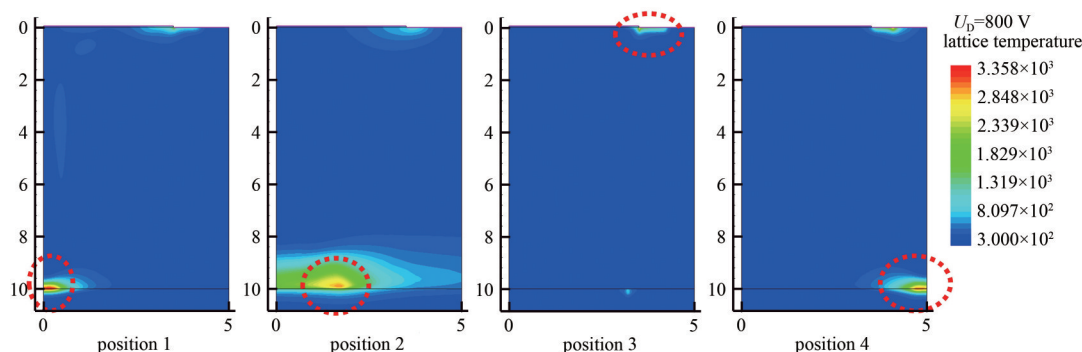


Fig.11 Spatial distribution of lattice temperature at different incident positions

图 11 不同入射位置下晶格温度的空间分布

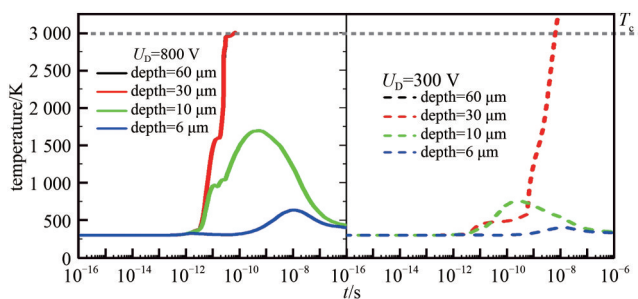


Fig.12 Electrothermal response at different incident depths

图 12 不同入射深度下的电热响应

2 SiC MOSFET 总剂量效应

2.1 建立总剂量实验

现有的研究表明 SiC 二极管具有较强的抗总剂量效应能力^[30], 故未开展 SiC 二极管的总剂量效应实验。在开展不同偏置下的总剂量辐照实验之前, 首先需要对实验所用的 SiC MOSFET 进行各项电学参数测试, 选择性能正常且一致性较好的器件作为实验的样品器件。SiC MOSFET 的总剂量效应实验选取了 3 组不同的偏置条件, 分别是栅压偏置、漏压偏置以及零压偏置, 在整个辐照过程中选取了 5 个不同的剂量点, 分别为 50 krad(Si), 150 krad(Si), 250 krad(Si), 300 krad(Si), 500 krad(Si)。当累积剂量达到设定的剂量点后迅速取出器件, 并进行各项电学性能测

试，完成测试后将器件归位至辐照板继续辐照，待累积剂量达到下一设定剂量点时重复上述过程。温度和退火效应都会影响辐照损伤的准确评估^[31]。为了保证实验所得数据的可靠性，每个剂量点的测试都在停止辐照后的 1 h 内完成，整个辐照实验以及辐照前后的测试都在常温下进行。总剂量辐照实验前后用半导体参数分析仪对器件的各项电学参数进行测量，不同偏置下的总剂量辐照实验条件见表 1。

表 1 不同偏置下的总剂量辐照实验条件

Table1 Experimental conditions of total dose irradiation under different biases

bias condition	total does/krad(Si)	temperature
gate bias($U_{GS}=3\text{ V}$)	500	room temperature
drain bias($U_{DS}=300\text{ V}$)	500	room temperature
zero bias($U_{GS}=U_{DS}=0\text{ V}$)	500	room temperature

2.2 总剂量实验结果与分析

通过分析不同偏置下 SiC MOSFET 辐照前后的电学参数，发现辐照后 SiC MOSFET 的直流特性都发生了不同程度的变化。栅压偏置下，SiC MOSFET 辐照前后的输出特性曲线如图 13 所示，从图中的结果可以看出，随着累积剂量的增加，器件的整个输出特性曲线的漂移量明显增大，无论是线性区还是饱和区，器件的漏源电流都发生了明显的增加。

栅压偏置下，SiC MOSFET 的转移特性曲线以及跨导曲线随着辐照累积剂量的变化情况，如图 14 所示。从图中展示的结果可以看出，当辐照累积剂量为 50 krad(Si)时，SiC MOSFET 的转移特性曲线出现负漂，器件电学性能发生轻微退化，但随着辐照累积剂量的不断增加，器件电学参数的退化程度越来越大。通过辐照过程中跨导曲线的变化情况可以看出，辐照前后器件的最大跨导没有明显的变化，但是辐照前后最大跨导对应栅压发生了漂移，说明总剂量辐照后器件沟道载流子的迁移率没有发生改变^[31]。图 15 是栅压偏置下，辐照前后 SiC MOSFET 的击穿特性曲线，从图中看出，当辐照累积剂量达到 500 krad(Si)时器件的击穿电压没有明显减小，耐压性能没有发生明显退化。

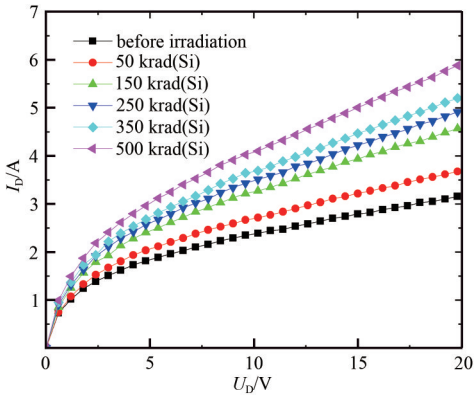


Fig.13 Variation of output characteristic curves of SiC MOSFET under gate voltage bias with increasing cumulative dose during irradiation
图 13 栅压偏置下 SiC MOSFET 输出特性曲线随辐照时累积剂量增加的变化

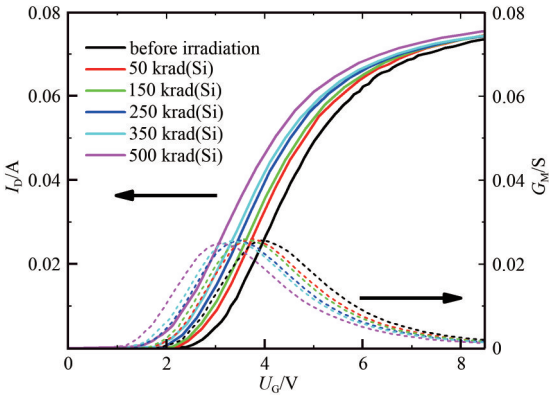


Fig.14 Transfer characteristic curves and the transconductance curves of the SiC MOSFET device under the gate voltage bias with the increase of the cumulative dose during irradiation
图 14 栅压偏置下 SiC MOSFET 的转移特性曲线以及跨导曲线随着辐照时累积剂量增加的变化

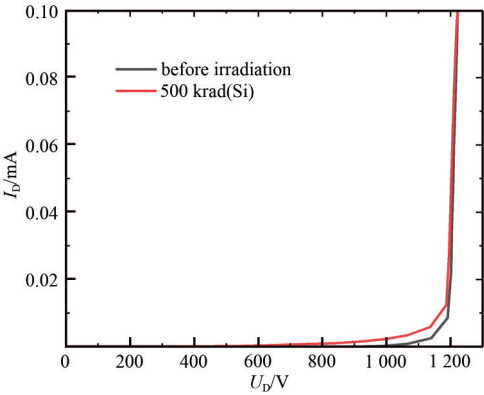


Fig.15 Changes in breakdown characteristics of SiC MOSFET under gate voltage bias after irradiation
图 15 栅压偏置下 SiC MOSFET 辐照后击穿特性的变化

通过对比不同偏置下 SiC MOSFET 辐照前后的退化程度，发现辐照过程中的偏置条件对辐照后器件的退化程度有明显的影响。图 16 展示了不同偏置下，SiC MOSFET 辐照前后亚阈值区域的转移特性曲线，从图中可以看出，当辐照累积剂量达到 500 krad(Si)时，器件的转移特性曲线都发生了明显的负向漂移，且栅压偏置下器件辐照后的转移特性曲线的漂移程度最大。图 17 展示了不同偏置下，辐照过程中器件阈值电压随辐照累积剂量的变化情况，从图中结果可以看出，随着累积剂量的增加，器件的阈值电压都有明显的漂移，但漂移程度存在明显

的差别,当辐照剂量达到 500 krad(Si)时,栅压偏置条件下,辐照后器件的阈值电压漂移了 0.8 V,变化程度高达 35%,而漏压偏置和零压偏置下,辐照后器件的阈值电压漂移变化程度为 20% 和 12%。图 18 展示了不同偏置条件下 SiC MOSFET 关态漏电流随累积剂量的变化规律。辐照过程中施加栅压偏置时,器件的关态漏电流会随着累积剂量增加而发生明显变化。当辐照的累积剂量达到 500 krad(Si)时,器件的关态漏电流增加了 3 个数量级,使器件静态功耗增加。

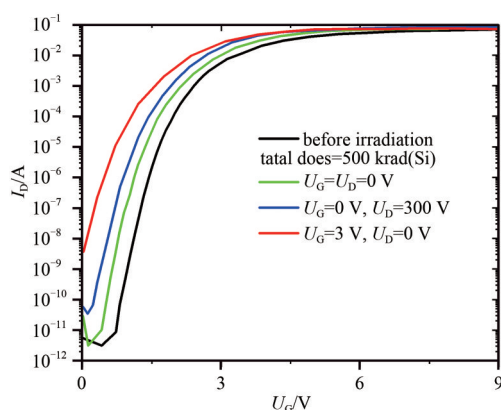


Fig.16 Changes in the subthreshold transfer curves of SiC MOSFET under different biases after irradiation

图 16 不同偏置下 SiC MOSFET 辐照后亚阈值转移曲线的变化

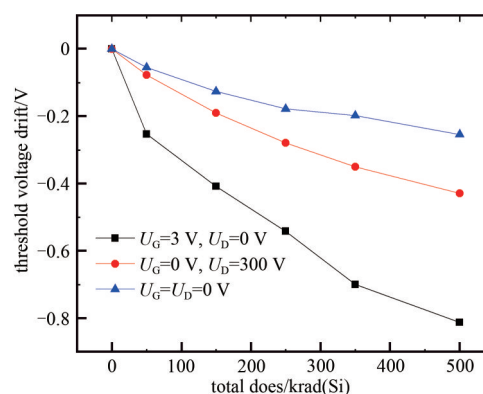


Fig.17 Changes in threshold voltage of SiC MOSFET under different biases after irradiation

图 17 不同偏置下 SiC MOSFET 辐照后阈值电压的变化

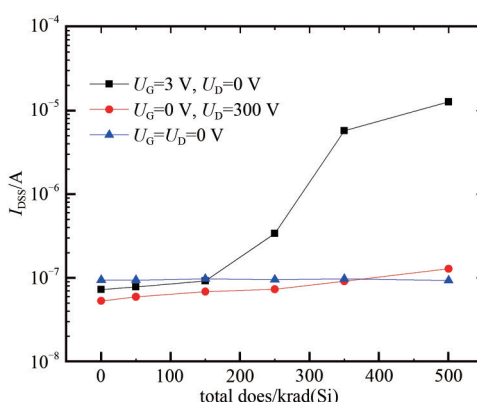


Fig.18 Off-state leakage current varying with the accumulated dose under different biases

图 18 不同偏置下关态漏电流随累积剂量变化

根据实验结果可以看出,总剂量效应主要对 SiC MOSFET 的静态电学参数产生了明显的影响,其中包括器件的阈值电压减小、饱和源漏电流增加等;同时也发现了栅压偏置($U_{GS}=3$ V)是 SiC MOSFET 辐照过程中的最恶劣偏置,相较于漏压偏置($U_{DS}=300$ V)和零压偏置($U_{DS}=U_{GS}=0$ V),栅压偏置下器件的各项电学参数退化程度最大。

总剂量效应造成 SiC MOSFET 退化的主要原因是辐照在器件栅氧化层中感生出陷阱电荷。 γ 射线入射 SiC MOSFET 时,有一部分能量沉积在栅氧化层中。当沉积的能量大于材料的禁带宽度时,部分被束缚的电子会吸收入射粒子沉积的能量,当吸收的能量足够大时,电子会从价带跃迁到导带,并在导带底部产生一个游离电子,同时在价带顶部出现一个空穴。此时,位于导带的电子和价带失去电子产生的空穴就会形成电子-空穴对。栅氧化层中的电子-空穴对可能有一部分发生复合,未复合的部分继续存在于栅氧化层中。由于电子在栅氧化层中的迁移率远大于空穴,因此在外加电场的作用下,电子会在很短时间被扫出栅氧化层。逃脱初始复合的空穴则会缓慢地向着 SiC/SiO₂ 界面处运动,一部分空穴被栅氧化层中的一些陷阱捕获,形成氧化物陷阱电荷。运动到 SiC/SiO₂ 界面处的空穴被界面陷阱捕获,形成界面陷阱电荷。对于实验所用的 N 沟道 SiC MOSFET 来说,氧化物陷阱电荷会导致器件的阈值电压负漂,界面态电荷会导致器件的阈值电压正漂。分析认为,本次辐照实验后器件阈值电压的漂移可能是氧化物陷阱电荷和界面态电荷共同导致的。

想要深入揭示 SiC MOSFET 总剂量效应的物理机理,需要准确计算出辐照在器件栅氧化层内部感生的氧化物陷阱电荷以及界面态陷阱电荷的浓度。利用中带电压法,可以精确计算出辐照感生的氧化物陷阱电荷以及界面

态陷阱电荷的浓度。中带电压法使用的基本假设是：a) 阈值电压变化由氧化物陷阱电荷和界面态共同决定，满足式(1)；b) 当 SiC 的费米能级处于禁带中央时，界面态不捕获电荷，认为此时器件阈值电压的漂移量都是由氧化物陷阱电荷引发的，满足式(2)。基于以上假设，氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷对器件阈值电压的贡献量就能准确分离出来。在分离出不同陷阱电荷对器件阈值电压的贡献量之后，可根据式(3)、式(4)准确算出氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷的浓度。其中，获取中带电压时需计算出中带电流，中带电流可由式(5)计算得到，然后在转移特性曲线中找到中带电流所对应的栅压，此时的栅压就是所求的中带电压。

$$\Delta U_{th} = \Delta U_{ot} + \Delta U_{it} \quad (1)$$

$$\Delta U_{ot} = \Delta U_{mg} \quad (2)$$

$$\Delta N_{ot} = \frac{C_{ox} \Delta U_{ot}}{q} \quad (3)$$

$$\Delta N_{it} = \frac{C_{ox} \Delta U_{it}}{q} \quad (4)$$

$$I_{mg} = \frac{\sqrt{2} C_{ox} (U_{gs} - U_{th}) k T L_B n_i \left(\ln \frac{N_A}{n_i} \right)^{-1/2}}{I_{ds}} \quad (5)$$

式中： C_{ox} 为单位面积的栅氧化层电容； k 为常温下的玻兹曼常数； q 为电荷量； T 为温度， L_B 为 SiC 中的德拜长度； n_i 为沟道的载流子浓度； N_A 为 i 沟道的掺杂浓度。

图 19 为不同偏置下，辐照过程中在 SiC MOSFET 栅氧化层中感生的氧化物陷阱电荷以及界面态陷阱电荷随着辐照累积剂量的变化情况。从图中结果可以看出，总剂量效应辐照在 SiC MOSFET 的氧化层中感生出的氧化物陷阱电荷浓度始终随着累积剂量的增加而一直增大；但是界面态陷阱电荷的浓度没有随着累积剂量的增加而发生变化，原因是由于 SiC MOSFET 具有较大的本征界面缺陷，辐照过程中在器件栅氧化层中感生的界面态陷阱电荷的增量不足以引发器件电学参数发生改变。因此，器件氧化层内由于辐照感生的氧化物陷阱电荷是导致 SiC MOSFET 电学特性发生退化的主要原因。随着辐照过程中氧化物陷阱电荷的增加，氧化层中的电场强度急剧增加，导致 P 基区出现反型甚至耗尽，影响栅极对器件的控制能力，形成漏电路径，导致阈值电压减小，关态漏电流增加。

上述结论也很好地解释了 SiC MOSFET 的最大跨导没有随累积剂量的增加而变化的原因。由于辐照后界面态陷阱电荷的浓度没有明显变化，所以器件的沟道载流子在靠近界面处传输时不会受到界面态陷阱电荷的散射作用，沟道载流子的迁移率不会发生改变。器件的跨导由载流子迁移率决定，所以辐照后器件的跨导不会有所变化。

为了解释器件辐照后的退化程度和偏置条件之间的依赖关系，需要了解氧化物陷阱电荷的产额与偏置条件之间的关系，从图 19 可知，栅压偏置下，辐照后氧化物陷阱电荷的浓度最大。根据 γ 射线辐照时器件氧化层中空穴逃脱初始复合的数量与栅氧化层中电场强度的关系可知，栅极电场会影响氧化层中逃脱初始复合的空穴的数量，逃脱初始复合的空穴数随着栅极的电场强度的增加而增大，上文提到了逃脱初始复合的空穴会朝着 SiO_2/SiC 界面处跃迁，并在此过程中会被俘获形成陷阱电荷从而造成器件发生退化。因此，在栅极施加电压意味着有更多的空穴能够逃脱初始复合(相较于零偏和漏压偏置)，则会在氧化层中形成更高浓度的氧化物陷阱电荷，从而增加器件退化程度。对比 100 °C 下的总剂量效应辐照实验，发现 SiC MOSFET 在辐照的过程中发生了退火效应而导致氧化物陷阱电荷降低，且器件辐照时主要存在隧穿效应和热激发 2 种退化方式，其他偏置条件相同时器件在室温下的退化情况比在 100 °C 下更恶劣^[32]。

3 SiC 器件位移损伤效应

SiC 器件的位移损伤效应研究实验在西安脉冲反应堆上进行，该辐射场是中子和伽马射线的混合场，1 MeV

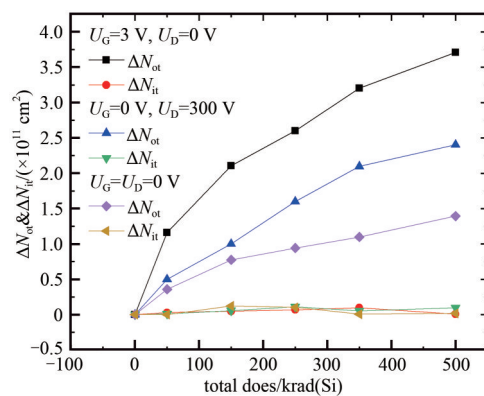


Fig.19 SiC MOSFET trap charge changing with accumulated dose under different biases

图 19 不同偏置下 SiC MOSFET 陷阱电荷随累积剂量的变化

等效中子累积注量 $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 。脉冲反应堆中的屏蔽金属盒可以调节中子和 γ 射线之比(n/γ)。屏蔽金属盒是由 γ 射线吸收材料例如铅金属等制成, 对于 γ 射线有很好的屏蔽作用, 而对中子的屏蔽作用较小, 但是过厚的 γ 射线吸收材料也会影响中子的运动。通过添加不同厚度的 γ 射线吸收材料块体可以达到不同的屏蔽效果, 进而改变反应堆辐照实验中的 n/γ 。本次实验采用的 n/γ 比为 $1.06 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{rad}(\text{Si})$, 注量率为 $3.72 \times 10^{10} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。实验过程中, 反应堆注量达到 $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 即停止辐照, 待辐照环境安全后由专业工作人员取出实验器件, 辐照过程在室温下进行。SiC MOSFET 和 SiC JBS 二极管的结构如图 1 所示。

开展静态、关态、开态 3 种偏置条件下的 SiC MOSFET 中子位移损伤效应实验。开态偏置下, 栅极电压 $U_{\text{GS}} = 3 \text{ V}$, 漏极电压 $U_{\text{DS}} = 2 \text{ V}$ 。漏压偏置下, 栅极电压 $U_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$, 漏极电压 $U_{\text{DS}} = 300 \text{ V}$ 。如图 20 所示, 开态和静态条件下 SiC MOSFET 的阈值电压和跨导退化较小, 漏压偏置下 SiC MOSFET 出现明显的阈值电压增大以及跨导减小。同样地, 如图 21 所示, 漏压偏置下 SiC MOSFET 的输出特性出现明显的退化。不同偏置条件下 SiC MOSFET 的导通电阻变化情况如图 22 所示。开态和静态条件下器件的导通电阻退化程度类似, 而在漏压偏置下器件的导通电阻明显退化严重。漏压偏置下器件的外延层存在较高的电场强度。在强电场影响下, 中子入射诱导器件材料产生的空位-间隙原子对相比于没有电场时更加难以复合, 导致漏压偏置下达到累积注量后器件内的缺陷密度高于开态和静态条件下的缺陷密度, 进而引起器件出现更严重的退化^[33]。

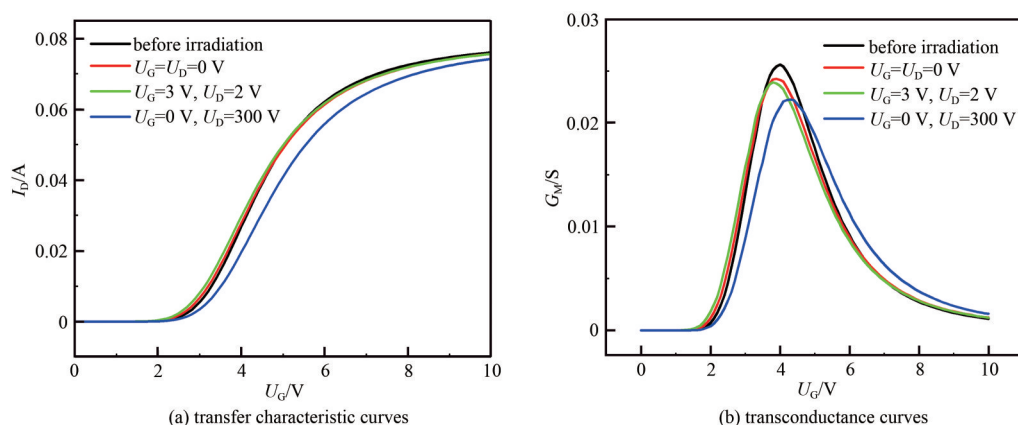


Fig.20 SiC MOSFET device performance

图20 SiC MOSFET 器件性能

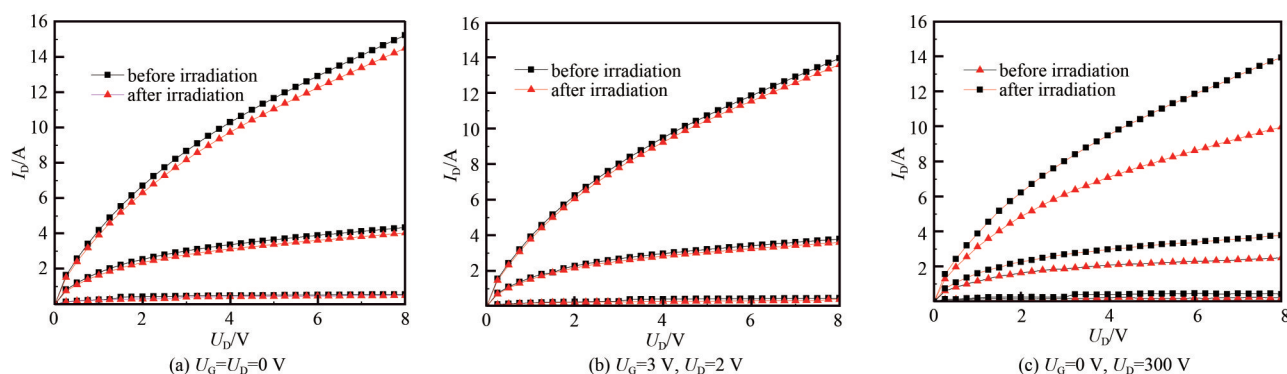


Fig.21 Output curves of SiC MOSFET before and after neutron irradiation under different electrical stress conditions

图21 不同电力条件下 SiC MOSFET 中子辐照前后的输出曲线

由于反应堆装置施加电压偏置有数量限制, 对于 SiC JBS 二极管仅开展了静态偏置条件下的中子辐照实验。SiC JBS 二极管辐照前后的正向特性和反向特性如图 23 所示。SiC JBS 二极管在中子辐照后的正向压降发生了明显上升。在电流为 10 A 时, SiC JBS 二极管的正向压降上升了 30 mV 。中子辐照导致 SiC JBS 二极管的反向漏电流发生了明显的减小, 在反向电压为 300 V 时, SiC JBS 器件的反向漏电流从 29 nA 下降到了 19 nA 。中子辐照在器件内部产生的空位和间隙原子导致了器件电学性能的变化, 导致正向压降上升, 反向漏电流降低。

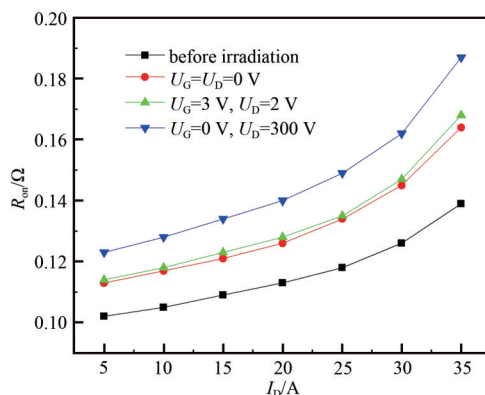


Fig.22 On-resistance of SiC MOSFET devices before and after neutron irradiation under different electrical stresses

图 22 不同电应力下中子辐照前后 SiC MOSFET 器件的导通电阻

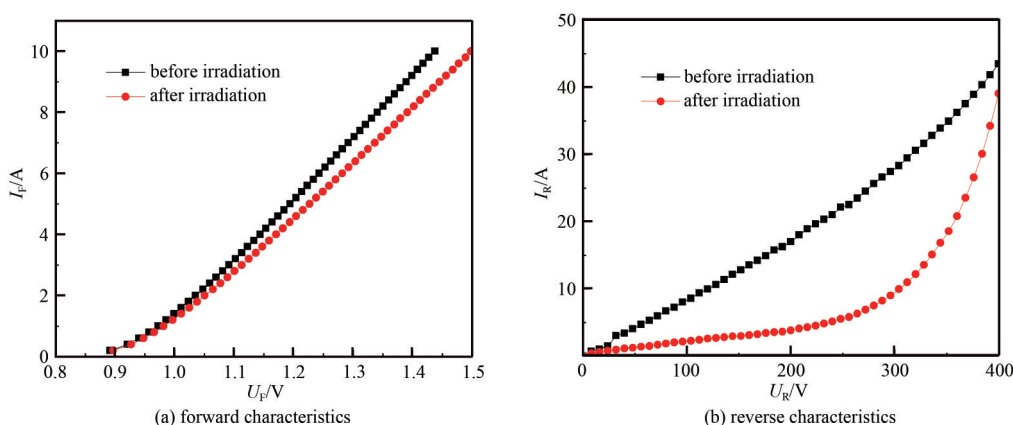


Fig.23 Electrical characteristics of SiC JBS diode before and after neutron irradiation

图 23 中子辐照前后 SiC JBS 二极管的电学特性

4 结论

SiC JBS 二极管和 SiC MOSFET 在 20~80 MeV 质子辐照下发生烧毁时, 器件变为短路状态的过程伴随着波浪形状的脉冲电流产生, 脉冲电流的峰值随时间累积逐渐减小。不同偏置电压和质子能量下 SiC 器件发生 SEB 时的脉冲电流宽度均小于 5 μs 。随着偏置电压的增加, SiC 器件的 SEB 敏感性增加, 导致器件的 SEB 累积剂量下降。SiC JBS 二极管烧坏后的反向击穿电压小于 1 V, 正向导通前的电流比辐照前增加了 8 个数量级。随着正向电压的增加, SiC JBS 二极管烧毁前后的电流差逐渐减小, SiC JBS 二极管仍具有开启特性。偏压为 700 V 的 SiC MOSFET 在烧毁后输出特性部分下降, 而偏压为 800 V 的器件在烧毁后的输出完全丧失。发生 SEB 后 SiC JBS 二极管和 SiC MOSFET 的击穿特性完全丧失。当 SiC JBS 二极管和 SiC MOSFET 的偏置电压分别为 400 V 和 600 V, 在 20~80 MeV 质子辐照下累积剂量达到 $1 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$ 时, 2 种 SiC 器件的电学性能没有发生变化。基于蒙特卡罗方法, 得到 SiC MOSFET 中重离子致能量沉积的时间和空间分布。利用 TCAD 工具模拟了重离子从 4 种不同位置垂直入射 SiC MOSFET 的电热效应, 当重离子从源极上方入射时器件的晶格温度变化最为明显。栅源结区和衬底外延层结区都是 SiC MOSFET 中达到 SEB 临界温度的初始区域。大电流和强电场同时存在造成在 SiC MOSFET 局部区域产生过高的功率耗散, 导致局部区域的晶格温度超过 SiC 材料的熔点。

利用钴源对 SiC MOSFET 器件开展了不同偏置下的总剂量辐照实验。累积剂量达到 500 krad(Si)后器件的阈值电压、饱和漏电流等静态参数发生了明显的退化。辐照在器件氧化层内感生的氧化物陷阱电荷是造成器件阈值电压等参数退化的主要原因, 辐照过程中器件的界面态陷阱电荷没有发生明显变化。辐照时器件的偏置条件对器件的退化程度会产生明显影响, 相较于漏压偏置和零偏, SiC MOSFET 在栅压偏置下辐照后器件的电学参数退化最明显。栅压偏置($U_{GS}=3 \text{ V}$, $U_{DS}=0 \text{ V}$)下 SiC MOSFET 在累积剂量达到 500 krad(Si)时其阈值电压向左漂移了 0.8 V, 关态漏电流增大了约 3 个数量级。栅压偏置能增加逃脱初始复合的空穴的数量, 使得氧化层内空穴俘获数量增加, 最后形成的氧化物陷阱电荷浓度升高, 导致器件退化加剧。利用脉冲反应堆开展 SiC 器件中子辐照效应。3 种偏置条件中, 在漏压偏置($U_{GS}=0 \text{ V}$, $U_{DS}=300 \text{ V}$)下中子剂量达到 $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 时 SiC MOSFET 的阈值电压、

跨导、饱和漏电流和导通电阻退化最严重,存在漏极偏置会加剧SiC MOSFET损伤。在中子注量达到 $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 时,SiC JBS二极管的正向导通电流和反向电流都减小。

参考文献:

- [1] 李效白. SiC和GaN电子材料和器件的几个科学问题[J]. 微纳电子技术, 2004,41(11):1-6. (LI Xiaobai. Several scientific issues of SiC and GaN electronic materials and devices[J]. Micronano Electronic Technology, 2004,41(11):1-6.) doi:10.3969/j.issn.1671-4776.2004.11.001.
- [2] ADELL P. Dose and dose rate effects in microelectronics:pushing the limits to extreme conditions[C]// IEEE NSREC Short Course. Paris,France:IEEE Conference Publishing Services, 2014:65-67.
- [3] DIXIT S K,DHAR S,ROZEN J,et al. Total dose radiation response of nitrided and non-nitrided $\text{SiO}_2/4\text{H-SiC}$ MOS capacitors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006,53(6):3687-3692. doi:https://doi.org/10.1109/TNS.2006.885164.
- [4] AKTURK A,MCGARRITY J M,POTBHARE S,et al. Radiation effects in commercial 1 200 V 24 A silicon carbide power MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013,59(6):3258-3264. doi:https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2223763.
- [5] ZHANG C X,SHEN X,ZHANG E X,et al. Temperature dependence and postirradiation annealing response of the 1/f noise of 4H-SiC MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013,60(7):2361-2367. doi:10.1109/TED.2013.2263426.
- [6] YOKOSEKI T,ABE H,MAKINO T,et al. Recovery of the electrical characteristics of SiC MOSFETs irradiated with gamma-rays by thermal treatments[J]. Materials Science Forum,Switzerland:Trans Tech Publications, 2015(821-823):705-708. doi:https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.821-823.705.
- [7] HAZDRA P,POPELKA S. Radiation resistance of wide-bandgap semiconductor power transistors[J]. Physica Status Solidi, 2017,214(4):1600447-1-8. doi:https://doi.org/10.1002/pssa.201600447.
- [8] MURATA K,MITOMO S,MATSUDA T,et al. Impacts of gate bias and its variation on gamma-ray irradiation resistance of SiC MOSFETs[J]. Physica Status Solidi, 2017,214(4):1600446-1-7. doi:https://doi.org/10.1002/pssa.201600446.
- [9] WASKIEWICZ R J,ANDERS M A,LENAHAN P M,et al. Ionizing radiation effects in 4H-SiC nMOSFETs studied with electrically detected magnetic resonance[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2017,64(1):197-203. doi:https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2622159.
- [10] SCHOEN K P,WOODALL J M,COOPER J A,et al. Design considerations and experimental analysis of high-voltage SiC Schottky barrier rectifiers[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1998,45(7):1595-1604. doi:https://doi.org/10.1109/16.701494.
- [11] MCGARRITY J M,OAKLEY R E,DELANCEY W M,et al. Displacement damage effects in SiC JFETs as a function of temperture[J]. American Institute of Physics, 1993,271(10):609-615. doi:https://doi.org/10.1063/1.43206.
- [12] HAZDRA P,ZÁHLAVA V,VOBECK J. Point defects in 4H-SiC epilayers introduced by 4.5 MeV electron irradiation and their effect on power JBS SiC diode characteristics[J]. Solid State Phenomena, 2014,20(206):451-456. doi:https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.205-206.451.
- [13] 张林,肖剑,邱彦章,等. Ti/4H-SiC肖特基势垒二极管抗辐射特性的研究[J]. 物理学报, 2011,60(5):545-549. (ZHANG Lin, XIAO Jian, QIU Yanzhang, et al. Research on anti-radiation characteristics of Ti/4H-SiC Schottky barrier diodes[J]. Acta Physica Sinica, 2011,60(5):545-549.) doi:CNKI:SUN:WLXB.0.2011-05-083.
- [14] CHAO D S. Influence of displacement damage induced by neutron irradiation on effective carrier density in 4H-SiC SBDs and MOSFETs[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019,58(8):1-8. doi:https://doi.org/10.7567/1347-4065/aafc9b.
- [15] KUBOYAMA S,KAMEZAWA C,IKEDA N,et al. Anomalous charge collection in silicon carbide Schottky barrier diodes and resulting permanent damage and single-event burnout[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006,53(6):3343-3348. doi:https://doi.org/10.1109/TNS.2006.885165.
- [16] WITULSKI A F,ARSLANBEKOV R,RAMAN A,et al. Single-event burnout of SiC junction barrier Schottky diode high-voltage power devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2017,65(1):256-261. doi:https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2782227.
- [17] SHOJI T,NISHIDA S,HAMADA K,et al. Analysis of neutron-induced single-event burnout in SiC power MOSFETs[J]. Microelectronics Reliability, 2015,55(9-10):1517-1521. doi:https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.06.081.
- [18] JAVANAINEN A,GALLOWAY K F,NICKLAW C,et al. Heavy ion induced degradation in SiC Schottky diodes:bias and energy deposition dependence[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016,64(1):415-420. doi:https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2616921.
- [19] JAVANAINEN A,TUROWSKI M,GALLOWAY K F,et al. Heavy-ion-induced degradation in SiC Schottky diodes:incident angle and energy deposition dependence[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2017,64(8):2031-2037. doi:https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2717045.

- [20] ABBATE C,BUSATTO G,COVA P,et al. Analysis of heavy ion irradiation induced thermal damage in SiC Schottky diodes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2015,62(1):202–209. doi:https://doi.org/10.1109/TNS.2014.2387014.
- [21] ZHANG Hong, GUO Hongxia, ZHANG Fengqi, et al. Study on proton-induced single event effect of SiC diode and MOSFET[J]. Microelectronics Reliability, 2021(124):114329–114337. doi:https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114329.
- [22] AKTURK A, WILKINS R, MCGARRITY J, et al. Single event effects in Si and SiC power MOSFETs due to terrestrial neutrons[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016,64(1):529–535. doi:https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2640945.
- [23] 王跃科, 邢克飞, 杨俊. 空间电子仪器单粒子效应防护技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2010. (WANG Yueke, XIN Kefei, YANG Jun. Single event effect mitigation techniques for space electronic instrument[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.)
- [24] 张鸿, 郭红霞, 潘霄宇, 等. 重离子在碳化硅中的输运过程及能量损失[J]. 物理学报, 2021,70(16):68–77. (ZHANG Hong, GUO Hongxia, PAN Xiaoyu, et al. The transport process and energy loss of ions in silicon carbide[J]. Acta Physica Sinica, 2021,70(16): 68–77.) doi:10.7498/aps.70.20210503.
- [25] ZHANG Hong, GUO Hongxia, ZHANG Fengqi, et al. Sensitivity of heavy-ion-induced single event burnout in SiC MOSFET[J]. Chinese Physics B, 2022,31(1):018501–018502. doi:https://doi.org/10.1088/1674-1056/ac051d.
- [26] MCPHERSON J A, KOWAL P J, PANDEY G K, et al. Heavy ion transport modeling for single-event burnout in SiC-based power devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018,66(1):474–481. doi:https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2880865.
- [27] NILSSON O, MEHLING H, HORN R, et al. Determination of the thermal diffusivity and conductivity of monocrystalline silicon carbide(300~2 300 K)[J]. High Temperatures-High Pressures, 1997,29(1):73. doi:10.1068/htec142.
- [28] TOULOUKIAN Y S, BUYCO E H. Specific heat nonmetallic solids in thermophysical properties of matter[M]. New York, USA: IFI/Plenum, 1970.
- [29] BALL D R, GALLOWAY K F, JOHNSON R A, et al. Ion-induced energy pulse mechanism for single-event burnout in high-voltage SiC power MOSFETs and junction barrier Schottky diodes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019,67(1):22–28. doi:https://doi.org/10.1109/TNS.2019.2955922.
- [30] SHERIDAN D C, CHUNG G, CLARK S, et al. The effects of high-dose gamma irradiation on high-voltage 4H-SiC Schottky diodes and the SiC-SiO₂/interface[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001,48(6):2229–2232. doi:10.1109/23.983200.
- [31] 顾朝桥, 郭红霞, 潘霄宇, 等. 不同应力下碳化硅场效应晶体管器件总剂量效应及退化特性[J]. 物理学报, 2021,70(16):204–212. (GU Zhaoqiao, GUO Hongxia, PAN Xiaoyu, et al. The total dose effect and annealing characteristics of silicon carbide field effect transistor devices under different stresses[J]. Acta Physica Sinica, 2021,70(16):204–212.) doi:10.7498/aps.70.20210515.
- [32] 顾朝桥. 不同应力下 SiC MOSFET 器件总剂量效应及退化机理研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2021. (GU Zhaoqiao. Research on the total dose effect and degradation mechanism of SiC MOSFET devices under different stresses[D]. Xiangtan, China: Xiangtan University, 2021.)
- [33] 柳奕天. 碳化硅肖特基二极管和场效应管中子辐照损伤效应研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2021. (LIU Yitian. Research on neutron radiation damage effects of silicon carbide Schottky diodes and field effect tubes[D]. Xiangtan, Hunan, China: Xiangtan University, 2021.)

作者简介:

张 鸿(1994–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为宽禁带半导体辐射效应机理及加固 .email: 458171175@qq.com.

郭红霞(1964–), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为电子元器件的辐射效应.

顾朝桥(1995–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电子元器件的辐射效应.

柳奕天(1996–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电子元器件的辐射效应.

张凤祁(1980–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电子元器件的辐射效应.

潘霄宇(1991–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为半导体器件空间辐射效应.

琚安安(1993–), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电子元器件的辐射效应.

刘 晔(1998–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电子元器件的辐射效应.

冯亚辉(1995–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为电子元器件的辐射效应.