

SiC 功率器件辐照效应研究进展

刘超铭¹, 王雅宁¹, 魏轶聃², 王天琦¹, 齐春华¹,
张延清¹, 马国亮¹, 刘国柱², 魏敬和², 霍明学¹

(1. 哈尔滨工业大学空间环境与物质科学研究院, 哈尔滨 150001;

2. 中国电子科技集团公司第五十八研究所, 江苏 无锡 214072)

摘要: SiC 功率器件是许多航天器用电子设备的重要组成部分, 是保障深空探测任务顺利进行的前提和基础。在梳理 SiC 功率器件发展概况的同时, 针对不同 SiC 功率器件 (SiC SBD、SiC JBS、SiC MOSFET) 在空间辐射环境下的性能退化规律进行了概述, 重点分析了辐射环境下 SiC 功率器件的损伤机理, 为 SiC 功率器件抗辐射技术的长远发展提供了参考。

关键词: SiC 功率器件; 肖特基势垒二极管; 结势垒肖特基二极管; MOSFET; 空间辐射效应; 损伤机理

中图分类号: TN454 文献标志码: A 文章编号: 1681-1070 (2022) 06-060101

DOI: 10.16257/j.cnki.1681-1070.2022.0605

中文引用格式: 刘超铭, 王雅宁, 魏轶聃, 等. SiC 功率器件辐照效应研究进展[J]. 电子与封装, 2022, 22 (6): 060101.

英文引用格式: LIU Chaoming, WANG Yaning, WEI Yidan, et al. Progress in the study of irradiation effects of SiC power devices[J]. Electronics & Packaging, 2022, 22(6): 060101.

Progress in the Study of Irradiation Effects of SiC Power Devices

LIU Chaoming¹, WANG Yaning¹, WEI Yidan², WANG Tianqi¹, QI Chunhua¹,

ZHANG Yanqing¹, MA Guoliang¹, LIU Guozhu², WEI Jinghe², HUO Mingxue¹

(1. Space Environment Simulation Research Infrastructure, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. China Electronics Technology Group Corporation No.58 Research Institute, Wuxi 214072, China)

Abstract: SiC power device is an important part of many spacecraft electronic equipments. It is the premise and foundation to ensure the smooth progress of deep space exploration mission. The development of SiC power devices is combed, the performance degradation law of different SiC power devices (SiC SBD, SiC JBS, SiC MOSFET) in space radiation environment is summarized, and the damage mechanism of SiC power devices in radiation environment is mainly analyzed, which provide a reference for the long-term development of radiation resistance technology of SiC power devices.

Keywords: SiC power devices; schottky barrier diode; junction barrier schottky diode; MOSFET; space radiation effect; damage mechanism

1 引言

随着微电子技术日新月异的发展,作为传统半导体材料的硅(Si)与砷化镓(GaAs)在半导体器件中表现出的电学性能已逐渐接近其理论极限。作为第三代半导体材料,碳化硅(SiC)材料以其比硅材料更为优良的物理及电学特性,吸引了众多功率器件业内人士的关注。与传统半导体材料相比,SiC材料具有宽禁带、高热导率、高临界击穿场强和高载流子饱和速度等优势,因此已成为国际上普遍公认的新一代电力电子器件材料,被应用于输配电系统、轨道交通、新能源汽车、光伏逆变器可再生能源发电、军工国防等前沿科技领域,其中,SiC材料在功率开关器件中的应用引起了国内外学者的广泛关注。SiC功率器件最突出的性能优势在于其高压、高频和高温工作特性,可以有效地降低电力电子系统的功率损耗^[1]。

随着航空航天事业向深空探测方向迅速发展,电子器件面临的工作环境越来越多样,在复杂空间环境中保证器件工作的稳定性显得尤为重要。空间辐射环境中充斥着大量的高能电子、质子、 γ 射线和重离子等粒子,会对航天器中的半导体元器件造成威胁^[2]。对于多数半导体材料而言,产生一对电子空穴对需要的平均能量为其禁带宽度的3~5倍^[3],SiC材料的禁带宽度比传统Si材料大得多,因此辐照引入的电子空穴对更少。材料的临界位移能反映其抗位移辐照能力,因此SiC材料临界位移能是Si材料的近2倍,可有效减少位移缺陷的产生^[4]。

本文主要介绍了国内外针对SiC基肖特基二极管(SBD)、结势垒肖特基二极管(JBS)、MOSFET器件空间辐射效应的研究成果,阐述了几种常用SiC功率器件在高能粒子辐射下的性能变化规律与损伤机理,并对SiC功率器件抗辐射性能的发展与面临的挑战进行了展望。

2 SiC 器件发展现状

经过近60年的持续发展,硅基功率器件已成为当今社会各种电能转换接口设备的主流选择。20世纪50年代末,硅晶闸管(Thyristor)的成功研制标志着功率半导体器件的开端;80年代中期开始,可关断晶闸管(GTO)开始广泛应用于高压大功率变换器;而从20世纪90年代开始,绝缘栅双极型晶体管(IGBT)突破

了阻断电压偏低的限制,成功应用于3.3 kV及以上电压等级场合,并以其较好的动静态性能在中压应用场合逐渐取得了优势地位。进入21世纪后,大功率变流装置对功率器件提出了更高的要求:阻断电压更高,导通压降更低,开关损耗更低,温度特性更好。然而硅基功率器件经过了60年的发展后,性能已经趋近于体二极管的材料极限($10^9 \sim 10^{10}$ W/S),通过器件原理的创新、结构的改良及工艺的进步已经难以明显提升其总体性能,这已成为制约电力电子技术进一步发展的瓶颈之一^[5]。

近二十年来,SiC单晶生长技术又取得了很大突破,在SiC晶片质量和尺寸上都有了稳步提高,促进了SiC外延、器件、封装等整个产业链的发展^[6]。目前,国外研究和生产SiC单晶的研究机构、高校和企业集中在美国、日本、德国等国家。与此同时,SiC外延技术的不断发展进一步推动了SiC功率器件的研发与产业化。增大SiC外延晶片尺寸是降低SiC功率器件成本的关键,随着SiC衬底制造技术的不断提高,SiC外延晶片已从过去的2、3英寸,逐渐发展到目前主流的4、6英寸。另一方面,随着SiC功率器件耐压等级要求的不断提高,SiC外延晶片的厚度也从过去的十微米量级发展到目前的百微米量级,最高达到了250 μm 以上。另外,降低SiC外延层表面缺陷是提高SiC功率器件成品率、降低制造成本的关键途径,因此降低外延层表面缺陷是外延工作的重中之重。目前表面缺陷密度已从过去的每平方厘米几个缺陷,降低到每平方厘米小于一个缺陷的水平,最低达到了每平方厘米0.05个缺陷^[7-10]。

随着SiC外延生长技术的不断进步,主要发达国家竞相发展SiC功率器件制造技术,近来多家国际大公司向以使用6英寸外延晶片为主导的6英寸SiC功率器件制造工艺转移,SiC器件产品也在向高压端扩展,如3300 V级,目前已实现10 kV的SiC SBD、PIN二极管、MOSFET、IGBT、GTO晶体管的生产,其中单管器件的最高电压达到了27 kV^[11-13]。

SiC功率器件主要包括SiC二极管、SiC开关管和SiC功率模块。其中SiC二极管又分为SBD和JBS;SiC开关管分为SiC MOSFET、SiC JFET和SiC IGBT等;SiC功率模块分为全SiC功率模块和混合SiC功率模块^[13]。SBD采用4H-SiC的衬底及高阻保护环终端技术,并用势垒更高的Ni和Pt金属改善电流密度,适用于阻断电压在0.6~1.5 kV范围内的应用;JBS兼具SBD导通压降低和PIN二极管阻断电压高、反向电

流小的优点, 阻断电压范围为 1.5~3 kV; MOSFET 等功率开关器件是电力电子系统中的重要组成部分, 主要应用于中低压领域^[14]。目前在深空探测领域航天器用电子设备中应用的主要为 SiC 二极管与 SiC 开关管, 因此本文针对 SiC SBD、SiC JBS 与 SiC MOSFET 器件进行了研究。

3 空间辐射效应

随着航空航天事业向深空探测方向迅速发展, 电子器件面临的工作环境越来越多样, 在复杂空间环境中保证器件工作的稳定性显得尤为重要。特别是对于太阳系中冰冷天体的探索, 例如火星和木星, 辐射环境和空间低温环境对电子元器件的正常使用有着重要的影响。空间辐照及核辐照环境存在着诸多辐射源。在长期辐照过程中, 高能射线、粒子入射会在半导体材料内产生大量的电荷累积, 从而引起器件性能的退化甚至失效, 产生总剂量效应^[15-16]。在航天器和空间系统的应用中, 总剂量效应的影响主要分为电离作用和原子位移作用。电离作用是指辐照材料的原子通过电离吸收入射粒子的能量, 产生电子空穴对; 原子位移作用是指辐照材料的原子被高能粒子击中脱离原有位置, 造成晶格损伤。相较于原子位移损伤, 电离损伤的影响更加显著, 且更易于发生^[17]。其中, 电离损伤又根据高能粒子的作用数量分为单粒子效应 (SEE) 与电离总剂量效应 (TID)。国内外研究表明, SiC 功率器件的抗总剂量效应和位移损伤效应能力较强, 单粒子效应则远不如预期。航天器上的单粒子效应主要是由重离子和质子引起的, 质子通过与半导体材料的核相互作用产生重离子进而由重离子诱发单粒子效应。单粒子效应包括单粒子翻转、单粒子瞬态等软错误, 单粒子锁定、单粒子烧毁、单粒子栅穿等硬错误^[18]。

在航天以及核应用中, 辐照对器件性能的影响会扩大到整个系统的正常运行上, 美国和前苏联早年发射的卫星曾发生多次故障, 甚至失效。我国至今已发射了几十种各类用途的卫星, 其中有的卫星也发生了故障, 缩短了工作寿命, 造成很大的损失。故障结果分析表明, 其主要是由于空间高能带电粒子对航天器上电子系统产生的辐射效应造成的, 这些效应引起的故障占卫星故障的绝大部分^[19-20]。因此, 空间系统中电子器件的抗辐照性能直接关系到航天器的使用寿命、稳定性以及安全性^[21]。

空间粒子辐射环境具有能谱宽、粒子成分多、全

方位立体角分布、不同时期不同种类粒子的注量率不同且注量率较低等特点^[22]。然而, 半导体器件的空间辐射效应评估主要是通过实验室的各种辐射模拟装置或辐射源开展地面模拟试验。地面模拟试验环境与真实的空间粒子辐射环境存在差异。地面试验时, 能谱较窄, 一般达到几百兆电子伏; 辐照粒子单一, 一般采用单一粒子对被测器件进行辐照; 入射角度范围小, 一般采用单向入射; 注量率较高, 因成本限制采用加速试验方法^[23]。因此, 为在地面准确评估半导体器件的空间辐射效应, 需要充分考虑上述差异对单粒子效应的影响, 以免出现过于保守或过于低估的情况。

4 SiC 基 SBD 器件的辐射效应研究

半导体晶格在受到高能粒子轰击的过程中会通过库仑散射将高能粒子能量的一部分转移给晶格原子。临界位移能 (E_d) 就是表征转移给晶格原子并使晶格原子离开其原始晶格位置所需要的最小能量。在抗辐照方面, 材料的临界位移能越高, 其抗位移辐照的特性就越好, SiC 因其较高的临界位移能, 在高能带电粒子辐照的条件下产生位移辐照缺陷的几率较小。

2002 年, SHERIDAN 等^[24]对 Ni、Ti、Mo/4H-SiC SBD 的射线辐照效应进行了报道, 研究结果显示, 在经过总剂量为 4 Mrad (Si) 的射线辐照后, 所采用的 3 种肖特基接触的 SiC SBD 的直流正向和反向特性均无明显退化现象, 该研究结果表明在高辐射环境下 SiC 在极端环境电子学中的特殊潜力; 此外, 与未经过辐照的器件相比, 经过辐照后的 SiC SBD 的击穿电压增加了约 200 V, 并通过数值模拟确定了负极氧化电荷的增加是反向击穿电压提高的原因。2002 年, NIGAM 等^[25]研究了 Ni/4H-SiC SBD 的 40 MeV 高能质子辐照效应, 辐照后, Ni/4H-SiC SBD 的整流特性有轻微的下降, 反向击穿电压也下降了 50 V。研究结果表明 Ni/4H-SiC SBD 反向漏电流的增加原因是辐照在材料中产生了复合中心。

2019 年, SHENG 等^[26]针对 4H-SiC SBD 进行了中子与 ^{60}Co - γ 射线辐照实验。在经过 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的中子辐照后, SiC SBD 的正向和反向特性几乎没有变化, 见图 1, 这意味着在这种低通量快中子辐照下, SiC SBD 的电性能没有表现出明显的退化。此外实验还采用了总剂量为 300 krad 的 ^{60}Co - γ 射线对样品进行辐照, 辐照前后正向与反向 I - V 曲线如图 2 所示, 与中子辐照结果类似, ^{60}Co - γ 射线对 SiC SBD 电性能的影响并不

明显,正向与反向 I - V 曲线基本不变。为进一步评估中子位移损伤对 SiC SBD 造成的影响,实验将快中子的辐射通量 Φ_f 提升至 $1.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$,得到图 3 中的结果,可以看到此时 SiC SBD 在辐照前后的 I - V 曲线发生了明显的变化,除正向电流减小外,正向 I - V 曲线的斜率也产生了很大变化;通过计算得知高通量的快中子辐

照后, SiC SBD 的理想因子数值增加,表明器件内形成了高密度的缺陷^[27,31]。与此同时,从图 3 中还可以看到阻断电压显著降低,造成 SiC SBD 性能的严重劣化。因此,中子引起的位移损伤会在 SiC SBD 中引入大量缺陷,从而极大地改变载流子运输性质,影响器件的基本运行。

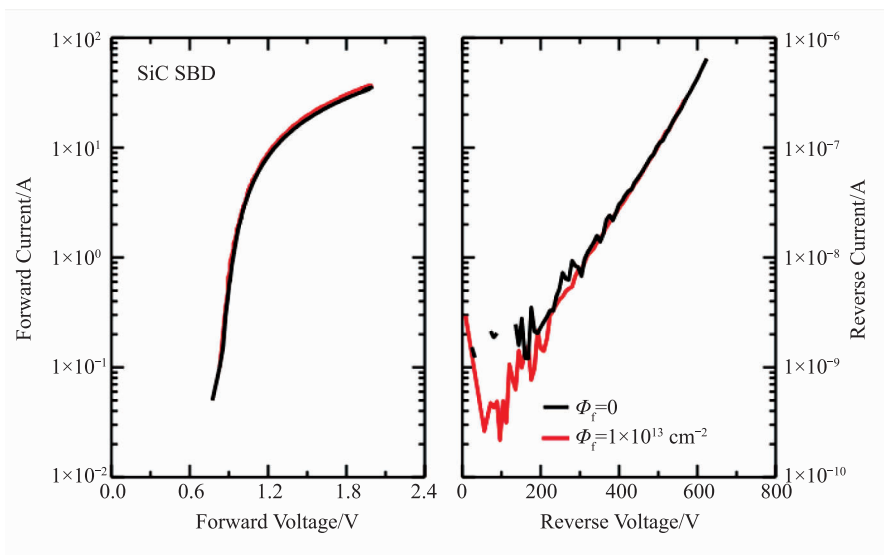


图 1 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的中子辐照前后 SiC SBD 正向与反向 I - V 曲线^[26]

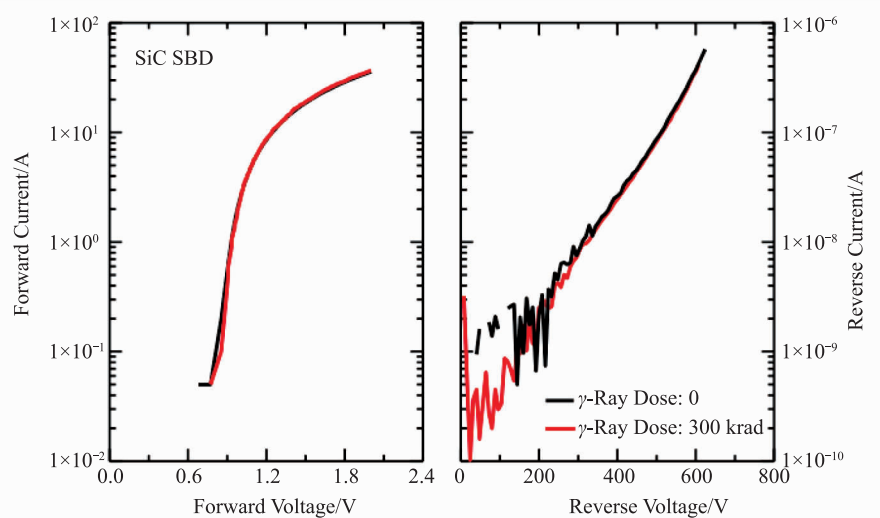
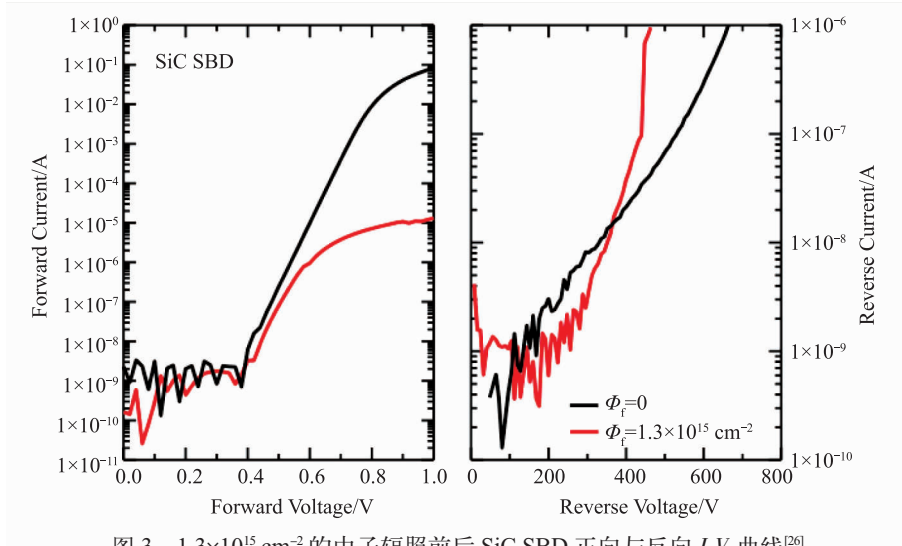


图 2 300 krad ^{60}Co - γ 射线辐照前后 SiC SBD 正向与反向 I - V 曲线^[26]

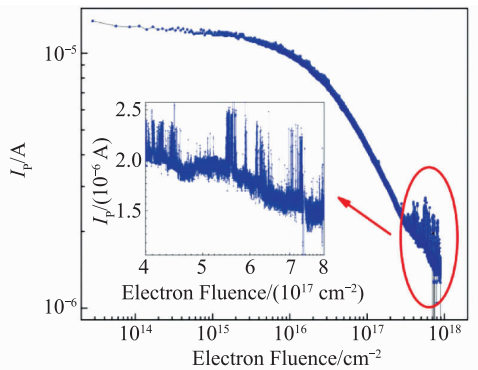
与此同时,国内的 YANG 等^[28]选取了能量为 1.8 MeV、通量为 $9.62 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、总注量为 $9.05 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 的电子对 4H-SiC SBD 进行辐照试验,结果如图 4 所示,随着电子注量的增加,器件的感应电流 I_p 不断减小;当电子注量达到 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,电流减小到 $1.24 \times 10^{-5} \text{ A}$,可以认为 SiC SBD 足以抵抗通量低于 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的电子辐照。然而随着电子注量的进一步增加,器件的感应电流开始急剧下降,辐照结束时,电流达到 $1.82 \times 10^{-6} \text{ A}$,相比于初始值降低了 85%,同时 SiC SBD 的感应电流波动也急剧增大。这是由于 SiC SBD

受到高注量电子辐照时,在 SiO_2 层、SiC 层以及金属和 SiC 之间的界面^[29-31]内会产生大量缺陷,这些缺陷会在 1.8 MeV 电子辐照时对电荷载流子产生去除效应^[32-33],导致感应电流的减小。

HEMMINGSSON 等^[34]利用深能级瞬态谱 (DLTS) 研究了电子辐照化学气相沉积生长的 4H-SiC 外延层中的深能级缺陷。在 100~750 K 温度范围内对电子辐照的 P-N 结进行的测量显示,电子陷阱和空穴陷阱的热电离能范围为 0.35~1.65 eV,这是导致器件性能恶化的主要原因。实验中常采用 I - V 、 C - V 与 DLTS 分析

图 3 $1.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的中子辐照前后 SiC SBD 正向与反向 I - V 曲线^[26]

研究缺陷对 SiC SBD 性能的影响。研究发现, DLTS 缺陷能级 (EH1、EH3 和 $Z_{1/2}$) 极有可能是电子辐照后电荷收集效率降低的原因之一, 其中 EH1 和 EH3 与碳间隙有关, $Z_{1/2}$ 与碳空位有关。研究表明, 当辐照电子能量超过 100 keV 时会在 SBD 中引入 $Z_{1/2}$ 和 $\text{EH}_{6/7}$, $Z_{1/2}$ 和 $\text{EH}_{6/7}$ 的浓度随着辐照注量的增大而提高。OMOTOSO 等^[35-38]的研究表明, 电子辐照会导致 Ni/4H-SiC SBD 自由载流子浓度降低。SiC SBD 经电子辐照后, 会在半导体/金属界面附近形成缺陷, 显著增加理想因子并出现瞬态非稳态电流。

图 4 感应电流随电子注量的实时变化曲线^[28]

针对 SiC SBD 工艺的改进, 叶毅等^[39]研究了表面电场降低 (D-Resurf) 技术, 可提高反向击穿电压, 改善正向导通特性, 还通过仿真对参数进行了一系列的优化; 陈刚等^[40]则制备了 Ni/SiC SBD, Ni/SiC 作为终端放置在 SBD 边缘, 在反向击穿电压为 1100 V 时, Ni/SiC SBD 依然保持较小的漏电流, 且正向导通特性表现良好。

5 SiC 基 JBS 器件的辐射效应研究

随着电力电子技术的迅速发展, 以 SBD 和 PIN 二

极管为主的传统二极管已无法满足高频率、大功率及低功耗的市场需求, 前者击穿电压低、反向漏电大, 而后者高频特性较差。因此 JBS 应运而生, 该结构将 SBD 结构和 PIN 结构巧妙地结合在一起, 结合了 SBD 良好的开关特性和 PIN 二极管高击穿电压和低漏电流的特性, 具有高耐压、低压降、小漏电、高频特性好及强抗过压和浪涌电流能力。与 SBD 相比, JBS 中有 P-N 结存在, 辐照效应更加复杂, 包括了在 SBD 中不存在的少子效应。因此, 在研究分析 JBS 辐照效应的过程中不仅要考虑半导体-金属肖特基结的辐射效应, 还要考虑 P-N 结的辐照效应。

2014 年, HAZDRA 等^[41]针对 1700 V SiC JBS 功率二极管进行了注量分别为 $1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 、 $6.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、 $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的中子辐照实验, 通过电容深能级瞬态光谱、 C - V 曲线和 I - V 曲线测量对辐射缺陷、热稳定性和对二极管特性的影响进行表征。由图 5 可知, 不同注量下 SiC JBS 所有正向 I - V 曲线在低偏压下都呈线性变化, 而在较大的正向电压下, 串联电阻决定其变化趋势; 随着辐照注量的增加, I - V 曲线的线性区域变小, 在较高电压下的电流也有所下降, 这与辐照后 JBS 串联电阻增加的趋势相符, 此时在较低偏压下器件的肖特基结势垒高度基本保持不变, 这正是由于随着辐照注量的增加, 引入了类受体辐射缺陷或氮掺杂剂失活, 导致 JBS 低掺杂 N 外延层中自由载流子数目减少。同时随着辐照剂量的增加, 外延层中掺杂数目的减少可能与迁移率的降低相结合。图 5 中的反向 I - V 特性表明中子辐照对 SiC JBS 在低反向电压下的泄漏电流不会造成太大影响, 这是由于碳化硅的宽带隙抑制了辐照引入的深能级电荷载流子的产生, 引入的深能级则表现为电荷陷阱, 而非产生中心; 引

入缺陷的受主特性降低了外延层中的 N 型掺杂水平,从而降低了反向偏置 JBS 结的空间电荷区 (SCR) 中的电场强度,因此辐照后二极管的击穿电压保持不变甚至略有增加。而在高中子注量辐照下,二极管的反向 I - V 特性在低电压下表现为泄漏电流迅速增长,并随着中子注量的增加而增加,这种异常现象是由深能级或表面态捕获的电子的热释放引起的,此后测试电流与 SCR 延伸的速度成正比关系变化。在辐照后的二极管中,有效氮掺杂减少;并且在低电压 (大于 40 V) 时 SCR 比未辐照的样品扩展得更快。当 SCR 延伸率相等时,电流过冲在较高的电压下停止。应该注意的是,随着中子辐照剂量的增加,肖特基结势垒高度的增加抑制了受辐照二极管在高电压 (大于 1000 V) 区域的反向电流;在高电压 (大于 1000 V) 区域,泄漏是由结势垒上的热离子发射给出的。可以得出结论,中子辐照对工作在关闭状态下的 SiC 二极管基本不会产生影响。

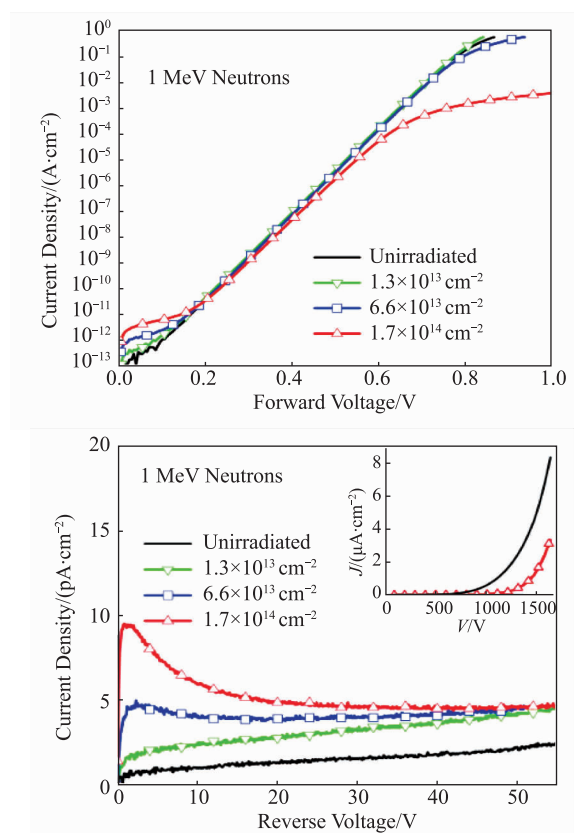


图 5 中子辐照前后 4H-SiC JBS 的正向与反向 I - V 特性^[41]

哈尔滨工业大学的刘超铭等^[43]采用注量为 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 和 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 1 MeV 电子对 4H-SiC JBS 进行了电子辐照实验,研究了不同注量电子对 4H-SiC JBS 的 I - V 特性、 C - V 特性和缺陷的辐照效应,其中

I - V 特性曲线如图 6 所示。随着电子注量的增加,正向电流减小,根据计算可得辐照后串联电阻由 $49.8 \text{ m}\Omega$ 增长到 $81.2 \text{ m}\Omega$ 。辐照产生的缺陷可以俘获 SiC 中的自由载流子,使净载流子浓度降低并产生补偿效应,从而导致串联电阻增加^[44-46]。而漏电流随辐照注量先增加后降低,载流子浓度随辐照注量的增加而降低,载流子去除率为 0.37 cm^{-1} 。较低注量下漏电流的增加原因可能是辐照引起原子位移产生“形成-复合中心”^[46];较高注量下漏电流的降低原因可能是电子辐照对 SiC JBS 注入退火效应,也可能是电子辐照引入补偿缺陷导致载流子浓度的降低^[47-48]。图 7 中的 PL (Photoluminescence) 研究结果表明,辐照后 V_c 、 V_{si} 显著增加。辐照引起缺陷浓度增加并捕获载流子导致载流子浓度降低,这是 4H-SiC JBS 器件的 I - V 特性、 C - V 特性退化的主要原因。同时载流子浓度降低和辐照产生的非辐射复合中心可能引起了淬灭效应^[49-50]。总体来说,电子辐照强烈影响 SiC 的晶格结构和周期势场,并能在禁带内引入缺陷能级,降低材料中的载流子迁移率和载流子浓度。此外,由电子辐照引起的深能级缺陷常常充当非辐射复合中心,抑制发光效率,从而导致发光强度降低^[51]。缺陷浓度的增加也会导致 4H-SiC JBS 的 I - V 和 C - V 特性变化^[52]。

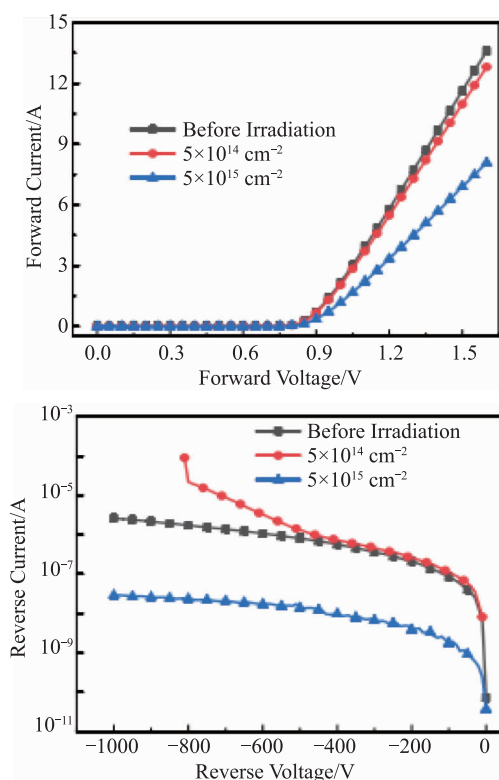
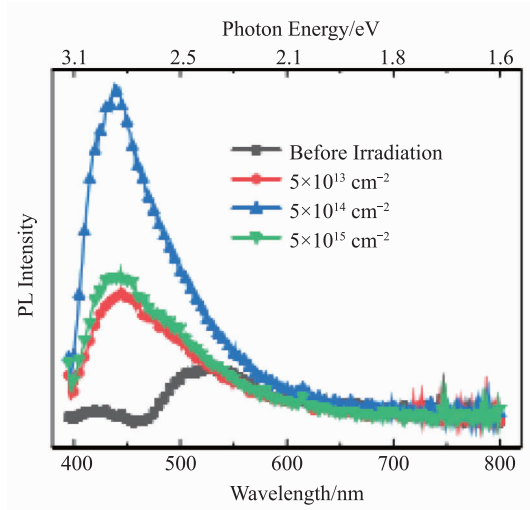


图 6 电子辐照前后 4H-SiC JBS 的正向与反向 I - V 特性^[43]

图 7 电子辐照前后 4H-SiC JBS 的 PL 光谱^[43]

6 SiC 基 MOSFET 器件的辐射效应研究

2014 年, ALEXANDRU 等^[53]研究了质子与电子辐照对 MOSFET 电学参数的影响, 实验主要针对 4H-SiC nMOSFET 器件进行了带电粒子辐照与分析。辐照部分选取了基于 4 种不同注量下的 5 MeV 质子辐照: 5×10^{11} p/cm²、 5×10^{12} p/cm²、 5×10^{13} p/cm² 与 5×10^{14} p/cm²; 以及基于 4 种不同吸收剂量的 15 MeV 电子辐照: 100 krad (Si)、1 Mrad (Si)、2 Mrad (Si) 与 3 Mrad (Si)。辐照前后 4H-SiC MOSFET 重要电学参数变化如表 1、2 所示。

表 1 5 MeV 质子辐照后 4H-SiC MOSFET 电学参数^[53]

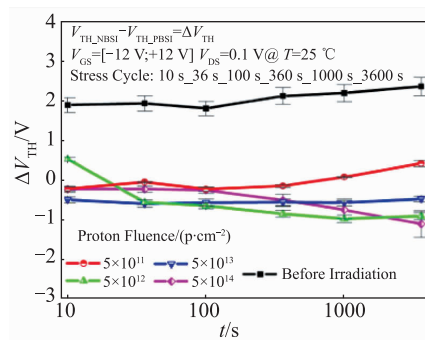
注量 / (p·cm ⁻²)	0	5×10^{11}	5×10^{12}	5×10^{13}	5×10^{14}
$V_{\text{BREAKDOWN}}/\text{V}$	23.60	30.02	29.15	26.41	27.32
$V_{\text{TH_NBSI}}/\text{V}$	6.58	5.09	5.35	4.15	3.99
$V_{\text{TH_PBSI}}/\text{V}$	4.23	5.02	6.31	4.10	4.54
$\mu_{\text{EFF}}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	1.05	1.71	1.40	3.29	5.20
$I_{\text{DSAT}}/\mu\text{A}$	15.40	5.64	10.96	22.51	34.24
$g_m/(\mu\text{A} \cdot \text{V}^{-1})$	5.64	1.65	3.28	5.70	8.47

表 2 15 MeV 电子辐照后 4H-SiC MOSFET 电学参数^[53]

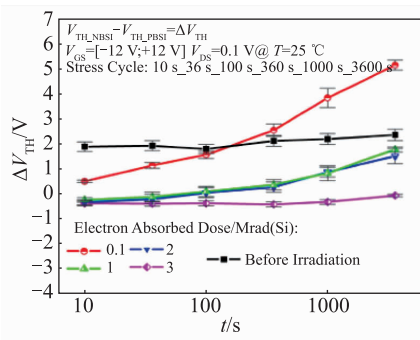
吸收剂量 /Mrad (Si)	0	0.1	1	2	3
$V_{\text{BREAKDOWN}}/\text{V}$	23.56	25.23	26.54	27.21	23.64
$V_{\text{TH_NBSI}}/\text{V}$	6.58	3.84	4.59	4.79	4.56
$V_{\text{TH_PBSI}}/\text{V}$	4.23	-0.67	3.20	5.27	4.21
$\mu_{\text{EFF}}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	1.05	3.95	2.59	2.42	4.32
$I_{\text{DSAT}}/\mu\text{A}$	15.40	12.74	11.50	8.66	26.93
$g_m/(\mu\text{A} \cdot \text{V}^{-1})$	5.64	3.13	3.01	2.44	6.64

由实验可知, 不同注量辐照前后 4H-SiC MOSFET 的阈值电压、沟道迁移率与栅漏电流都发生了较为明显的变化。阈值电压和栅漏电流变化如图 8 所示, 可以看出在经过质子辐照后, 阈值电压降低并且随时间

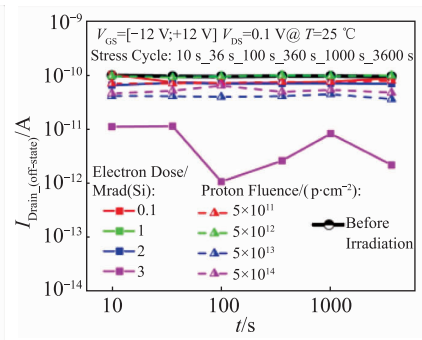
增长而趋于稳定, 随着质子注量的增加, 阈值电压呈现逐渐减小的趋势; 电子辐照前后变化与质子辐照相似; 同时还可以看到, 即使在最高通量的质子辐照与最大注量的电子辐照下, 其栅漏电流仍几乎保持不变。



(a) 5 MeV 不同注量质子辐照



(b) 15 MeV 不同吸收剂量电子辐照



(c) 不同质子和电子辐照通量/剂量下的平均漏电流随时间的变化

图 8 不同辐照剂量下阈值电压和栅漏电流变化^[53]

国内的梁晓雯等^[54]为探究 SiC MOSFET 在空间辐射环境下的性能稳定性, 选取了 ^{60}Co - γ 射线为辐照源, 采用 $1.74 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{s}$ 的剂量率对 36 A 1200 V SiC MOSFET 进行总剂量辐射实验。器件转移特性曲线随辐射剂量变化趋势如图 9 所示, 在较低的外加电场条件下, 随着辐射总剂量的增加, 转移特性曲线基本没有变化; 图 10 (a) 显示了在高电场下辐照的器件的 $I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$ 曲线, 从中可以发现, 当剂量小于 $0.58 \text{ kGy}(\text{SiO}_2)$ 时, 曲线几乎没有变化, 当剂量大于 $0.58 \text{ kGy}(\text{SiO}_2)$ 时, 曲线向负方向移动; 图 10 (b) 给出了从图 9 和图 10 (a) 中提取的阈值电压的变化情况, 当在 0 V 和 5 V 偏压

下照射时, 阈值电压变化量 ΔV_{TH} 很小, 而当在 20 V 偏压下照射时, 阈值电压变化量 ΔV_{TH} 显著降低。

这种现象主要是由氧化物中正电荷的积累所导致的。 γ 射线辐照在氧化物中产生电子-空穴对, SiO_2 中电子的迁移率远高于空穴的迁移率, 因此在 20 V 的辐照偏压条件下, 强电场会导致电子向栅极快速漂移, 空穴向 SiC/ SiO_2 界面缓慢漂移。在此过程中, 部分空穴会被氧空位俘获, 形成正的氧化物陷阱电荷^[55]。而在 -5 V 和 0 V 偏压配置下, 空穴的动能很小, 大部分空穴被电子复合, 氧化物中无法形成正电荷。

相比于辐照总剂量效应, 单粒子会对 SiC

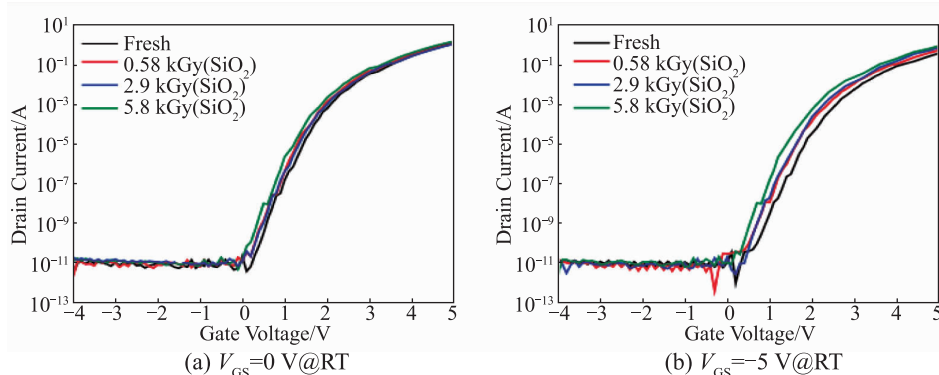


图 9 不同偏置条件下的转移特性曲线与辐射剂量关系^[54]

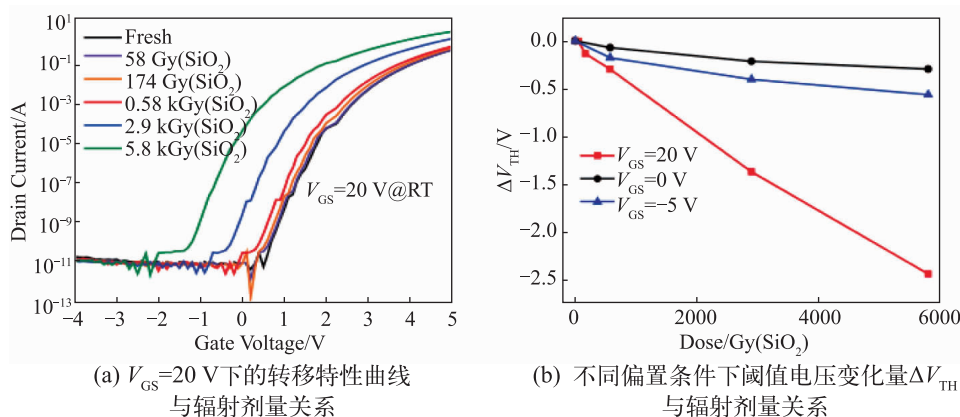


图 10 辐照后 SiC MOSFET 转移特性与阈值电压变化曲线^[54]

MOSFET 造成更为严重的损伤, 其中单粒子烧毁 (SEB) 作为一种破坏型的 SEE, 在 N 型沟道功率晶体管中极易发生。为探究 SiC MOSFET 器件的单粒子烧毁效应, 哈尔滨工程大学的于成浩^[56]仿真分析了功率 MOSFET 的单粒子烧毁效应, 图 11 给出了线性能量传输 (LET) 值为 $0.01 \text{ pC}/\mu\text{m}$ 的离子在颈区位置入射后, 功率 MOSFET 漏源电流随时间的变化曲线。可以看到, 当漏源电压 $V_{\text{DS}}=260 \text{ V}$ 时, 器件的瞬态电流随时间不断增加, 从初始较低的数值变为一个高稳态电流值, 最终造成器件烧毁; 而当 $V_{\text{DS}}=250 \text{ V}$ 时, 初始一段

时间内瞬态电流随时间不断增加, 在 1 ns 左右开始下降, 并在 10 ns 时降低为零, 没有发生单粒子烧毁效应。定义触发 SEB 所需要的最低漏源电压为 SEB 阈值电压, 不同 LET 值下功率 MOSFET 的 SEB 阈值电压如图 12 所示, SEB 阈值电压随 LET 值的增加而不断减小, 直到达到 SEB 阈值电压饱和, 该饱和值即为功率 MOSFET 器件的安全工作区 (SOA)。SOA 是表征功率 MOSFET 器件 SEB 性能的一个重要参数, 用来定义对 SEB 效应免疫的漏源电压工作区域, 通常用 SEB 阈值电压随 LET 值的变化曲线来定义。

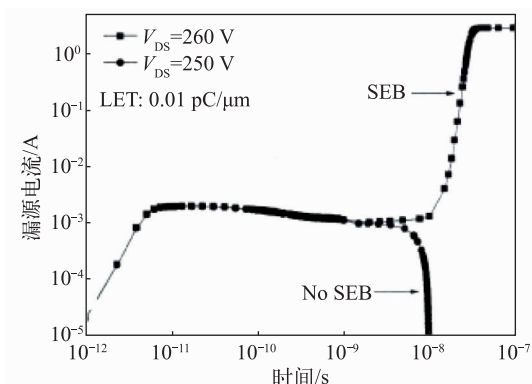


图 11 离子入射后,功率 MOSFET 漏源电流随时间的变化曲线^[56]

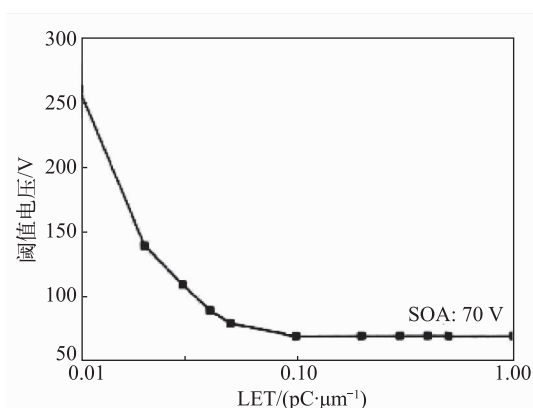
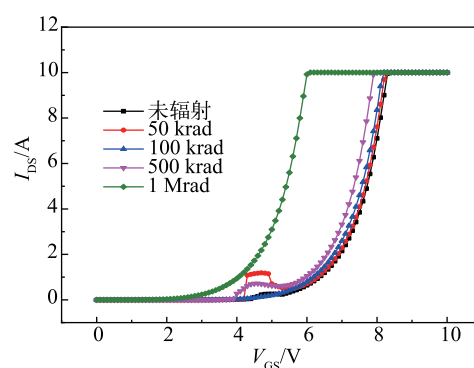


图 12 离子入射后,功率 MOSFET SEB 阈值电压随 LET 的变化曲线^[56]

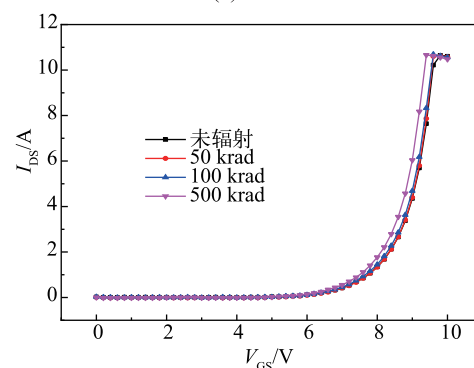
于庆奎等^[57]选取了不同厂家的 SiC 功率器件进行单粒子效应的研究,实验结果表明在重离子辐照后,在器件发生单粒子烧毁失效前的更低电压下,SiC MOSFET 的漏电流快速增加。由此可知,重离子辐照会引起 SiC MOSFET 单粒子烧毁,而漏电流增加和单粒子烧毁与入射粒子 LET 和偏置电压有关;同时漏电流还会随入射离子注量的增加而增大,因此具有一定的累积效应。

为验证 SiC MOSFET 在空间复杂辐照环境下的电性能可靠性,哈尔滨工业大学的刘超铭等人针对 SiC MOSFET 在低温与辐照耦合环境下性能的变化规律与损伤机理进行了深入分析。实验选取 1200 V 商用 SiC MOSFET 为研究对象,分别在 300 K、200 K、40 K 的温度环境下对样品进行了 ^{60}Co - γ 射线辐照,辐射剂量分别为 50 krad、100 krad、500 krad 与 1 Mrad。图 13 为不同温度下 SiC MOSFET 的转移特性曲线,可以很明显地看出随着辐射剂量的增加,转移特性曲线负向漂移。从图 13 中提取器件的阈值电压,可得阈值电压

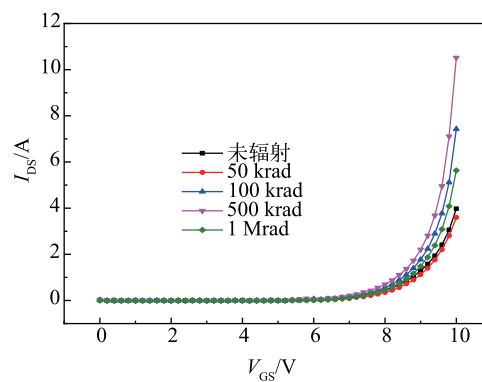
V_{th} 在不同温度下随辐射剂量的变化曲线如图 14 所示,在同一辐射剂量下阈值电压随着温度的降低而增大,在温度为 40 K 时,阈值电压达到极大值。之前的研究表明,界面态密度随温度的降低而迅速增加,由于假定界面态为负电荷,因此低温下阈值电压产生图中所示的正向偏移;与此同时,随着温度的降低,表面费米能级向导带边缘 E_c 移动,界面态密度迅速增大,导致大量的电子在低温下将被捕获在界面态,得到更高的阈值电压^[58];而 ^{60}Co - γ 射线辐照诱导产生了大量的电子-空穴对,空穴由于迁移速率较慢易被栅氧层中的氧空位捕获,形成带正电的氧化物陷阱电荷,造成了辐射后阈值电压的负向偏移。



(a) $T=300\text{ K}$



(b) $T=200\text{ K}$



(c) $T=40\text{ K}$

图 13 不同温度下 SiC MOSFET 辐射后转移特性曲线

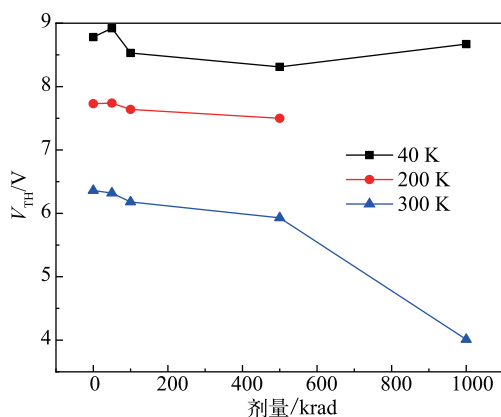


图14 不同温度下SiC MOSFET 阈值电压 V_{th} 与辐射剂量的关系

7 结论

随着半导体功率器件工艺与深空探测技术的不断发展,我国将不断加快向更深更远深空领域迈进的步伐。由于深空环境中充斥着大量的高能粒子,严重威胁到在轨航天器的使用寿命与测量数据的准确性,因此对SiC功率器件在空间辐射环境下可靠性的研究显得尤为关键。由国内外学者对SiC功率器件空间辐射效应的研究可知,高能粒子主要是通过SiC SBD中造成高密度的缺陷,并且在材料中诱导复合中心的产生,降低了自由载流子浓度,从而影响其正向与反向泄漏电流,造成器件性能的退化;针对SiC JBS器件,电子辐照影响了SiC的晶格结构,在禁带内部引入了缺陷能级,使得材料中的载流子迁移率和载流子浓度降低,同时辐照造成的深能级缺陷常常充当非辐射复合中心,抑制了发光效率;SiC MOSFET的 SiO_2/SiC 界面与栅氧层对空间辐射环境较为敏感,辐照在氧化层中产生大量的电子-空穴对,由于迁移速率较慢,导致大量的空穴被栅氧层内的氧空位俘获成为带正电的有效氧化物陷阱电荷,导致了MOSFET阈值电压的正向漂移。因此,SiC功率器件在空间辐射环境下的可靠性是SiC功率器件工艺发展与深空探测技术推进的重要保障,改进SiC功率器件工艺结构以充分发挥SiC宽禁带材料抗辐射性能的优势,对我国未来航空航天科技的发展具有关键作用。

参考文献:

- [1] 柏松,李士颜,费晨曦,等.新一代SiC功率MOSFET器件研究进展[J].人工晶体学报,2020,49(11):2122-2127.
- [2] 高博,刘刚,王立新,等.功率VDMOS器件低剂量率辐

- 射损伤效应研究[J].微电子学,2013,43(1):115-119.
- [3] 尚也淳,张义门,张玉明.SiC抗辐照特性的分析[J].西安电子科技大学学报,1999,26(6):807-810.
- [4] 王敬轩,吴昊,王永维,等.SiC MOSFET器件抗辐照特性研究[J].智能电网,2016,4(11):1078-1081.
- [5] 漆宇,李彦涌,胡家喜,等.SiC功率器件应用现状及发展趋势[J].大功率变流技术,2016(5):1-6.
- [6] 盛柏赖,程文芳.碳化硅器件及其应用[J].电子元器件应用,2001,3(5):19-23.
- [7] MÜLLER M, BICKERMANN M, HOFMANN D, et al. Studies on SiC liquid phase crystallization as technique for SiC bulk growth[J]. Materials Science Forum, 1998, 264-268: 69-72.
- [8] 科信. II-VI Advanced 公司展示首款 200 mm 碳化硅圆片[J].半导体信息,2015(4):17.
- [9] 彭燕,陈秀芳,彭娟,等.高质量半绝缘 $\phi 150$ mm 4H-SiC 单晶生长研究[J].人工晶体学报,2016,45(5):1145-1152.
- [10] SCOTT. 中科院物理所成功研制 6 英寸碳化硅单晶衬底[J].今日电子,2015(1):27.
- [11] 申思,陈小龙.国产碳化硅晶片产业的探路先锋[J].高科技与产业化,2019(5):18-21.
- [12] 刘春艳,张明福.苏州维特莱恩公司高品质 6 英寸电阻法碳化硅单晶研制成功[J].人工晶体学报,2019,48(9):1768.
- [13] 张玉明,汤晓燕,宋庆文.碳化硅功率器件研究现状[J].新材料产业,2015(10):26-30.
- [14] WU J. Design and fabrication of 4H-silicon carbide MOSFET[D]. New Jersey: The State University of New Jersey, 2009.
- [15] GAO B, LIU G, WANG L X, et al. Investigation into low dose rate radiation damage effects of radiation hardened power VDMOS devices[J]. Microelectronics, 2013, 43(1): 115-119.
- [16] LAUENSTEIN J M, LADBURY R L, GOLDSMAN N, et al. Interpreting space-mission LET requirements for SEGR in power MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(6): 3443-3449.
- [17] BOURDARIE, SÉBASTIEN, XAPSOS M. The near-earth space radiation environment[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(4): 1810-1832.
- [18] 曹爽. 宇航用SiC结势垒肖特基二极管单粒子效应研究[D].北京:中国空间技术研究院(航天五院),2020.
- [19] HUGHES H L, BENEDETTO J M. Radiation effects and hardening of MOS technology: Devices and circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3): 500-521.

- [20] BARTH J L, DYER C S, STASSINOPOULOS E G. Space, atmospheric, and terrestrial radiation environments[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3): 466-482.
- [21] 王敬轩, 吴昊, 王永维, 等. SiC MOSFET 器件抗辐照特性研究[J]. 智能电网, 2016, 4 (11): 1078-1081.
- [22] 向宏文. 航天器空间辐射环境及效应地面模拟试验[C]//中国宇航学会飞行器总体专业委员会学术研讨会, 2005.
- [23] 陈伟, 郭晓强, 姚志斌, 等. 空间辐射效应地面模拟等效的关键基础问题[J]. 现代应用物理, 2017, 8(2): 12.
- [24] 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, 2002, 48(6): 2229-2232.
- [25] NIGAM S, KIM J, REN F, et al. High energy proton irradiation effects on SiC schottky rectifiers [J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(13): 2385-2387.
- [26] CHAO D S, SHIH H Y, JIANG J Y, et al. 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 (SB): SBBD08.
- [27] SZE S M. Physics of semiconductor devices[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 15(12): 1438.
- [28] YANG G, PANG Y, YANG Y, et al. High-dose electron radiation and unexpected room-temperature self-healing of epitaxial SiC schottky barrier diodes [J]. Nanomaterials, 2019, 9(2): 194.
- [29] AITKEN J M, YOUNG D R, PAN K. Electron trapping in electron-beam irradiated SiO₂[J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(6): 3386-3391.
- [30] STORASTA L, BERGMAN J P, ANZÉN E, et al. Deep levels created by low energy electron irradiation in 4H-SiC [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(9): 4909-4915.
- [31] CINAR K, COSKUN C, AYDOGAN S, et al. The effect of the electron irradiation on the series resistance of Au/Ni/6H-SiC and Au/Ni/4H-SiC schottky contacts [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2010, 268(6): 616-621.
- [32] PEASE R L, ENLOW E W, DINGER G L, et al. Comparison of proton and neutron carrier removal rates[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1988, 34 (6): 1140-1146.
- [33] MCGARRITY J M, MCLEAN F B, DELANCEY W M, et al. Silicon carbide JFET radiation response[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1992, 39(6): 1974-1981.
- [34] HEMMINGSSON C, SON N T, KORDINA O, et al. Deep level defects in electron-irradiated 4H-SiC epitaxial layers [J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81(9): 6155-6159.
- [35] OMOTOSO E, MEYER W E, AURET F D, et al. The influence of high energy electron irradiation on the schottky barrier height and the Richardson constant of Ni/4H-SiC schottky diodes[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2016, 39: 112-118.
- [36] OMOTOSO E, MEYER W E. The effects of high-energy proton irradiation on the electrical characteristics of Au/Ni/4H-SiC schottky barrier diodes [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2017: 241-245.
- [37] OMOTOSO E, MEYER W E, AURET F D, et al. Effects of 5.4 MeV alpha-particle irradiation on the electrical properties of nickel schottky diodes on 4H-SiC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2016, 365: 264-268.
- [38] AURET F D. Electrical characterization of deep levels created by bombarding nitrogen-doped 4H-SiC with alpha-particle irradiation[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2016, 371: 312-316.
- [39] 叶毅, 张金平, 罗小蓉, 等. 新型 4H-SiC 阳极凹槽 D-RESURF 肖特基二极管[J]. 微电子学, 2008, 38 (4): 457-467.
- [40] 陈刚, 秦宇飞, 柏松, 等. 采用场板和边缘终端技术的大电流 Ni/4H-SiC SBDs[J]. 固体电子学研究进展, 2009, 29 (4): 611-614.
- [41] HAZDRA P, ZÁHLAVA V, VOBECKÝ J. Point defects in 4H-SiC epilayers introduced by neutron irradiation [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2014, 327(1): 124-127.
- [42] BERG D, HALLÉN A, PELLEGRINO P, et al. Nitrogen deactivation by implantation-induced defects in 4H-SiC epitaxial layers[J]. Applied Surface Science, 2001, 78(19): 2908-2910.
- [43] 刘超铭, 肖一平, 王天琦, 等. 4H-SiC 结势垒肖特基二极管电子辐照效应测试分析[J]. 现代应用物理, 2021, 12(2): 71-77.
- [44] GUPTA S, MURALIKIRAN M, FARMER J, et al. The effect of boron doping and gamma irradiation on the structure and properties of microwave chemical vapor deposited boron-doped diamond films[J]. Journal of Materials Research, 2009, 24(4): 1498-1512.

- [45] ÇINAR K, COSKUN C, AYDOĞAN S, et al. The effect of the electron irradiation on the series resistance of Au/Ni/6H-SiC and Au/Ni/4H-SiC schottky contacts [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2010, 268(6): 616-621.
- [46] PARADZAH A T, OMOTOSO E, LEGODI M J, et al. Electrical characterization of high energy electron irradiated Ni/4 H-SiC schottky barrier diodes[J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45(8): 4177-4182.
- [47] LUO Z, CHEN T, CRESSLER J D, et al. Impact of proton irradiation on the static and dynamic characteristics of high-voltage 4H-SiC JBS switching diodes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(6): 1821-1826.
- [48] OMOTOSO E, MEYER W E, AURET F D, et al. Response of Ni/4H-SiC schottky barrier diodes to alpha-particle irradiation at different fluences[J]. Physica B: Condensed Matter, 2016, 480: 196-200.
- [49] PEARTON S J, DEIST R, REN F, et al. Review of radiation damage in GaN-based materials and devices[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2013, 31(5): 050801.
- [50] PONS D, BOURGOIN J C. Irradiation-induced defects in GaAs[J]. Journal of Physics C: Solid State Physics, 1985, 18(20): 3839.
- [51] LIU C, BERENCÉN Y, YANG J, et al. Irradiation effects on the structural and optical properties of single crystal β -Ga₂O₃[J]. Semiconductor Science and Technology, 2018, 33(9): 095022.
- [52] 陈刚, 秦宇飞, 柏松, 等. 采用场板和边缘终端技术的大电流 Ni/4H-SiC SBDs[J]. 固体电子学研究进展, 2009, 29(4): 611-614.
- [53] ALEXANDRU M, FLORENTIN M, CONSTANT A, et al. 5 MeV proton and 15 MeV electron radiation effects study on 4H-SiC nMOSFET electrical parameters [C]// European Conference on Radiation & Its Effects on Components & Systems. IEEE, 2014: 1732-1738.
- [54] LIANG X W, CUI J W. Study of the influence of gamma irradiation on long-term reliability of SiC MOSFET [J]. Radiation Effects and Defects in Solids, 2020, 175(5-6): 559-566.
- [55] SCHWANK J R, SHANEYFELT M R, FLEETWOOD D M, et al. Radiation effects in MOS oxides[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(4): 1833-1853.
- [56] 于成浩. 功率 MOSFET 单粒子效应及辐射加固研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [57] 于庆奎, 曹爽, 张洪伟, 等. SiC 器件单粒子效应敏感性分析[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(10): 2114-2119.
- [58] HULL B A, DAS M K, RYU S H, et al. Status of 1200 V 4H-SiC power DMOSFETs[C]// 2007 International Semiconductor Device Research Symposium, 2007.



作者简介:

刘超 (1986—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为电子元器件辐射效应及可靠性。