

碳化硅结势垒肖特基二极管质子辐照损伤研究

刘翠翠¹ 李治明² 韩金华¹ 郭刚¹ 殷倩¹ 张艳文¹ 刘建成¹

1(中国原子能科学研究院 国防科技工业抗辐照应用技术创新中心 北京 102413)

2(兰州大学 核科学与技术学院 兰州 730000)

摘要 碳化硅功率器件凭借优异性能被抗辐照应用领域寄予厚望。为探究碳化硅功率器件抗中能质子辐照损伤能力,明确其辐射效应退化机制,对标低地球轨道累积十年等效质子位移损伤注量,针对高性能国产碳化硅结势垒肖特基二极管开展了10 MeV质子室温、无偏压辐照实验。测试了器件辐照前后的正向伏安特性、反向伏安特性、电容特性等电学特性,并通过深能级瞬态谱仪分析了辐照缺陷引入特点。结果显示:器件辐照后正向电性能稳定,较低反向安全电压下漏电流减小,注量增加后击穿电压严重退化;分析认为质子辐照导致势垒高度增加、辐照缺陷增加、载流子浓度降低。碳化硅肖特基功率器件的辐射损伤过程及机理研究,为其中能质子环境应用的评估验证提供了数据支撑。

关键词 碳化硅结势垒肖特基二极管, 中能质子, 辐射效应, 电学性能, 深能级缺陷

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.020203

Proton irradiation damage in silicon carbide junction barrier Schottky diode

LIU Cuicui¹ LI Zhiming² HAN Jinhua¹ GUO Gang¹ YIN Qian¹ ZHANG Yanwen¹ LIU Jiancheng¹

1(National Radiation Application Center, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2(School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract [Background] Silicon carbide junction barrier Schottky (SiC JBS) diode is a kind of power device based on wide bandgap semiconductor. SiC JBS diode is expected to become an important part of electric propulsion systems in the radiation application field in the future space exploration due to its excellent high-voltage, high-frequency and high-power characteristics. However, there are a large number of protons in the typical orbit of spacecraft, which always threaten the stable operation of spacecraft, including its key components. [Purpose] This study aims to explore the resist ability of SiC JBSs to the degradation of medium energy proton irradiation, and clarify the mechanism of radiation effect of SiC JBSs from medium energy proton. [Methods] Based the proton equivalent displacement damage dose in low Earth orbit for ten years, the SiC JBSs were firstly irradiated using 10 MeV protons at fluences ranging from $3 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ to $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ at room temperature and without bias voltage. And the macro electrical characteristics of the SiC JBSs both before and after irradiation, including the forward current-voltage (I - V), reverse I - V and capacitance-voltage (C - V) characteristics, were tested. Then the irradiation-induced defects characteristics were tested by deep level transient spectrum (DLTS). Further, the related degradation mechanism that was associated with this phenomenon was also investigated using based on the test data and

中核集团“青年英才”科研项目(No.11FY212306000801)资助

第一作者: 刘翠翠, 女, 1993年出生, 2020年于中国科学院半导体研究所获博士学位, 研究领域为半导体器件辐射效应及可靠性分析

通信作者: 郭刚, E-mail: ggg@ciae.ac.cn

收稿日期: 2022-06-25, 修回日期: 2022-10-18

Supported by Young Talents Project of China National Nuclear Corporation (No.11FY212306000801)

First author: LIU Cuicui, female, born in 1993, graduated from Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2020, focusing on radiation effect and reliability analysis of semiconductor devices

Corresponding author: GUO Gang, E-mail: ggg@ciae.ac.cn

Received date: 2022-06-25, revised date: 2022-10-18

mathematical calculation. Finally, irradiation experiments of accelerator protons were carried out for commercial SiC JBSs. **[Results]** The results show that the forward electrical characteristic of the SiC JBSs is stable, and the leakage current decreases at low reverse safety voltage. But the rated breakdown voltage is seriously degraded with the increase of irradiation fluence. The main contribution to the change of SiC JBSs characteristics originates from the increase of interface charge, deep level defects and Schottky barrier height, and the decrease of carrier density and carrier diffusion length in the drift region. **[Conclusions]** Analysis of the radiation damage process and mechanism of SiC JBSs in this study provides a research basis for its evaluation and verification before applied to medium energy proton environment.

Key words SiC JBS, Intermediate energy proton, Radiation effect, Electrical performance, Deep level defect

第三代宽禁带半导体材料碳化硅(Silicon carbide, SiC)性能突出,其禁带宽度是硅的2倍,热导率是硅的3倍,饱和漂移速度是硅的2倍,并且拥有更高的原子离位阈能,故SiC功率器件的抗辐照应用前景也被广泛看好^[1-3]。SiC结势垒肖特基二极管(Junction Barrier Schottky diode, JBS)是目前最广泛应用的高压大功率器件之一,其相比传统的肖特基势垒二极管(Schottky Barrier Diode, SBD),具有工作电流大、开关速度快、抗浪涌特性好、适宜千伏以上高压应用等突出优势,非常适合航天电源系统^[4-6],有望在先进空间核动力及深空探测任务中扮演重要角色。但空间自然辐射环境中存在大量高能粒子,其中主要成分是质子,会导致半导体器件产生多种辐射效应。一般来讲,辐射效应分为单粒子效应(Single Event Effect, SEE)、总剂量效应(Total Ionization Dose, TID)及位移损伤效应(Displacement Damage, DD)^[7-8],早在21世纪初国外便开展了关于SiC JBS或SBD等功率器件位移损伤效应的相关研究。

2002年, Nigam^[9]通过40 MeV质子辐照SiC肖特基整流器的实验发现器件受辐照缺陷影响肖特基势垒高度改变,同时复合中心使正向电流低偏压下增大、高偏压下减小,且反向击穿电压降低。2004年, Luo^[10]利用63.3 MeV质子辐照SiC SBD实验发现, SBD辐照后反向特性改善,并认为是质子对4H-SiC的退火效应导致部分深能级缺陷消失产生的结果。2005年, Harris^[11]根据203 MeV质子辐照SiC SBD的实验结果提出了载流子去除作用是引起该器件串联电阻变大、电学性能退化的关键原因。2019年, Hazdra^[12]结合质子辐照实验识别了SiC JBS的部分缺陷类型,并进一步阐述了辐照产生的深能级缺陷Z1/Z2引起N型漂移区发生载流子去除效应是导致SiC JBS位移损伤退化的主要原因。2020年, Ivana^[13]通过中子实验也发现,不同类型缺陷对SiC SBD电学性能有不同影响,该结论与前人质子辐照缺陷的解释吻合。

纵观近年来国内外研究结果可知,被普遍认可的DD造成SiC JBS电性能退化的基本机制是辐照缺陷导致的载流子去除效应。其过程可描述为辐照在器件轻掺杂漂移区引入受主型缺陷,产生载流子去除效应并导致载流子浓度下降、扩散长度下降、电导率调制损失,表现出正向压降增加。对比国内外现状发现, SiC JBS被质子辐照之后电学性能的变化特点并不统一,关于其辐射效应退化物理机制的描述众说纷纭,更缺乏针对性抗辐射加固技术,导致SiC功率器件也迟迟未被真正应用于航空航天领域,因此针对SiC功率器件更多更深入的辐射效应退化机制研究仍亟待开展。

1 实验设置

为了研究SiC功率器件对中能质子的辐射效应响应特点,分析其位移损伤效应机理,针对国产商用高性能SiC JBS开展了质子辐照实验研究。试验样品为国产商用的SiC JBS,其额定反向电压阈值是1 200 V,平均正向电流为40 A,采用双芯TO-247-3规格共阴极封装。为保证质子能量作用于器件时未受损失,试验前对SiC JBS进行开帽处理,即去除聚合物顶盖使芯片裸露,开帽处理后的试验样品实物如图1所示。

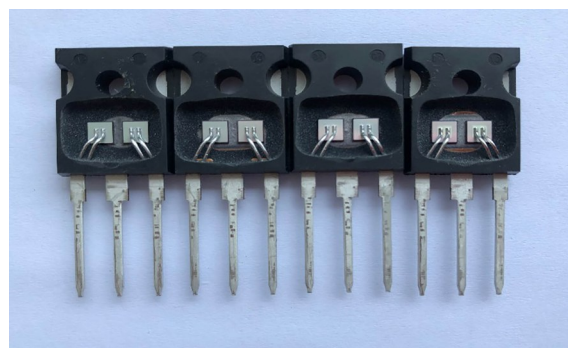


图1 试验用SiC JBS样品实物
Fig.1 Snapshot of test samples of SiC JBS

辐照实验前需筛选特性参数稳定性、均一性较好的器件作为实验样品,图2是筛选出的样品辐照前的电学性能初测结果,可见筛选出的同一器件的

左侧、右侧两只芯片,以及不同器件之间的正向 I - V 特性、反向 I - V 特性都较统一,稳定性和均一性较好,符合实验要求。

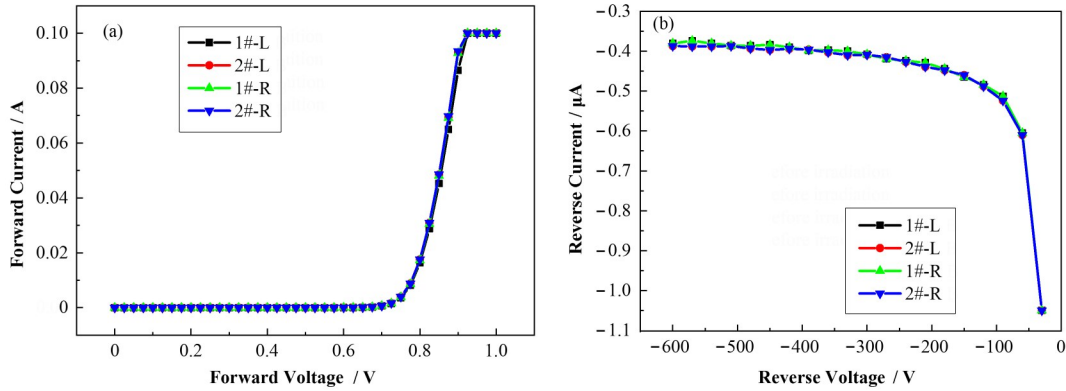


图2 辐照前样品的正向电学性能(a)及反向电学性能(b)

Fig.2 Forward electrical characteristics (a) and reverse electrical properties (b) of SiC JBSs before irradiation

10 MeV 质子等效位移损伤注量是地面模拟辐照位移损伤研究中常用的等效研究方法,以低地球轨道 10 年的累积注量为目标场景,10 MeV 质子等效位移损伤注量约为 $3 \times 10^{10} \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$ [14-16]。由于 10 MeV 质子在 SiC 中的射程约 480 μm ,在铝材料中的射程约 620 μm ,而该 SiC JBS 器件表面 Al 金属层厚度约 4 μm ,外延结构总厚度约 360 μm ,故 10 MeV 质子可依次穿透器件表面金属电极层、肖特基结界面、PN 结界面以及 N-/N+ 外延界面,并影响各界面及各层材料性能。在 10 MeV 能量点分别开展了注量为 $3 \times 10^9 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $3 \times 10^{10} \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$ 质子辐照,质子辐照实验在中国原子能科学研究院 HI-13 串列静电加速器上开展,辐照时器件的所处环境为室温、无偏压状态,每种条件下的辐照时间均为 1 000 s,相关试验参数及样品编号列于表 1。

表 1 质子辐照试验参数

Table 1 The experimental parameters of proton irradiation

能量 Energy / MeV	编号 Number	注量率 Fluence rate / $\text{p} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	总注量 Fluence / $\text{p} \cdot \text{cm}^{-2}$
10	1#	3×10^6	3×10^9
	2#	3×10^7	3×10^{10}

辐照前后,采用 Keithley 2410 源表、B1500 半导体器件分析仪以及 Phystech FT1030 DLTS 测试谱仪等仪器,分别对器件左侧(L)和右侧(R)芯片的正向 I - V 特性、反向 I - V 特性、 C - V 特性等电学性能以及深能级缺陷进行了测试分析,其中 C - V 测试频率为 1 MHz,DLTS 测试偏压为-8 V。左侧和右侧芯片的数据可作为对照进行分析。

2 结果分析

2.1 正向 I - V 特性

图3为 SiC JBS 质子辐照试验前后的正向 I - V 曲线,其中,图3(a)为器件左侧芯片的 I - V 特性曲线,图3(b)为器件右侧芯片的 I - V 特性曲线。由图3可见,质子辐照之后,器件的正向 I - V 特性的改变非常小。精确测试分析发现,在达到 1 mA 开启状态时,几乎所有器件辐照后的开启电压都出现了小幅度增大;而在超过 1 V 较大正向偏压下,经过质子辐照的器件正向电流也出现小幅度的增长。同时,正向 I - V 特性改变量与质子注量的关系较小,即正向电流没有随质子累积注量的增加而出现明显的正向增加关系。

根据热电子发射理论,在较小偏压下, SiC JBS 电流主要由其肖特基势垒高度决定;在较高偏压下, SiC JBS 电流主要由其串联电阻决定。较小偏压下 SiC JBS 的热电子发射电流 I 可用式(1)表示^[17]:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nK_B T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中: q 是电子电荷; V 是正向工作电压; K_B 是玻尔兹曼常数; I_s 是反向饱和电流; n 是理想因子。反向饱和电流 I_s 的计算由式(2)推导得到:

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{K_B T}\right) \quad (2)$$

式中: Φ_B 为肖特基势垒高度; A 是二极管有源区面积; A^* 是 Richardson 常数,其值为 $146 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ 。 I_s 可通过 $\ln I$ 相对于 V 的曲线与 Y 轴的截距,即当 $V=0$ 时的值得到。

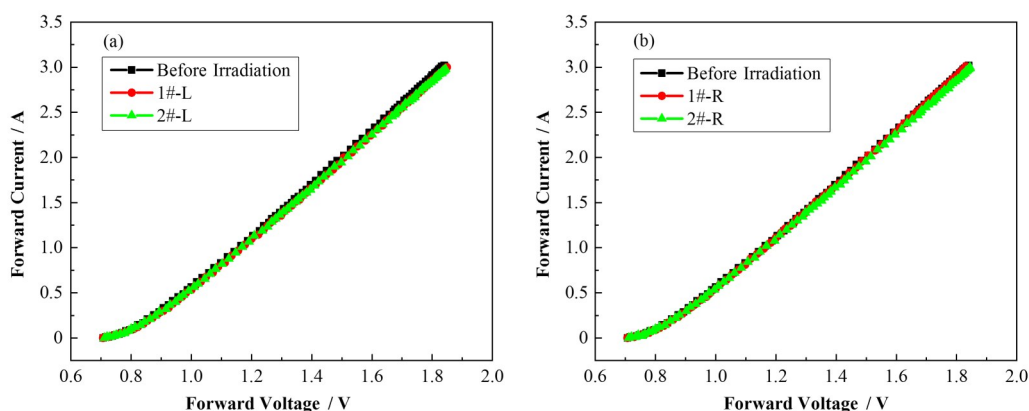


图3 质子辐照前后左侧芯片(a)及右侧芯片(b)的正向*I-V*曲线
Fig.3 Forward *I-V* characteristic curves of left chip (a) and right chip (b) of SiC JBSs before and after proton irradiation

理想因子 n 可用于描述热电子发射电流的占比,其值约接近于1,代表热电子发射电流占比越大,其值可由式(3)表示:

$$n = \frac{q}{K_B T} \times \frac{dV}{d \ln I} \quad (3)$$

肖特基势垒 Φ_B 则可通过式(4)提取:

$$\Phi_B = \frac{K_B T}{q} \times \ln \left(\frac{A A^* T^2}{I_s} \right) \quad (4)$$

采用以上数学模型并结合器件的正向*I-V*测试数据,提取辐照后 SiC JBS 器件的理想因子 n 发现,同正向*I-V*曲线所呈现的测试结果类似, n 基本维持在1.5以下,仅小幅度增长,说明采用10 MeV中能质子、以类比低地球轨道十年的累积注量辐照之后,器件电流仍旧以热电子发射作用产生的电流为主。同时,较高电压下辐照后器件的正向电流随电压增加幅度几乎没有变化,结合计算公式发现,串联电阻 R_s 也基本没有发生改变,而较大电压下正向电流小幅度的增加,可能与质子电离作用有关:10 MeV质子在SiC中得线性能量传输值(Linear Energy Transfer, LET)约 $0.35 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$,质子可电离出额外的电子空穴对,短时间内增加了器件内的载流子浓度,导致正向电流出现小幅度增加,但该电荷会随室温退火而逐渐复合并消失。

辐照前后的理想因子 n 变化情况如图4所示。辐照前的 JBS 的理想因子 n 的范围在1.020~1.021,接近于1,这表明热电子发射是此 SiC JBS 主要的电流传导机制。经过 $3 \times 10^9 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$ 注量质子辐照后器件的理想因子 n 改变较小,经过 $3 \times 10^{10} \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$ 注量质子辐照后理想因子 n 也仅增加至1.022,说明质子辐照在器件内引入了少量的复合电流,导致原来的电流传输机制稍有改变,但是仍旧以热电子发射为主。

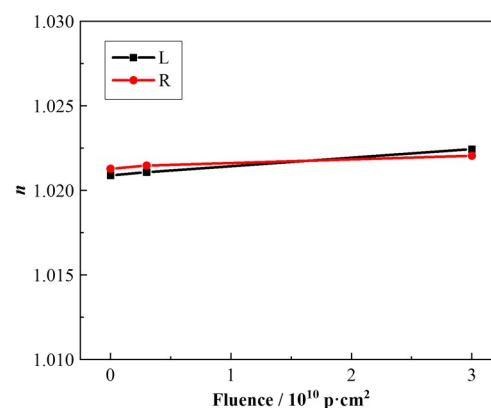


图4 SiC 器件质子辐照前后的理想因子
Fig.4 Comparison of ideal factor n of SiC JBS before and after irradiation

2.2 反向*I-V*特性

质子辐照试验前后 SiC JBS 的反向*I-V*特性曲线如图5所示,同样图5(a)为器件左侧芯片的*I-V*特性曲线,图5(b)为器件右侧芯片的*I-V*特性曲线。可见,在较小反向偏压下,基本所有器件辐照后的反向电流出现下降,同时从原来 $4.2 \times 10^{-7} \text{ A}$ 减小到 $2.8 \times 10^{-7} \text{ A}$;而随着反向电压增加,器件的反向电流开始增加,其中,经过 $3 \times 10^{10} \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$ 较大注量质子辐照后2#-L的反向阈值电压发生了严重退化,由原始的大于1200 V退化至在小于200 V时即出现了反向击穿。

对于反向电流小偏压下减小的原因,可从器件工作方式和反向电流组成部分的角度切入分析。SiC JBS 的反向电流主要包含热电子发射电流、隧穿电流以及空间耗尽区复合电流三个部分^[18]。因此,产生此现象的具体机制为:1)质子辐照引入缺陷并形成载流子陷阱和复合中心,由于俘获载流子增加、复合作用增强,载流子寿命降低、载流子浓度减小,

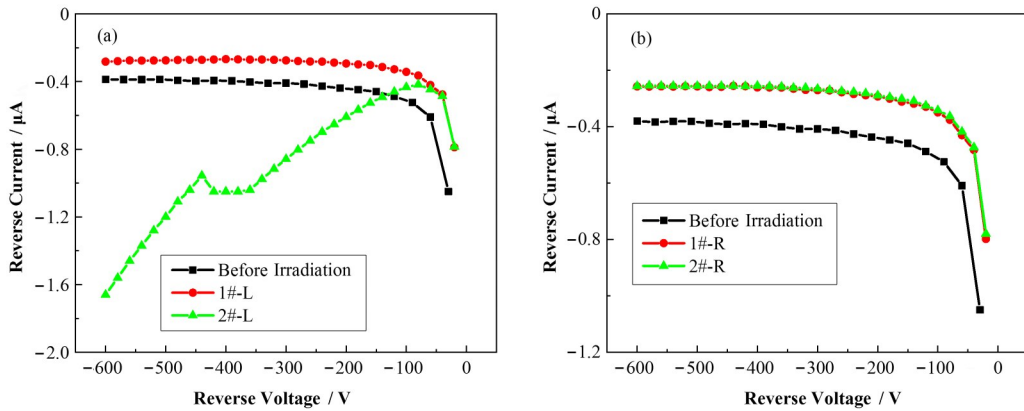


图5 质子辐照后左侧芯片(a)及右侧芯片(b)的反向*I-V*曲线
Fig.5 Reverse *I-V* characteristic curves of left chip (a) and right chip (b) of SiC JBSs before and after proton irradiation

即产生了载流子去除效应;2)质子辐照导致肖特基势垒高度改变,进而影响到热电子发射电流及隧穿电流;3)质子的电离作用导致器件SiC肖特基接触界面处电荷增加,表面电场改变,反向电流和反向击穿电压均受影响。在较高反向偏压下,PN结耗尽区展宽,导致反向电流被截止。而部分被质子辐照过的器件出现了反向电流的骤增,说明质子辐照在器件内部引入了大量缺陷以及界面电荷,并由其协同作用导致器件的安全工作区受到影响,所以当反向偏压增加到一定程度时更容易出现击穿,即出现了电流的骤增。这类界面电荷属可恢复电荷,经退火

等处理即可去除其影响。对室温退火后的器件进行了反向*I-V*测试,结果如图6所示。可见,质子辐照后初期出现严重退化的2#-L器件反向*I-V*特性未恢复,经过 $3 \times 10^9 \text{ p}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $3 \times 10^{10} \text{ p}\cdot\text{cm}^{-2}$ 质子辐照之后的额定电压分别从1200 V以上降低至890 V、800 V。这是由于质子辐照引入了位移缺陷,威胁到器件的可靠性,进而导致器件的反向击穿电压严重下降。而且,所有器件在较小反向电压下的电流均恢复到辐照前的大小,也证明质子辐照引入了器件界面电荷,而室温退火消除了界面电荷的影响。

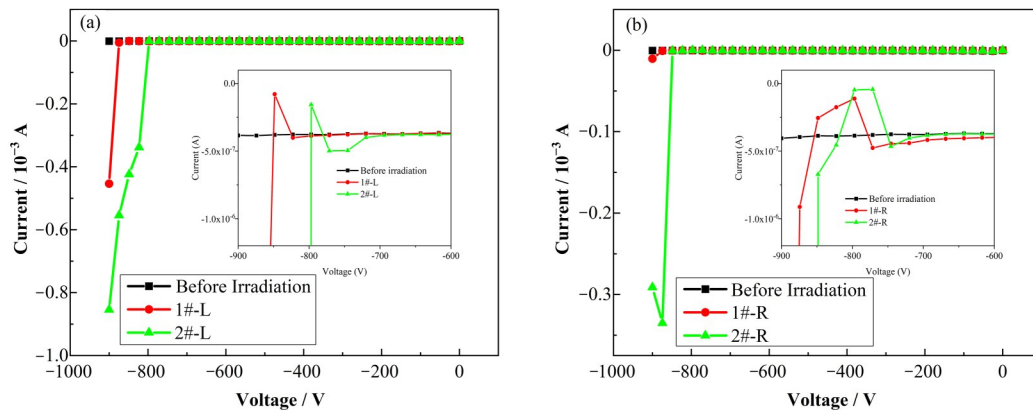


图6 室温退火后左侧芯片(a)及右侧芯片(b)的反向*I-V*曲线
Fig.6 Reverse *I-V* characteristic curves of left chip (a) and right chip (b) of SiC JBSs after room temperature annealing

2.3 C-V特性

SiC JBS具有PN结肖特基势垒复合结构,可消除隧穿电流对最高阻断电阻的限制,因此具有较高的击穿电场强度。通过辐照之后初期的测试结果发现,器件的正向*I-V*特性基本未变化,雪崩击穿电压和*C-V*特性也基本稳定,因此认为PN结没有被破坏。因此,通过测试*C-V*特性可推算器件耗尽层宽度的变化以及势垒高度的变化,而且在实际情况下,

肖特基势垒的提取有两种方法,既可以通过测量JBS的正向特性曲线的斜率结合式(4)提取肖特基势垒高度,也可以通过*C-V*曲线提取。图7则为器件辐照后1~10 V测试偏压下的*C-V*曲线,可见辐照后器件电容量出现下降。器件原始电容量在0 V处为2600 pF,经过 $3 \times 10^9 \text{ p}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $3 \times 10^{10} \text{ p}\cdot\text{cm}^{-2}$ 剂量质子辐照后,左侧芯片依次降低至2320 pF及1630 pF,右侧芯片依次降低至1950 pF及1900 pF。

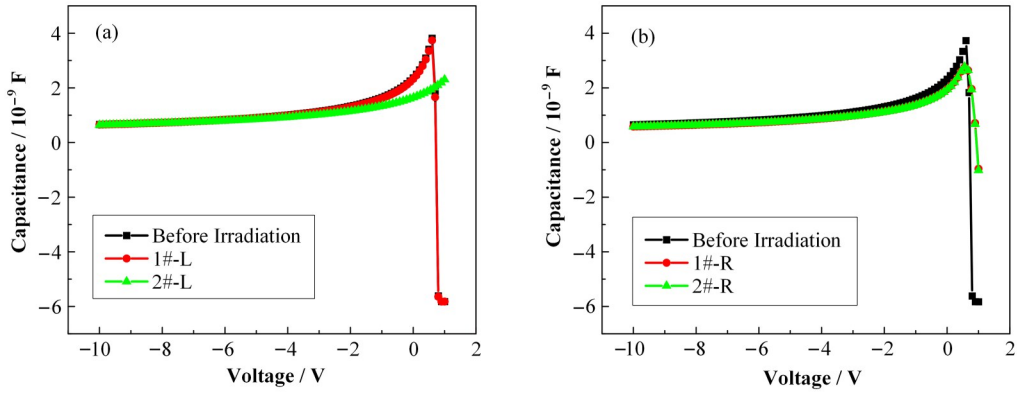


图7 质子辐照前后左侧芯片(a)及右侧芯片(b)的 C - V 曲线
Fig.7 C - V characteristic curves of left chip (a) and right chip (b) of SiC JBSs before and after proton irradiation

SiC JBS 的肖特基势垒高度 Φ_B 可通过 C - V 特性提取,如式(5)描述^[19]:

$$\Phi_B = V_{bi} + \frac{K_B T}{q} \times \ln\left(\frac{N_C}{N_{eff}}\right) \quad (5)$$

式中: V 是外加电压; V_{bi} 是内建电势; N_{eff} 为有效载流子浓度; N_C 为4H-SiC的有效态密度,其值为 $1.69 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。对比式(4)和式(5)的结果,可以验证数学计算的正确性以及理论分析的可靠性。对于SiC JBS电容 C 与电压 V 的关系可由式(6)表示^[20]:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{\epsilon_s q A^2 N_{eff}} \times (V_{bi} + V) \quad (6)$$

式中: ϵ_s 是材料的相对介电常数,对于4H-SiC其值为 $9.7 \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ 。结合图7及式(7)所得质子辐照后的1#、2#器件以及未辐照器件的 $1/C^2$ - V 关系曲线如图8所示。式(6)斜率的绝对值为 $\frac{2}{\epsilon_s q A^2 N_{eff}}$,与载流子浓度呈反比关系,各关系曲线与 X 轴的截距为内建电势 V_{bi} 。

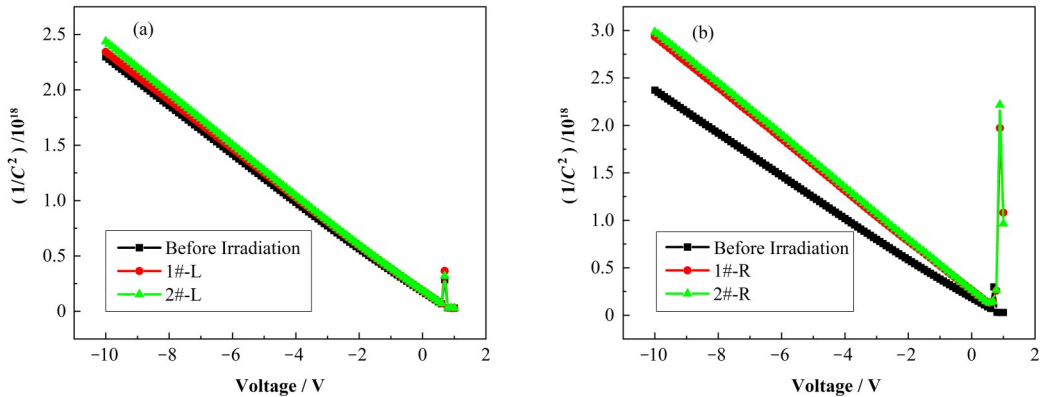


图8 质子辐照前后左侧芯片(a)及右侧芯片(b)的 $1/C^2$ - V 关系曲线
Fig.8 The curve of $1/C^2$ - V of left chip (a) and right chip (b) of SiC JBSs before and after proton irradiation

对式(6)变形后可得式(7):

$$N_{eff} = \frac{2}{\epsilon_s q A^2} \times \left(\frac{V_{bi} + V}{1/C^2} \right) \quad (7)$$

式中: $\frac{2}{\epsilon_s q A^2}$ 是一个常量。计算所得曲线的斜率及与 X 轴的截距如表2所示。分析可见,质子辐照之后 $1/C^2$ - V 关系曲线的斜率的绝对值变大,曲线与 X 轴截距的减小,说明经过质子辐照后器件内建电势 V_{bi} 增加, $\frac{V_{bi} + V}{1/C^2}$ 比值减小。

表2 质子辐照前后SiC JBS的 $1/C^2$ - V 关系曲线参数
Table 2 The data from the curve of $1/C^2$ - V of SiC JBS before and after irradiation

编号 Number	斜率 Slope / $\text{pF}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}$		X轴截距 X-axis intercept	
	L	R	L	R
芯片 Chip				
辐照前 Before irradiation				
1#	-2.16×10^{17}	-2.17×10^{17}	0.96	0.95
2#	-2.22×10^{17}	-2.51×10^{17}	0.97	1.21
	-2.34×10^{17}	-2.55×10^{17}	1.08	1.29

结合式(7)及图8数据,即可计算得到器件辐照前后的 N_{eff} 及 V_{bi} ,将其带入式(4)及式(7)即可得到器件辐照前后的肖特基势垒高度 Φ_{B} 。采用C-V法器件辐照前后的肖特基势垒高度 Φ_{B} 、载流子浓度 N_{eff} 的计算结果如表3所示。分析可知,经过质子辐照后辐照缺陷增加,对载流子的俘获能力增强、载流子之间的复合能力增强,因此导致器件肖特基势垒高度 Φ_{B} 上升,有效载流子浓度 N_{eff} 下降。

表3 质子辐照前后SiC JBS的关键参数
Table 3 The Key performance parameters of SiC JBS before and after irradiation

编号 Number	肖特基势垒高度 Schottky Barrier Height $\Phi_{\text{B}} / \text{V}$		有效载流子浓度 Effective carrier concentration $N_{\text{eff}} / \text{cm}^{-3}$	
	L	R	L	R
	辐照前 Before Irradiation	1.03	1.02	2.33×10^{16}
1#	1.04	1.38	2.27×10^{16}	2.00×10^{16}
2#	1.05	1.46	2.15×10^{16}	1.97×10^{16}

2.4 DLTS测试分析

图9为辐照前后SiC JBS的DLTS测试结果。从器件辐照前的DLTS测试结果可以看出,其DLTS谱线中存在大量E1、Z1/Z2、EH3、EH5等深能级缺陷峰位,分别位于导带下0.39 eV、0.67 eV、0.70 eV、1.10 eV附近,其均为受主型缺陷。研究表明,E1的产生与硅空位有关,Z1/Z2的产生与碳空位有关,而EH3、EH5等是由多个缺陷能级叠加形成的复合缺陷能级^[11-12,21]。

分析图9发现,经过辐照质子注量的增加,Z1/Z2、EH3、EH5几个重要的缺陷峰均有不同程度的增强,同时Z1/Z2左侧的缺陷峰E2增强,E1缺陷峰减弱,其中E2能级位于导带下0.60 eV处,具有受主型

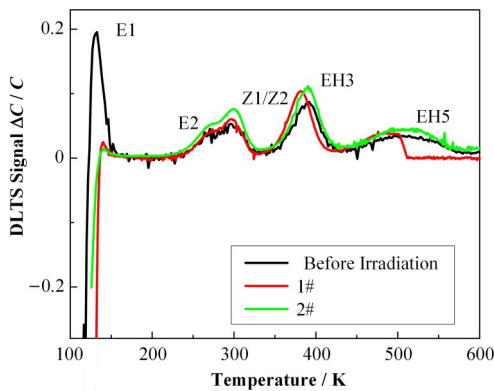


图9 SiC器件质子辐照前后的DLTS结果
Fig.9 Comparison of DLTS test results of SiC JBS before and after irradiation

缺陷特征。同时,经过 $3 \times 10^{10} \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$ 注量的质子辐照后Z1/Z2、EH3、EH5缺陷峰出现了更显著的展宽现象。新的缺陷峰可能是质子辐照在器件内引入了更多的C空位缺陷或复合缺陷等深能级缺陷导致,这与文献[12]中轻离子辐照SiC JBS后的DLTS测试结果吻合。而辐照引入的新型缺陷峰位与原始缺陷峰位合并,这可以解释原始缺陷峰展宽的现象。而更多的辐照缺陷会形成大量复合中心或陷阱中心等深能级中心,增强了载流子复合能力以及暂时性俘获载流子能力,进而引起载流子浓度降低及载流子寿命减小,最终在宏观上反映为对器件反向漏电流特性、电容电压特性的影响。对于E1、EH3峰位对应的温度不一致的情况,可能与DLTS测试的低温情况下芯片温度未能达到预设温度有关。

3 结语

对标低地球轨道环境10年的10 MeV质子等效位移损伤注量,开展了SiC JBS室温无偏压的中能质子辐照实验,并通过多种测试技术提取了器件辐照前后的宏观电学特性及微观缺陷的数据。结果显示,中能质子辐照结束后会在器件内同时产生电离作用以及非电离作用,电离作用产生的电荷复合之后,由于引入了更多的深能级缺陷,复合中心与陷阱能级的作用使载流子复合与被俘获现象增强,导致SiC JBS肖特基势垒升高、载流子浓度下降、载流子寿命降低,进而导致器件安全工作阈值退化。总体来说,本文关于SiC JBS位移损伤机制的研究是基于SiC JBS的真实辐射环境开展,结合了数学计算建立了器件电学性能参数与微观缺陷性能之间的联系,多角度分析了器件产生位移损伤退化的机理。虽然实验结果证明了低地球轨道环境下SiC JBS被质子辐照10年后的退化较小,但质子辐照产生的位移缺陷对器件的长期安全工作存在隐患,严重情况下也会导致器件完全失效。这些研究对SiC功率器件抗位移损伤加固改善、保障辐射环境下电力系统的可靠应用都有重要意义。

致谢 感谢四川大学、航天772所提供的I-V、C-V等电学性能测试条件,感谢西安电子科技大学测试中心提供的DLTS测试平台。

作者贡献声明 刘翠翠:负责实验、测试以及数据处理的主要工作,提出编写思路并负责论文起草的主要工作;李治明:负责实验及测试的主要工作,负责论文起草、修改论文的主要内容;韩金华:负责质子辐照碳化硅位移损伤的相关模拟及计算;郭刚:负责审核、把关论文的科学性、严谨性;殷倩:负责质子模

拟辐照实验；张艳文：负责质子模拟辐照实验；刘建成：负责测试质子束流诊断系统、器件测试系统的操作及维护。

参考文献

- 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.
SHANG Yechun, ZHANG Yimen, ZHANG Yuming. Analysis of the SiC irradiation resistance[J]. Journal of Xidian University, 1999, **26**(6): 807–810.
- 余雪强. 碳化硅肖特基二极管和场效应管辐射累积损伤效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.001403.
YU Xueqiang. Study on radiation cumulative damage effect of sic schottky diodes and field effect transistor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.001403.
- 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.
YU Qingkui, CAO Shuang, ZHANG Hongwei, *et al.* Single event effect sensitivity analysis of SiC device[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, **53**(10): 2114–2119.
- 黄毛毛, 李瑞, 李德明, 等. 碳化硅二极管在高压电源的应用研究[J]. 核技术, 2019, **42**(5): 050402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.050402.
HUANG Maomao, LI Rui, LI Deming, *et al.* Research and application of silicon carbide diode in high voltage power supply[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(5): 050402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.050402.
- Lebedev A A, Levinshtein M E, Ivanov P A, *et al.* Fursin. Effect of Irradiation with 15-MeV Protons on Low Frequency Noise in Power SiC MOSFETs[J]. Semiconductors, 2019, **53**(12): 1568–1572. DOI: 10.1134/S1063782619160140.
- 刘翠翠, 郭刚, 李治明, 等. SiC MOSFET单粒子效应研究现状[J]. 核技术, 2022, **45**(1): 010001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.010001.
LIU Cuicui, GUO Gang, LI Zhiming, *et al.* Recent research progress of single particle effect of SiC MOSFET [J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(1): 010001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.010001.
- Song Q W, Tang X Y, Han C, *et al.* Effects of proton radiation on field limiting ring edge terminations in 4H-SiC junction barrier Schottky diodes[J]. Science China Technological Sciences, 2019, **62**(7): 1210–1216. DOI: 10.1007/s11431-018-9394-8.
- Yang F, Wang W, Wang D, *et al.* Mechanical and optical property assessment of irradiated SiC with displaced atoms[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, **41**(8): 4429–4437. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.03.020.
- 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. DOI: 10.1063/1.1509468.
- Luo Z, Chen T, Ayayi C A, *et al.* Proton radiation effects in 4H-SiC diodes and MOS capacitors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, **51**(6): 3748–3752. DOI: 10.1109/TNS.2004.839254.
- Richard H D, Albert J F, Martin O P. Displacement damage effects on the forward bias characteristics of SiC schottky barrier power diodes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005, **52**(6): 2408–2412. DOI: 10.1109/TNS.2005.860730.
- Hazdra P, Popelka S. Displacement damage and total ionization dose effects on 4H-SiC power devices[J]. IET Power Electronics, 2019, **12**(15): 3910–3918. DOI: 10.1049/iet-pel.2019.0049.
- Capan I, Brodar T, Yamazaki Y, *et al.* Influence of neutron radiation on majority and minority carrier traps in n-type 4H-SiC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2020, **478**: 224–228. DOI: 10.1016/j.nimb.2020.07.005.
- Jun I, Xapsos M A, Messenger S R, *et al.* Proton Nonionizing Energy Loss (NIEL) for device applications [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, **50**(6): 1924–1928. DOI: 10.1109/TNS.2003.820760.
- Jun I, Kim W, Evans R. Electron nonionizing energy loss for device applications[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, **56**(6): 3229–3235. DOI: 10.1109/TNS.2009.2033692.
- 孙毅, 唐民, 于庆奎. 典型卫星轨道的位移损伤剂量计算与分析[J]. 航天器环境工程, 2013, **30**(5): 487–492. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2013.05.006.
SUN Yi, TANG Min, YU Qingkui. Calculation and analysis of displacement damage dose for typical satellite orbits[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, **30**(5): 487–492. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2013.05.006.
- Wang S, Zhang Y, Zhang Y. Parameter extraction for a Ti/4H-SiC Schottky diode[J]. Chinese Physics B, 2003, **12**

- (1): 94–96. DOI: 10.1088/1009-1963/12/1/317.
- 18 肖甲木. SiC肖特基二极管单粒子失效机理研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021. DOI: 10.27389/d.cnki.gxadu.2021.001265.
XIAO Jiamu. Research on single event failure mechanism of SiC Schottky diode[D]. Xi'an: Xidian University, 2021. DOI: 10.27389/d.cnki.gxadu.2021.001265.
- 19 Donald A N. 半导体物理与器件[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
Donald A N. Semiconductor physics and devices[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- 20 Kawahara K, Xuan T T, Son N T, *et al.* Investigation on origin of Z1/2 center in SiC by deep level transient spectroscopy and electron paramagnetic resonance[J]. Applied Physics Letters, 2013, **102**(11): 112106. DOI: 10.1063/1.4796141.
- 21 Morono A, Hodgson E R, Malo M. Displacement damage effect on the radiation induced deuterium absorption for different types of SiC[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, **98**(10): 2042 – 2045. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.04.062.