

电子辐照对 SiC 功率 MOSFET 器件 动态特性的影响机理

付祥和^{1,2}, 赵小龙^{1,2}, 彭文博^{1,2}, 郭书文^{1,2}, 蔡亚辉^{1,2}, 贺永宁^{1,2}

(1. 西安交通大学电子与信息学部, 710049, 西安; 2. 西安市微纳电子与系统集成重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对 SiC 功率场效应晶体管在太空、核工业等高能粒子辐照环境下应用时的老化失效问题, 以 1 200 V SiC MOSFET 器件为对象, 研究了电子辐照对 SiC MOSFET 器件动态特性影响及机理。在 10 MeV 电子束下对 SiC MOSFET 器件进行 200 kGy 剂量的辐照; 然后, 采用双脉冲测试电路对 SiC MOSFET 器件进行开关测试, 并提取开关速度以及开关瞬态能量损耗等参数; 接着对器件进行静态特性测试得到器件的阈值电压、栅极电阻、寄生电容等参数; 最后, 对比辐照与未辐照器件动态和静态特性参数变化分析电子辐照对 SiC MOSFET 器件动态特性影响机理。分析结果表明: 在漏极电压 800 V、漏极电流 15 A、栅极外接电阻 200 Ω 的测试条件下, 辐照后器件开启延迟时间减小 11.6 ns, 开启瞬态能量损耗减小 0.18 μ J, 关断延迟时间增大 48.4 ns, 关断瞬态能量损耗增大 0.11 μ J。结合器件静态特性参数分析发现: 辐照后氧化层中正固定电荷增加 $7.14 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 器件阈值电压减小 1.5 V; 电子辐照在氧化层中电离产生电子空穴对, 氧化层陷阱捕获空穴形成带正电的固定电荷, 使得器件阈值电压减小, 这是导致器件在电子辐照后开启速度变快, 关断速度变慢的主要原因。该研究结果可为 SiC 功率器件在辐照环境中的应用以及制造厂商提高 SiC MOSFET 在辐照环境中的可靠性提供一定的参考。

关键词: SiC 功率器件; 场效应晶体管; 电子辐照; 动态特性

中图分类号: TN386.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202211010 **文章编号:** 0253-987X(2022)11-0095-09

Impact of Electron Irradiation on Dynamic Characteristics of SiC Power MOSFETs

FU Xianghe^{1,2}, ZHAO Xiaolong^{1,2}, PENG Wenbo^{1,2}, GUO Shuwen^{1,2},
CAI Yahui^{1,2}, HE Yongning^{1,2}

(1. Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. The Key Lab of Micro-Nano Electronics and System Integration of Xi'an City, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper studies the impact of electron irradiation on the dynamic characteristics of 1 200 V SiC MOSFETs and the corresponding mechanism in an attempt to tackle the aging of SiC power field-effect transistors used in high-energy particle irradiation applications such as the space and nuclear industry. First, the SiC MOSFET is irradiated with a dose of 200 kGy under 10 MeV electron beam. Then the SiC MOSFET is tested for switching in a double-pulse test circuit, and parameters such as switching speed and switching transient energy loss are recorded. After that, the static characteristics of the device are tested to obtain the threshold voltage, gate resistance,

收稿日期: 2022-03-19。 作者简介: 付祥和(1996—),男,博士生;贺永宁(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFB0407800)。

网络出版时间: 2022-07-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220712.1415.002.html>

parasitic capacitance and other parameters. Finally, the impact of electron irradiation on the dynamic characteristics of SiC MOSFETs is analyzed by comparing the dynamic and static characteristic parameters of irradiated and non-irradiated devices. The results show that the turn-on delay time of the irradiated device is reduced by 11.6 ns, the turn-on transient energy loss is reduced by 0.18 μJ , the turn-off delay time increases by 48.4 ns, and the turn-off transient energy loss increases by 0.11 μJ under a drain voltage of 800 V, a drain current of 15 A, and an external gate resistance of 200 Ω . It is found that the positive fixed charge in the oxide layer increases by $7.14 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ after irradiation, and the threshold voltage of the device decreases by 1.5 V; ionizing electron irradiation in the oxide layer creates electron hole pairs and the oxide layer traps the holes and form positive fixed charges, which reduces the threshold voltage of the device. This is the main reason for faster turn-on and slower turn-off of the device after electron irradiation. The research results can provide some reference for the application of SiC power devices in the irradiation environment and for manufacturers to improve the reliability of SiC MOSFETs in the irradiation environment.

Keywords: SiC power device; field effect transistor; electron irradiation; dynamic characteristics

功率半导体器件作为电能控制和电能转换系统的重要器件,其可靠性对于整个系统的安全运行是十分重要的。在加速老化的应力下可以加快器件的老化和失效过程,测试器件在老化过程中电学特性变化进而分析器件失效机理以及对其寿命进行预测^[1-3]。用于航天和核工业领域的电力变换电路,需要在高能粒子辐照环境下进行大功率运行,这对功率器件和功率转换电路提出了新的可靠性和要求^[1,4]。为了建立可靠的高功率密度和高效率转换电路,电力电子器件需要在辐照环境中具有安全可靠的开关性能。相对于硅材料,第三代半导体碳化硅材料具有更优越的性能^[5]。碳化硅材料禁带宽度是硅材料3倍,临界击穿电场强度是硅材料10倍,热导率是硅材料3倍,并且具有更高抗辐照能力^[6],其在航天、核工业等领域应用,使得辐照对碳化硅功率半导体器件性能影响问题越来越被重视。相对于硅基器件,基于宽禁带半导体电器元件和集成电路性能更加稳定,能适应更加恶劣的环境。

高压碳化硅 MOSFET 器件出现在商用市场之后,已经报道了电子辐照^[7-9]、质子辐照^[10-11]、中子辐照^[12-13]、伽马射线辐照^[14-17]以及单粒子效应^[18-19]对碳化硅功率 MOSFET 器件特性影响。文献[7]研究了 4.5 MeV 电子辐照对 1700 V SiC MOSFET 器件静态特性的影响,结果表明在低剂量时,随辐照剂量增加,器件阈值电压迅速降低,并在辐照剂量达到 1 kGy 时,器件阈值电压小于规格书中的阈值电压最小值,并且导通电阻随着辐照剂量的增加而增大。文献[10]研究了 15 MeV 质子辐照对 4H-SiC

MOSFET 器件静态特性的影响。随着质子辐照剂量的增大,在漂移区产生缺陷导致器件漂移区电阻增加,器件的关态漏电流也随着辐照剂量的增加而增大,栅极和漏极电容在辐照通量达到 $\Phi = 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时增大了 30 倍。文献[14]研究了伽马射线辐照对 SiC MOSFET 器件的影响,随着辐照剂量的增加,器件的阈值电压减小,关态漏电流增大。上述文献对器件辐照后的静态特性变化进行了全面的研究,但是没有对器件开关特性受辐照影响的研究。电子辐照对 SiC MOSFET 器件主要影响是在栅氧层中引入了正固定电荷^[7],由于栅氧层对于辐照很敏感,因此在功率半导体器件中 MOSFET 对于辐照耐受能力低,暴露在辐照环境中时,容易发生参数特性变化甚至失效。

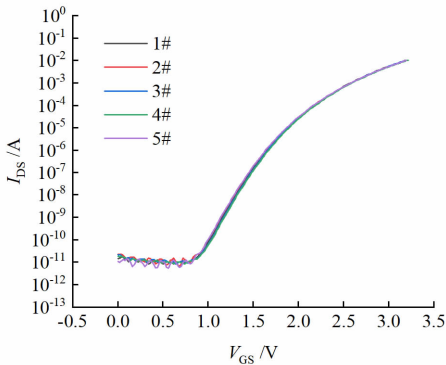
对于辐照对碳化硅 MOSFET 器件特性影响,现有文献中研究工主要集中在辐照后碳化硅器件静态特性上。然而,碳化硅 MOSFET 器件在电力电子系统中长时间工作于开关状态,碳化硅器件动态特性是电力变换系统设计的关键,对整个系统运行可靠性有着至关重要的影响,本文研究重点在于电子辐照对器件动态特性的影响。在近地表面,地磁场捕获的电子和质子围绕地球运动形成了地球的两个辐射带,内辐射带主要由质子和电子组成,外辐射带主要由高能电子组成(电子能量范围约 5~7 MeV),并且受到太阳活动的影响,辐射带中电子能量和通量也会发生剧烈变化。研究 SiC MOSFET 器件在电子辐照下的特性变化以及可靠性问题对于其在空间辐照环境中的应用是十分重要的。结合我

们目前的实验条件,此次电子辐照实验选取的电子能量为 10 MeV,与地球辐射带中电子能量在同一数量级。本文研究了电子辐照对碳化硅功率 MOSFET 动态特性的影响,并对其机理进行了分析。

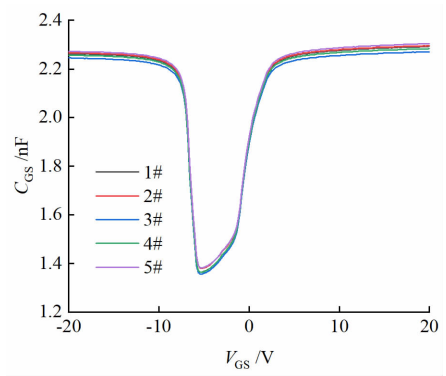
1 实 验

本实验选用 CREE 公司商用 SiC 功率 MOSFET 器件 C2M0080120D; 额定阻断电压 $V_{DS} = 1\ 200\text{ V}$, 导通电阻 $R_{DS(ON)} = 80\text{ m}\Omega$, 额定电流 $I_D = 36\text{ A}$ 。该器件为平面栅结构, 器件结构示意图如图 1 所示。此次电子辐照使用的电子加速器型号为 Rhodotron TT200 (江苏达胜加速器制造有限公司), 电子束能量 10 MeV, 加速器最大束流 10 mA, 最大功率 100 kW。辐照时, 使用的束流为 9 mA, 剂量率为 15 kGy/s。10 MeV 电子束单面标准(水)穿透深度为 3.6 cm^[20], 在碳化硅中的穿透深度为 1.125 cm(碳化硅密度为 3.2 g/cm⁻³), 器件中碳化硅芯片厚度约为 300 μm , 因此 10 MeV 电子能够完全穿透整个芯片, 电子的部分能量沉积在芯片中。实验对器件进行总剂量为 200 kGy 的辐照, 为了减小辐照过程中产生过多热量对器件特性产生影响, 整个辐照过程分为 4 次进行, 每次辐照剂量为 50 kGy。在辐照过程中, 器件的 3 个引脚未施加偏置电压, 处于悬空状态。此次进行了 1 个样品的辐照, 实验中测试对比的两个器件未辐照器件(器件 A)和辐照之后的器件(器件 B)为两个器件, 为了避免器件之间的个体差异对实验结果的影响, 所选用的两个器件为同一批次的器件(批次号: WA4720017)。图 2 给出了 5 个同批次器件均一性测试结果(亚阈值特性曲线和 C_{GS} - V_{GS} 曲线), 可以看出这 5 个器件之间差异是很小的, 因此文中器件 A 和器件 B 之间

特性差异主要是电子辐照产生的。



(a) 5 个同批次器件的亚阈值特性曲线



(b) 5 个同批次曲线的 C_{GS} - V_{GS} 曲线

图 2 同批次器件均一性测试结果

Fig. 2 Test results of homogeneity of devices from the same batch

为了能够快速准确表征功率 MOSFET 器件的开关性能, 设计并搭建了一个双脉冲测试系统, 其等效电路如图 3 所示。任意波形函数发生器产生两个方波脉冲施加到栅极驱动电路上, 控制器件开通和关断。通过调节第一个脉冲时长, 可以得到不同电流下器件关断瞬态和开通瞬态特性。双脉冲测试电路中待测器件位置在蓝色虚线框内, 如图 3 所示。负载电感使用铜线绕制的单层空心线圈电感(电感大小为 334 μH), 具有低寄生电容并且没有磁饱和和限制。续流二极管采用碳化硅肖特基二极管, 其导通压降小, 损耗低, 可以减小电感续流期间能量损失。为了保证器件在开关瞬态器件漏极电压稳定, 在直流电源上并联 51.7 μF 电容为器件开关瞬态提供电能。在测试过程中, 使用示波器电压探头对器件栅极电压和漏极电压进行采样; 漏极电流通过同轴分流器转换为电压信号传输到示波器中。

在完成动态测试以后, 使用安捷伦 B1505A 功率半导体器件测试仪、安捷伦 B2902A 和安捷伦

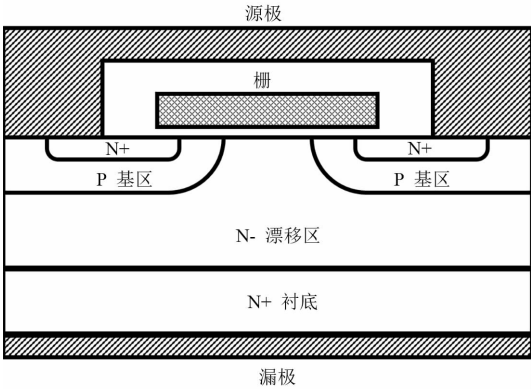
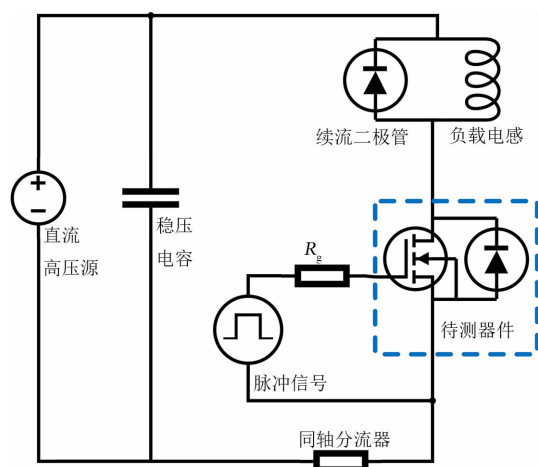
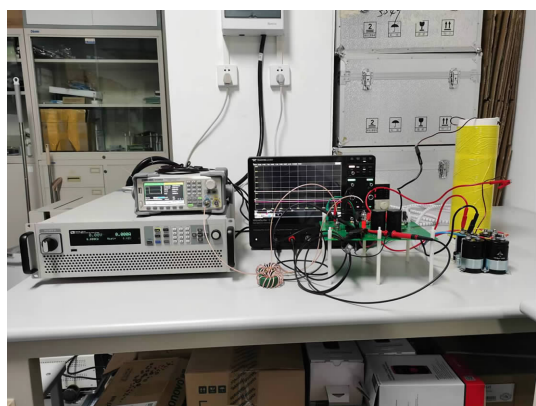


图 1 器件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of device structure



(a) 双脉冲测试电路



(b) 双脉冲测试实物照片

图3 双脉冲测试系统

Fig. 3 Double pulse test system

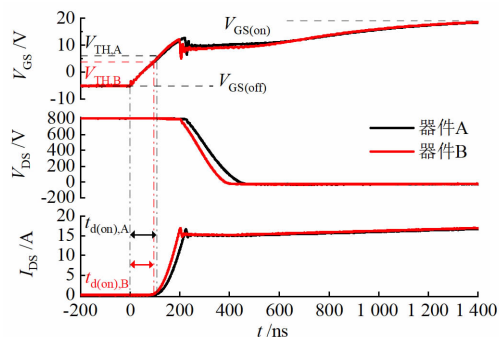
E4980AL 对器件静态特性进行了测试,主要测试内容为亚阈值特性曲线测试、 C_{GS} - V_{GS} 曲线测试和输入电容 C_{iss} - V_{DS} 曲线测试。结合动态测试结果,对器件受到辐照之后性能变化机理进行了分析。

2 结果与分析

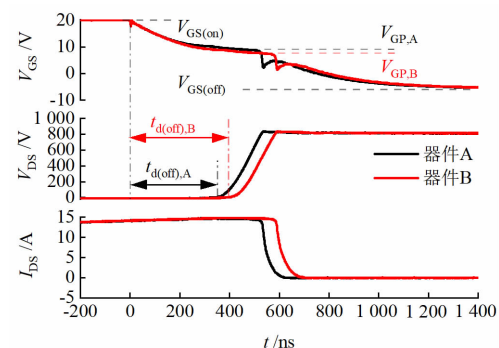
2.1 辐照对器件动态特性的影响

器件动态测试结果如图4所示,其中器件A为未辐照器件,器件B为辐照之后的器件。在开关测试中,直流电源电压为800V,负载电流15A。为了能够更明显观察到辐照对器件特性的影响,测试中外接了一个200Ω栅极电阻,减慢器件开启和关断过程。在开启瞬态,当栅极电压从0升高到阈值电压时,漏极电流开始增加,该段时间为开启延迟时间^[21]

$$t_{d(on)} = R_G [C_{GS} + C_{GD}(V_{DS})] \ln \left[\frac{V_{GS(on)} - V_{GS(off)}}{V_{GS(on)} - V_{TH}} \right] \quad (1)$$



(a) 开启瞬态特性



(b) 关断瞬态特性

图4 未辐照器件(器件A)与辐照器件(器件B)开关瞬态特性

Fig. 4 Switching characteristic for non-irradiated device (device A) and irradiated device (device B)

在关断瞬态,当栅极电压从开启电压减小至米勒平台电压时,漏极电压开始增加,该段时间称为关断延迟时间^[21]

$$t_{d(off)} = R_G [C_{GS} + C_{GD}(V_{ON})] \ln \left[\frac{V_{GS(off)} - V_{GS(on)}}{V_{GS(off)} - V_{GP}} \right] \quad (2)$$

式中: R_G 为栅极输入电阻; C_{GS} 为栅源电极电容; $C_{GD}(V_{DS})$ 为器启前栅漏电极电容; $C_{GD}(V_{ON})$ 为关断前栅漏电极电容; V_{TH} 为阈值电压; V_{GP} 为米勒平台电压; $V_{GS(on)}$ 和 $V_{GS(off)}$ 分别为施加在栅极上的开启和关断驱动电压。

两个器件开关过程中主要参数如表1和表2所示,在开启瞬态,器件B相对于器件A开启延迟时间减少11.6ns,电流变化速率增加0.01A/ns,电压变化速率增加0.78V/ns;在关断瞬态器件B相对于器件A关断延迟时间增加了48.4ns,电流变化速率减小0.04A/ns,电压变化速率减小0.03V/ns。两个器件在开关瞬态损耗功率波形和能量损耗分别如图5和表3所示,由于开关延迟时间不同,导致两个器件开关瞬态功率损耗波形峰值位置有所偏移。器件B相对于器件A,开启损耗能量减少了

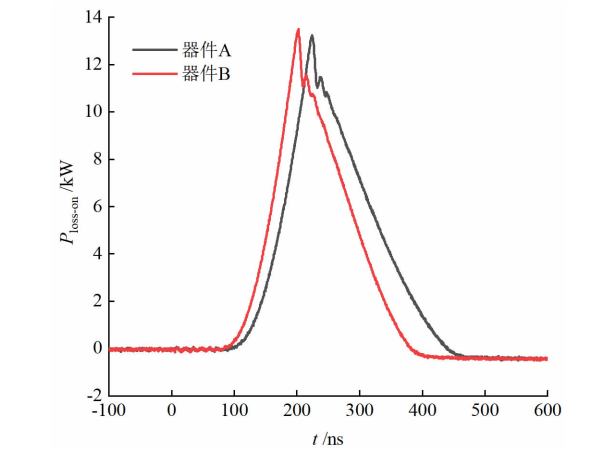
0.18 μJ ,关断损耗能量增加了 0.11 μJ 。

表 1 开启瞬态特性参数

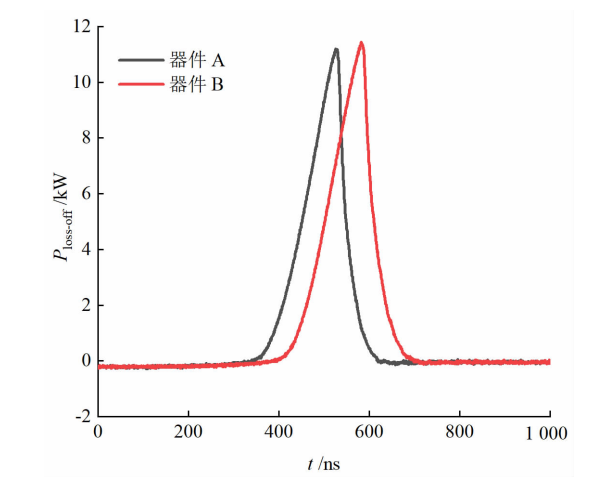
Table 1 Parameters of switching-on characteristics			
器件	开启延迟时间/ ns	$ di/dt $ / ($\text{A} \cdot \text{ns}^{-1}$)	$ dv/dt $ / ($\text{V} \cdot \text{ns}^{-1}$)
A	96.4	0.16	3.98
B	84.8	0.17	4.76

表 2 关断瞬态特性参数

Table 2 Parameters of switching-off characteristics			
器件	关断延迟时间/ ns	$ di/dt $ / ($\text{A} \cdot \text{ns}^{-1}$)	$ dv/dt $ / ($\text{V} \cdot \text{ns}^{-1}$)
A	339.6	0.23	5.31
B	388.0	0.19	5.28



(a)开启瞬态损耗功率波形



(b)关断瞬态损耗功率波形

图 5 未辐照器件(器件 A)与辐照器件(器件 B)开关瞬态损耗功率波形

Fig. 5 Switching losses waveform of non-irradiated device (device A) and irradiated device (device B)

表 3 开关瞬态能量损耗

Table 3 Switching losses energy μJ			
器件	开启损耗能量	关断损耗能量	总损耗能量
A	1.73	1.08	2.81
B	1.55	1.19	2.74

2.2 电子辐照对器件动态特性影响机理分析

由式(1)和(2)可知,对器件开关延迟时间有影响的主要因素有栅极输入电阻,输入电容($C_{iss}=C_{GS}+C_{GD}$)、阈值电压和米勒平台电压。可以通过器件静态特性参数变化来分析器件动态特性发生变化的机理。

分别测试上述两个器件的亚阈值特性曲线如图 6 所示,器件 B 相对于器件 A 亚阈值特性曲线明显左移,两器件阈值电压分别为 $V_{th,A}=2.75\text{ V}$, $V_{th,B}=1.25\text{ V}(@V_{DS}=5\text{ V}, I_{DS}=1\text{ mA})$ 。器件 B 相对于器件 A,亚阈值特性曲线(图 6)与 $C-V$ 滞回曲线(图 7)明显左移,图 6 和图 7 中分别给出了亚阈值特性曲线和 $C-V$ 滞回曲线平移后的对比,两个曲线均未发生畸变,说明氧化层内固定电荷发生了变化,但界面态并没有发生变化^[22]。Wei 等^[23]提出分段 $C-V$ 法,可以根据 $C_{GS}-V_{GS}$ 曲线的漂移提取栅氧界面损伤位置信息,图 7 结果显示 $C_{GS}-V_{GS}$ 曲线整体平移,说明栅氧层内固定电荷变化量是均匀的,电子辐照对器件栅氧层损伤是没有选择性的均匀损伤。阈值电压表达式如下所示

$$V_{TN} = \left| \frac{Q'_{SD,max}}{C_{ox}} \right| - \frac{Q'_{SS}}{C_{ox}} + \phi_{ms} + 2\phi_{fp} \tag{3}$$

式中: C_{ox} 为栅氧层电容; $Q'_{SD,max}$ 为半导体耗尽层电荷; Q'_{SS} 为氧化层中固定正电荷量; ϕ_{ms} 为金属半导体功函数差; $2\phi_{fp}$ 为半导体表面势。辐照之后阈值电压变化是氧化层固定电荷变化导致的,由式(3)可以

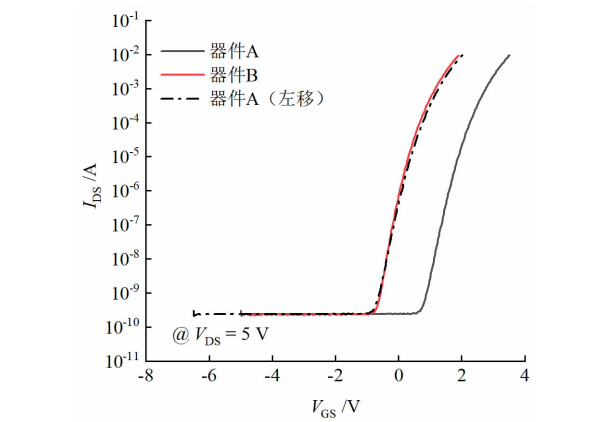


图 6 亚阈值电流曲线

Fig. 6 Subthreshold current curve

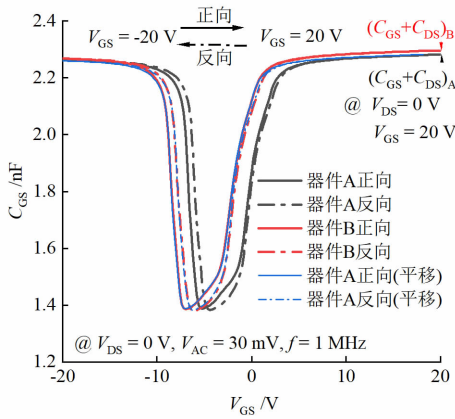


图7 器件 C_{GS} - V_{GS} 曲线

Fig. 7 C_{GS} - V_{GS} curve of the devices

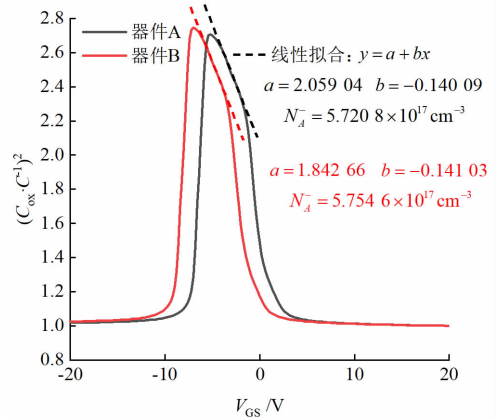


图8 $(C_{ox}/C)^2$ - V_{GS} 曲线

Fig. 8 $(C_{ox}/C)^2$ - V_{GS} curve

得到阈值电压变化量 ΔV_{th} 与氧化层固定电荷变化量 $\Delta Q'_{ss}$ 之间的关系

$$\Delta V_{th} = -\frac{\Delta Q'_{ss}}{C_{ox}} = -\frac{\Delta n q S_{ox}}{C_{ox}} \quad (4)$$

式中: Δn 为氧化层内单位面积固定正电荷变化量; 电子电量 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C; $S_{ox} = 3$ mm², 为器件栅氧层面积。器件 B 相对于器件 A, 阈值电压变化量 $\Delta V_{th} = -1.5$ V。由图 6 C_{GS} - V_{GS} 曲线可得栅氧层电容为 2.285 nF, 由式(4)计算得到辐照之后器件栅氧层中固定正电荷增加量为 $\Delta Q'_{ss} = 3\ 427.5$ pC ($\Delta n = 7.14 \times 10^{11}$ cm⁻²)。

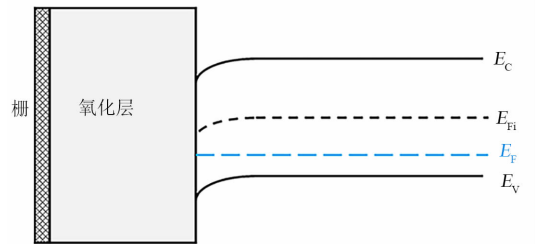
辐照效应分为电离效应和位移效应, 电离效应可以在器件中电离产生电子空穴对, 器件中的中性陷阱捕获位电子或空穴而带电, 位移效应产生缺陷捕获自由载流子会使载流子浓度下降^[24]。通过 C-V 法可以提取沟道载流子浓度^[25], 栅电容 C 和栅压 V_{GS} 之间的关系可以表示如下

$$\left(\frac{C_{ox}}{C}\right)^2 = 1 - \frac{2C_{ox}^2(V_G - V_{FB})}{q\epsilon_s\epsilon_0 N_A} \quad (5)$$

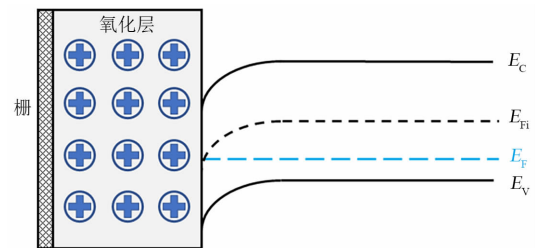
式中: C_{ox} 为氧化层电容; N_A 为电离受主浓度(载子浓度); $\epsilon_s = 10.2$ 为 4H-SiC 相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数; q 为电子电量。通过沟道表面耗尽时 $(C_{ox}/C)^2$ 与栅压的线性关系斜率可以提取沟道载流子浓度的值。 $(C_{ox}/C)^2$ 与栅压关系图如图 8 所示, 提取得到器件 A 和器件 B 的载流子浓度分别为 $5.720\ 8 \times 10^{17}$ cm⁻³ 和 $5.754\ 6 \times 10^{17}$ cm⁻³, 差值为 3.38×10^{15} cm⁻³, 因此位移效应不是主要起作用的效应。主要是电离效应起作用, 氧化层陷阱捕获空穴, 使得氧化层的固定电荷增多。

图 9 为辐照前后沟道区能带结构示意图。辐照前, 在 0 栅偏电压下, P 型 SiC 中能带图如图 9(a) 所

示; 辐照之后, 栅氧层中固定正电荷增多, 在 0 栅偏电压下 SiC 表面能带下弯变大, 氧化层/SiC 界面处价带边缘相对于辐照前更接近于费米能级, 器件阈值电压降低^[26]。因此, 辐照之后栅极正固定电荷增多会对器件性能产生较大影响。



(a) 辐照前器件沟道区能带结构示意图



(b) 辐照后器件沟道区能带结构示意图

E_C —导带; E_{Fi} —本征费米能级; E_F —费米能级; E_V —价带。

图9 器件沟道区能带结构示意图

Fig. 9 The energy-band diagram of the SiC MOSFET device in channel region

两个器件输入电容随漏源电压变化曲线如图 10 所示, 辐照器件与未辐照器件输入电容曲线没有明显差异。在 $V_{DS} = 1.2$ V 时输入电容 $C_{iss(A)} = 1.872$ nF, $C_{iss(B)} = 1.845$ nF; 在 $V_{DS} = 800$ V 时输入电容 $C_{iss(A)} = 1.231$ nF, $C_{iss(B)} = 1.251$ nF。

器件栅极总输入电阻 R_G 是由器件内部栅极电

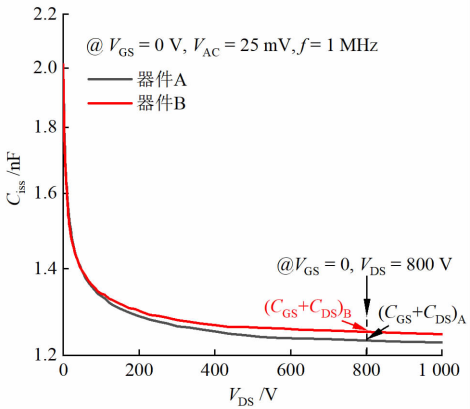


图 10 器件输入电容 C_{iss} 随漏极偏压 V_{DS} 变化曲线
Fig. 10 The input capacitance (C_{iss}) of the device varies with drain bias (V_{DS})

阻 $R_{G(in)}$ 和电路外接栅极电阻 $R_{G(ex)}$ 组成。在频率为 1 MHz 幅值为 25 mV 交流信号下测得器件 A 和器件 B 内部栅极电阻相同, $R_{G(in),A} = 4.13 \Omega$, $R_{G(in),B} = 4.13 \Omega$, 栅极内部输入电阻主要由栅极多晶硅决定, 辐照对器件栅极内部输入电阻没有明显影响。外接栅极电阻为 200 Ω , 两个器件栅极总输入电阻相同, 分别为 $R_{G,A} = 204.13 \Omega$, $R_{G,B} = 204.13 \Omega$ 。

MOSFET 饱和电流与栅压关系式如下^[21]

$$I_{D,sat} = k(V_{GS} - V_{TH})^2 \tag{6}$$

式中: $I_{D,sat}$ 为漏极饱和电流; V_{GS} 为栅压; V_{TH} 为阈值电压; k 为结构参数, 是一个常数。栅压在米勒平台电压阶段, 器件处于饱和区, 因此米勒平台电压计算表达式如下

$$V_{GP} = V_{TH} + \sqrt{\frac{I_{D,sat}}{k}} \tag{7}$$

由式(7)可知, 米勒平台电压 V_{GP} 与阈值电压呈正相关, 并且两者变化量相同, 即米勒平台电压随阈值电压减小而减小。两器件开关瞬态(图 4)中, 栅压变化过程中有一段平台期(米勒平台), 器件 B 米勒平台电压小于器件 A 米勒平台电压, 与式(7)分析结果相同。

由上述静态参数测试结果以及式(1)和式(2)可以对器件开启和关断延迟时间进行估算。开关瞬态过程中, 式(1)和式(2)中固定参数有: 栅极电阻 $R_{G,A} = 204.13 \Omega$; $R_{G,B} = 204.13 \Omega$; 栅极开启电压 $V_{GS(on)} = 20 \text{ V}$; 栅极关断电压 $V_{GS(off)} = -5 \text{ V}$; 阈值电压 $V_{TH,A} = 3.75 \text{ V}$, $V_{TH,B} = 2.91 \text{ V}$ ($@I_{DS} = 0.1 \text{ A}$, 图 4(a)); 米勒平台电压 $V_{GP,A} = 9.24 \text{ V}$, $V_{GP,B} = 7.88 \text{ V}$ ($@V_{DS} = 200 \text{ V}$, 图 4(b))。在开关过程中, 器件栅极电容 C_{GS} 随着栅源电压 V_{GS} 而变化, 在这里

我们选取一个定值对开启和关断延迟时间进行一个估算。对于式(1), 选取 $(C_{GS} + C_{DS})_A = 1.231 \text{ nF}$, $(C_{GS} + C_{DS})_B = 1.251 \text{ nF}$ ($@V_{GS} = 0 \text{ V}$, $V_{DS} = 800 \text{ V}$, 图 10)); 对于式(2), 选取 $(C_{GS} + C_{DS})_A = 2.274 \text{ nF}$, $(C_{GS} + C_{DS})_B = 2.292 \text{ nF}$ ($@V_{GS} = 20 \text{ V}$, $V_{DS} = 0 \text{ V}$, 图 7))。将上述参数代入式(1)和式(2)中, 计算值与实验值对比如表 4 所示。计算得到辐照后器件开启延迟时间减少 11.2 ns(实验值为 11.6 ns), 关断延迟时间增加 49.3 ns(实验值为 48.4 ns), 与实验值相比误差分别为 3.45% 和 1.86%。

表 4 实验值和计算值对比

Table 4 Comparison of experimental and calculated values

器件	开启延迟时间/ns		关断延迟时间/ns	
	实验值	计算值	实验值	计算值
A	96.4	108.3	339.6	259.6
B	84.8	97.1	388.0	310.3

上述结果表明, 器件在电子辐照之后, 相对于未辐照器件, 静态特性参数主要表现为阈值电压减小, 动态特性参数主要表现为开启延迟时间减小, 关断延迟时间增大。在电机驱动电路中, 上述特性变化容易导致桥臂直通, 发生短路故障, 因此在辐照环境中, 需要考虑器件特性变化对系统运行可靠性的影响。

3 结 论

SiC 功率器件在航天、核工业等领域中应用时, 器件特性会受辐照影响, 进而影响到整个系统的工作。SiC 功率器件主要应用在开关电源和电极驱动等电路中, 长期工作在开关状态, 因此辐照对 SiC 功率器件的开关特性影响的研究十分重要。此次实验进行了 200 kGy 辐照剂量下器件动态特性变化的测试研究, 目前阶段实验中没有进行不同辐照剂量条件下器件的测试研究, 下一阶段实验将在 1、5、10、50、100 kGy 辐照剂量条件下进行器件电学特性的测试, 以获得在辐照过程中器件特性的变化趋势。本文研究电子辐照之后 SiC 功率 MOSFET 器件动态特性变化及其机理进行研究分析, 主要结论如下。

- (1)辐照之后, 器件动态特性发生了明显变化: 器件开启延迟时间减小 11.6 ns, 关断延迟时间增大 48.4 ns。
- (2)氧化层对辐照很敏感, 辐照之后器件栅氧层的固定正电荷增多, 器件阈值电压减小了 1.5 V, 是导致器件开启延迟时间减小、关断延迟时间增大的

主要原因。

(3)碳化硅功率 MOSFET 器件作为开关器件应用于辐照环境中时,应考虑辐照之后器件动态特性变化(开启延迟时间减小、关断时间增大)对系统的影响。

参考文献:

- [1] 白志强, 张玉明, 汤晓燕, 等. 4H-SiC 功率 MOSFET 可靠性研究进展 [J]. 电子与封装, 2022, 22(4): 1-9.
BAI Zhiqiang, ZHANG Yuming, TANG Xiaoyan, et al. Research progress on reliability of 4H-SiC power MOSFET [J]. Electronics & Packaging, 2022, 22(4): 1-9.
- [2] 陈明. 高温功率循环下绝缘栅双极型晶体管失效特征及机理分析 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 119-126.
CHEN Ming. Failure characteristics and mechanism analysis of IGBT modules under high-temperature power cycling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 119-126.
- [3] 陈明, 胡安, 刘宾礼. 绝缘栅双极型晶体管失效机理与寿命预测模型分析 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(10): 65-71.
CHEN Ming, HU An, LIU Binli. Failure mechanism and lifetime prediction modeling of IGBT power electronic devices [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(10): 65-71.
- [4] 周荔丹, 闫朝鑫, 姚钢, 等. 空间辐射环境对航天器分布式电力系统关键部件的影响及应对策略 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1365-1380.
ZHOU Lidan, YAN Chaoxin, YAO Gang, et al. Influence of space radiation environment on critical components of spacecraft distributed power system and countermeasures [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1365-1380.
- [5] BALIGA B J. Silicon carbide power devices [M]. New Jersey, USA: World Scientific, 2005.
- [6] 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): 1-12.
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): 1-12.
- [7] POPELKA S, HAZDRA P. Effect of electron irradiation on 1700 V 4H-SiC MOSFET characteristics [J]. Materials Science Forum, 2016, 858: 856-859.
- [8] LEBEDEV A A, KOZLOVSKI V V, LEVINSHTEIN M E, et al. Impact of 0.9 MeV electron irradiation on main properties of high voltage vertical power 4H-SiC MOSFETs [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2020, 177: 109200.
- [9] KOZLOVSKI V V, VASIL'EV A E, EMTSEV V V, et al. Dependence of the kinetics of radiation-induced defect formation on the energy absorbed by Si and SiC when exposed to fast charged particles [J]. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2019, 13(6): 1155-1159.
- [10] LEBEDEV A A, KOZLOVSKI V V, LEVINSHTEIN M E, et al. Effect of high energy (15 MeV) proton irradiation on vertical power 4H-SiC MOSFETs [J]. Semiconductor Science and Technology, 2019, 34(4): 045004.
- [11] LEBEDEV A A, LEVINSHTEIN M E, IVANOV P A, et al. Effect of irradiation with 15-MeV protons on low frequency noise in power SiC MOSFETs [J]. Semiconductors, 2019, 53(12): 1568-1572.
- [12] NISKANEN K, TOUBOUL A D, GERMANICUS R C, et al. Impact of electrical stress and neutron irradiation on reliability of silicon carbide power MOSFET [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020, 67(7): 1365-1373.
- [13] PRINCIPATO F, ALLEGRA G, CAPPELLO C, et al. Investigation of the impact of neutron irradiation on SiC power MOSFETs lifetime by reliability tests [J]. Sensors, 2021, 21(16): 5627.
- [14] MATSUDA T, YOKOSEKI T, MITOMO S, et al. Change in characteristics of SiC MOSFETs by gamma-ray irradiation at high temperature [J]. Materials Science Forum, 2016, 858: 860-863.
- [15] LIANG Xiaowen, CUI Jiangwei, ZHENG Qiwen, et al. 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.
- [16] HU Dongqing, ZHANG Jingwei, JIA Yunpeng, et al. Impact of different gate biases on irradiation and annealing responses of SiC MOSFETs [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(9): 3719-3724.
- [17] TAKEYAMA A, MAKINO T, OKUBO S, et al. Radiation response of negative gate biased SiC MOSFETs [J]. Materials, 2019, 12(17): 2741.
- [18] 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): 1-14.
LIU Cuicui, GUO Gang, LI Zhiming, et al. Recent research progress of single particle effect of SiC MOSFET [J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(1): 1-14.

[19] 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.

[20] 赵延军, 吕均涛, 刘卫霞, 等. 10 MeV 电子加速器出束能量参数测量及其初步应用 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2020, 38(4): 75-80.
ZHAO Yanjun, LV Juntao, LIU Weixia, et al. Measurement of energy parameters and preliminary applications of 10 MeV linear accelerator electron beam [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2020, 38(4): 75-80.

[21] BALIGA B J. Fundamentals of power semiconductor devices [M]. Berlin, Germany: Springer, 2008.

[22] MCWHORTER P J, WINOKUR P S. Simple technique for separating the effects of interface traps and trapped-oxide charge in metal-oxide-semiconductor transistors [J]. Applied Physics Letters, 1986, 48(2): 133-135.

[23] WEI Jiaying, LIU Siyang, LI Sheng, et al. Extraction method of interfacial injected charges for SiC power MOSFETs [J]. Superlattices and Microstructures, 2018, 113: 706-712.

[24] 李东洵. 4H-SiC 功率 VDMOSFET 器件辐照效应及加固方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

[25] 郜锦侠, 张义门, 汤晓燕, 等. C-V 法提取 SiC 隐埋沟道 MOSFET 沟道载流子浓度 [J]. 物理学报, 2006, 55(6): 2992-2996.
GAO Jinxia, ZHANG Yimen, TANG Xiaoyan, et al. Extraction of channel carrier concentration using C-V method for SiC buried-channel MOSFET [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6): 2992-2996.

[26] NEAMEN D A. Semiconductor physics and devices: basic principles [M]. 3rd ed. Boston, USA: McGraw-Hill, 2003.

(编辑 荆树蓉 刘杨)