

重离子引起 SiC MOSFET 栅 氧化物潜在损伤研究

于庆奎^{1,2}, 曹爽^{1,2}, 张琛睿¹, 孙毅^{1,2}, 梅博^{1,2}, 王乾元^{1,2},
王贺^{1,2}, 魏志超^{1,2}, 张洪伟^{1,2}, 张腾³, 柏松³

(1. 中国空间技术研究院 宇航物资保障事业部, 北京 100029; 2. 国家级抗辐照应用技术创新中心, 北京 100029;
3. 南京电子器件研究所 宽禁带半导体电力电子器件国家重点实验室, 江苏 南京 211111)

摘要: 针对空间应用, 开展 SiC MOSFET 单粒子效应试验研究。在加速器上用重离子辐照 1 200 V SiC MOSFET, 离子线性能量传输 (LET) 在 0.26~118 MeV·cm²/mg 之间, 辐照中被试器件加 50~600 V 静态漏源偏置电压、栅源短接, 实时测量电特性, 进行辐照后栅应力 (PIGS) 测试。试验结果发现, 50~100 V 偏置电压下, 离子引起瞬态电流, PIGS 测试栅失效。分析认为离子引起栅氧化物潜在损伤, PIGS 测试过程中, 潜在损伤进一步退化导致栅失效。氧化物潜在损伤不仅与辐照偏置电压有关, 还与入射离子 LET 和注量有关。PIGS 测试需要的栅应力时间与潜在损伤程度有关, 可超过 300 s。并给出了电荷累积损伤模型。模型进行 SiC MOSFET 单粒子效应评估时, 应考虑离子引起栅氧化物潜在损伤的影响, 需根据轨道和任务周期确定试验离子注量, 根据应用情况确定辐照偏置电压, 并评估确定 PIGS 测试栅应力时间。

关键词: SiC MOSFET; 辐射效应; 单粒子效应; 单粒子烧毁; 单粒子栅穿; 潜在损伤; 辐照后栅应力

中图分类号: TL99; TN406; O474 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2023)12-2254-10

doi: 10.7538/yzk.2023.youxian.0576

Latent Gate Oxide Damage in SiC MOSFET Induced by Heavy Ions

YU Qingkui^{1,2}, CAO Shuang^{1,2}, ZHANG Chenrui¹, SUN Yi^{1,2},
MEI Bo^{1,2}, WANG Qianyuan^{1,2}, WANG He^{1,2}, WEI Zhichao^{1,2},
ZHANG Hongwei^{1,2}, ZHANG Teng³, BAI Song³

(1. China Aerospace Components Engineering Center, Beijing 100029, China;
2. National Innovation Center of Radiation Technology, Beijing 100029, China;
3. State Key Laboratory of Wide-Bandgap Semiconductor Power Electronic Devices,
Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 211111, China)

Abstract: The single event effect on SiC MOSFET was studied for space applications. 1 200 V SiC MOSFET from four manufactures was irradiated with heavy ions. The ions of carbon (C), germanium (Ge), tantalum (Ta), bismuth (Bi), and uranium (U) were used. The linear energy transfer (LET) of ions was 0.26-118 MeV·cm²/mg. The static drain-source bias voltage of 50-600 V was applied on the devices under test and the electrical characteristics were measured during irradiation. The post irradiation gate

stress (PIGS) test was performed. The experiment results show that single event transient current (SETC) is induced by heavy ions at 50-100 V bias voltage, single event leakage current (SELC) is induced by heavy ions at 200 V bias voltage, and single event burnout is induced by heavy ions at 200-600 V bias voltage. The experiment results confirm that the gate oxide of SiC MOSFET is the most sensitive to single event effect. Biased at about 5% of the rated breakdown voltage, the latent gate oxide damage may be induced by heavy ions. The latent gate oxide damage may further degrade to lead the gate failure during PIGS test. The latent gate oxide damage is the function of incident ion LET and bias voltage, as well as ion fluence, which is a cumulative effect. Dependent on the severity of latent gate oxide damage, the gate stress time to trigger gate failure may exceed 300 s. The mechanism of accumulate charge damage was proposed. The electric field in the gate oxide layer increases due to charges generated by the incident ions at different locations. The accumulate damage of gate oxide is caused. It is necessary to evaluate the effect of latent gate oxide damage induced by heavy ions in SiC MOSFETs for single event effect test for space application, the ion fluence used should be calculated based on the orbit and mission period, and the appropriate gate stress time should be evaluated for PIGS test.

Key words: SiC MOSFET; radiation effect; single event effect; single event burnout; single event gate rupture; latent damage; post irradiation gate stress

新一代航天器对高压功率器件提出了迫切应用需求,如新一代深空探测航天器的电推进系统需要使用千伏以上的高压功率器件^[1],空间太阳能电站能量转换和传输系统需要使用高压功率器件^[2]。与硅器件相比,SiC 器件的工作电压达到千伏以上,且具有工作温度高和功耗低的优点,在新一代航天器中有非常好的应用前景^[1,3]。航天器工作在空间辐射环境中,必须开展抗辐射研究。国内外对 SiC MOSFET 开展了较多的单粒子效应研究,发现重离子辐照下,其辐射效应与入射离子线性能量传输(LET)和偏置电压有关,会出现的辐射效应:1) 氧化层潜在损伤;2) 离子引起漏电流(SELC);3) 单粒子烧毁(SEB)^[4-6]。国际上对 SiC MOSFET 的 SELC 和 SEB 研究较多,文献[6-7]研究指出当入射离子 LET 大于 $10 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$,在约 100 V 漏源偏置电压下,离子在 SiC MOSFET 栅氧化物中引入潜在损伤,在约 200 V 或更高偏置电压下,发生 SELC 退化,SELC 退化不可恢复;在 400 V 左右偏置电压下,离子会引起 SEB。文献[4,8-11]研究认为离子引起的 SiC MOSFET 内部永久损伤导致漏电流和击穿电压下降与入射离子 LET 和漏

源偏置电压有关。Yan 等^[12]研究了离子入射角度对漏电流的影响,指出垂直入射产生的漏电流损伤最严重。Peng 等^[13]研究认为 SELC 与离子累积注量有关。关于 SEB,Abbate 等^[14]研究认为 2 个离子重复轰击同一个位置,损伤积累,最终发生 SEB。Liu 等^[15]通过仿真研究了增加高掺杂 P^+ 区有减缓 SiC MOSFET 发生 SEB 的作用。文献[16-17]试验和仿真研究了 SiC MOSFET 的 SELC 和 SEB 机理。Robert 等^[18]根据 SELC 与入射离子注量和偏压关系的研究结果,指出应根据应用条件,包括偏置电压、轨道高度及寿命周期等,评估 SELC 的影响。总结国内外研究进展可得出,SiC MOSFET 单粒子效应和硅器件不同:SiC MOSFET 在低电压(如 10%左右额定击穿电压)就会发生离子引起的 SELC,并在栅氧化物中引入潜在损伤,离子引入的栅氧化物潜在损伤在栅应力作用下会退化,引起单粒子栅穿(SEGR),造成器件功能失效,在 40%~50%额定击穿电压下会发生 SEB,由于在栅氧化物中引起潜在损伤所需要的偏置电压比引起 SEB 的更低,可得出 SiC MOSFET 栅氧化物单粒子效应最敏感;在硅器件中,离子引起的 SELC 影响不显著,几乎

在接近额定击穿电压或 SEB 阈值电压时,才会发生离子引起的 SELC^[7]。因此,需要开展 SiC MOSFET 单粒子效应研究,特别是离子引起氧化物潜在损伤的规律。在 SiC MOSFET 单粒子效应评估中,应当评估离子引起氧化物潜在损伤的影响,否则会导致错误的评估结果,影响其可靠应用。对于硅 MOSFET,为了评估氧化物潜在损伤,现有的 SEB 和 SEGR 试验方法标准规定了辐照后栅应力(PIGS)测试要求,要求 PIGS 测试栅应力时间不少于 1 s^[19]。对于 SiC MOSFET,为了准确评估离子引起的氧化物潜在损伤对器件可靠性的影响,需要掌握 SiC MOSFET 栅氧化物损伤的变化规律和影响因素,包括与偏置电压、入射离子 LET 和注量等之间的关系以及 PIGS 测试栅应力时间要求等。

本文以 4 个生产厂的 1 200 V SiC MOSFET 为对象,在加速器上进行重离子辐照,辐照中器件加电并实时原位测量电特性,辐照后进行 PIGS 测试,研究离子引起的栅损伤随偏置电压、入射离子 LET 和注量以及 PIGS 测试栅应力时间等的变化规律,为制定 SiC MOSFET 单粒子试验方法提供支持,同时为器件加固和空间应用提供参考。

1 试验样品和条件

试验样品为平面结构 1 200 V SiC MOSFET,来自 4 个生产厂(以下分别称为 A、B、C 和 R),均为非加固器件。辐照前,被试器件开帽,露出芯片,并编号测试,电性能均合格。重离子试验在中国原子能科学研究院 HI-13 串列静电加速器、中国科学院近代物理研究所回旋加速器 HIRFL 和哈尔滨工业大学 300 MeV 质子重离子加速器 SESRI 上进行。采用碳(C)、锆(Ge)、钽(Ta)、铋(Bi)和铀(U)离子,离子在芯片表面的 LET 在 0.26~118 MeV·cm²/mg 之间,在硅中射程均大于 30 μm。

在离子辐照过程中,被试器件漏源间加 50~600 V 静态偏置电压,栅源短接,实时测量漏极和栅极漏电流 I_{DS} 、 I_{GS} ,根据产品手册规定,当 I_{DS} 超过 100 μA 时,判为器件失效;当 I_{GS} 超过 100 nA,判为栅氧化层失效。辐照后,进行 PIGS 测试。PIGS 测试方法为施加栅电压 V_{GS} ,从 0 V 开始,以 1 V 为台阶增加到 20 V,

漏源电压为 0 V,测试 I_{GS} 。除另有注明,栅应力施加时间为 1 s。重离子辐照试验和 PIGS 测试均在室温下进行。

2 试验结果和讨论

2.1 SiC MOSFET 重离子辐照试验结果

取样品在加速器 SESRI 上进行辐照试验。SESRI 以 12 s 时间周期输出离子,在 12 s 时间周期内,3 s 时间有离子输出,9 s 时间无离子输出。用重离子 Bi,其能量为 1 200 MeV,芯片表面 LET 为 97.5 MeV·cm²/mg,注量率为 5×10^3 cm⁻²·s⁻¹,分别在 50 V 和 100 V 漏源偏置电压(栅源短接)下对 4 个生产厂的器件进行注量为 10^5 cm⁻² 的辐照。当加速器输出离子时,漏极和栅极检测到瞬态电流,测试结果列于表 1。典型被试器件瞬态电流测试结果示于图 1,瞬态电流出现的时间间隔约为 12 s,与加速器输出离子的周期相吻合,因此,判断是离子引起的瞬态电流(SETC)。由图 1 可看出,A-176 被试器件在 100 V 漏源偏置电压下,无离子辐照时栅极漏电流 I_{GS} 小于 10 pA;有离子辐照时,离子引起的栅极瞬态电流最大值约为 500 pA,离子束停止,栅极漏电流基本恢复到初始值。无离子辐照时,漏极漏电流 I_{DS} 小于 100 pA;有离子辐照时,离子引起的漏极瞬态电流最大幅度约为 25 nA,离子束停止,漏极漏电流基本恢复到初始值。

重新取样品在加速器 SESRI 上用 Bi 离子、200 V 漏源偏置电压下辐照注量为 10^5 cm⁻²,测量到和入射离子相对应的漏极和栅极漏电流阶跃增加。典型被试器件漏电流阶跃增加的测试结果示于图 2,可看出,漏电流约每 12 s 阶跃增加,加速器离子输出周期为 12 s,因此判断器件漏电流阶跃增加是入射离子引起的 SELC。试验结果表明,漏电流随入射离子累积增加,离子束流停止,漏电流未恢复,说明离子在器件栅氧化层引入不可恢复的损伤,导致漏电流不恢复。

取样品分别在 HI-13 串列静电加速器、加速器 HIRFL 和 SESRI 上用 C、Ge、Ta、Bi 和 U 离子辐照。离子 LET 为 0.26~118 MeV·cm²/mg,漏源偏置电压为 200~600 V。测试结果列于表 2,当离子 LET 为 0.26 MeV·cm²/mg 时,被试器件未发生 SEB 或 SEGR;当离子 LET

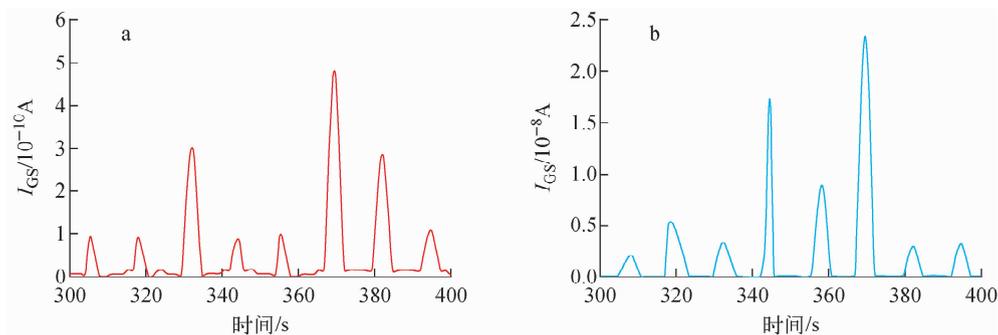
为 $37 \sim 118 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 时,被试器件发生 SEB。试验结果验证了离子 LET 和偏置电压增加,重离子会引起 SiC MOSFET 发生 SEB。另

外,200 V 偏置电压辐照离子注量 10^6 cm^{-2} 发生 SEB,在相同 LET 下辐照离子注量 10^5 cm^{-2} 未发生 SEB,表明离子引起的损伤与注量有关。

表 1 1 200 V SiC MOSFET 在 50 V 和 100 V 偏置电压下重离子辐照测试结果

Table 1 Test result of 1 200 V SiC MOSFET under heavy ion irradiation at 50 V and 100 V bias voltages

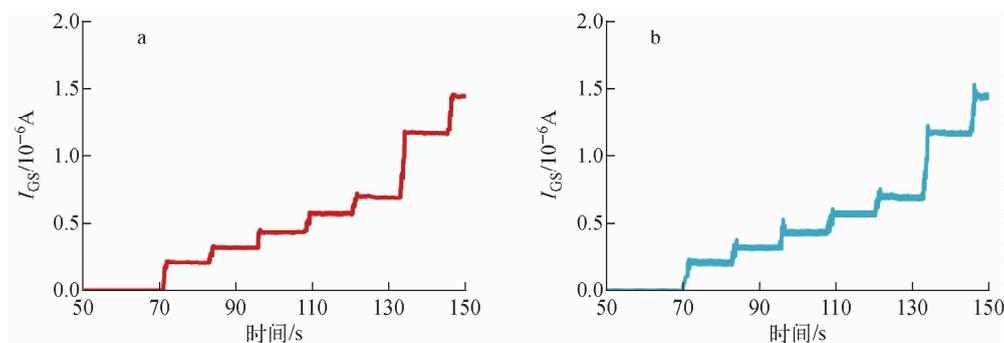
生产厂	样品	离子 LET/ ($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$)	V_{DS}/V	注量/ cm^{-2}	辐照中测试结果
A	A-1	97.5	50	10^5	漏极和栅极出现瞬态电流
	A-2	97.5	50	10^5	漏极和栅极出现瞬态电流
	A-172	97.5	100	10^5	漏极和栅极出现瞬态电流
	A-176	97.5	100	10^5	漏极和栅极出现瞬态电流
B	B-6	97.5	100	10^5	漏极和栅极出现瞬态电流
	B-11	97.5	100	10^5	漏极和栅极出现瞬态电流
	B-12	97.5	100	10^5	漏极和栅极出现瞬态电流
C	C-5	97.5	50	10^5	漏极和栅极出现瞬态电流
	C-8	97.5	100	10^5	漏极和栅极出现瞬态电流
R	R-1	97.5	100	10^5	漏极和栅极出现瞬态电流
	R-2	97.5	100	10^5	漏极和栅极出现瞬态电流



a——栅极;b——漏极

图 1 被试器件 A-176 在 100 V 偏置电压下 Bi 离子辐照中的瞬态电流

Fig. 1 Transient current measured for device A-176 during Bi ion irradiation at 100 V bias voltage



a——栅极;b——漏极

图 2 被试器件 A-178 在 200 V 偏置电压下 Bi 离子辐照中的漏电流

Fig. 2 Leakage current measured for device A-178 during Bi ion irradiation at 200 V bias voltage

表 2 1 200 V SiC MOSFET 重离子引起 SEB 试验结果
Table 2 Test result of SiC MOSFET SEB induced by heavy ions

样品	离子	加速器 类型	离子 LET/ (MeV · cm ² /mg)	V _{DS} /V	注量/ cm ⁻²	辐照中 测试结果
A-7-W	C	SESRI	0.26	500	10 ⁶	未发生 SEB
A-8-W	C	SESRI	0.26	600	10 ⁶	未发生 SEB
A-2	Ge	HI-13	37	400	10 ⁶	发生 SEB
A-5-B	Ge	HI-13	37	600	5 × 10 ³	发生 SEB
A-2-B	Ta	HIRFL	75.4	290	10 ⁵	发生 SEB
A-3-B	Ta	HIRFL	75.4	340	10 ⁵	发生 SEB
A-101	Bi	SESRI	97.5	500	10 ⁵	发生 SEB
A-10	Bi	SESRI	97.5	350	10 ⁵	发生 SEB
A-10-W	Bi	SESRI	99.8	300	10 ⁶	发生 SEB
A-9-W	Bi	SESRI	99.8	200	10 ⁶	发生 SEB
A-163	U	SESRI	118	300	10 ⁶	发生 SEB

2.2 PIGS 测试结果

对重离子辐照过程中出现 SETC 的被试器件进行 PIGS 测试。经过 50 V 漏源偏置电压下辐照注量 10⁵ cm⁻² 的器件, PIGS 测试过程中栅漏电流无明显变化, PIGS 测试通过; 经过 100 V 漏源偏置电压下辐照注量 10⁵ cm⁻² 的器件, PIGS 测试中栅漏电流均超过 100 nA, 栅失效。测试结果列于表 3。典型器件 PIGS 测试过程中栅漏电流随栅电压的变化示于图 3。根据试验结果推断, 经过 100 V 偏置电压辐照注

量 10⁵ cm⁻² 的被试器件, 离子在栅氧化层中产生潜在损伤, 在 PIGS 测试过程中, 潜在损伤在栅电压应力作用下, 进一步退化, 导致栅失效。根据 50 V 偏置电压辐照的被试器件 PIGS 测试未出现栅失效、100 V 偏置电压辐照的被试器件 PIGS 测试出现栅失效, 得出氧化物潜在损伤程度与辐照偏置电压有关。

为了进一步验证氧化物潜在损伤程度与辐照偏置电压有关, 取样品 A-143 用 Bi 离子辐照, 离子 LET 为 97.5 MeV · cm²/mg, 辐照后

表 3 出现 SETC 的器件 PIGS 测试结果
Table 3 PIGS test result for device with SETC

样品	离子 LET/ (MeV · cm ² /mg)	V _{DS} /V	注量/cm ⁻²	PIGS 测试结果
A-1	97.5	50	10 ⁵	PIGS 测试通过
A-2	97.5	50	10 ⁵	PIGS 测试通过
A-172	97.5	100	10 ⁵	I _{GS} 超过 100 nA, 栅失效
A-176	97.5	100	10 ⁵	I _{GS} 超过 100 nA, 栅失效
B-6	97.5	100	10 ⁵	I _{GS} 超过 100 nA, 栅失效
B-11	97.5	100	10 ⁵	I _{GS} 超过 100 nA, 栅失效
B-12	97.5	100	10 ⁵	I _{GS} 超过 100 nA, 栅失效
C-8	97.5	100	10 ⁵	I _{GS} 超过 100 nA, 栅失效
R-1	97.5	100	10 ⁵	I _{GS} 超过 100 nA, 栅失效
R-2	97.5	100	10 ⁵	I _{GS} 超过 100 nA, 栅失效

进行 PIGS 测试,测试结果列于表 4。在 50 V 漏源偏置电压辐照后,PIGS 测试栅电流无明显变化;在 75 V 漏源偏置电压辐照后,PIGS 测试栅电流 I_{GS} 增加 1 个数量级,在 100 V 漏源偏置电压辐照后,PIGS 测试栅失效,试验验证了氧化物潜在损伤随辐照偏置电压增大而严重。

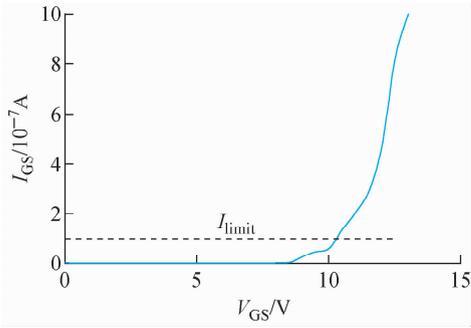


图 3 被试器件 A-172 PIGS 测试中栅漏电流随栅电压的变化

Fig. 3 Change of gate leakage current with gate bias voltage during PIGS test for device A-172

2.3 氧化物潜在损伤与离子注量的关系

为了获得栅氧化物潜在损伤与离子注量的关系,进行了不同注量辐照试验。取样品在加速器 SESRI 上用 Bi 离子辐照,离子能量为 1 200 MeV,芯片表面 LET 为 $97.5 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$,注量率为 $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 50 V 漏源偏置电压下分别辐照累积注量 10^5 、 10^6 和 10^7 cm^{-2} ,在每个累

积注量下分别进行 PIGS 测试。测试结果列于表 5,辐照累积注量为 10^5 cm^{-2} 时,PIGS 测试栅漏电流无明显变化;辐照累积注量为 10^6 cm^{-2} 时,PIGS 测试栅漏电流增加, I_{GS} 从 pA 量级增加到 50 nA;辐照累积注量为 10^7 cm^{-2} 时,PIGS 测试栅漏电流 I_{GS} 增大到 $1 \mu\text{A}$,栅失效。测试结果表明离子引起的氧化物潜在损伤与离子注量有关,呈现累积效应。

2.4 氧化物潜在损伤与离子 LET 的关系

为了验证氧化物潜在损伤受离子 LET 的影响,取样品采用 C、Ge、Bi 离子辐照,辐照中实时检测被试器件 I_{GS} 和 I_{DS} 。辐照中未检测到 SEB 和 SEGR 发生。辐照后 PIGS 测试结果列于表 6。试验结果表明,入射离子 LET 增加,PIGS 测试不通过的可能性增加,验证了氧化物潜在损伤的严重程度与入射离子 LET 具有正相关性。

2.5 栅应力时间的影响

取样品在 HI-3 串联静电加速器上用 Ge 离子辐照,芯片表面 LET 为 $37 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$,离子在硅中射程为 $30 \mu\text{m}$,注量率为 $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,辐照注量为 10^5 cm^{-2} ,漏源偏置电压为 200~300 V。辐照后进行 PIGS 测试,测试结果列于表 7。由表 7 可看出:在 200 V 偏置电压下辐照的器件,触发栅失效需要的栅应力时间超过 300 s;在 250 V 偏置电压下辐照的器件,触发栅失效需要的栅应力时间为 12~

表 4 SiC MOSFET 在不同偏置电压后 PIGS 测试结果

Table 4 PIGS test result for SiC MOSFET irradiated at various bias voltages

样品	V_{DS}/V	注量/ cm^{-2}	测试结果
A-143	辐照前		$I_{GS} = 25 \text{ pA}$
A-143	50	10^5	$I_{GS} = 26 \text{ pA}$,与辐照前比,变化不大
A-143	75	10^5	$I_{GS} = 380 \text{ pA}$,与辐照前比,增加 1 个数量级
A-143	100	10^5	I_{GS} 超过 100 nA,达到 $2 \mu\text{A}$ 限流值,栅失效

表 5 1 200 V SiC MOSFET 辐照不同累积注量后 PIGS 测试结果

Table 5 PIGS test result for SiC MOSFET irradiated at various fluences

样品	离子 LET/ ($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$)	V_{DS}/V	注量/ cm^{-2}	PIGS 测试结果
AL-3	97.5	50	10^5	I_{GS} 无明显变化
AL-3	97.5	50	10^6	I_{GS} 从 pA 量级增加到 50 nA
AL-3	97.5	50	10^7	I_{GS} 增大到 $1 \mu\text{A}$,栅失效

表 6 不同离子 LET 辐照 PIGS 的测试结果

Table 6 PIGS test result with various LETs

离子	离子 LET/(MeV·cm ² /mg)	剂量/cm ⁻²	V _{DS} /V	PIGS 测试结果
C	0.26	10 ⁵	500	通过
Ge	37.3	4×10 ⁶	100	通过
Ge	37.3	10 ⁵	200	不通过
Bi	97.5	10 ⁵	100	不通过

表 7 栅应力时间的测试结果

Table 7 Test result of gate stress time

样品	离子 LET/ (MeV·cm ² /mg)	V _{DS} /V	剂量/cm ⁻²	测试结果
A-Z-1	37	200	10 ⁵	施加 20 V 栅偏置电压 300 s, 栅漏电流增大到 50 nA
A-T-9	37	250	10 ⁵	施加 20 V 栅偏置电压 12 s, 栅失效
A-131	37	250	10 ⁵	施加 20 V 栅偏置电压 69 s, 栅失效
A-E-4	37	300	10 ⁵	施加 10 V 栅偏置电压 1 s, 栅失效

69 s; 在 300 V 偏置电压下辐照的器件, 触发栅失效需要的栅应力时间为 1 s。分析认为, 高偏置电压下离子引起的潜在损伤严重, 需要的栅应力时间短, 因此, 得出 PIGS 测试需要的栅应力时间与栅氧化物潜在损伤的严重程度有关。

2.6 分析讨论

由试验结果可知, 在 50 V 漏源偏置电压下, 随剂量增加离子可引起潜在损伤, 在栅应力作用下, 会引起栅失效, 低于文献[6-7]给出的 100 V 潜在损伤阈值; PIGS 测试栅应力时间与损伤程度有关, 会超过 300 s。因此, 应关注离子引起潜在损伤对器件可靠性的影响, 进行宇航用 SiC MOSFET 辐射效应评估时, 需要针对性地进行潜在损伤影响的评估。Abbate 等^[14]指出重离子引起 SiC MOSFET 失效机理是两个以上离子重复轰击同一位置, 损伤累加, 导致失效。该机理可以解释重离子引起的 SiC MOSFET 辐照损伤具有累积效应, 但在辐照剂量 10⁵~10⁷ cm⁻² 情况下, 两个离子重复击中同一位置的概率很小, 几乎可忽略不计, 该机理不太有说服力。分析认为可能的失效机理是电荷累积引起的, 高能离子在 SiC 中电离出电子-空穴对, 在 SiC 中形成一个瞬时导电路径。图 4 为高能离子在 SiC MOSFET 中电离出导电路径示意图, 在漏源加偏置电压、栅源短接的情况下, 该导电路径的产生使得部分漏源偏置电压

也加在漏栅之间, 电离产生的电子-空穴对在电场作用下分别朝相反的方向漂移, 其中, 空穴在栅氧化层下面聚集。在 50~100 V 漏源偏置电压下辐照, 入射离子电离的空穴在栅氧化层下面聚集, 增加了栅氧化层上的电压, 导致氧化层内电场增加, 当电场增加到足够大时, 会在栅氧化层引入潜在损伤。栅极不同位置入射离子产生的电荷对氧化层内电场增加具有叠加作用, 因此, 多个重离子引起的损伤具有累积效应。在 200 V 偏置电压下辐照, 电荷在栅氧化层两边聚集的足够多, 导致氧化层内电场过高, 在栅氧化层引入不可恢复的损伤。

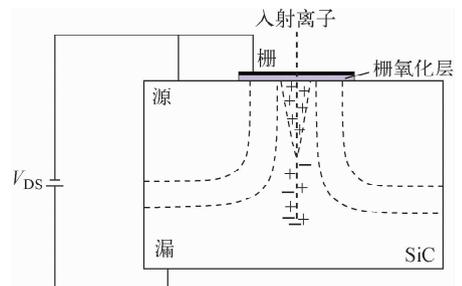


图 4 高能离子在 SiC MOSFET 中电离出导电路径示意图

Fig. 4 Current path induced by heavy ions in SiC MOSFET

为进一步解释重离子造成 SiC MOSFET 栅极损伤的现象, 使用 Sentaurus TCAD 仿真

工具建立二维仿真模型。仿真器件结构和关键参数列于表 8。

表 8 TCAD 仿真的主要参数

Table 8 Main parameter for TCAD simulation

参数	数值
漏极衬底掺杂浓度, cm^{-2}	1×10^{19}
源级 N^+ 掺杂浓度, cm^{-2}	1×10^{19}
源级 P^+ 掺杂浓度, cm^{-2}	2×10^{17}
栅极氧化层厚度, nm	50
漂移区厚度, μm	15
沟道长度, μm	0.8
JFET 区域长度, μm	2

根据 SiC MOSFET 的材料特性,在仿真的物理模型中考虑不完全电离模型、禁带变窄模型;对于载流子的输运,考虑漂移扩散模型;对于载流子的产生复合考虑 SRH 模型、俄歇复合和电场驱动的雪崩击穿模型;对于载流子迁移率,考虑掺杂模型、高电场饱和模型。由于需要仿真重离子入射,所以同时考虑了重离子模型,重离子对栅极损伤的最坏情况是离子从关态器件的栅极中心表面垂直入射,本文采用这一入射方式,重离子的主要参数列于表 9。

表 9 仿真使用的离子参数

Table 9 Main characteristic of heavy ions used in simulation

离子	能量/ MeV	离子 LET/ ($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$)	射程/ μm
C	960	0.26	299
Ge	208	37.3	30.3

重离子射程保证可以穿过整个器件的漂移区($>15 \mu\text{m}$),高斯分布径迹半径为 $0.05 \mu\text{m}$,重离子的 LET 设置为 $0.25 \text{ pC}/\text{cm}$ 和 $0.02 \text{ pC}/\text{cm}$ (相当于 SiC 材料的 $37 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 和 $0.3 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$)。为研究重离子入射对栅极损伤的影响,仿真重离子入射时的瞬时电场分布情况,图 5 为 $V_{\text{DS}} = 100 \text{ V}$ 、Ge 离子入射时间 $t = 4 \text{ ps}$ 时, SiC MOSFET 栅极区域的电场分布。重离子入射后,在轨迹周围形

成大量电子-空穴对的等离子柱,在强电场作用下,电子和空穴没有复合,而是被电场驱动产生瞬时电流,漏极电压将会耦合到栅极上,导致栅极电场增大,这是重离子引起栅极损伤的重要原因。

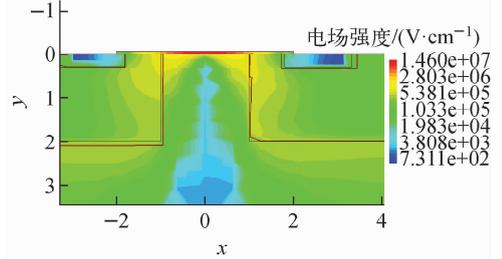


图 5 $V_{\text{DS}} = 100 \text{ V}$ 、Ge 离子入射时间 $t = 4 \text{ ps}$ 时 SiC MOSFET 栅极区域的电场分布

Fig. 5 Electric field distribution in gate region of SiC MOSFET with $V_{\text{DS}} = 100 \text{ V}$ and Ge ion incidence time $t = 4 \text{ ps}$

仿真 $V_{\text{DS}} = 100 \text{ V}$ 和 $V_{\text{DS}} = 200 \text{ V}$ 偏置电压时 Ge 离子入射 SiC MOSFET 的栅极电场随时间的变化情况,结果如图 6 所示。同一离子入射时,不同偏置电压下栅极电场 E_{OX} 随时间变化的趋势相同, $t = 4 \text{ ps}$ 时栅极电场达到最高值, $V_{\text{DS}} = 200 \text{ V}$ 时 $E_{\text{OX_MAX}} = 27.8 \text{ MV}/\text{cm}$, $V_{\text{DS}} = 100 \text{ V}$ 时 $E_{\text{OX_MAX}} = 14.7 \text{ MV}/\text{cm}$ 。栅极峰值电场随偏置电压升高,会导致更严重损伤产生。

研究入射离子 LET 对 SiC MOSFET 栅极损伤的影响,仿真 $V_{\text{DS}} = 100 \text{ V}$ 时 Ge 和 C 离子

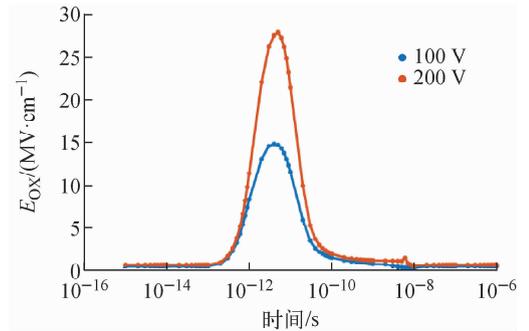


图 6 $V_{\text{DS}} = 100 \text{ V}$ 和 $V_{\text{DS}} = 200 \text{ V}$ 偏置电压时 Ge 离子入射过程中 SiC MOSFET 栅极电场变化
Fig. 6 Change of gate electric field of SiC MOSFET during Ge ion incidence at $V_{\text{DS}} = 100 \text{ V}$ and $V_{\text{DS}} = 200 \text{ V}$

入射对栅极电场的影响,结果如图7所示。在同一偏置电压下,LET低的C离子导致的峰值电场 $E_{OX_MAX} = 6.7 \text{ MV/cm}$,LET高的Ge离子导致的峰值电场 $E_{OX_MAX} = 14.7 \text{ MV/cm}$,更高的LET会导致更严重的栅极损伤。

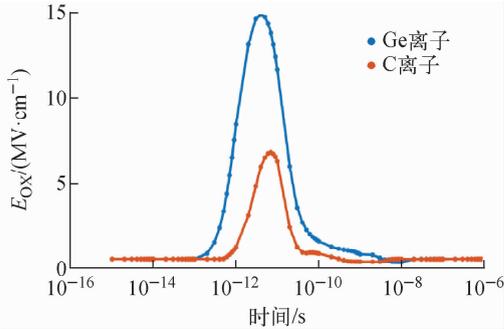


图7 C离子(LET = 0.26 MeV · cm²/mg)和Ge离子(LET = 37 MeV · cm²/mg)

入射过程中SiC MOSFET栅极电场的变化

Fig.7 Change of gate electric field of SiC MOSFET during incidence of C ions (LET=0.26 MeV · cm²/mg) and Ge ions (LET=37 MeV · cm²/mg)

3 结论

用重离子辐照1200V SiC MOSFET,在50~100V偏置电压下离子引起栅氧化物潜在损伤,潜在损伤会引起栅失效;在200V偏置电压下离子引起的不可恢复的损伤;在200~600V偏置电压下离子引起SEB。试验和仿真分析确认离子入射引起栅氧化物潜在损伤与偏置电压、入射离子LET和注量等呈正相关。试验结果表明栅单粒子效应最敏感,在约5%额定击穿电压下会发生离子引入的氧化物潜在损伤引起器件失效。在SiC MOSFET加固和空间应用中,需要评估离子引起的氧化物潜在损伤的影响,应根据轨道和任务周期确定试验用离子注量和偏置电压,并确定适合的PIGS测试栅应力时间。

感谢中国原子能科学研究院郭刚研究员团队、中国科学院近代物理研究所刘杰研究员团队和哈尔滨工业大学刘超铭副教授、王天琦副研究员、刘剑利研究员及其团队在重离子试验过程中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 曹宇翔,张潇,王少宁,等. 碳化硅功率器件在宇航电源中的研究与应用[J]. 电子设计工程, 2023,31(9):7-12
CAO Yuxiang, ZHANG Xiao, WANG Shaoning, et al. Research and application of silicon carbide power devices in aerospace power supply [J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(9): 7-12(in Chinese).
- [2] 侯欣宾,王立,李庆民,等. 空间太阳能电站高压大功率电力传输关键技术综述[J]. 电工技术学报,2018,33(14):3385-3395.
HOU Xinbin, WANG Li, LI Qingmin, et al. Review of key technologies for high-voltage and high-power transmission in space solar power station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3385-3395(in Chinese).
- [3] 张宝林,唐林江,陈滔,等. 第三代宽禁带半导体(SiC)器件在空间太阳能电站中的应用及进展[J]. 空间电子技术,2018,15(2):94-100.
ZHANG Baolin, TANG Linjiang, CHEN Tao, et al. Application of third generation wide-gap semiconductor (SiC) devices in space solar power station[J]. Space Electronic Technology, 2018, 15(2): 94-100(in Chinese).
- [4] MARTINELLA C, ZIEMANN T, STARK R, et al. Heavy-ion microbeam studies of single-event leakage current mechanism in SiC VDMOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020, 67(7): 1381-1389.
- [5] MARTINELLA C, NATZKE P, ALIA R G, et al. Heavy-ion induced single event effects and latent damages in SiC power MOSFETs[J]. Microelectronics Reliability, 2022, 128: 114423.
- [6] ZHOU X, PANG H, JIA Y, et al. Gate oxide damage of SiC MOSFETs induced by heavy-ion strike[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(8): 4010-4015.
- [7] JOHNSON R A, WITULSHI A F, BALL D R, et al. Analysis of heavy-ion-induced leakage current in SiC power devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2022, 69(3): 248-253.
- [8] MARTINELLA C, STARK R, ZIEMANN T, et al. Current transport mechanism for heavy-ion degraded SiC MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(7): 1702-1709.

- [9] LIANG X, ZHAO J, ZHENG Q, et al. Impact of heavy-ion irradiation on gate oxide reliability of silicon carbide power MOSFET [J]. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 2021, 176(11-12): 1 038-1 048.
- [10] MCPHERSON J A, HITCHCOCK C W, CHOW T P, et al. Ion-induced mesoplasma formation and thermal destruction in 4H-SiC power MOSFET devices[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2021, 68(5): 651-658.
- [11] BUSATTO G, PASQUALE A D, MARCIANO D, et al. Physical mechanisms for gate damage induced by heavy ions in SiC power MOSFET [J]. *Microelectronics Reliability*, 2020, 114: 113903.
- [12] YAN X Y, HE Z, CHEN Q Y, et al. An investigation of angle effect on heavy ion induced single event effect in SiC MOSFET[J]. *Microelectronics Reliability*, 2022, 138: 114696.
- [13] PENG C, LEI Z, ZHANG Z, et al. Influence of drain bias and flux on heavy ion-induced leakage currents in SiC power MOSFETs[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2022, 69(5): 1 037-1 043.
- [14] ABBATE C, BUSATTO G, TEDESCO D, et al. Gate damages induced in SiC power MOSFETs during heavy-ion irradiation—Part I [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(10): 4 235-4 242.
- [15] LIU Y, WANG Y, YU C, et al. Effect of P+ shielding region on single event burnout of 4H-SiC trench gate MOSFET[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2018, 122: 165-170.
- [16] ZHANG H, GUO H, LEI Z, et al. Experiment and simulation on degradation and burnout mechanisms of SiC MOSFET under heavy ion irradiation [J]. *Chinese Physics B*, 2023, 32 (2): 028504.
- [17] PENG C, LEI Z, CHEN Z, et al. Experimental and simulation studies of radiation-induced single event burnout in SiC-based power MOSFETs[J]. *IET Power Electron*, 2021, 14(9): 1 700-1 712.
- [18] ROBERT A J, WITULSKI A F, SIERAWSKI B D, et al. Influence of radiation environment variability on cumulative heavy-ion-induced leakage current in SiC power devices[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2023, 70(4): 322-327.
- [19] MIL-STD-750 method 1080.1 single-event burnout and single-event gate rupture[S]. [S. l.]: [s. n.], 2012.