

## 不同应力下碳化硅场效应晶体管器件总剂量效应及退火特性

顾朝桥 郭红霞 潘霄宇 雷志峰 张凤祁 张鸿 琺安安 柳奕天

### Total dose effect and annealing characteristics of silicon carbide field effect transistor devices under different stresses

Gu Zhao-Qiao Guo Hong-Xia Pan Xiao-Yu Lei Zhi-Feng Zhang Feng-Qi Zhang Hong Ju An-An  
Liu Yi-Tian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 166101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210515

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210515>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

射线总剂量辐照对单轴应变Si纳米n型金属氧化物半导体场效应晶体管栅隧穿电流的影响

Influence of  $\gamma$ -ray total dose radiation effect on the tunneling gate current of the uniaxial strained Si nanometer n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2017, 66(7): 076101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.076101>

氮化镓基高电子迁移率晶体管单粒子和总剂量效应的实验研究

Single event effect and total dose effect of GaN high electron mobility transistor using heavy ions and gamma rays

物理学报. 2021, 70(11): 116102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202028>

绝缘体上硅金属氧化物半导体场效应晶体管中辐射导致的寄生效应研究

Radiation induced parasitic effect in silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2018, 67(21): 216102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181372>

65 nm互补金属氧化物半导体场效应和晶体管总剂量效应及损伤机制

Radiation effect and degradation mechanism in 65 nm CMOS transistor

物理学报. 2018, 67(14): 146103 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172542>

铁电负电容场效应晶体管研究进展

Recent research progress of ferroelectric negative capacitance field effect transistors

物理学报. 2020, 69(13): 137701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200354>

双极型晶体管总剂量效应的统计特性

Statistical characteristics of total ionizing dose effects of bipolar transistors

物理学报. 2021, 70(13): 136102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201835>

# 不同应力下碳化硅场效应晶体管器件 总剂量效应及退火特性\*

顾朝桥<sup>1)</sup> 郭红霞<sup>2)†</sup> 潘霄宇<sup>2)</sup> 雷志峰<sup>3)</sup>  
张凤祁<sup>2)</sup> 张鸿<sup>1)</sup> 琚安安<sup>1)</sup> 柳奕天<sup>1)</sup>

1) (湘潭大学材料科学与工程学院, 湘潭 411105)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

3) (工业和信息化部第五研究所, 电子元器件可靠性物理及其应用技术国家重点实验室, 广州 510610)

(2021年3月17日收到; 2021年4月14日收到修改稿)

以碳化硅场效应晶体管器件作为研究对象, 对其开展了不同电压、不同温度下的钴源辐照实验以及辐照后的退火实验. 使用半导体参数分析仪测试了器件的直流参数, 研究了器件辐照敏感参数在辐照和退火过程中的变化规律, 分析了电压、温度对器件辐照退化产生影响的原因, 也探索了退火恢复的机理. 结果表明: 辐照感生的氧化物陷阱电荷是造成碳化硅场效应晶体管器件电学参数退化的主要原因, 电压和温度条件会影响氧化物陷阱电荷的最终产额, 从而导致器件在不同电压、不同温度下辐照后的退化程度存在差异; 退火过程中由于氧化物陷阱电荷发生了隧穿退火, 导致器件电学性能得到了部分恢复.

**关键词:** 碳化硅场效应晶体管, 总剂量, 电压, 温度, 退火效应

**PACS:** 61.80.Ed, 61.82.Fk, 73.20.-r, 85.30.Tv

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210515

## 1 引言

航天器电源系统中的半导体器件会长期处于空间辐射环境中, 由于宇宙射线和各种带电粒子的作用, 会使器件产生各种辐照效应, 导致器件的性能退化甚至失效, 降低器件工作的稳定性和可靠性. 随着航空航天领域的不断进步, 要求航天器中功率半导体器件向着高频、高耐压、高可靠性、抗辐照等方向发展<sup>[1,2]</sup>. 而半导体器件的性能往往与半导体材料密切相关, 作为第三代宽禁带半导体材料的代表之一, 碳化硅(SiC)材料由于本身具有宽禁带、高击穿场强、高热导率以及高饱和电子漂移速率等优点, 可以用于高压、高频、高功率及高温

领域. 相比于传统硅基器件, SiC功率器件能够实现提高电子设备工作效率、降低装置体积和重量、增加抗辐照性能, 满足新一代航天器对功率半导体器件的要求. 因此, SiC基功率半导体器件在空间辐照环境中具有很大的应用前景<sup>[3-6]</sup>.

目前, SiC场效应晶体管(SiC MOSFET)器件的辐照效应引起了人们极大的关注. 2012年, Akturk等<sup>[7]</sup>利用<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 射线对1200 V的SiC MOSFET功率器件开展总剂量实验, 结果表明, 当累积剂量超过100 krad(Si)时, 器件仍然具有良好的性能, 但累积剂量超过300 krad(Si)时, 栅极-漏极之间电容将发生变化并会显著影响器件的开关性能. 2016年, Pavel和Stanislav<sup>[8]</sup>利用4.5 MeV的电子对1700 V的4H-SiC MOSFET功率器件

\* 国家自然科学基金(批准号: 11875229)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guohongxia@nint.ac.cn

进行了总剂量实验, 结果表明, SiC MOSFET 功率器件对于电子辐照十分敏感, 阈值电压随着累积剂量的增加会迅速降低. 2019 年, Pavel 和 Stanislav [9] 对不同的 SiC 功率器件开展了总剂量辐照实验, 结果表明, 包含氧化层的 SiC 器件受到辐照后更容易出现总剂量效应. 但是, 半导体器件可能在各种复杂恶劣的环境下工作, 想要精确地评估器件的抗总剂量能力, 需要掌握器件的功能退化、失效规律与累积剂量以及电压、温度等应力条件之间的关系. 根据先前的报道, MOS 晶体管在辐照过程中电子空穴对的初始复合率对电场也有很强的依赖性 [10]. 同时由于 SiC 材料具有较大的禁带宽度, 因此杂质离化能较大, SiC 基器件在室温下仅有 60% 左右的杂质离化, 当温度达到 700 K 时, 所有的杂质才会全部离化, SiC 器件的最高工作温度可达到 800 K 以上, 是一种用于高温环境的理想器件 [11,12]. 因此, 在辐照过程中引入电压、温度等变量是精确评估 SiC 基半导体器件抗总剂量能力的必要条件.

地面模拟 MOS 器件的总剂量效应通常会用到高剂量率辐照配合一定条件的加速退火来等效空间辐射环境. SiC MOSFET 器件在辐射后进行退火, 可以使其性能部分甚至完全恢复, 但是退火效应会受到退火时的环境温度、时间、电场等因素的影响 [13,14]. 因此, 对辐照后的 SiC MOSFET 进行不同环境下的退火实验, 有助于深入地研究 SiC MOSFET 器件的退火机理.

本文利用  $\gamma$  射线对 SiC MOSFET 器件开展了不同电压、不同温度下的总剂量辐照实验; 同时也对器件辐照后的退火效应进行了研究, 并基于 Arrhenius 模型, 分析了阈值电压恢复时退火时间和温度之间的函数关系.

## 2 实验

所用的器件为泰科天润生产的商业级增强型的 N 沟道 SiC MOSFET 功率器件, 器件的结构示意图如图 1 所示. 器件型号为 G1 M080120 B, 采用 TO-247 封装, 器件的基本参数如下: 阈值电压  $V_{th}$  为 4 V, 源漏击穿电压  $V_{(BR)DSS}$  为 1200 V, 额定电流为 40 A.

总剂量辐照实验在  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线源上进行, 并在辐照实验中引入了电压和温度等变量. 在探究电应力对器件辐照退化的影响时选取了栅压偏置

( $V_{GS} = 5\text{ V}$ ,  $V_{DS} = 0\text{ V}$ )、漏压偏置 ( $V_{GS} = 0\text{ V}$ ,  $V_{DS} = 300\text{ V}$ )、零压偏置 ( $V_{GS} = V_{DS} = 0\text{ V}$ ) 进行总剂量辐照实验, 在此基础上又选取了 1, 3, 5, 10 和 20 V 等不同栅压进行总剂量辐照实验; 在探究温度应力对器件辐照退化的影响时选取了室温和 100 °C 两个温度变量进行总剂量辐照实验, 辐照时的剂量率都为 50 rad (Si)/s. 辐照前后, 利用 BC3193 半导体分析仪以及 B1500 A 对器件的各项电学参数作出了详细的表征. 整个辐照过程中选取了 50, 150, 250, 350 和 500 krad (Si) 等 5 个剂量点. 为了保证实验数据的可靠性, 器件辐照后的电学参数测试都在 1 h 内完成.

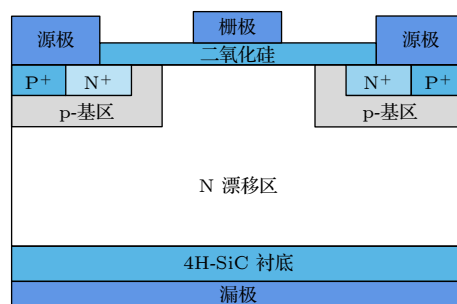


图 1 4H-SiC MOSFET 简化示意图

Fig. 1. Simplified schematic diagram of 4H-SiC MOSFET.

当总剂量辐照实验完成后, 对辐照后的 SiC MOSFET 器件进行不同温度、不同电压下的退火实验, 整个退火过程持续一周的时间. 并在特定的时间点取下器件移位到 BC3193 上进行电学性能的测量.

## 3 结果与分析

### 3.1 电应力对 SiC MOSFET 器件总剂量效应的影响

图 2 和图 3 分别给出了 SiC MOSFET 器件在不同偏置条件下辐照前后的转移特性曲线、阈值电压漂移量与累积剂量的关系. 从图中的实验结果可以看出, 在 500 krad (Si) 的累积剂量下, 三类偏置条件下器件的转移特性曲线都有明显的向左漂移, 器件的阈值电压也有显著的减小. 与此同时, 发现实验选用的偏置电压条件对器件的辐照退化程度有很大影响, 在相同的累积剂量下, 栅压偏置下器件的辐照退化最严重. 当辐照剂量达到 500 krad (Si) 时, 栅压偏置下阈值电压的变化程度高达 46%,

漏压偏置和零压偏置下阈值电压变化程度为 24%。以上结果表明, 对于增强型 N-MOSFET 器件来说, 栅极施加电场是器件总剂量辐照过程中的最恶劣偏置。

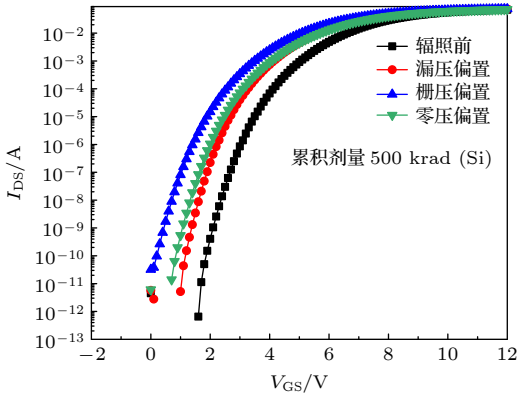


图 2 不同偏置下 SiC MOSFET 辐照前后转移特性曲线  
Fig. 2. Transfer characteristics of SiC MOSFET before and after irradiation under different biasing conditions.

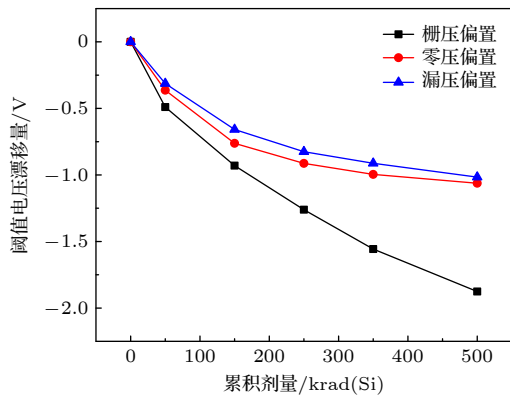


图 3 不同偏置下 SiC MOSFET 阈值电压随累积剂量的变化  
Fig. 3. Variation of threshold voltage of SiC MOSFET with cumulative dose under different bias.

在此基础上, 为了更加深入地探索栅极电场强度对 SiC MOSFET 器件辐照退化的影响, 开展了不同栅压下的总剂量辐照实验. 图 4 是 1, 3, 5, 10 和 20 V 等不同栅压下器件辐照前后亚阈值区域的转移曲线, 辐照累积的总剂量为 500 krad(Si). 从图中结果来看, 不同栅压偏置下辐照后器件的转移曲线都向左漂移, 然而器件辐照后的退化程度并没有随着栅极电压的增加而变大. 与栅极电压为 1 V 时相比, 当栅极电压为 3 V 时器件辐照后的退化程度明显增大; 但是与栅极电压为 3 V 时相比, 当栅极电压为 5, 10 和 20 V 时, 器件辐照后的退化程度明显减小, 并且随着栅压增加这种变弱的程

度愈发明显. 值得注意的是, 栅压为 20 V 时器件辐照后的退化程度甚至要略小于栅压为 1 V 时的退化程度. 经过对器件阈值电压的测试发现, 当栅压为 1 V 时, 辐照后器件阈值降低了 1.3 V, 当栅压为 3 V 时, 辐照后器件阈值电压减小了 1.9 V, 当栅压为 20 V 时, 辐照后器件阈值电压减小了 1.2 V.

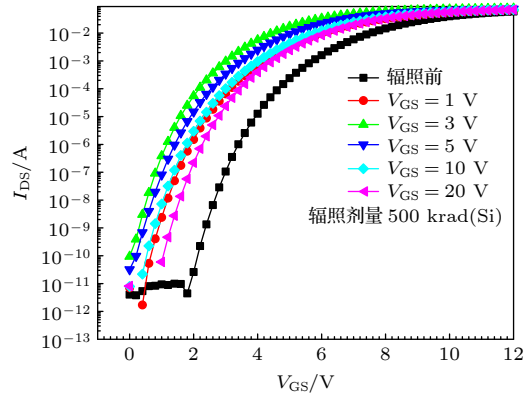


图 4 不同栅压下辐照前后的亚阈值区域转移特性曲线  
Fig. 4. Transferring characteristics of subthreshold region before and after irradiation under different gate pressures.

为了解释这种总剂量辐照退化和电场之间的依赖关系, 需要从总剂量效应造成器件性能退化的物理过程来分析. 总剂量效应造成 SiC MOSFET 器件的退化主要是由于辐照在器件栅氧化层中感生出陷阱电荷. 当  $\gamma$  射线入射到 SiC MOSFET 中, 会在氧化层中沉积能量, 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, 使其从价带跃迁到导带, 在氧化层中产生大量的电子-空穴对. 由于电子在氧化物介质中的迁移率远大于空穴, 因此在外加电场的作用下, 电子在极短时间内 (皮秒级) 被扫出栅极, 在此之前空穴和电子会发生复合. 逃脱复合的空穴则会通过跃迁的方式向着 SiC/SiO<sub>2</sub> 界面处移动, 当空穴跃迁至 SiO<sub>2</sub> 界面附近时, 会在界面附近的深层陷阱中被俘获, 形成正的氧化物陷阱电荷 [15-17]. 空穴跃迁过程中会释放出氢元素, 并在 SiC/SiO<sub>2</sub> 界面处发生作用而产生界面态陷阱. 氧化物陷阱电荷会导致 SiC MOSFET 器件的阈值电压负漂, 界面态电荷会导致阈值电压正漂, 可以认为阈值电压的漂移由氧化陷阱电荷和界面态电荷共同决定 [18]. 所以, 对于本次研究中的 N 沟道 MOSFET 器件来说, 相对于漏压偏置和零偏, 栅极施加正的电压会



增加逃脱初始复合的空穴数量,形成的陷阱电荷浓度也会更大,增加器件的辐照退化程度,这也解释了为什么栅压偏置是辐照时的最恶劣偏置.上文解释了总剂量效应会在器件栅氧化层内感生出氧化物陷阱电荷以及界面态电荷,从而造成器件电学性能退化.因此,想要深入地揭示 SiC MOSFET 器件的总剂量效应的物理机理,首先就是要精确地计算出  $\gamma$  射线辐射时在器件栅氧化层内部产生的氧化物陷阱电荷以及界面态电荷的浓度.

精确计算出两种陷阱电荷浓度的第一步是将氧化物陷阱电荷和界面态电荷对阈值电压的贡献量分离出来.在这里用  $\Delta V_{ot}$  表示氧化物陷阱电荷对阈值电压漂移做出的贡献,用  $\Delta V_{it}$  表示界面态电荷对阈值电压漂移做出的贡献,辐照后阈值电压的漂移量可以用 (1) 式表示.本研究采用了中带电压法对器件的两种辐射感生电荷进行分离 [19,20].中带电压  $V_{mg}$  就是指当费米能级与禁带中心点重合时对应的栅极电压.此时,由于界面态呈电中性,不会引起阈值电压的变化.因此,可以认为阈值电压的漂移都是由氧化物陷阱电荷引起的,如 (2) 式所示.

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

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

综上所述,计算出阈值电压漂移量  $\Delta V_{th}$  和中带电压  $V_{mg}$  就能精确分离两种陷阱电荷对阈值电压的贡献量.阈值电压  $\Delta V_{th}$  一般通过最大外推法来确定,转移曲线的最大跨导处的切线与横轴的交点所对应的就是阈值电压.中带电压  $V_{mg}$  的确定首先是利用 (3) 式和 (4) 式计算出中带电流  $I_{mg}$ ,然后在转移特性曲线的亚阈值区域找到中带电流  $I_{mg}$  所对应的栅压,此时的栅压就是所求的  $V_{mg}$ .在这里需要注意的是,  $I_{mg}$  相对来说会很小,因此可能要将转移特性曲线中线性部分反向延长才能得到  $V_{mg}$ .

$$I_{ds} = C_m C_{ox} (V_{gs} - V_{th}), \quad (3)$$

$$I_{mg} = \sqrt{2} C_m k T L_B n_i \left( \ln \frac{N_A}{n_i} \right)^{-1/2}, \quad (4)$$

其中,  $C_{ox}$  表示单位面积的栅氧化层电容,  $k$  表示玻尔曼兹常数,  $T$  表示温度,  $L_B$  表示 SiC 中的德拜长度,  $n_i$  表示沟道的载流子浓度,  $N_A$  表示 p-基区的

掺杂浓度.

根据上述理论,求出  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  后,氧化物固定电荷浓度以及界面态电荷浓度可以通过 (5) 式和 (6) 式计算出:

$$\Delta N_{ot} = \frac{C_{ox} \Delta V_{ot}}{q}, \quad (5)$$

$$\Delta N_{it} = \frac{C_{ox} \Delta V_{it}}{q}, \quad (6)$$

式中,  $q$  表示电荷量.

基于图 4 所示的不同栅压下的亚阈值区域的转移特性曲线,利用上述的中带电压法分离得到不同栅压下氧化物陷阱电荷浓度、界面态电荷浓度以及阈值电压漂移量随辐照时栅压的变化,如图 5 所示.可以看出,相较于栅压为 3 V 时辐照后氧化物陷阱电荷的浓度,在 5, 10 和 20 V 时辐照后感生的氧化陷阱电荷浓度分别降低了 22%, 37% 和 48%.同时发现,整个辐照过程界面态电荷浓度没有增加,认为当施加的栅压超过 3 V 之后,器件阈值电压的漂移量减小是由氧化物陷阱电荷浓度减小造成的.

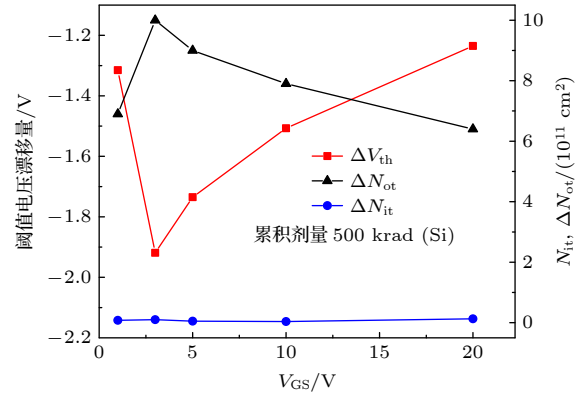


图 5 辐照后阈值电压和陷阱电荷浓度随栅压的变化  
Fig. 5. Variation of threshold voltage and trap charge concentration with gate voltage after irradiation.

对于栅压和氧化物陷阱电荷俘获率之间的关系可以这样解释,随着栅压增加,逃脱复合的空穴比例会增加,但空穴俘获截面会减小,氧化层中俘获空穴的数量主要依赖于俘获截面 [21,22].因此,本研究表明,在不同的栅压下进行相同累积剂量辐照,辐照后 SiC MOSFET 器件的氧化物陷阱电荷浓度不会随着栅压的增大而变大,在栅压超过 3 V 时,空穴俘获截面会减小.

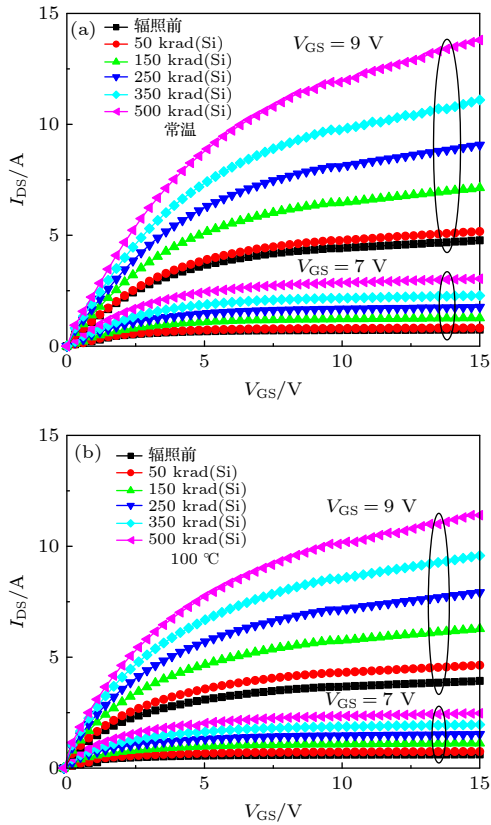


图6 SiC MOSFET 器件在辐照前后输出曲线 (a) 常温辐照; (b) 100 °C 辐照

Fig. 6. Output curve of SiC MOSFET device before and after irradiation: (a) Normal temperature irradiation; (b) high temperature irradiation.

### 3.2 温度应力对 SiC MOSFET 器件总剂量效应的影响

图 6(a) 和图 6(b) 分别给出了 SiC MOSFET 器件在室温和 100 °C 时, 辐照前后的输出特性曲线. 在辐照前后对器件的输出特性进行测试时, 分别选取了  $V_{GS} = 7\text{ V}$  以及  $V_{GS} = 9\text{ V}$  的测试条件. 从图 6(a) 和图 6(b) 所示的结果来看,  $\gamma$  射线辐照后会导致器件的漏源电流增加, 随着累积剂量的增加漏源电流的变化量逐渐增大. 图 7(a) 和图 7(b) 分别给出了 SiC MOSFET 器件在常温和 100 °C 时, 辐照前后的亚阈值区域转移特性曲线. 从图 7(a) 和图 7(b) 可以看出, 随着累积总剂量的增加, 辐照后器件的转移特性曲线都逐渐向负电压一侧漂移, 阈值电压逐渐减小但辐照后曲线的斜率没有明显变化. 同时, 图中也反映出总剂量效应导致器件电学性能的退化会受到温度应力的影响, 主要表现为在 100 °C 下辐照时器件电学性能的退化程度更低.

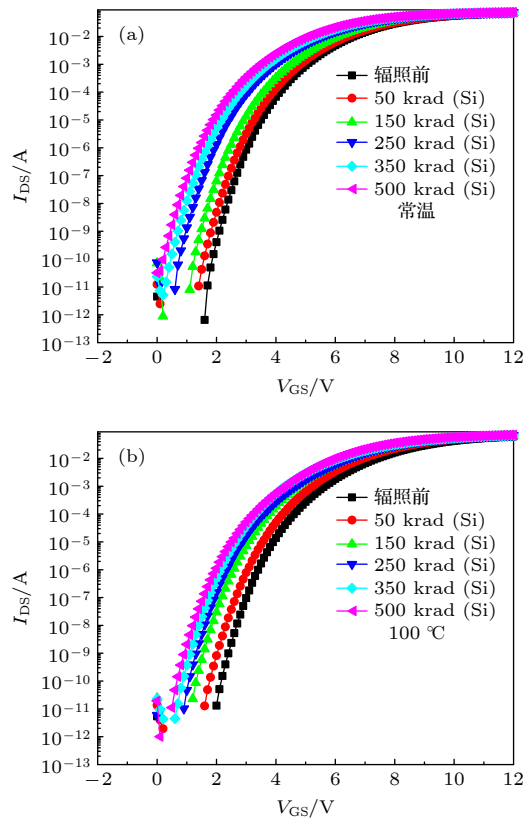


图7 SiC MOSFET 器件辐照的前后转移曲线 (a) 常温辐照; (b) 100 °C 辐照

Fig. 7. Transfer curve of SiC MOSFET devices before and after irradiation: (a) Normal temperature irradiation; (b) high temperature irradiation.

上述结果表明, 总剂量效应会使 SiC MOSFET 器件发生退化而导致器件阈值电压、漏源电流等电学参数发生变化; 相较于 100 °C, 常温环境是 SiC MOSFET 器件进行  $\gamma$  射线辐照时的恶劣辐照环境. 关于总剂量效应导致 SiC MOSFET 器件的退化机理在上文中已经进行了阐述, 为了解释在常温和 100 °C 下辐照时, 器件退化程度存在差异的原因, 基于图 7(a) 和图 7(b) 所示的两种温度下器件辐照前后的转移特性曲线, 利用中带电压法分离得到室温和 100 °C 时, 辐照感生的氧化物陷阱电荷和界面态电荷造成阈值电压的漂移量  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$ , 如图 8 所示. 可以看出, 无论是在常温还是 100 °C 的环境下辐照, 造成器件阈值电压退化的主要原因都是辐照在氧化层内感生的氧化物陷阱电荷, 但在相同的累积剂量下, 100 °C 下进行辐照时感生的氧化物陷阱电荷浓度更低一些, 所以导致在此温度下辐照时器件的退化程度更低. 分析认为, 100 °C 下辐照时, 器件在辐照过程中发生了退火效应而导致

氧化物陷阱电荷浓度变低, SiC MOSFET 器件辐照后存在隧穿效应以及热激发两种退火方式. 图 9 给出了高温辐照时隧穿效应的电荷分布情况, 当在 100 °C 对器件进行辐照时, 一方面辐照会在器件的栅氧化层内感生出氧化物陷阱电荷, 另一方面沟道电子会在 100 °C 的温度环境中获得足够穿过 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面的能量, 在电场的作用下由沟道隧穿到氧化层内与辐照感生的氧化物陷阱电荷发生中和, 使其浓度减小, 从而造成辐照退化程度降低. 热激发退火是将氧化层中由辐照感生的氧化物陷阱电荷通过热激发的形式移除氧化层, 从而降低器件的辐照退化程度.

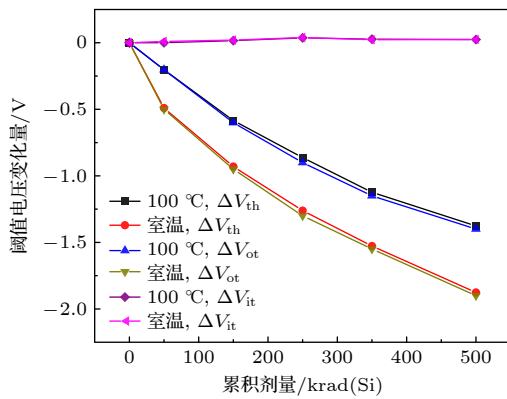


图 8 不同温度下辐照时电压漂移量和总剂量的关系  
Fig. 8. Relationship between the voltage drift and the total dose during irradiation at different temperatures.

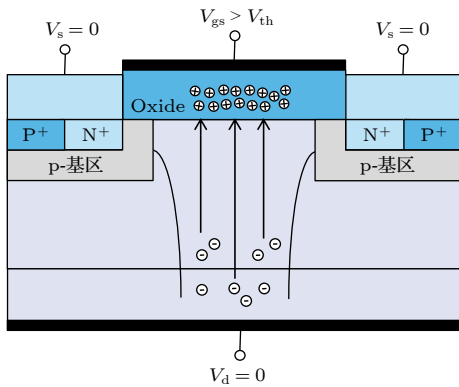


图 9 SiC MOSFET 器件高温辐照时隧穿效应电荷分布  
Fig. 9. Tunneling effect charge distribution in SiC MOSFET devices irradiated at high temperature.

### 3.3 退火效应

为了研究辐照后的 SiC MOSFET 器件的退火效应, 对辐照后的器件开展了 100 °C 的恒温加速退火实验, 整个退火实验的周期为一周, 共计 168 h, 并在栅极施加了 5 和 0 V 的电压, 整个退火过程中

选取不同的时间点对器件的各项电学参数进行测量. 图 10 给出了栅压为 5 V 时, 在 100 °C 下进行 168 h 退火后器件的输出特性曲线, 从图 10 中的结果来看, 辐照后的器件经历 168 h 的高温退火后曲线恢复了 50%. 图 11 给出了在 100 °C 时, 栅压为 5 和 0 V 时退火过程中阈值电压随时间的变化曲线, 可以看出, 退火时在栅极 5 V 的电压会使阈值电压的恢复量更大, 退火 168 h 后, 栅极加电时阈值电压恢复了 40%, 而不加电时阈值电压仅恢复了 11%. 同时, 为了进行对比, 也开展了栅压为 5 V 时的常温退火实验. 图 12 给出了栅压为 5 V 时, 在 100 °C 和常温下进行退火时阈值电压随时间的变化曲线, 通过对比两种温度下退火后的结果可以发现, 经历 168 h 的高温退火后阈值电压恢复了 40%, 而经历 168 h 的常温退火后阈值电压仅恢复了 19%.

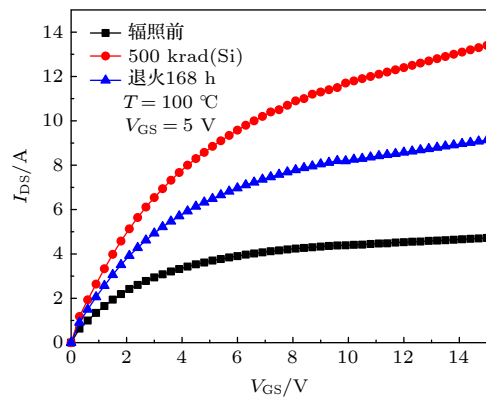


图 10 SiC MOSFET 器件辐照后退火 168 h 后的输出曲线  
Fig. 10. Output curve of SiC MOSFET device after 168 h annealing after irradiation.

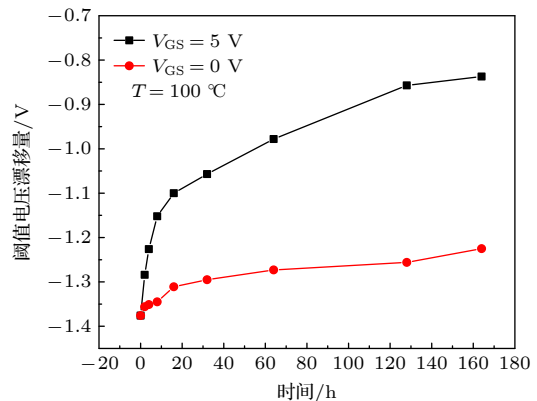


图 11 栅压为 5 和 0 V 退火时阈值电压漂移量随时间的变化关系  
Fig. 11. Relationship of threshold voltage recovery with time under different gate voltage annealing conditions.

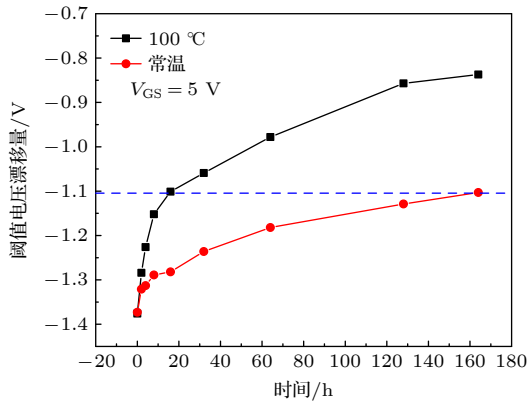


图 12 常温和 100 °C 退火时阈值电压漂移量随时间的变化关系

Fig. 12. Relationship of threshold voltage recovery with time at room temperature and annealing at 100 °C.

上一节提到了高温环境下器件辐照产生的退化会发生部分恢复,这是由于高温环境会引发器件发生隧穿退火或热激发退火.结合图 11 和图 12 的退火恢复情况来看,除了高温这一重要因素外,退火过程中给栅极施加正的电压也会极大地促进退火恢复程度.结合两种退火恢复机理的物理过程,说明器件 100 °C 下辐照时,主要发生的是隧穿退火而导致辐照退化程度降低.

为了更加直观地反映出辐照后的器件退火恢复程度和退火温度之间的物理关系,本文引入了 Arrhenius 模型<sup>[23]</sup>,该模型是使用温度应力实验时最典型、应用最广的加速模型.本文以相同的阈值电压恢复量作为基准,得到温度与时间的表达式.所用的阿列尼斯经验公式如下:

$$\ln t = A + E/(kT), \quad (7)$$

式中  $A$  为常数,  $k$  是玻尔曼兹常数,  $E$  为激活能,  $T$  是绝对温度,  $t$  是时间.

从 (7) 式可以看出,时间  $t$  和温度  $T$  之间存在一定的函数关系.在实验过程选取两组不同的退火温度  $T_1, T_2$ , 阈值电压恢复量相同时,得到所需的时间分别为  $t_1, t_2$ , 如图 12 所示.将实验所得的温度和时间代入 (7) 式,得到如下公式:

$$\frac{t_1}{t_2} = \exp \left[ \frac{E}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right]. \quad (8)$$

根据 (8) 式,可以计算出阈值电压恢复时的激活能  $E = 0.33$  eV, 在求得激活能  $E$  后代入 (7) 式可以得到温度和时间之间的确切的函数关系式,该函数的关系曲线如图 13 所示.根据该函数曲线可求得任意温度下退火时阈值电压恢复所需的时间.

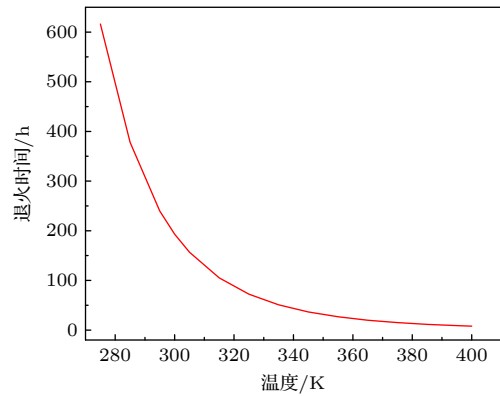


图 13 阈值电压恢复时退火温度与时间的函数曲线

Fig. 13. Function of annealing temperature and time when threshold voltage is restores.

## 4 结 论

本文针对 SiC MOSFET 功率器件开展了不同电场以及不同温度下的总剂量辐照实验,并对辐照后的器件的退火特性进行了研究.实验结果表明,总剂量效应会使器件的电学性能发生退化,但应力条件的存在对其退化程度有较大影响.通过开展不同电应力下的辐照实验发现,栅压偏置下器件辐照后得阈值电压漂移最明显,说明栅压偏置是过程中的最恶劣偏置;同时,确定了辐照感生氧化物陷阱电荷浓度与栅压大小的相关性,发现辐照时较大的栅压能降低辐照感生的氧化物陷阱电荷的浓度.通过开展不同温度下的辐照实验发现,高温应力会使辐照后器件的退化程度变小.通过高温退火实验发现隧穿退火是器件电学性能恢复的主要原因,并分析了阈值电压恢复时退火时间和温度之间量函数关系.

## 参考文献

- [1] Claeys C, Simonen E(translated by Liu L Z)2008 *Radiation Effects of Advanced Semiconductor Materials and Devices* (Beijing: National Defence Industry Press) pp12–20 (in Chinese) [克拉艾C, 西蒙恩 E著(刘忠立译) 2008 先进半导体材料及器件的辐射效应(北京:国防工业出版社)第12—20页]
- [2] Bagatin M, Gerardin S, Paccagnella A 2017 *Semicond. Sci. Technol.* **32** 033003
- [3] Wang J, Zhao T, Li J 2008 *IEEE Trans. Electron Devices* **55** 1798
- [4] Nakamura S 1998 *Science* **281** 956
- [5] Akturk A, Goldsman N, Potbhare S, Lelis A 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 033703
- [6] Sriram K D, Sarit D, John R, Ronald D S 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3687
- [7] Akturk A, McGarrity J M, Potbhare S, Goldsman N 2012 *IEEE Trans. Electron Devices* **59** 3258



- [8] Pavel H, Stanislav P 2016 *Phys. Status Solidi A* **8** 160047
- [9] Pavel H, Stanislav P 2019 *IET Power Electron.* **12** 3910
- [10] Shaneyfelt M R, Schwank J R, Fleetwood D M, Winokur P S, Hughes K L 1990 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** 1187
- [11] Cooper J A, Melloch M R, Singh R, Agarwal A, Palmour J W 2002 *IEEE Trans. Electron Devices* **49** 658
- [12] Palmour J W, Edmond J A, Kong H S, Carter C H 1993 *Chin. Phys. B* **185** 461
- [13] Khosropour P, Galloway K F, Zupac D 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 555
- [14] Hirai H, Kita K 2017 *J. Appl. Phys.* **56** 111302
- [15] Chen W H, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L, He L, Zhang T F, Zhang X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4090 (in Chinese) [陈伟华, 杜磊, 庄奕琪, 包军林, 何亮, 张天福, 张雪 2009 物理学报 **58** 4090]
- [16] Liu Z L, Hu Z Y, Zhang Z X, Shao H, Ning B X, Bi D W, Chen M, Zou S C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 116103 (in Chinese) [刘张李, 胡志远, 张正选, 邵华, 宁冰旭, 毕大炜, 陈明, 邹世昌 2011 物理学报 **60** 116103]
- [17] Oldham T R, Mclean F B 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 483
- [18] Wang X 2016 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [万欣 2016 博士学位论文(北京: 清华大学)]
- [19] Koichi M, Satoshi M, Takuma M, Takashi Y, Takahiro M, Shinobu O 2017 *Phys. Status Solidi A* **214** 1600446
- [20] McWhorter P J, Winokur P S 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 133
- [21] James R S, Marty R S, Daniel M F, James A F, Paul E D, Philippe P, Véronique F C 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 1833
- [22] Shaneyfelt M R, Schwank J R, Fleetwood D M, Winokur P S, Hughes K L, Sexton F W 1990 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **37** 1632
- [23] Li F, Fu D X, Zhang R, Ma H L 2020 *Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers* Dalian, China, April 14–16, 2020 p331

# Total dose effect and annealing characteristics of silicon carbide field effect transistor devices under different stresses\*

Gu Zhao-Qiao<sup>1)</sup> Guo Hong-Xia<sup>2)†</sup> Pan Xiao-Yu<sup>2)</sup> Lei Zhi-Feng<sup>3)</sup>  
Zhang Feng-Qi<sup>2)</sup> Zhang Hong<sup>1)</sup> Ju An-An<sup>1)</sup> Liu Yi-Tian<sup>1)</sup>

1) (*School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

2) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

3) (*State Key Laboratory of Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component, CEPREI, Guangzhou 510610, China*)

( Received 17 March 2021; revised manuscript received 14 April 2021 )

## Abstract

In this paper, silicon carbide field effect transistor device is taken as a research object, and the cobalt source irradiation experiment is conducted under different voltages and different temperatures and the annealing experiment is also performed after irradiation. The semiconductor parameter analyzer is used to test the direct current (DC) parameters of the device, and the changes in the radiation sensitive parameters of the device in the irradiation and annealing process are studied. The reasons for the influence of voltage and temperature on the radiation degradation of the device are analyzed, and the annealing recovery is also explored. The results show that the oxide trapped charge induced by irradiation is the main reason for the degradation of the electrical parameters of the silicon carbide field effect transistor device. The voltage and temperature can affect the final yield of the oxide trapped charge, which causes the device to produce the difference in the degree of degradation after irradiation at different voltages and different temperatures; in the annealing process, due to the annealing of the tunneling of oxide trapped charges, the electrical performance of the device can be restored partially.

**Keywords:** silicon carbide field effect transistor, total dose, voltage, temperature, annealing effect

**PACS:** 61.80.Ed, 61.82.Fk, 73.20.-r, 85.30.Tv

**DOI:** [10.7498/aps.70.20210515](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210515)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11875229).

† Corresponding author. E-mail: [guohongxia@nint.ac.cn](mailto:guohongxia@nint.ac.cn)