

不同偏置下增强型 AlGa_N/Ga_N HEMT 器件总剂量效应研究

邱一武 郭风岐 殷亚楠 张平威 周昕杰
(中国电子科技集团公司第五十八研究所 无锡 214035)

摘要 氮化镓功率器件凭借优异性能被抗辐照应用领域重点关注,为探究氮化镓功率器件抗 γ 射线辐照损伤能力,明确其辐射效应退化机制,针对增强型 AlGa_N/Ga_N 高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)器件开展不同偏置(开态、关态和零偏置)条件下的 γ 射线辐照与不同温度的退火试验,分析器件电学性能同偏置条件和退火环境之间的响应规律。结果表明:随着 γ 射线辐照剂量的增加,器件阈值电压负漂,跨导峰、饱和漏电流和反向栅泄漏电流逐渐增加,且在开态偏置条件下器件的电学特性退化更加严重;此外,高温环境下退火会导致器件的电学性能恢复更加明显。分析认为 γ 射线辐照剂量越高,产生的辐照缺陷越多,同时栅极偏压会降低辐照引发的电子-空穴对的初始复合率,逃脱初始复合的空穴数量增多,进一步增加了缺陷电荷的浓度;而高温环境会导致器件发生隧穿退火或热激发退火,有助于器件性能恢复。氮化镓功率器件的辐照损伤过程及机理研究,为其空间环境应用的评估验证提供了数据支撑。

关键词 增强型 AlGa_N/Ga_N HEMT 器件, 总剂量效应, 偏置条件, 电学性能, 退火恢复

中图分类号 TN386

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110502

Total ionizing dose effect of enhanced AlGa_N/Ga_N HEMT devices under different bias

QIU Yiwu GUO Fengqi YIN Yanan ZHANG Pingwei ZHOU Xinjie

(China Electronics Technology Group Corporation No.58 Research Institute, Wuxi 214035, China)

Abstract [Background] Gallium nitride (Ga_N) power devices have garnered attention in the anti-irradiation field owing to their excellent performance. [Purpose] This study aims to explore the anti- γ -ray damage ability of gallium nitride power devices and clarify the mechanism of radiation degradation. [Methods] Firstly, the domestically produced commercial NP20G65D6 P-GaN gate enhanced AlGa_N/Ga_N High Electron Mobility Transistor (HEMT) device was taken as test sample. Then, ⁶⁰Co γ -ray source with different irradiation doses of 0.3 Mrad (Si), 0.6 Mrad (Si), and 1.0 Mrad (Si), respectively, was employed to conduct total dose irradiation experiments under different bias (ON-state, OFF-state, and GND-state) conditions and annealing tests at different temperatures for enhanced AlGa_N/Ga_N HEMT devices. Finally, the response law between the electrical performance of the device and the bias condition and annealing environment were analyzed to reveal the degradation mechanism of device sensitive parameters. [Results] The results indicate that as the γ -ray irradiation dose increases, the device's threshold voltage exhibits a negative drift, and the transconductance peak, saturation leakage current, and reverse gate leakage current gradually increase. Simultaneously, the electrical characteristics of the device deteriorate more rapidly under the ON-state bias condition. Furthermore, annealing at high temperatures leads to a more apparent recovery of the electrical

第一作者: 邱一武, 男, 1993 年出生, 2019 年于哈尔滨工业大学获硕士学位, 材料工程专业, 工程师, 主要从事抗辐射 IC 设计, 半导体器件辐射效应及可靠性分析

通信作者: 周昕杰, E-mail: zhouxinjie2000@sina.com

收稿日期: 2023-04-24, 修回日期: 2023-07-15

First author: QIU Yiwu, male, born in 1993, graduated from Harbin Institute of Technology with a master's degree in 2019, major in materials engineering, engineer, mainly engaged in anti-radiation IC design, semiconductor device radiation effect and reliability analysis

Copresponding author: ZHOU Xinjie, E-mail: zhouxinjie2000@sina.com

Received date: 2023-04-24, revised date: 2023-07-15

properties of devices. The analysis demonstrates that the higher the γ -ray irradiation dose, the more radiation defects are generated. The gate bias reduces the initial recombination rate of electron-hole pairs caused by irradiation, increases the number of holes escaping the initial recombination, and further increase the concentration of defect charge. The high-temperature environment causes tunneling annealing or thermal excitation annealing, which is conducive to the recovery of device performance. **[Conclusions]** The radiation damage process and mechanism of gallium nitride power devices of this study provides data support for evaluating and verifying its application in a space environment.

Key words Enhanced AlGaIn/GaN HEMT devices, Total ionizing dose effect, Bias conditions, Electrical property, Annealing recovery

氮化镓(GaN)基异质结材料凭借宽禁带、耐高温、高击穿电压以及优异的抗辐照性能成为航天领域半导体材料的研究和应用焦点,然而基于GaN材料的AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)因其制备过程存在的本征缺陷和损伤,在空间应用过程中性能将受到环境中重粒子、质子、中子以及 γ 射线的影响,从而产生一系列辐射效应,如总剂量效应(Total Ionizing Dose effect, TID)^[1-3]、单粒子效应(Single Event Effect, SEE)^[4-5]和位移损伤剂量效应(Displacement Damage Dose effect, DDD)^[6-7]等。大量高能粒子会在器件中引入缺陷,致使器件电学性能退化甚至失效,严重威胁器件的可靠性。

长期工作在辐射环境中的AlGaIn/GaN HEMT器件电学性能退化程度与器件栅极偏压、辐照粒子种类、辐照剂量以及退火温度等因素紧密相关。其中,器件栅极偏压是影响器件辐射效应的最重要因素之一,其损伤机理主要与辐射时电荷的产生、传输、俘获过程有关^[8-11]。2013年,Wang等^[12]对耗尽型AlGaIn/GaN HEMT器件开展了三种偏置条件下的总剂量辐照试验,结果表明,浮空条件下AlGaIn/GaN HEMT器件直流参数并未发生明显的变化,开态偏置下器件辐照后的饱和漏电流退化最为严重,但在三种偏置条件辐照后阈值电压几乎未发生改变。2019年,Zheng等^[13]对耗尽型GaN HEMT器件

开展了⁶⁰Co γ 射线辐照试验,同样指出了栅极偏置会加重器件的性能退化。就目前而言,大部分的总剂量辐照试验都是在耗尽型GaN HEMT器件浮空条件下进行的,对增强型GaN HEMT器件加电偏置下的总剂量效应研究相对较少,且总剂量辐射效应机理复杂,并没有形成统一的机理解释。

因此,采用不同剂量的⁶⁰Co γ 射线对增强型AlGaIn/GaN HEMT器件开展三种偏置条件下的总剂量辐照试验,并进一步研究退火时间及退火温度对辐照后器件电学特性恢复的影响,探究器件总剂量效应与辐照剂量、电压偏置和退火环境之间的响应规律,揭示器件敏感参数的退化机理。

1 试验样品与试验方案

辐照试验样品选自国产商用的NP20G65D6型号的P-GaN栅增强型AlGaIn/GaN HEMT器件(650 V, 11 A, 120 m Ω),为实现试验样品性能一致性的要求,所选样品均来自同一型号同一批次。试验前预先将样品焊接到特制的3引脚TO-247转接板上,以便试验过程中施加偏置电压和对后续器件的性能测试,辐照试验过程中,器件不需要进行开封处理。试验所用的P-GaN栅增强型AlGaIn/GaN HEMT器件二维结构图与实物图如图1所示。

总剂量辐照试验在中国科学院上海应用物理研究所的⁶⁰Co γ 射线源上进行,平均能量为1.25 MeV,辐照环境为室温((23 \pm 2) $^{\circ}$ C),剂量率为

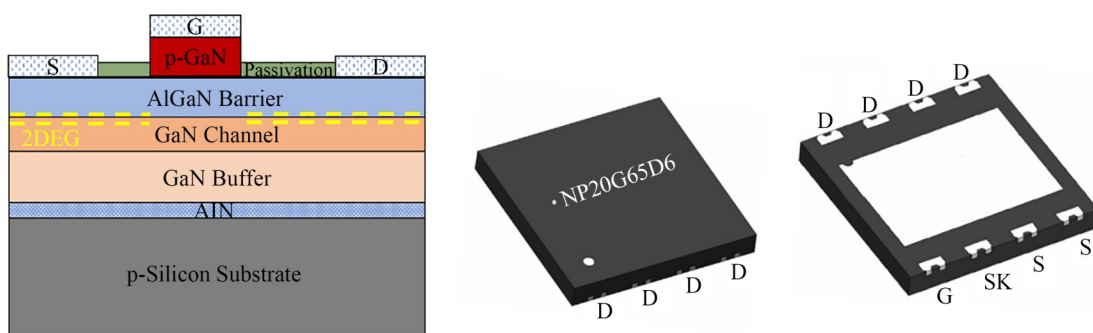


图1 P-GaN栅增强型AlGaIn/GaN HEMT器件示意图 (a)二维结构图,(b)实物图正面,(c)实物图背面

Fig.1 Diagram of P-GaN enhanced AlGaIn/GaN HEMT device

(a) Two-dimensional structure, (b) Front of physical picture, (c) Back of physical picture

50 rad(Si) · s⁻¹, 而辐照剂量点分别选择 0.3 Mrad(Si)、0.6 Mrad(Si)和 1.0 Mrad(Si)。辐照过程中使用低压直流电源设备来施加偏置电压, 每个剂量点放置 6 个器件, 两个器件为一组, 每组器件分别施加开态(ON-state)偏置、关态(OFF-state)偏置和零(GDN-state)偏置, 每种试验条件下均有两组试验数据进行对比分析, 降低试验和测试过程中引起的误差对辐照结果的影响。 γ 射线辐照试验三种偏置条件如表 1 所示。

表 1 γ 射线辐照试验三种偏置条件
Table 1 γ -ray irradiation experiment three bias conditions

	V_{gs} / V	V_{ds} / V
开态 ON-state	+3	0.5
关态 OFF-state	-3	0.5
零偏置 GDN-state	0	0

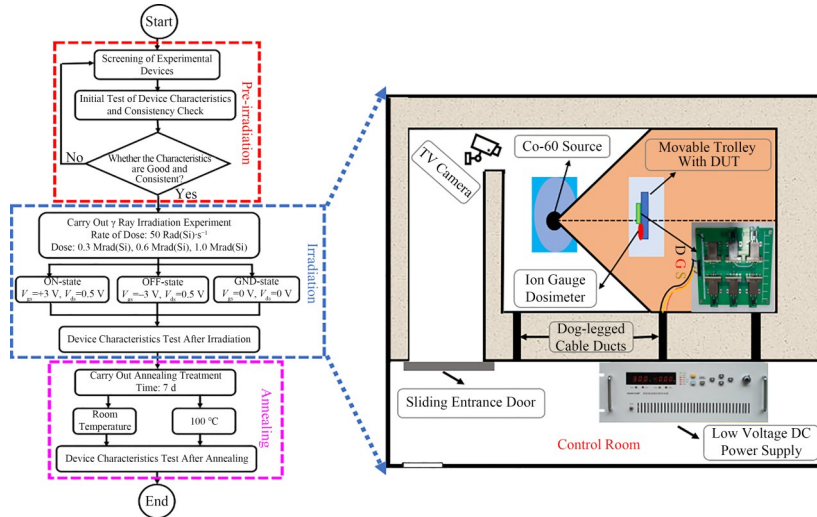


图 2 γ 射线辐照试验流程图(a)和试验设备布局示意图(b)

Fig.2 Flow chart of γ -ray irradiation experiment (a) and experiment equipment layout diagram (b)

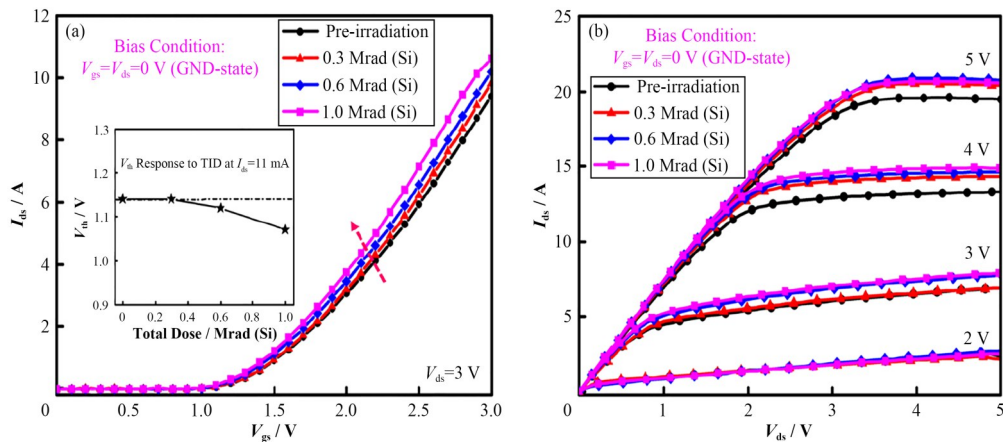


图 3 GDN-state 偏置下增强型 AlGaIn/GaN HEMT 器件辐照前后转移特性(a)和输出特性(b)

Fig.3 Transfer characteristics (a) and output characteristics (b) of the enhanced AlGaIn/GaN HEMT devices before and after irradiation under GDN-state bias

制定试验流程, γ 射线辐照试验流程图和试验设备布局示意图见图 2^[14]。辐照结束后将试验器件取出放入干冰中保存, 并在 48 h 内完成离线测量器件阈值电压 V_{th} 、跨导峰值 $g_{m,max}$ 、饱和漏电流 I_{dsat} 等电学特性, 以防在运输和测试过程中发生退火效应。离线测试结束后将器件分别置于室温和 100 °C 环境中退火 7 d, 每隔 1 d 取出进行电学性能测试, 退火过程中器件均处于浮空状态。

2 试验结果

2.1 总剂量辐照试验结果

图 3 为 GDN-state 偏置下增强型 AlGaIn/GaN HEMT 器件辐照前后转移特性及输出特性。按器件说明书规定, 定义器件 $V_{ds}=3V$ 、 $I_{ds}=11 mA$ 时的栅源电压 V_{gs} 为器件阈值电压 V_{th} 。

从图 3(a) 可知, 在 GDN-state 偏置条件下, 转移

特性曲线随着辐照剂量的增加发生轻微负向漂移，当辐照剂量达到 1.0 Mrad(Si) 时，曲线漂移量达到最大，此时 V_{th} 由辐照前的 1.15 V 降至 1.08 V， V_{th} 仅减小 0.07 V，阈值电压 V_{th} 几乎不受辐照剂量的影响。从图 3(b) 可知，当辐照剂量为 0.3 Mrad(Si) 时，器件饱和漏极电流 I_{dsat} 增加最为明显，此时 I_{dsat} 也仅增大了 4.1% ($V_{gs}=5$ V, $V_{ds}=4$ V)，随着辐照剂量的继续增加， I_{dsat} 增大幅度变缓。表明 GND-state 偏置条件下，器件电学特性在辐照前后未呈现出大的变化，性能相对稳定。

为了进一步研究不同偏置条件对器件总剂量效应的影响规律，对增强型 AlGaIn/GaN HEMT 器件又开展了关态 (OFF-state) 和开态 (ON-state) 偏置条件下的总剂量辐照试验。为了说明方便，避免数据繁杂，只给出 1.0 Mrad(Si) γ 射线辐照前后器件转移特性，插图为对应的跨导变化曲线。

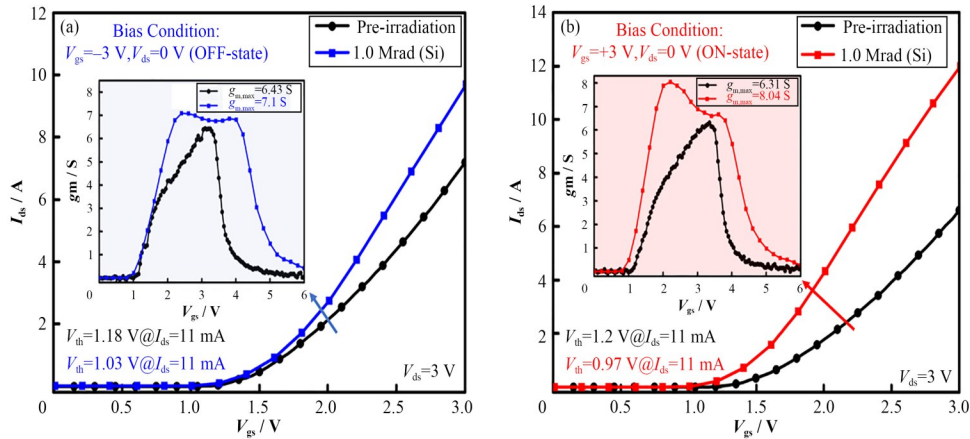


图 4 两种偏置条件下 1.0 Mrad(Si) γ 射线辐照前后器件转移特性 (a) 关态偏置, (b) 开态偏置
Fig.4 Transfer characteristic of the device before and after γ -ray irradiation with 1.0 Mrad(Si) under two bias conditions (a) OFF-state bias, (b) ON-state bias

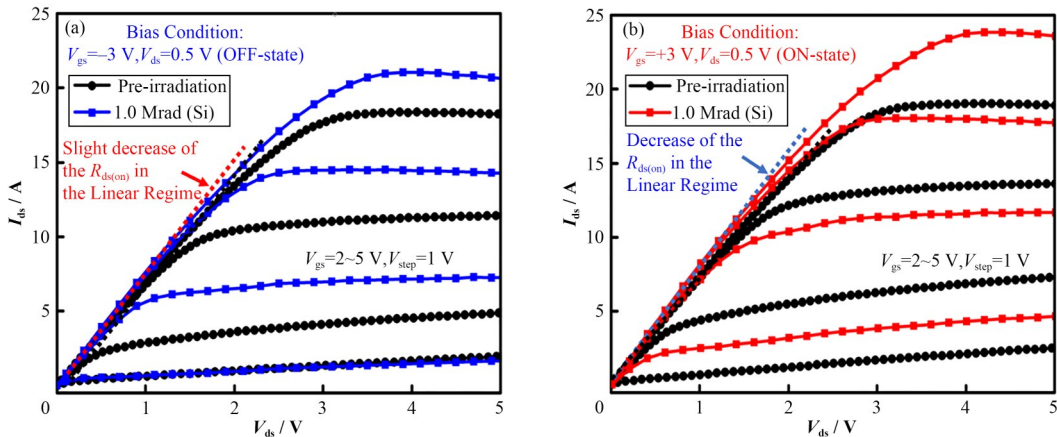


图 5 两种偏置条件下 1.0 Mrad(Si) γ 射线辐照前后器件输出特性 (a) 关态偏置, (b) 开态偏置
Fig.5 Output characteristic of the device before and after γ -ray irradiation with 1.0 Mrad(Si) under two bias conditions (a) OFF-state bias, (b) ON-state bias

从图 4 可以看出，OFF-state 偏置条件下，经 1.0 Mrad(Si) γ 射线辐照后，转移特性曲线同样发生负向漂移，此时 V_{th} 由辐照前 1.18 V 下降为 1.03 V，同时最大跨导也略有增加。相比之下，ON-state 偏置条件下，辐照后器件转移特性曲线漂移更加明显， V_{th} 减小 0.23 V，最大跨导由辐照前的 6.31 S 增大为 8.04 S。跨导曲线表示器件的栅控能力，是影响频率特性的重要指标之一，最大跨导的变化量可以很好地评估沟道载流子迁移率的变化情况，辐照后器件栅控能力上升，说明载流子迁移率增大。且有相关研究表明^[15-16]，器件在刻蚀过程中会产生一定量的表面缺陷，而低于 1.6 Mrad(Si) 的 γ 射线辐照对器件界面有一定修复作用，使得载流子迁移率提高，跨导峰值增加，本试验结果与此结论相一致。

图 5 为两种偏置条件下 1.0 Mrad(Si) γ 射线辐照前后器件输出特性。

从图 5 中可知，两种偏置条件辐照后，器件漏极

饱和电流 I_{dsat} 较辐照前均有所增大, 相比较而言, ON-state 偏置下增强型 AlGaIn/GaN HEMT 器件辐照前后的输出特性曲线变化更加显著, 经过 1.0 Mrad(Si) γ 射线辐照后, 器件的饱和漏电流 I_{dsat} 增大了 23.3% ($V_{\text{gs}}=5 \text{ V}$, $V_{\text{ds}}=4 \text{ V}$), 而 OFF-state 偏置辐照后饱和漏电流 I_{dsat} 增大了 16.2% ($V_{\text{gs}}=5 \text{ V}$, $V_{\text{ds}}=4 \text{ V}$)。从输出特性曲线可以提取出器件的导通电阻 (R_{on}) 辐照前后的变化情况, 与辐照前相比, 辐照后增强型 AlGaIn/GaN HEMT 器件的导通电阻都相应减小, 但减小幅度有限。

栅极漏电是制约 AlGaIn/GaN HEMT 器件性能提升的重要因素之一, 图 6 为两种偏置条件下 1.0 Mrad(Si) γ 射线辐照前后器件栅特性。

由图 6(a) 可以看出, 在 1.0 Mrad(Si) γ 射线辐照后, OFF-state 偏置条件下器件栅反向泄漏电流增加了不到一个数量级, 正向栅特性不发生改变。而从图 6(b) 来看, ON-state 偏置条件下器件栅反向泄

漏电流由辐照前的 10^{-9} A 增加到 10^{-8} A , 增加了一个多数量级, 且栅正向泄漏电流也略微增加。势垒高度是决定栅泄漏电流的最主要因素, 器件辐照后栅泄漏电流发生变化, 说明 γ 射线辐照产生了势垒层表面陷阱电荷, 载流子的隧穿概率增加, 降低了有效肖特基势垒高度, 器件的栅泄漏电流增加。

2.2 退火试验结果

总剂量效应引起的器件辐照损伤受外界环境的影响非常明显, 存在着与退火温度、外加电场以及退火时间等因素相关的退火特性, 图 7 为 AlGaIn/GaN HEMT 器件最大跨导和饱和漏电流变化量随辐照剂量、退火时间和退火温度的变化情况。

从图 7(a) 中看出, 在同一偏置条件下, 随着辐照剂量的增加, 器件 $g_{\text{m,max}}$ 均有所增大, 当辐照剂量为 1.0 Mrad(Si) 时, GND-state、OFF-state 和 ON-state 三种偏置下器件 $g_{\text{m,max}}$ 增加量分别为 7.2%、11.1% 和 26.5%, 可见, ON-state 偏置下 $g_{\text{m,max}}$ 增大最为明显, 为

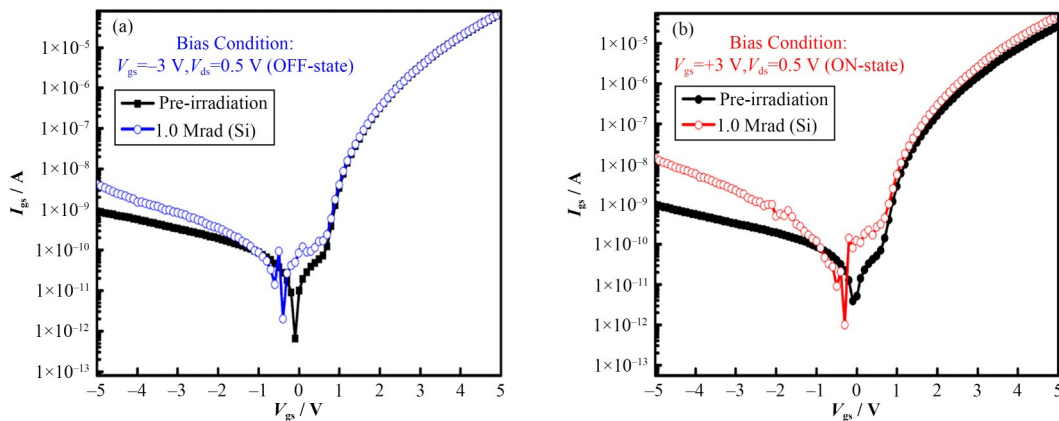


图 6 两种偏置条件下 1.0 Mrad(Si) γ 射线辐照前后器件栅特性 (a) 关态偏置, (b) 开态偏置
Fig.6 Gate leakage current characteristics of the device before and after 1.0 Mrad(Si) γ -ray irradiation under two bias conditions (a) OFF-state bias, (b) ON-state bias

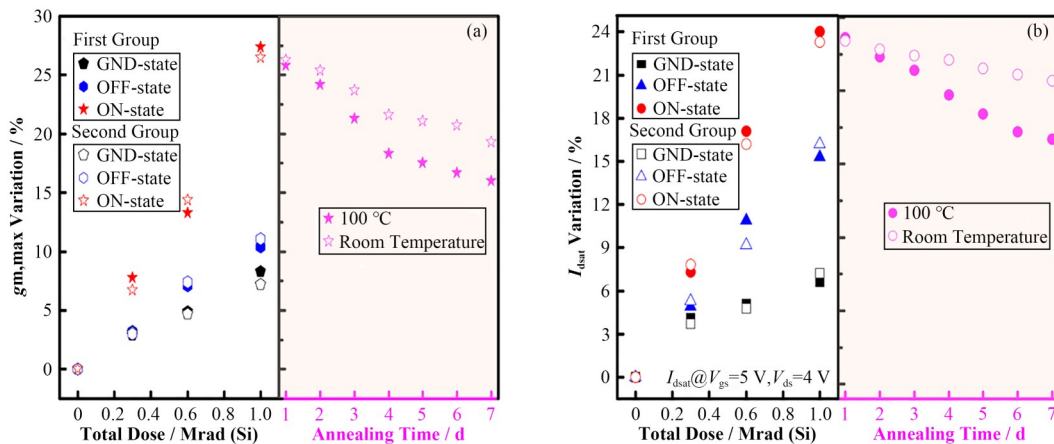


图 7 AlGaIn/GaN HEMT 器件最大跨导(a)和饱和漏电流(b)变化量随辐照剂量、退火时间和退火温度的变化情况
Fig.7 The variation of AlGaIn/GaN HEMT devices characteristics changes with irradiation dose, annealing time and annealing temperature (a) Maximum transconductance, (b) Saturation drain current

为进一步研究器件退火特性,仅对 ON-state 偏置下的两组器件分别进行了 7 d 不同温度下的退火试验,结果发现,随着退火时间的增加, $g_{m,max}$ 变化量得到部分恢复,其中,100 °C 环境下退火,器件 $g_{m,max}$ 恢复较多,退火 7 d 后, $g_{m,max}$ 恢复了 9.8%。从图 7(b) 中看出,随着辐照剂量的增加, I_{dsat} 的变化趋势同 $g_{m,max}$ 一致,在 ON-state 偏置下变化最为明显,当辐照剂量为 1.0 Mrad(Si), I_{dsat} 增大了 23.3% ($V_{gs}=5\text{ V}$, $V_{ds}=4\text{ V}$),从退火试验结果来看,经过 7 d 室温退火,器件 I_{dsat} 恢复有限,仅恢复了 2.6%,相比之下,100 °C 下退火 7 d, I_{dsat} 恢复了 6.9%。这是因为对 GaN HEMT 器件进行退火后,辐照缺陷减少,少数载流子扩散长度增加,使 GaN HEMT 器件电学性能提高,而退火温度越高,越有利于载流子扩散,器件性能恢复就越显著。但无论是 $g_{m,max}$ 还是 I_{dsat} 退火后都没有恢复到辐照前的初始值,有可能因退火时间较短不足以完全移除缺陷电荷或者辐照产生的新型缺陷难以通过退火去除。

3 试验分析与讨论

器件在 γ 射线辐照后饱和漏电流 I_{dsat} 增大、阈值电压 V_{th} 负漂、最大跨导 $g_{m,max}$ 增大,这与文献[12–13]针对耗尽型 AlGaIn/GaN HEMT 功率器件在总剂量辐照后性能发生严重退化的现象不同。图 8 给出了 P 型栅增强型 AlGaIn/GaN HEMT 器件的能带图和 GaN 系统中缺陷电性取决于费米能级的位置示意图。

从图 8(a) 来看,P-GaN 栅导致器件费米能级与导带相对位置发生改变,费米能级位于 GaN 电子势阱以下,实现增强型器件的特性^[17–18]。同时 GaN HEMT 器件具有氢相关的缺陷,P-GaN 栅费米能级较低,可自发产生正电性缺陷,如图 8(b) 中的 $[V_{Ga}H_4]^{1+}$,正电性缺陷会使 V_{th} 降低, I_{ds} 上升;而 AlGaIn 层中的缺陷通常俘获电子呈现电负性,如图 8(b) 中的 $[V_{Ga}H_2]^{-}$ 、 $[V_{Ga}H]^{2-}$ 、 $[V_{Ga}]^{3-}$,负电性缺陷会

导致 I_{ds} 下降,所以器件辐照后 V_{th} 降低, I_{ds} 上升的原因可能是 P-GaN 栅中累积了更多正电性缺陷^[19]。也有研究学者^[20]将辐照后器件 I_{ds} 上升归结于应变松弛所导致。跨导表示器件的栅控能力,辐照后最大跨导 $g_{m,max}$ 增加,而跨导的改变与载流子迁移率 μ 紧密相关,二维电子气 (Two Dimensional Electron Gas, 2DEG) 沟道中载流子迁移率 μ 计算如式(1)所示^[21]:

$$\frac{V_{DS}}{I_{DS}} = R_s + R_D + \frac{Lt}{W\mu\epsilon(V_{GS} - V_{TH})} \quad (1)$$

式中: V_{DS} 和 I_{DS} 分别为漏源极电压和电流; R_s 和 R_D 分别为源极和漏极接入电阻; ϵ 为 AlGaIn 介电常数; t 为势垒层厚度; W 和 L 分别为栅极宽度和长度。从式(1)中可以看出,器件饱和区跨导主要是受载流子迁移率 μ 的影响,由于低剂量的 γ 射线辐照会使 2DEG 沟道附近散射中心(界面态电荷、电离缺陷)减少,提高了载流子迁移率^[22]。2DEG 沟道载流子浓度增加或迁移率提高还会引起串联电阻的降低,进而饱和漏电流也会发生变化,总体而言,低剂量 γ 射线辐照对增强型 AlGaIn/GaN HEMT 器件性能会起到了一定的改善作用。

ON-state 偏置是本次辐照最恶劣的偏置条件,有研究表明^[23],在 AlGaIn/GaN HEMT 器处于导通状态下,且栅漏极之间的电场较高时,则器件中热电子应力就成为主导,当器件导电沟道中热电子的能量超过异质结的导带断续 ΔE_c ,这些电子将跃迁出 2DEG 沟道被陷阱俘获形成界面态,进而影响 2DEG 浓度,导致器件性能退化加剧。此外,由于栅极电场的存在,会降低辐照引发的电子-空穴对的初始复合率,增加了逃脱初始复合的空穴的数量,缺陷密度会大大增加^[24–25]。AlGaIn/GaN HEMT 器件加电应力前后的电荷分布示意图如图 9 所示。

将 ON-state 偏置辐照后的器件分别进行室温和 100 °C 下退火 7 d,从退火试验结果来看,退火温度越高,退火时间越长,器件性能恢复就越快,主要是

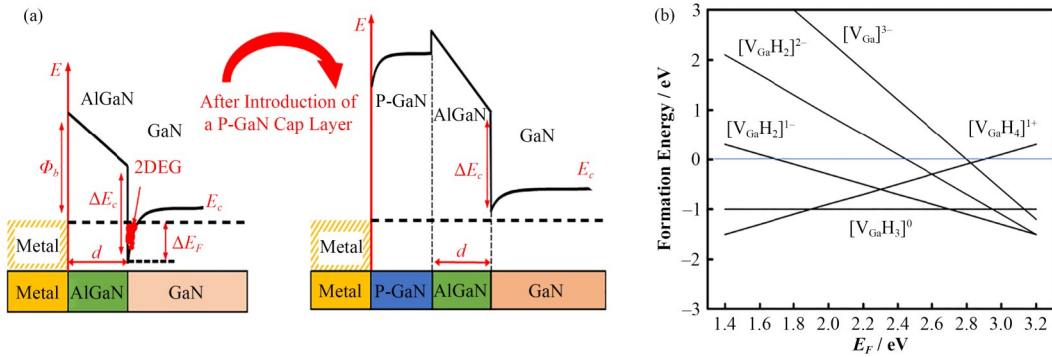


图 8 (a) P 型栅增强型 AlGaIn/GaN HEMT 器件的能带图和 (b) GaN 系统中缺陷电性取决于费米能级的位置示意图^[18]
Fig.8 (a) Energy band diagram of P-gate enhanced AlGaIn/GaN HEMT devices and (b) the electrical properties of defects in GaN systems depend on the location diagram of Fermi levels^[18]

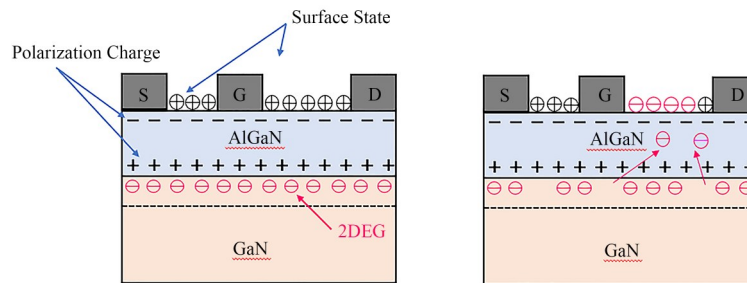


图9 AlGaIn/GaN HEMT 器件加电应力前后的电荷分布图^[24] (a) 电应力前, (b) 电应力后
Fig.9 Charge distribution diagram of AlGaIn/GaN HEMT device before and after electrical stress^[24]
(a) Before electrical stress, (b) After electrical stress

因为高温环境会使器件发生隧穿退火或热激发退火,降低了辐照缺陷浓度,但无论是在室温还是100 °C下退火,器件电学特性都难以恢复到辐照前的初始状态,可能与退火时间较短或者辐照产生的界面态陷阱电荷难以通过退火去除有关。

4 结语

针对增强型 AlGaIn/GaN HEMT 器件开展不同偏置条件下的⁶⁰Co γ 射线总剂量辐照试验及不同温度下的退火试验,充分模拟器件各种实际工作条件,探究器件总剂量效应失效特征与损伤机理。

试验结果表明,随着 γ 射线辐照剂量的增加,不同偏置条件会导致器件电学特性发生不同程度的变化,GND-state 偏置辐照后器件电学特性最为稳定,OFF-state 偏置次之,ON-state 偏置辐照后器件电学参数退化最为明显。但无论在何种偏置条件下,器件在 γ 射线辐照后均出现饱和漏电流 I_{dsat} 增大、阈值电压 V_{th} 负漂、最大跨导 $g_{\text{m,max}}$ 增大、导通电阻 R_{on} 减小的现象,AlGaIn层产生的负电荷和P-GaN栅层的正电荷是其电学性能退化主要原因,退化程度取决于二者谁占主导作用。由于器件处于导通状态下,会使沟道中热电子跃迁出2DEG沟道被陷阱俘获形成界面态,进而影响2DEG浓度,加剧了总剂量辐照对器件性能的影响,与此同时,栅极电场的存在会降低辐照引发的电子-空穴对的初始复合率,增加了逃脱初始复合的空穴的数量,导致陷阱电荷的浓度增加,所以加电偏置辐照后器件的退化程度更大^[24]。此外,总剂量效应引起的器件辐照损伤受外界环境的影响非常明显,存在着与退火温度和退火时间等因素相关的退火特性,退火试验结果发现,在同一辐照剂量下,随着退火温度升高,退火时间增长,引起的器件退化程度随之减小,这是因为高温使器件发生了隧穿退火或热激发退火,降低辐照产生的缺陷浓度,器件的电学性能得以部分恢复。

作者贡献声明 邱一武负责试验、测试以及辐射机理分析的主要工作,提出编写思路并负责论文起草

的主要工作;郭风岐负责数据整理和辐射机理分析工作;殷亚楠负责辐射机理分析工作;张平威负责辐照试验的主要工作;周昕杰负责审核、把关论文的科学性、严谨性。

参考文献

- 1 Luo B, Johnson J W, Ren F, *et al.* Influence of ⁶⁰Co γ -rays on dc performance of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. Applied Physics Letters, 2002, **80**(4): 604 - 606. DOI: 10.1063/1.1445809.
- 2 Umana-Membreno G A, Dell J M, Parish G, *et al.* Effect of ⁶⁰Co gamma-irradiation on two-dimensional electron gas transport and device characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs[J]. Physica Status Solidi, 2010, **2**(7): 2581 - 2584. DOI: 10.1002/pssc.200461519.
- 3 Yadav A, Flitsiyan E, Chernyak L, *et al.* Low and moderate dose gamma-irradiation and annealing impact on electronic and electrical properties of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. Radiation Effects and Defects in Solids, 2015, **170**(5): 377 - 385. DOI: 10.1080/10420150.2015.1010170.
- 4 Lidow A, Nakata A, Rearwin M, *et al.* Single-event and radiation effect on enhancement mode gallium nitride FETs[C]//2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW). July 14-18, 2014, Paris, France. IEEE, 2015: 1 - 7. DOI: 10.1109/REDW.2014.7004594.
- 5 Islam Z, Paoletta A L, Monterrosa A M, *et al.* Heavy ion irradiation effects on GaN/AlGaIn high electron mobility transistor failure at off-state[J]. Microelectronics Reliability, 2019, **102**: 113493. DOI: 10.1016/j.microrel.2019.113493.
- 6 张得玺, 陈伟, 罗尹虹, 等. P型栅增强型 GaN 功率开关器件的中子辐照效应[J]. 现代应用物理, 2018, **9**(3): 53 - 58. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2018.030602.
ZHANG Dexi, CHEN Wei, LUO Yinhong, *et al.* Neutron radiation effects of P-gate normally-off GaN power

- switching transistor[J]. *Modern Applied Physics*, 2018, **9**(3): 53 - 58. DOI: [10.12061/j.issn.2095-6223.2018.030602](https://doi.org/10.12061/j.issn.2095-6223.2018.030602).
- 7 常思远, 杨生胜, 文轩, 等. 非易失性阻变存储器总剂量效应试验研究[J]. *核技术*, 2020, **43**(12): 120502. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.120502](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.120502).
- CHANG Siyuan, YANG Shengsheng, WEN Xuan, *et al.* Experimental study on the total ionizing dose effects of nonvolatile RRAM[J]. *Nuclear Techniques*, 2020, **43**(12): 120502. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.120502](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.120502).
- 8 Kim B J, Ahn S, Ren F, *et al.* Effects of proton irradiation and thermal annealing on off-state step-stressed AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2016, **34**(4): 041231. DOI: [10.1116/1.4959028](https://doi.org/10.1116/1.4959028).
- 9 吴素贞, 徐政, 徐海铭, 等. MIS型 GaN HEMT 器件的 X-ray 辐射总剂量效应研究[J]. *电子与封装*, 2020, **20**(12): 5. DOI: [10.16257/j.cnki.1681-1070.2020.1211](https://doi.org/10.16257/j.cnki.1681-1070.2020.1211).
- WU Suzhen, XU Zheng, XU Haiming, *et al.* Study of X-ray total-ionizing-dose effect in MIS type GaN HEMT device[J]. *Electronics and Packaging*, 2020, **20**(12): 5. DOI: [10.16257/j.cnki.1681-1070.2020.1211](https://doi.org/10.16257/j.cnki.1681-1070.2020.1211).
- 10 刘默寒, 陆妩, 马武英, 等. 偏置条件对 NPN 型锗硅异质结双极晶体管电离辐射效应的影响[J]. *核技术*, 2015, **38**(6): 060202. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.060202](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.060202).
- LIU Mohan, LU Wu, MA Wuying, *et al.* Bias effects on total ionizing dose radiation response of NPN silicon-germanium hetero-junction bipolar transistors[J]. *Nuclear Techniques*, 2015, **38**(6): 060202. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.060202](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.060202).
- 11 陈法国, 于伟跃, 梁润成, 等. 可扩展式微处理器总剂量效应在线测试系统研制[J]. *核技术*, 2022, **45**(11): 110404. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110404](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110404).
- CHEN Faguo, YU Weiyue, LIANG Runcheng, *et al.* Development of extendable on-line test system for total ionizing dose effect of microprocessor[J]. *Nuclear Techniques*, 2022, **45**(11): 110404. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110404](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110404).
- 12 Wang Y P, Luo Y H, Wang W, *et al.* ^{60}Co gamma radiation effect on AlGaIn/AlN/GaN HEMT devices[J]. *Chinese Physics C*, 2013, **37**(5): 056201. DOI: [10.1088/1674-1137/37/5/056201](https://doi.org/10.1088/1674-1137/37/5/056201).
- 13 Zheng X, Feng S W, Peng C, *et al.* Evidence of GaN HEMT Schottky gate degradation after gamma irradiation [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, **66**(9): 3784 - 3788. DOI: [10.1109/TED.2019.2928560](https://doi.org/10.1109/TED.2019.2928560).
- 14 GJB 5422—2005: 军用电子元器件 γ 射线累积剂量效应测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- GJB 5422—2005: Testing method of military electronic devices for γ -ray total dose radiation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- 15 Quan S, Hao Y E, Ma X H, *et al.* Influence of ^{60}Co gamma radiation on fluorine plasma treated enhancement-mode high-electron-mobility transistor[J]. *Chinese Physics B*, 2011, **20**(5): 058501. DOI: [10.1088/1674-1056/20/5/058501](https://doi.org/10.1088/1674-1056/20/5/058501).
- 16 Lee J, Yadav A, Antia M, *et al.* Low dose ^{60}Co gamma-irradiation effects on electronic carrier transport and DC characteristics of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors[J]. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 2017, **172**(3 - 4): 250 - 256. DOI: [10.1080/10420150.2017.1300903](https://doi.org/10.1080/10420150.2017.1300903).
- 17 Uemoto Y, Hikita M, Ueno H, *et al.* A normally-off AlGaIn/GaN transistor with $R_{onA}=2.6\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ and $BV_{ds}=640\text{ V}$ using conductivity modulation[C]//2006 International Electron Devices Meeting. December 11-13, 2006, San Francisco, CA, USA. IEEE, 2007: 1 - 4. DOI: [10.1109/IEDM.2006.346930](https://doi.org/10.1109/IEDM.2006.346930).
- 18 穆昌根, 党睿, 袁鹏, 等. 增强型 GaN HEMT 器件的实现方法与研究进展[J]. *电子与封装*, 2022, **22**(10): 70 - 79. DOI: [10.16257/j.cnki.1681-1070.2022.1003](https://doi.org/10.16257/j.cnki.1681-1070.2022.1003).
- MU Changgen, DANG Rui, YUAN Peng, *et al.* Implementation methods and research progress of enhanced GaN HEMT devices[J]. *Electronics and Packaging*, 2022, **22**(10): 70 - 79. DOI: [10.16257/j.cnki.1681-1070.2022.1003](https://doi.org/10.16257/j.cnki.1681-1070.2022.1003).
- 19 Puzyrev Y S, Tuttle B R, Schrimpf R D, *et al.* Theory of hot-carrier-induced phenomena in GaN high-electron-mobility transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(5): 053505. DOI: [10.1063/1.3293008](https://doi.org/10.1063/1.3293008).
- 20 Vitusevich S A, Klein N, Belyaev A E, *et al.* Effects of γ -irradiation on AlGaIn/GaN-based HEMTs[J]. *Physica Status Solidi A*, 2003, **195**(1): 101 - 105. DOI: [10.1002/pssa.200306264](https://doi.org/10.1002/pssa.200306264).
- 21 Khanal M P, Ozden B, Kim K, *et al.* Electrical and optical characteristics of gamma-ray irradiated AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2017, **35**(3): 03D107. DOI: [10.1116/1.4979976](https://doi.org/10.1116/1.4979976).
- 22 熊妮. Si 基 GaN 功率器件辐照失效机理与可靠性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020. DOI: [10.27005/d.cnki](https://doi.org/10.27005/d.cnki).

[gdzku.2020.003571](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2020.003571).

XIONG Wei. Study on irradiation failure mechanism and reliability of Si-based GaN power devices[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. DOI: [10.27005/d.cnki.gdzku.2020.003571](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2020.003571).

- 23 Koley G, Kim H, Eastman L F, *et al*. Electrical bias stress related degradation of AlGaN / GaN HEMTs[J]. Electronics Letters, 2003, **39**(16): 1217 - 1218. DOI: [10.1049/el:20030773](https://doi.org/10.1049/el:20030773).
- 24 Saito W, Kuraguchi M, Takada Y, *et al*. Influence of surface defect charge at AlGaIn-GaN-HEMT upon Schottky gate leakage current and breakdown voltage[J].

IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, **52**(2): 159 - 164. DOI: [10.1109/TED.2004.842710](https://doi.org/10.1109/TED.2004.842710).

- 25 董世剑, 郭红霞, 马武英, 等. AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管器件电离辐照损伤机理及偏置相关性研究[J]. 物理学报, 2020, **69**(7): 294 - 302. DOI: [10.7498/aps.69.20191557](https://doi.org/10.7498/aps.69.20191557).

DONG Shijian, GUO Hongxia, MA Wuying, *et al*. Ionizing radiation damage mechanism and biases correlation of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor devices[J]. Acta Physica Sinica, 2020, **69**(7): 294 - 302. DOI: [10.7498/aps.69.20191557](https://doi.org/10.7498/aps.69.20191557).