

GaN 高电子迁移率晶体管器件单粒子烧毁 “台阶”电流机制*

王籽或¹⁾²⁾ 梁亚楠¹⁾ 陈睿^{1)2)†} 韩建伟¹⁾²⁾ 俞海龙¹⁾²⁾

1) (中国科学院国家空间科学中心, 太阳活动与空间天气全国重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

(2026 年 1 月 23 日收到; 2026 年 3 月 26 日收到修改稿)

针对两款商用增强型氮化镓高电子迁移率晶体管, 利用飞秒脉冲激光开展了单粒子烧毁 (single event burnout, SEB) 效应实验研究, 发现两款器件在 SEB 触发过程中的电流特征存在显著差异: INN650D150A 在激光入射后电流瞬间跃升并直接进入大电流烧毁状态, 而 EPC2034C 在最终烧毁前出现明显的“台阶”电流现象. 基于器件电特性参数分析发现, 两款器件的栅源和漏源电容存在较大差异, 进而提出寄生电容可能是导致器件 SEB“台阶”电流的关键因素. 最后基于单粒子效应精细实验和 TCAD 仿真手段, 阐明了 SEB“台阶”电流的触发机理. 当器件漏极和栅极同时施加外接电容 (680 pF 与 1 nF) 时, SEB“台阶”电流现象被触发. 这是由于诱发单粒子效应时会引起电流瞬时跃升, 而电容的快速充电限制了电流的瞬态上升过程, 并在未再次诱发阶段保持电流不变, 形成“台阶”电流. 此外, 寄生电容的增大使得漏极附近电子浓度升高, 电子陷阱俘获增强, 促进漏极附近负电荷积累, 导致漏极局部电场增强, SEB 阈值电压降低.

关键词: GaN 高电子迁移率晶体管, 单粒子烧毁效应, “台阶”电流, 寄生电容, 单粒子烧毁阈值电压

DOI: 10.7498/aps.75.20260122

CSTR: 32037.14.aps.75.20260122

1 引言

氮化镓高电子迁移率晶体管 (GaN HEMT) 凭借高击穿场强、高开关频率和低导通损耗等性能, 在高功率电子器件中展现出显著优势, 近年来已被广泛关注并将逐步应用于航天器电源系统中^[1]. 空间环境中的高能粒子可能引发 GaN HEMT 器件的单粒子烧毁 (single event burnout, SEB) 效应, 造成器件的永久损坏, 严重制约了其在空间领域的应用^[2-4]. 因此, 为保障 GaN HEMT 器件在空间电源系统中的可靠应用, 有必要对其 SEB 效应进行深入研究.

目前, 针对 GaN HEMT 器件 SEB 效应已开

展了广泛的研究, 涵盖了器件 SEB 效应的影响因素及机制等多个方面, 但研究中 SEB 电流响应主要表现为“直接烧毁”特征, 即粒子入射后电流迅速跃升并直接进入大电流 SEB 状态^[5-10]. 而 Wang 等^[11] 观察的 SEB 电流是不同于“直接烧毁”电流的“台阶”电流特征, 且造成这种“台阶”电流的机制目前尚不明确. 由于器件 SEB 电流响应特性与抗单粒子加固设计密切相关, 研究不同 SEB 效应特征的产生机制, 对器件 SEB 效应的理解和加固设计具有重要意义.

本研究利用飞秒脉冲激光实验装置, 对两款增强型 GaN HEMT 进行 SEB 实验, 观察到了“直接烧毁”电流和“台阶”电流的不同 SEB 电流响应特征. 对比两款器件的电学参数, 两款器件寄生电容

* 国家重点研发计划 (批准号: 2023YFB3611901) 和国家自然科学基金 (批准号: 12305319) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenrui2010@nssc.ac.cn

有明显差异, 据此提出寄生电容可能是影响 SEB 电流特征的关键因素的假设, 并通过单粒子效应精细实验和 TCAD 仿真手段, 阐明了 GaN HEMT 器件 SEB“台阶”电流的触发机理, 为器件抗辐射设计提供了新的设计思路.

2 实验设计

本研究选取两款商用增强型 GaN HEMT 器件, 分别为 Innoscience 公司生产的 INN650D150A (记为器件 a) 与 EPC 公司生产的 EPC2034C (记为器件 b). 其中, 器件 a 最大漏极电压 $V_{DS, \max}$ 为 650 V, 器件 b 为 200 V. SEB 实验在中国科学院国家空间科学中心单粒子效应飞秒脉冲激光实验装置 (femto-second pulse laser single event effects facility, FPLSEE) 上进行, 实验平台如图 1 所示. 脉冲激光单粒子效应实验方法已被广泛应用于 GaN HEMT 器件的 SEB 效应研究中 [12-16]. 在本实验中, 激光脉冲宽度为 35 fs, 波长为 630 nm, 聚焦后光斑直径为 2 μm , 脉冲重复频率 5 kHz, 激光能量设定为 9 nJ. 在激光辐照前对两款器件进行去封装处理, 以确保激光可直接照射至芯片表面. 载物台移动速度固定为 5000 $\mu\text{m}/\text{s}$, 并进行全芯片扫描, 扫描方式分别如图 2(a), (b) 所示. 由于器件 b 有源区位于电极引脚一侧, 为确保激光能够有效入射至目标区域, 在 PCB 设计中针对相应位置预留了矩形辐照窗口. 图 2(b) 展示了器件 b 背面的辐照窗口示意图, 其中红色矩形区域标记了 PCB 上预留的辐照窗口及激光扫描路径.

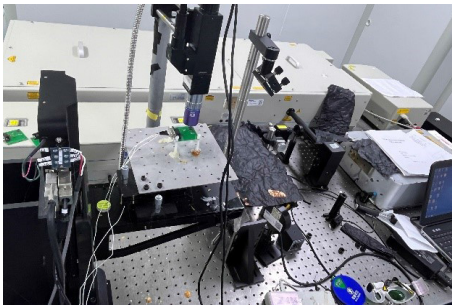


图 1 飞秒脉冲激光单粒子效应实验装置
Fig. 1. Femtosecond pulsed laser SEE test setup.

实验过程中, 器件处于关断偏置状态 ($V_S = 0 \text{ V}$, $V_G = 0 \text{ V}$), 具体实验电路如图 3 所示. 漏极通过限流电阻 (100 k Ω) 连接高压电源, 器件 a 的

V_{DS} 自 100 V 开始, 器件 b 的 V_{DS} 自 50 V 开始, 两款器件均以 50 V 步长逐步增大直至器件可承受的最大漏极电压. 所有测试均在室温下进行, 漏极电流由 Keysight 34461 A 数字万用表实时监测并记录, 电源限流设置为 1 mA.

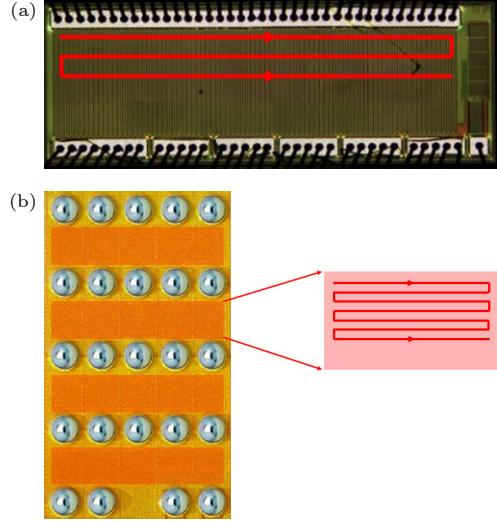


图 2 不同器件的激光辐照示意图 (a) 器件 a 正面图, 并标注了实验中激光扫描路径; (b) 器件 b 背面图, 红色矩形区域标注了 PCB 上预留的辐照窗口, 并标注出激光扫描路径
Fig. 2. Laser irradiation setup for the two devices: (a) Front-side view of device a, where the laser scanning path used in the experiment is indicated; (b) back-side view of device b, where the red rectangles indicate the irradiation windows opened on the PCB and the laser scanning path.

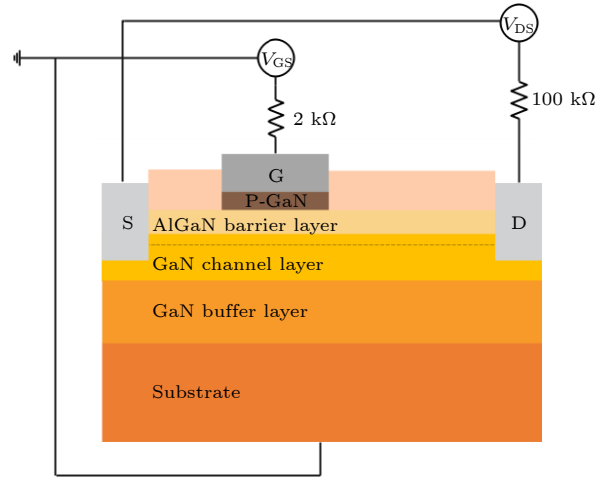


图 3 实验电路设置示意图
Fig. 3. Schematic diagram of the experimental circuit setup.

3 实验结果

在相同激光辐照 (9 nJ) 条件下, 两款 GaN HEMT 器件在 SEB 过程中的瞬态电流响应表现

出显著差异, 结果分别如图 4 和图 5 所示. 器件 a 在 $V_{DS} = 400\text{ V}$ 时发生烧毁, 其漏极电流在激光入射约 43 s 后迅速跃升至 1 mA, 并维持高电流水平, 表明器件内部发生不可逆损伤, 表现为典型的“直接烧毁”特征. 相比之下, 器件 b 的 SEB 电流响应明显不同. 在 $V_{DS} = 150\text{ V}$ 下, 器件 b 发生 SEB 效应, 其瞬态电流波形呈现出明显的“台阶”电流特征. 具体而言, 在激光入射后, 漏极电流首先快速跃升至 $39.4\text{ }\mu\text{A}$ 的稳定平台阶段, 持续约 6 s; 随后, 电流急剧上升至峰值 0.5 mA , 并最终维持在高电流水平. 并且这一响应特征在随后的多次重复实验中均可稳定复现.

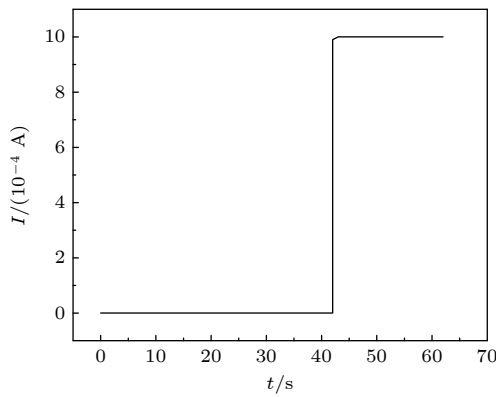


图 4 器件 a 的 SEB 触发电流响应

Fig. 4. Evolution of the SEB-triggered drain current of device a as a function of time.

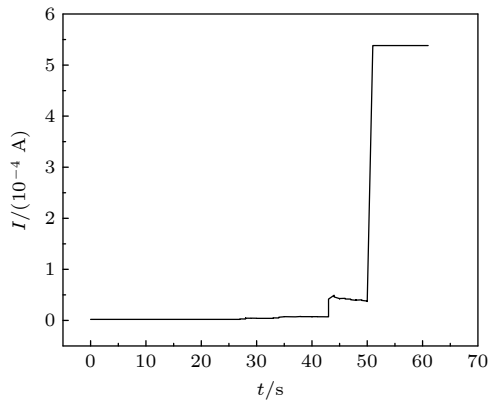


图 5 器件 b 的 SEB 触发电流响应

Fig. 5. Evolution of the SEB-triggered drain current of device b as a function of time.

两款器件在 SEB 发生前后测得的漏极电流 (I_D) 和栅极电流 (I_G) 的变化曲线如图 6 所示. 从图 6 可以观察到, SEB 效应导致器件漏端和栅端区域均出现漏电, 使器件发生不可逆的损伤.

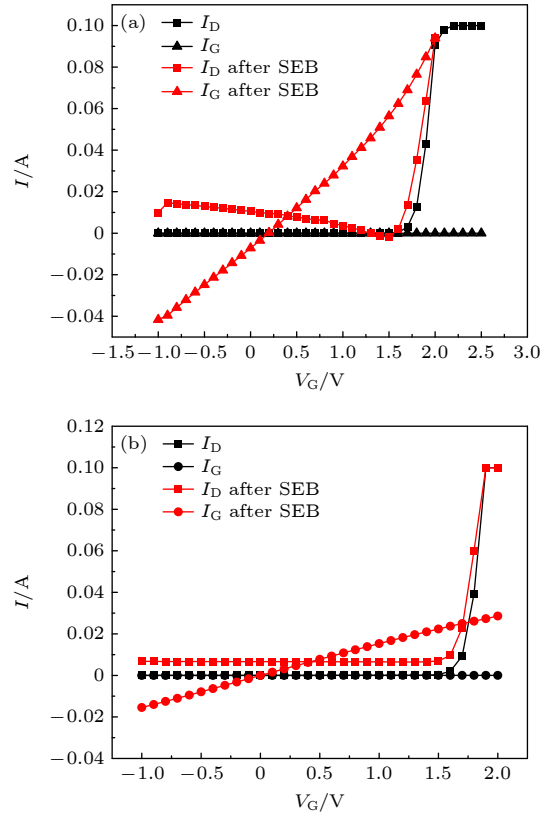


图 6 激光能量为 9 nJ 的脉冲激光辐照下 (a) 器件 a 和 (b) 器件 b 在发生 SEB 前 (黑色曲线) 和发生 SEB 后 (红色曲线) 的漏极电流和栅极电流随栅压的变化关系

Fig. 6. Drain and gate current characteristics of (a) device a and (b) device b as a function of gate voltage before SEB (black curves) and after SEB (red curves) under pulsed laser irradiation with an energy of 9 nJ .

4 讨论

为研究“台阶”电流响应特征产生的原因, 对实验中两款 GaN HEMT 器件的电学特性进行对比分析. 两款器件的转移特性曲线如图 7 所示, 基于曲线斜率提取的跨导 g_m 分别为 0.40 mS (器件 a) 和 0.45 mS (器件 b). 图 8 为两款器件的 $C-V$ 特性曲线, 该测试采用 Keysight B1500 A 半导体参数分析仪在 1 MHz 测试频率下进行准静态 $C-V$ 测量. 测试过程中, 漏极与源极短接, 栅极电压 V_{GS} 在 $-1.5\text{—}5\text{ V}$ 范围内扫描. 器件 a 的 C_{GS} 为 45.1 pF , 而器件 b 的 C_{GS} 达 1279 pF . 根据器件数据手册, 器件 a 的 C_{DS} 为 29.5 pF , 器件 b 的 C_{DS} 为 638 pF . 上述对比结果如表 1 所示, 可以看出两款器件的寄生电容参数具有显著差异: 器件 b 的 C_{GS} 和 C_{DS} 均明显高于器件 a. 在 Si 器件中, 已有研究表明寄生电容会对 SEB 响应产生影响 [17–19].

由此提出寄生电容差异可能是导致 SEB 电流特征不同的关键。

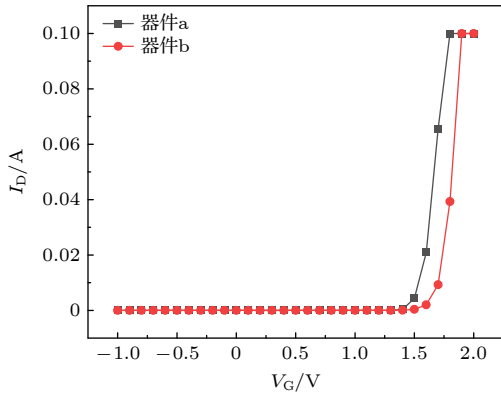


图 7 两款 GaN HEMT 器件转移特性曲线对比
Fig. 7. Comparison of transfer characteristics of the two GaN HEMT devices.

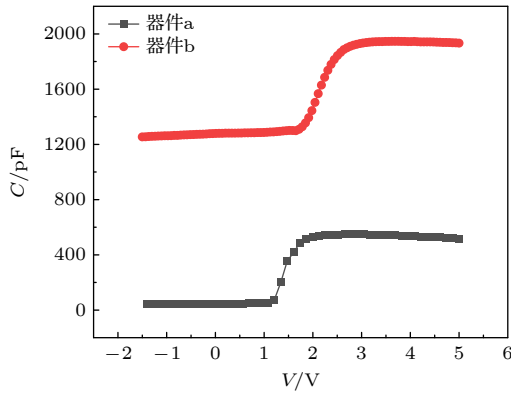


图 8 两款 GaN HEMT 器件 $C-V$ 曲线对比
Fig. 8. Comparison of $C-V$ curves of the two GaN HEMT devices.

表 1 两款 GaN HEMT 器件主要电学参数对比
Table 1. Comparison of the main electrical parameters of the two GaN HEMT devices.

器件参数	器件a	器件b
型号	INN650D150A	EPC2034C
C_{DS}/pF	29.5	638
C_{GS}/pF	45.1	1279
g_m/mS	0.40	0.45

鉴于两款器件在结构和电性能方面存在差异,为进一步验证寄生电容差异可能是导致 SEB 电流特征不同的影响因素,本研究针对同一器件(器件 a)设计了 6 组在漏极或栅极分别外接不同电容条件下的对比实验,电路设置如图 9 所示.具体激光辐照条件、外接电容参数以及对应的 SEB 电流特征总结于表 2.实验结果如图 10(a)所示,在漏极或

栅极单独外接电容时,无论电容大小,器件的 SEB 电流仍呈现典型的“直接烧毁”特征,未出现“台阶”电流特征;当漏极和栅极同时外接较小电容时,器件 SEB 电流也不会出现“台阶”特征.如图 10(b)所示,当漏极与栅极分别外接 $C_{DS,ext} = 680 \text{ pF}$ 和 $C_{GS,ext} = 1 \text{ nF}$ 的寄生电容时,器件 SEB 电流特征发生显著变化.在 200 V 偏置电压下,在加入外加电容的条件下,激光入射后漏极电流首先进入一个较稳定的“台阶”阶段,其平台电流约为 $6.5 \mu\text{A}$,持续时间约 100 s,随后电流快速上升并发生 SEB 效应,其特征表现出了“台阶”电流特征.而在未外加电容的条件下,器件 a 在相同偏置条件下并未触发 SEB 效应.上述结果表明,当漏极与栅极同时外加足够大的电容时,器件单粒子烧毁特征可从瞬态

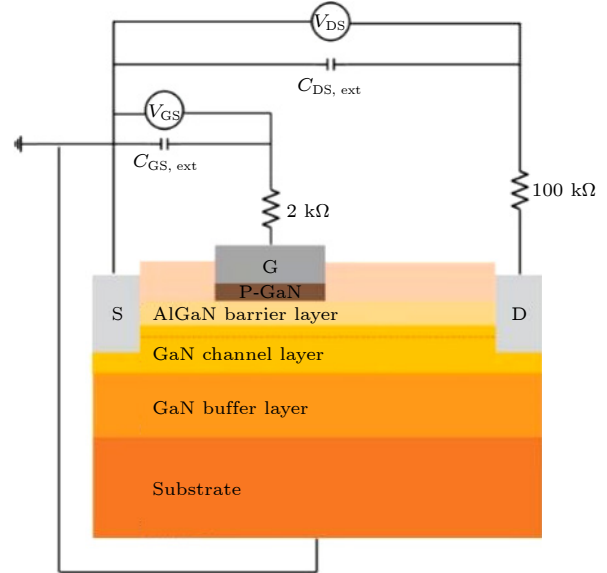


图 9 带外接等效寄生电容的实验电路设置示意图
Fig. 9. Schematic diagram of the experimental circuit setup with external equivalent parasitic capacitances.

表 2 外接电容对 GaN HEMT 器件 SEB 电流响应的的影响

Table 2. Effects of external capacitance on the SEB current response of GaN HEMT devices.

实验编号	激光能量	外接漏极电容 $C_{DS,ext}/\text{pF}$	外接栅极电容 $C_{GS,ext}/\text{pF}$	SEB 电流响应特征
1	9 nJ	470	—	瞬间烧毁电流
2		680	—	瞬间烧毁电流
3		—	300	瞬间烧毁电流
4		—	1000	瞬间烧毁电流
5		470	300	瞬间烧毁电流
6		680	1000	明显“台阶”电流

烧毁模式转变为“台阶”电流烧毁模式, 寄生电容是导致 SEB 电流特征不同的关键因素. 此外, 相比未外接电容的情况, 外接大容量电容的器件在更低的漏极偏置下即可触发 SEB 效应, 表现出 SEB 阈值电压的下降现象.

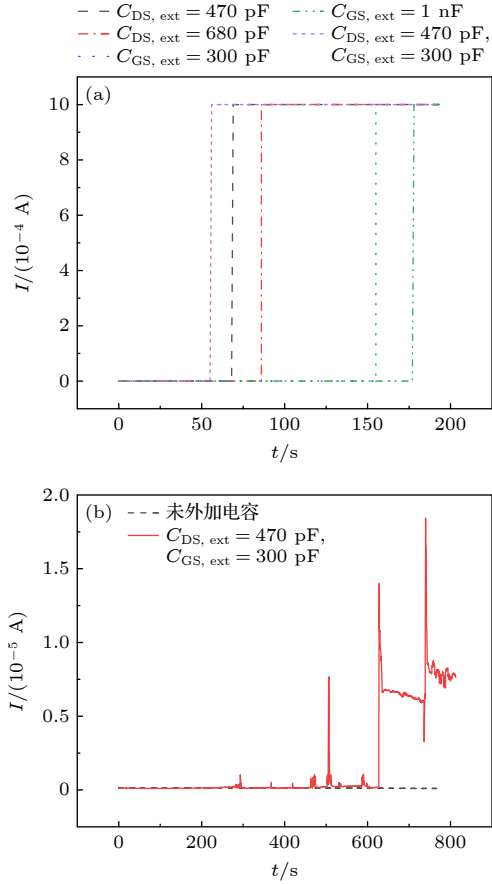


图 10 器件 a 在不同外寄生电容条件下的 SEB 电流特征 (a) 在不同外接寄生电容参数下直接烧毁电流特征; (b) 在无外接寄生电容与同时外接漏极/栅极寄生电容条件下的电流响应对比

Fig. 10. SEB current characteristics of device a under different external parasitic capacitance conditions: (a) Direct-burnout current characteristics under various external parasitic capacitance conditions; (b) comparison of SEB current responses without external parasitic capacitances and with simultaneous drain- and gate-side parasitic capacitances.

单粒子效应触发时, 漏极电流出现瞬时跃升. 已有研究表明, 该电流瞬时跃升特征是由于单粒子效应触发过程中器件漏极与栅极节点电压均出现的瞬态变化引起的^[20]. 当漏极与栅极均外接足够大的电容时, 器件漏极与栅极等效电容在百微秒量级时间内被快速充电. 根据电容的电荷-电压关系 ($dV = dQ/C$), 在相同的瞬态注入电荷条件下, 等效电容的增大导致漏极与栅极节点电压的瞬态变

化被抑制, 从而限制漏极电流的增长. 随后, 在未再次触发单粒子效应的过程中, 漏极电流不再发生明显变化, 从而形成观察到的电流平台特征. 随着单粒子效应再次被触发, 漏极电流再次骤升, 最终导致器件发生烧毁.

当仅在漏极或栅极外接电容时, 由于另一端节点缺乏足够的电荷存储能力, 器件节点电压仍会发生较大的瞬态变化, 因此漏极电流仍表现为“直接烧毁”特征. 综上所述, SEB 电流表现出的“台阶”特征是源于单粒子效应触发过程中引起漏极电流瞬时跃升, 而漏极与栅极等效电容的快速充电过程抑制了漏极与栅极节点电压的瞬态变化, 从而限制了瞬态电流的上升; 随后, 在未再次触发单粒子效应的过程中, 漏极电流保持不变, 从而形成“台阶”电流特征.

为进一步揭示寄生电容对 GaN HEMT 器件 SEB 过程的微观影响机制, 本文基于 p 型栅 GaN HEMT 器件的基础模型 (C-HEMT) 构建了两种等效寄生电容增强结构 (CE1/CE2-HEMT), 通过减薄 Si_3N_4 钝化层来增大 C_{GS} 与 C_{DS} . C-HEMT 模型的具体结构如下: Si_3N_4 钝化层厚度为 0.2 μm ; p-GaN 层厚度为 70 nm, 掺杂浓度为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; AlGaIn 势垒层厚度为 15 nm; GaN 沟道层厚度为 600 nm, 掺杂浓度为 $6.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; GaN buffer 层厚度为 1 μm , 掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; 源极和漏极长度均为 3 μm , 栅长为 2 μm , 栅源间距为 1.5 μm , 栅漏间距为 10 μm . 仿真过程中采用多种常规物理模型, 包括费米-狄拉克统计模型、载流子复合模型、迁移率模型、碰撞电离模型等; 同时引入重离子入射模型, 以模拟高能粒子入射条件下的单粒子效应过程. 其中, CE1-HEMT 结构在 C-HEMT 的基础上对 Si_3N_4 钝化层厚度减小 10 nm; CE2-HEMT 结构在 C-HEMT 的基础上对 Si_3N_4 钝化层厚度减小 15 nm. 3 种结构 GaN HEMT 模型的基本电学特性列于表 3, 其中 BV 表示击穿电压, 器件整体仍保持在合理范围内.

表 3 3 种结构 GaN HEMT 的基本电学特性

Table 3. Basic electrical characteristics of three GaN HEMT structures.

参数	C-HEMT	CE1-HEMT	CE2-HEMT
V_{th}/V	1.6	1.6	1.6
BV/V	678	665	652

从 GaN HEMT 器件的 SEB 效应机理上来看, 重离子入射产生的电子在外加漏极偏置电场作用下向漏极快速漂移, 并在漏极边缘被深能级电子陷阱俘获, 从而诱发负电荷积累并增强漏极局部电场, 导致器件烧毁^[21]. 由上述机理分析可知, GaN HEMT 的 SEB 触发与漏极边缘局部高电场的建立密切相关, 因此本研究从器件关键区域的横向电场分布角度, 对不同结构器件的 SEB 阈值电压的变化进行分析. 图 11 给出了 3 种结构在 350 V 和 400 V 漏极偏置条件下 GaN 层中的横向电场分布. 相比于 C-HEMT 在 400 V 漏极偏置条件下触发 SEB 效应, CE1-HEMT 和 CE2-HEMT 在 350 V 偏置条件下即可触发 SEB 效应, 表现为 SEB 阈值电压的降低. 在漏极附近, 350 V 条件下的电场峰值由 C-HEMT 的 2.05 MV/cm 提升至 CE1-HEMT 的 5.22 MV/cm 与 CE2-HEMT 的 6.97 MV/cm. 上述结果表明, 寄生电容增强结构会提升漏极处电场峰值, 从而降低器件 SEB 触发阈值电压.

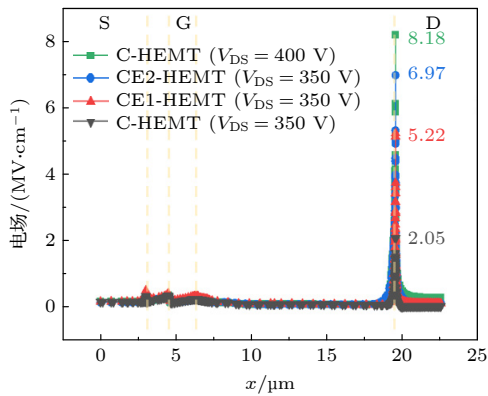


图 11 不同漏极偏置电压下, 3 种结构 GaN HEMT 器件 GaN 层内横向电场强度分布

Fig. 11. Lateral electric field distribution in the GaN layer of three GaN HEMT structures under different drain bias voltages.

进一步对 350 V 漏极偏置条件下重离子入射后 GaN HEMT 器件内部电子的演化过程进行分析, 其结果如图 12 所示. 在 $t = 1 \times 10^{-12}$ s 的重离子入射初始阶段 (图 12(a), (d), (g)), 可以观察到重离子入射在器件中产生大量电子-空穴对, 在外加电场作用下, 电子向漏极方向漂移. 其中, C-HEMT 中电子向漏极漂移速度更快. 随后电子在横向电场的作用下持续向漏极漂移, 当时间到 $t = 1 \times 10^{-10}$ s 时 (图 12(b), (e), (h)), 漏极处电子浓度明显增强. 至 $t = 3 \times 10^{-10}$ s 时刻 (图 12(c), (f), (i)),

大部分电子已被漏极收集, 但在 CE1-HEMT 和 CE2-HEMT 中, 漏极附近仍维持较高的电子浓度. 图 13 展示了 3 种结构在 $t = 3 \times 10^{-10}$ s 时刻, 漏极附近电子陷阱的占据率分布. 结果表明, CE1-HEMT

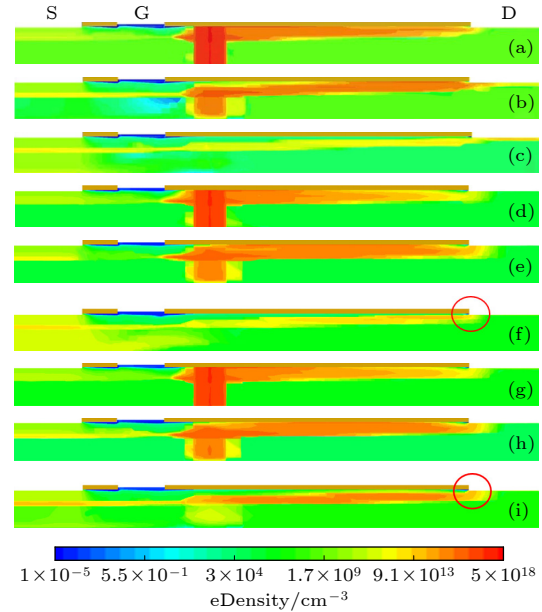


图 12 在 350 V 漏源偏置条件下, 重离子入射后 GaN HEMT 不同结构器件中电子浓度的分布 (a)–(c) 分别对应 C-HEMT 模型在 (a) 1×10^{-12} s, (b) 1×10^{-10} s, (c) 3×10^{-10} s 时刻的电子浓度分布; (d)–(f) CE1-HEMT 模型在相同时刻下的电子浓度分布; (g)–(i) CE2-HEMT 模型在相同时刻下的电子浓度分布

Fig. 12. Electron density distributions in GaN HEMT devices with different structures after heavy-ion irradiation under a drain-source bias of 350 V: (a)–(c) Electron density distributions of the C-HEMT model at 1×10^{-12} s, 1×10^{-10} s, and 3×10^{-10} s, respectively; (d)–(f) electron density distributions of the CE1-HEMT model at the same time; (g)–(i) electron density distributions of the CE2-HEMT model at the same time.

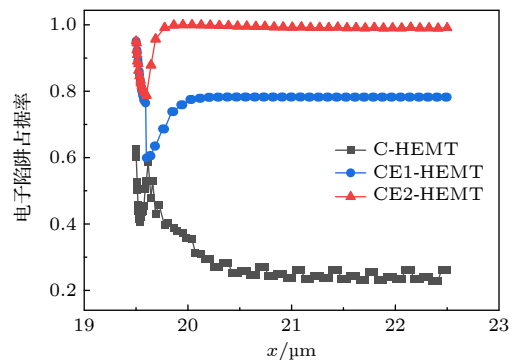


图 13 在 350 V 漏源偏置条件下, 3 种 GaN HEMT 结构在 3×10^{-10} s 时刻漏极附近的电子陷阱占据率分布

Fig. 13. Distribution of electron trap occupation near the drain of three GaN HEMT devices at 3×10^{-10} s under a drain-source bias of 350 V.

和 CE2-HEMT 在漏极附近具有更高的电子陷阱占据率. 结合上述分析, 寄生电容增大时, 漏极电子浓度更高, 更多电子被 GaN 层中的电子陷阱俘获. 该过程加剧了负电荷在漏极附近的积累, 进而增强漏极边缘的局部电场, 从而使器件在较低漏源偏置条件下触发 SEB 效应, 表现为 SEB 阈值电压的下降.

5 结 论

本研究利用脉冲激光单粒子效应实验装置, 对两款增强型 GaN HEMT 进行 SEB 实验: INN650 D150A 器件表现为直接烧毁电流特征, 而 EPC 2034C 器件则在失效前出现了明显的“台阶”电流特征. 通过对器件电特性参数对比分析, 提出寄生电容可能是影响 SEB 电流特征的关键因素. 通过对 INN650D150A 器件设计不同外接电容条件下的对比实验, 发现当漏极与栅极同时外加一定幅值的电容时, 器件 SEB 电流表现为“台阶”电流特征, 证明了寄生电容是影响 SEB 电流特征的关键因素. 分析认为, 单粒子效应触发过程中引起漏极电流瞬时跃升, 而电容的快速充电限制了电流的瞬态上升, 并在未再次触发阶段保持电流不变, 进而形成“台阶”电流. 此外, 实验发现漏极与栅极电容的升高会导致 SEB 阈值电压的降低. 通过 TCAD 仿真分析可知, 重离子入射产生的电子在电场作用下向漏极漂移, 寄生电容的增大导致漏极附近电子浓度升高, 增强电子陷阱俘获, 促进负电荷在漏极附近积累, 进而强化局部电场, 使器件在较低漏源偏置条件下触发 SEB 效应. 本文从实验与仿真两方面系统揭示了寄生电容对 GaN HEMT 器件 SEB 的影响, 为器件结构优化与抗辐照设计提供了新思路.

参考文献

[1] Huang S, Yang S, Tang Z K, Hua M Y, Wang X H, Wei K, Bao Q L, Liu X Y, Chen J 2016 *Sci. Sin.: Phys. Mech. Astron.* **46** 107307 (in Chinese) [黄森, 杨树, 唐智凯, 化梦媛,

王鑫华, 魏珂, 包琦龙, 刘新宇, 陈敬 2016 *中国科学: 物理学 力学 天文学* **46** 107307]
 [2] Martinez M J, King M P, Baca A G, Allerman A A, Armstrong A A, Klein B A, Douglas E A, Kaplar R J, Swanson S E 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 344
 [3] Onoda S, Hasuike A, Nabeshima Y, Sasaki H, Yajima K, Sato S I, Ohshima T 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 4446
 [4] Mizuta E, Kuboyama S, Nakada Y, Takeyama A, Ohshima T, Iwata Y, Suzuki K 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1956
 [5] Abbate C, Busatto G, Iannuzzo F, Mattiazzo S, Sanseverino A, Silvestrin L, Tedesco D, Velardi F 2015 *Microelectron. Reliab.* **55** 1496
 [6] Zhang H, Zheng X F, Lin D M, Lv L, Cao Y R, Hong Y H, Zhang F, Wang X H, Wang Y Z, Zhang W D, Zhang J F, Ma X H, Hao Y 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 082105
 [7] Cui Y X, Ma Y Q, Shangguan S P, Han J W 2022 *Photonics* **9** 270
 [8] Sun Y C, Wang Y, Li X J, Yang J Q, Cao F 2025 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **72** 3295
 [9] Wu Y H, Zhang J C, Zhao S L, Wu Z X, Wang Z X, Mei B, Duan C, Zhao D J, Zhang W H, Liu Z H, Hao Y 2022 *Sci. China Inf. Sci.* **65** 182404
 [10] Scheick L 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 2881
 [11] Wang L H, Jia Y P, Zhao Y F, Wang L, Deng Z H 2021 *Proceedings of the 4th International Conference on Radiation Effects of Electronic Devices (ICREED)* Xi'an, China, May 26–29, 2021 p1
 [12] Zhou F, Zou C, Zhou T Y, Xu W Z, Ren F F, Zhou D, Wang Y W, Chen D J, Xia Y Y, Wu L K, Li Y H, Zhu T G, Zheng Y D, Zhang R, Lu H 2024 *IEEE Electron Device Lett.* **45** 976
 [13] Khachatryan A, Roche N J H, Buchner S, Koehler A D, Anderson T J, Ferlet-Cavrois V, Muschitiello M, McMorro D, Weaver B, Hobart K D 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 2743
 [14] Shangguan S P, Ma Y Q, Han J W, Cui Y X, Wang Y H, Chen R, Liang Y N, Zhu X, Li Y 2021 *Microelectron. Reliab.* **125** 114364
 [15] Cui Y X, Ma Y Q, Shangguan S P, Kang X W, Liu P C, Han J W 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 136102 (in Chinese) [崔艺馨, 马英起, 上官士鹏, 康玄武, 刘鹏程, 韩建伟 2022 *物理学报* **71** 136102]
 [16] Ma Y Q, Cui Y X, Han J W, Shangguan S P, Wang Y H 2021 CN113466674A (in Chinese) [马英起, 崔艺馨, 韩建伟, 上官士鹏, 王英豪 2021 CN113466674A]
 [17] Liu J, Schrimpf R D, Massengill L, Galloway K F 1999 *Proceedings of the 5th European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems* Abbaye de Fontevraud, France, September 13–17, 1999
 [18] Titus J L 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 1912
 [19] Titus J L, Johnson G H, Schrimpf R D, Galloway K F 1991 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** 1315
 [20] Zerarka M, Austin P, Bensoussan A, Morancho F, Durier A 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 2242
 [21] Wang X H, Zheng X F, Lin D M, Zhang H, Cao Y R, Lv L, Wang Y Z, Hu P P, Liu J, Ma X H, Hao Y 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 173502

Mechanism of step current evolution in single event burnout of GaN high-electron-mobility transistors*

WANG Ziyu¹⁾²⁾ LIANG Yanan¹⁾ CHEN Rui^{1)2)†}

HAN Jianwei¹⁾²⁾ YU Hailong¹⁾²⁾

1) (National Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 23 January 2026; revised manuscript received 26 March 2026)

Abstract

Single event burnout (SEB) is a critical reliability concern for GaN high-electron-mobility transistors (GaN HEMTs) intended for space power applications. While SEB currents reported in the literature are typically characterized by an abrupt transition into a destructive high-current state (“direct burnout”), a step current evolution has also been sporadically observed but remains poorly understood. In this work, we investigate the physical origin of the step SEB current by combining femtosecond pulsed laser single event effect experiments, capacitance-controlled comparative tests, and TCAD simulations on two commercial enhancement-mode GaN HEMTs (INN650D150A and EPC2034C). Experiments were performed using a 35 fs, 630 nm laser at 5 kHz repetition rate and 9 nJ pulse energy, under off-state bias ($V_G = V_S = 0$ V) with drain bias stepped until failure. Distinct SEB signatures were reproducibly identified: INN650D150A exhibited a direct transition to the compliance-limited current at $V_{DS} = 400$ V, whereas EPC2034C showed a step current waveform at $V_{DS} = 150$ V, featuring an initial stable plateau followed by a rapid rise into the destructive regime. Electrical characterization revealed that EPC2034C possesses substantially larger intrinsic parasitic capacitances (C_{GS} and C_{DS}) than INN650D150A, motivating a capacitance-driven hypothesis for the step behavior. To verify this hypothesis, a set of external capacitance experiments was conducted on INN650D150A. The step SEB current was not observed when only the drain-side or gate-side capacitance was increased, nor when both sides were increased with insufficient capacitance. In contrast, a clear step response was triggered only when both drain and gate were simultaneously shunted by large capacitors ($C_{DS,ext} = 680$ pF and $C_{GS,ext} = 1$ nF), producing a stable plateau current (~ 6.5 μ A) before final burnout, and concurrently reducing the SEB threshold voltage. The analysis indicates that during the triggering of the single event effect, the drain current undergoes a transient increase, while the rapid charging of the capacitances at the drain and gate limits the further transient rise of the current. Subsequently, during the process in which no additional single event effect is triggered, the drain current remains nearly constant, thereby giving rise to the observed step current. Finally, TCAD simulations were employed to clarify how enhanced parasitic capacitance can also lower the SEB threshold voltage. Two capacitance-enhanced device variants (CE1-HEMT/CE2-HEMT) were constructed by reducing the thickness of the Si_3N_4 passivation layer relative to a baseline p-GaN gate structure. Electrons generated by heavy ion irradiation drift toward the drain under the applied electric field. The increase in parasitic capacitance leads to a higher electron concentration near the drain and enhances electron trapping, which promotes negative charge accumulation near the drain. Consequently, the local electric field is intensified, reducing the SEB threshold voltage. The experimental evidence and simulation results demonstrate that parasitic capacitance is a decisive factor governing both the shape of the SEB current (direct *vs.* step) and the SEB threshold voltage, providing practical guidance for radiation-hard design.

Keywords: GaN high-electron-mobility transistors, single event burnout, step current, parasitic capacitance, single event burnout threshold voltage

DOI: [10.7498/aps.75.20260122](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260122)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260122](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260122)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFB3611901) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12305319).

† Corresponding author. E-mail: chenrui2010@nssc.ac.cn

GaN高电子迁移率晶体管器件单粒子烧毁“台阶”电流机制

王籽或 梁亚楠 陈睿 韩建伟 俞海龙

Mechanism of step current evolution in single event burnout of GaN high-electron-mobility transistors

WANG Ziyu LIANG Yanan CHEN Rui HAN Jianwei YU Hailong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 110807 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260122

CSTR: 32037.14.aps.75.20260122

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260122>

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

空间用GaN功率器件单粒子烧毁效应激光定量模拟技术研究

Research on Single Event Burnout of GaN power devices with femtosecond pulsed laser

物理学报. 2022, 71(13): 136102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212297>

低压p-GaN高电子迁移率晶体管重离子辐照效应

Heavy ion irradiation effects in low-voltage p-GaN high-electron-mobility transistors

物理学报. 2026, 75(8): 136102 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251571>

双沟槽SiC金属-氧化物-半导体型场效应管重离子单粒子效应

Heavy ion single event effect in double-trench SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistors

物理学报. 2024, 73(2): 026103 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231440>

重离子辐射对AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管低频噪声特性的影响

Effect of heavy ion radiation on low frequency noise characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors

物理学报. 2024, 73(3): 036103 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20221360>

浪涌电流应力下肖特基型p-GaN高电子迁移率晶体管器件可靠性

Reliability of Schottky-type p-GaN high-electron-mobility transistors under surge current stress

物理学报. 2026, 75(8): 036103 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251573>

GaN高电子迁移率晶体管界面工程对高温与动态偏压可靠性提升的作用机制

Mechanism of GaN high electron mobility transistor interface engineering in enhancing high-temperature and dynamic bias reliability

物理学报. 2026, 75(8): 036103 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251629>