

专题: 半导体物理与器件

低压 p-GaN 高电子迁移率晶体管重离子辐照效应*

杨富康¹⁾ 祝江根²⁾ 吴克平¹⁾³⁾ 刘文正¹⁾ 高欢²⁾周春华³⁾ 张波²⁾ 周琦^{1)2)4)†}

1) (电子科技大学深圳高等研究院, 深圳 518172)

2) (电子科技大学集成电路科学与工程学院, 成都 611731)

3) (深圳平湖实验室, 深圳 518111)

4) (电子科技大学东莞研究院, 东莞 523808)

(2025年11月19日收到; 2026年1月14日收到修改稿)

氮化镓高电子迁移率晶体管 (GaN HEMT) 作为第三代半导体器件的代表, 在航空航天领域具有重要应用价值, 但针对低压 p-GaN HEMT 的重离子辐照效应研究较为缺乏, 亟需明确辐照引起器件退化的物理机理. 本文针对 40 V 肖特基型 p-GaN HEMT 器件, 研究了器件在关态条件下受到线性能量传输值为 $37.9 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 的 $^{84}\text{Kr}^{18+}$ 重离子辐照引起的阈值电压和泄漏电流的退化现象及其机理. 器件辐照过程中漏极瞬态电流呈现增长趋势, 栅极瞬态电流呈现下降趋势; 而器件在辐照后源漏之间漏电流 (I_{ds}) 增大大于 2 个数量级, 阈值电压 (V_{th}) 最大负向漂移达 0.26 V, 漏极漏电流 (I_{dss}) 增大和栅极漏电流 (I_{gss}) 减小. 通过 TCAD 仿真和能带理论分析, 发现与大多数高压器件重离子损伤发生在漂移区或者缓冲层不同的是, 该低压器件电学特性的退化可以归因于重离子辐照产生大量空穴在栅极附近积累, 被在 p-GaN 层和 AlGaN 势垒层中的类施主型空穴陷阱 (donor-like trap) 俘获, 降低了栅极下方沟道的电子势垒, 从而造成泄漏电流增加. 该研究对 GaN 器件在太空应用中的辐照可靠性评估具有参考意义.

关键词: 氮化镓, 高电子迁移率晶体管, 重离子辐照, 单粒子效应

DOI: 10.7498/aps.75.20251571

CSTR: 32037.14.aps.75.20251571

1 引言

氮化镓 (GaN) 作为第三代半导体材料的代表, 相较于 Si 器件, GaN 器件在高频工作下可以通过降低外围无源器件的体积使得系统体积和重量大幅减小, 且能在 200—300 °C 的高温环境中稳定工作^[1-3]; 相较于 GaAs 器件, 其击穿电压提升 3—5 倍, 更适配高压大功率场景^[4-6]. 这些特性使其成为电源系统和星载通信模块等关键部件的理想材料^[7-9].

然而 GaN 器件在太空应用中不可避免地会受到高能粒子的辐射, 这会对器件造成不可控的损伤, 重离子对半导体器件主要造成的损伤有单粒子效应 (single event effects, SEE) 和位移损伤 (displacement damage, DD)^[10-12]. 近年, 对于 GaN 高电子迁移率晶体管 (high electron mobility transistor, HEMT) 的重离子辐照效应已开展系列研究, 但是大多数研究集中在 MIS-GaN HEMT 结构和 Cascode 结构^[11], Kuo 等^[13] 发现辐照后 MIS-GaN HEMT 阈值电压减小和导通电流增大, 认为在 GaN 层和 Si_3N_4 层中分别产生空穴和缺陷导致在

* 国家科技重大专项 (批准号: 2024ZD06049××)、国家自然科学基金 (批准号: 62174019, 62504034)、广东省自然科学基金 (批准号: 2024A1515012139)、四川省科技计划 (批准号: 2026YFHZ0138) 和中国博士后科学基金 (批准号: 2025M770575) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhouqi@uestc.edu.cn

退火后, 阈值电压的增大和导通电流的减小. Zhu 等^[14]开展实验发现辐照引起 MIS-GaN HEMT 沟道电子密度、载流子迁移率和导通电阻发生退化, 这是因为 AlGaN 层和 AlGaN/GaN 界面的陷阱密度增加, 而辐照器件栅极漏电流和关态漏源击穿电压显著提高, 这是由于电子俘获和耗尽增强所致. 针对 p-GaN 这一结构, Huan 等^[15]对 650 V 增强型 p-GaN 栅 HEMT 进行⁸⁴Kr¹⁸⁺离子辐照发现动态导通电阻 (R_{on}) 发生退化而静态 R_{on} 保持不变, 潜在机理是由于其 GaN 缓冲层产生类受主电子陷阱造成二维电子气 (2DEG) 浓度的下降. Kuboyama 等^[16]在高漏极电压下用⁸⁴Kr¹⁸⁺离子观察到 200 V p-GaN HEMT 一种新的损坏模式, 它在漏极和源极之间引入了泄漏路径, 并且在漏极和源极端子之间出现了新的泄漏路径, 而没有对栅极造成任何损坏. 虽然对 p-GaN 栅 HEMT 的研究也取得了相关进展, 但大多数都集中在高压器件, 高压器件漂移区电场极高, 且辐照诱导的载流子运动和缺陷多发生在漂移区或者缓冲层. 而本研究针对 40 V p-GaN HEMT 器件进行重离子辐照实验, 低压器件工作电压较低, 对开关速度和精度要求更高其栅极损伤带来参数微小的变化 (如阈值电压的漂移) 会导致电路性能下降. 且该类器件在航空航天领域的小型化电源模块, 低功耗星载通信单元中应用广泛, 其耐受性对系统可靠性设计至关重要.

本文针对商用 40 V GaN 器件在⁸⁴Kr¹⁸⁺重离子辐照下的可靠性开展研究, 监测了器件在辐照过程中电流瞬态变化以及辐照后阈值电压、泄漏电流等电学特性的变化, 发现器件的损伤主要发生在栅极, 阈值电压和栅极泄漏电流都出现了较大的变化. 并结合 TCAD 仿真模型, 对重离子辐照后退化现象的物理机理进行了深入分析, 这为低压 GaN HEMT 器件在太空中的应用可靠性提供

了参考.

2 辐照实验环境和 TCAD 仿真拟合

重离子辐照实验在哈尔滨工业大学空间环境地面模拟装置进行, 采用回旋加速器产生周期性离子束作为辐照源, 辐照现场的装置如图 1(a) 所示. 辐照粒子使用线性能量传输值 (linear energy transfer, LET) 为 37.9 MeV/(mg·cm⁻²) 的⁸⁴Kr¹⁸⁺离子, 所有辐照实验离子束垂直器件表面入射, 平均剂量率维持在 1.1×10^4 ions·cm⁻²·s⁻¹ 左右. 实验采用的样品是一款商用 40 V/161A p-GaN HEMT 器件 (EPC2055). 为了使辐射粒子充分打入到器件内部, 器件倒装后通过引线焊接在 PCB 测试板上^[17], 如图 1(b), 经过焊接处理后的器件电学特性正常. 辐射期间使用瞬态信号分析仪监测器件的漏极电流 (I_d)、栅极电流 (I_g) 和漏源电压 (V_{ds}). 在辐照实验前后, 使用 Keithley 4200 和 Keysight B1505A 等半导体参数分析仪对器件的阈值电压, 栅极漏电流和漏极漏电流等基本电学参数进行表征.

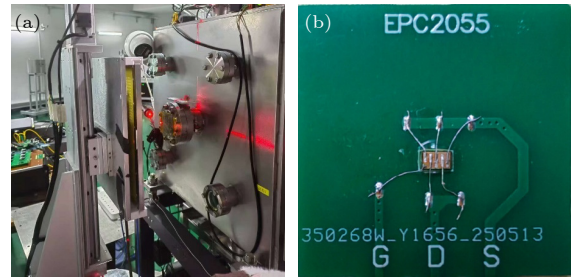


图 1 (a) 实验装置; (b) 实验样品 EPC2055

Fig. 1. (a) Experimental facility; (b) experimental sample (EPC2055).

为了分析辐照损伤类型与作用机理, TCAD 数值模拟仿真同步进行, 仿真结构如图 2(a) 所示, 其中 p-GaN 栅结构的等效模型如图 2(b) 所示,

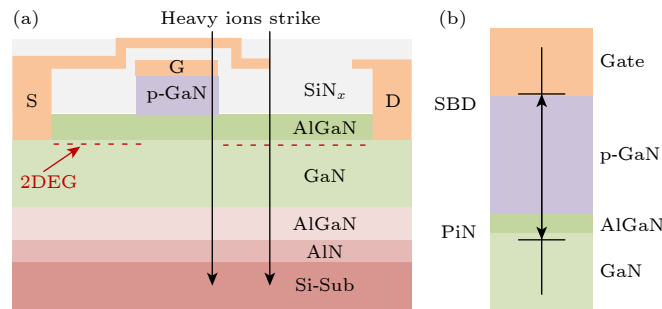


图 2 (a) TCAD 仿真结构示意图; (b) p-GaN 栅结构等效模型

Fig. 2. (a) Schematic diagram of the simulation structure; (b) equivalent circuit of the gate stack.

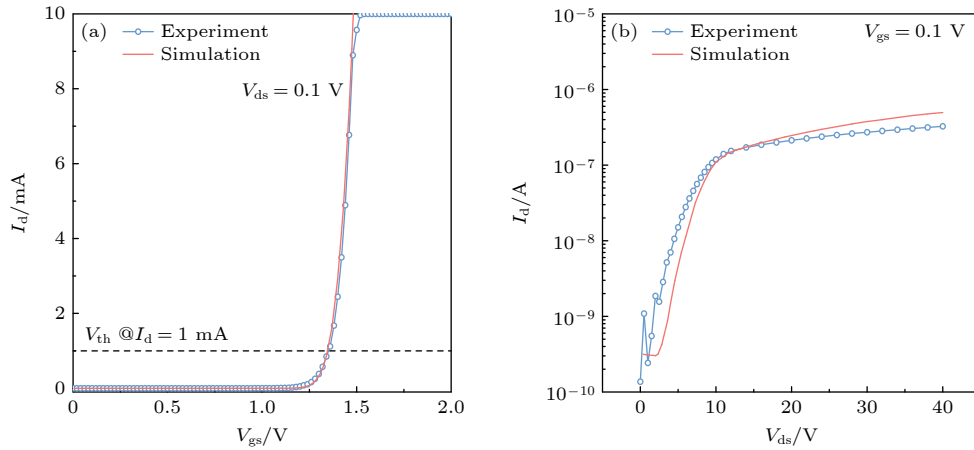


图 3 辐照前测试和仿真拟合 (a) 转移特性曲线; (b) 漏电特性曲线

Fig. 3. Fitting results for the pre-irradiation of the device: (a) Transfer characteristics; (b) leakage current characteristics.

肖特基金属与 p-GaN 层形成肖特基结, p-GaN/AlGaIn/GaN 形成 p-i-n 结, 组成 2 个背靠背的二极管结构 [18].

仿真模型结构包括的各层厚度、掺杂类型及掺杂浓度如表 1 所列. 器件栅极长度 L_g 设置为 $0.55 \mu\text{m}$, 栅源距离 L_{gs} 、栅漏距离 L_{gl} 分别设置为 $0.33 \mu\text{m}$ 和 $3.48 \mu\text{m}$. 器件上方的钝化层采用氮化硅材料. 经过仿真拟合, 仿真与实测的器件辐照前静态电学特性基本吻合, 如图 3(a) 和图 3(b) 所示, 阈值电压基本一致, 关态漏电在同一等级, 说明该仿真模型具有可参考性.

表 1 仿真外延结构掺杂类型以及掺杂浓度 (单位: cm^{-3})
Table 1. Doping types and concentrations at each layer (in cm^{-3}).

	厚度/ μm	掺杂类型	掺杂浓度/ (10^{14}cm^{-3})
p-GaN层	0.62	p	200000
AlGaIn势垒层	0.13	n	10
GaN沟道层	0.01	n	10
GaN缓冲层	0.80	n	1
AlN成核层	0.60	—	0
Substrate	1.00	p	10

3 辐照实验瞬态和退化机理分析

3.1 单粒子烧毁

为确定器件的单粒子烧毁临界条件, 采用阶梯升压法进行测试, 漏极电压初始值设置为 40 V , 步长 5 V , 某个漏极电压下, 器件的瞬态电流急剧增大, 则认为器件发生了烧毁 [19,20]. 如图 4(a) 所示, 器件的单粒子烧毁电压是 52 V , 实测源漏电压与设置

电压存在偏差, 采用实测电压评估器件的烧毁能力. 为了分析器件烧毁机理, 评估器件在辐照环境中工作的能力, 在保证器件不被烧毁的前提下, 对器件做了辐照退化实验, 即对进行辐照退化实验的器件漏极施加安全电压 40 V 的关态应力. 用于测试辐照退化程度的器件累积注量达 $5 \times 10^6 \text{ ions}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时停止辐照, 在辐照过程中监测栅极和漏极的实时电流曲线如图 4(b) 所示, 随着注量的增大, 漏极电流 I_d 呈现先增大后稳定的趋势, 栅极电流 I_g 与漏极电流 I_d 恰恰相反, 呈现先减小后稳定的趋势, 这表明辐照的过程中漏极增长的电流都是流向源极的. 在每次的辐照脉冲下, 器件漏极电流的增长量可达 $1.5 \times 10^{-4} \text{ A}$, 可见辐照瞬间产生的电子空穴对是非常多的; 器件的栅极电流仅在辐照脉冲开始的瞬间上升, 升高约 $1.7 \times 10^{-8} \text{ A}$, 这说明了产生的空穴在辐照刚开始有一部分向栅极移动了, 而之后栅极电流开始下降, 说明在辐照过程中产生的大量空穴在电场作用下向栅极移动, 被栅极区域类施主型空穴陷阱俘获, 栅极下区域势垒降低, 产生的大量电子空穴对在电场作用下穿过势垒形成更大的漏源电流 (I_{ds}). p-GaN 中的类施主型空穴陷阱会使有效受主浓度降低让肖特基耗尽区增加, 降低了界面处的隧穿概率, 使其栅极电流 (I_g) 下降. 当栅极区域的类施主型空穴陷阱被填满, 栅极电流 I_g 与漏极电流 I_d 趋于稳定.

3.2 阈值电压

图 5 所示为器件在辐照实验前后转移特性曲线, 在辐照后器件阈值电压减小了 0.26 V , 该参数

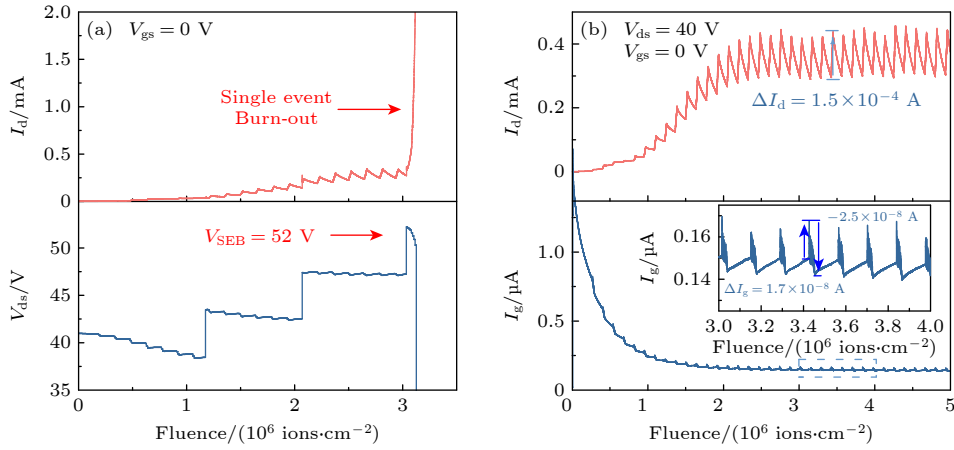


图 4 (a) 器件单粒子烧毁曲线; (b) 辐照过程实时电流

Fig. 4. (a) Single event burnout (SEB) curves during Kr irradiation; (b) measured drain and gate currents as a function of fluence.

的退化与重离子辐照导致类施主型空穴陷阱的填充密切相关, 这是由于产生的类施主型空穴陷阱作用. 经过一周静置后, 器件阈值电压向初始状态方向恢复, 但未完全恢复到初始状态, 这表明有很多浅能级陷阱在辐照结束后恢复了, 但辐照产生的晶格缺陷是无法恢复的^[21].

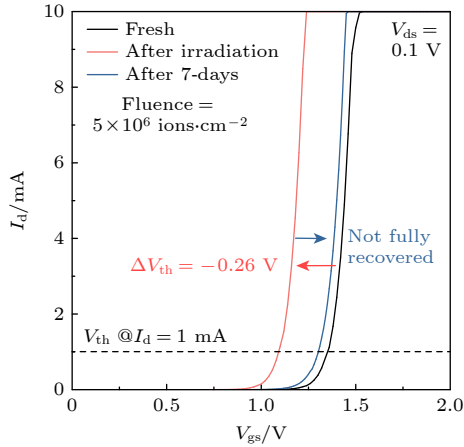


图 5 辐照前后转移特性曲线

Fig. 5. Measured transfer characteristics before and after irradiation.

自间隙和反位缺陷具有非常高的形成能, 因此在生长过程中较少引入, 而氮空位 (V_N) 形成能较低可能在 p 型氮化镓中大量存在, V_N 在 GaN 中充当浅施主能级 ($E_v + (0.5 \pm 0.2)$ eV)^[22,23]. 为了验证类施主型空穴陷阱对阈值电压的影响和栅极漏电永久性失效, 通过仿真在 p-GaN 层和 AlGaIn 势垒层中设置类施主型空穴陷阱, 比较阈值电压的变化以及能带的变化. 在 p-GaN 层中设置 5×10^{18} cm⁻³ 的类施主型空穴陷阱 ($E_v + 2.8$ eV), 在 AlGaIn 势

垒层中设置 5×10^{18} cm⁻³ 的类施主型空穴陷阱 ($E_v + 0.7$ eV), 俘获截面均设置为 1×10^{-14} cm²^[24]. 如图 6(a) 所示, 若 p-GaN 层和 AlGaIn 势垒层中存在类施主型空穴陷阱, 阈值电压负漂 0.26 V, 这与实测辐照后阈值电压漂移量相当. 仿真结果表明, pGaN 层与 AlGaIn 势垒层的类施主型空穴陷阱均对器件阈值电压的负漂有贡献, 它们影响阈值电压的物理机制如下: 在极化电场的作用下, 栅下 2DEG 完全被耗尽, 当 AlGaIn/GaN 界面处导带底与费米能级重合, 此时计算阈值电压 V_{th} :

$$V_{th} = \phi_b + \psi_{bi} + \psi_{s1} - (\Delta E_{c2} - \Delta E_{cl})/q - \Delta V_b, \quad (1)$$

其中 ϕ_b , ψ_{bi} , ψ_{s1} , ΔE_{cl} , ΔE_{c2} , ΔV_b 分别为肖特基接触势垒、肖特基接触内建电势、p-GaN/AlGaIn 界面表面态势垒、p-GaN/AlGaIn 界面导带差、AlGaIn/GaN 界面导带差和 AlGaIn 层的压降. p-GaN 中类施主空穴陷阱俘获空穴形成正电荷中心, 减少了 p-GaN 中净空穴浓度, 降低了栅极金属与 p-GaN 的肖特基接触内建电势, 即减小了 ψ_{bi} , 这减少了对 2 DEG 的耗尽作用, 如图 6(b) 所示存在类施主型空穴陷阱的能带中肖特基内建电势较无陷阱降低了 $\Delta\psi_{bi} = 0.09$ V; AlGaIn 中陷阱俘获空穴形成的固定正电荷会增强 AlGaIn/GaN 异质结的极化电场, 导致 AlGaIn 层的压降 ΔV_b 从 1.88 V 增加到了 2.03 V, 异质结处的电子势阱更深, 如图 6(b) 插图所示, 这两个位置的陷阱均使得栅极下方二维电子气 (2 DEG) 浓度提高, 阈值电压减小^[25]. 由 (1) 式计算可得 ΔV_{th} 减小了 0.24 V, 计算结果与实验结果相差 0.02 V, 在误差可接受范围内. 根据 Shockley-Read-Hall 模型, 对于 GaN 和 AlGaIn 材料, 在俘获

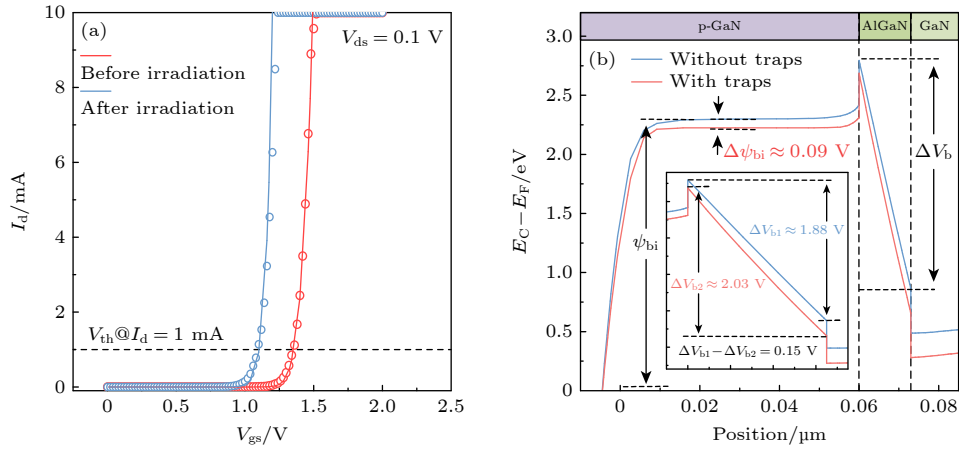


图 6 p-GaN 层和 AlGaIn 势垒层施主陷阱对 (a) 转移特性和 (b) 带的影

Fig. 6. Effect of donor traps in p-GaN layers and AlGaIn barrier layers on (a) transfer characteristics and (b) band structure.

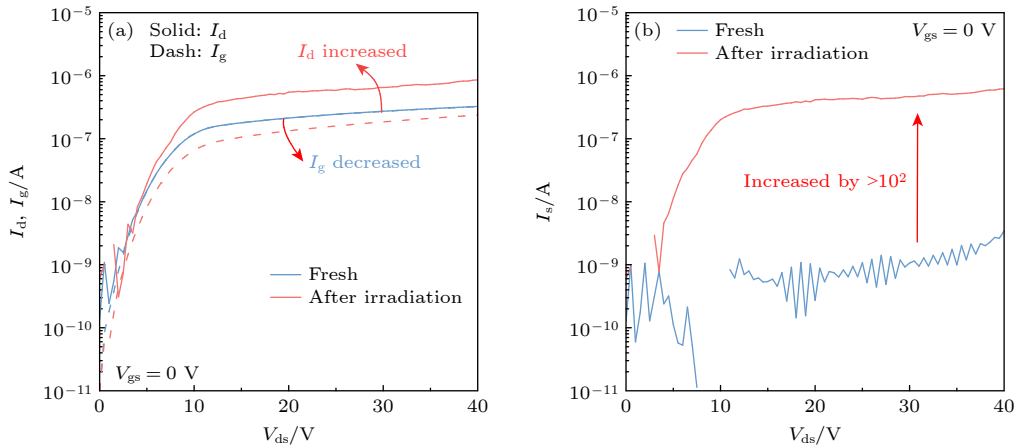


图 7 辐照前后 (a) 栅极漏电流和漏极漏电流; (b) 源极漏电流

Fig. 7. (a) Gate leakage current & drain leakage current and (b) source leakage current before and after irradiation.

截面为 $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ 情况下, $E_v + 0.7 \text{ eV}$ 的类施主型陷阱发射时间约为 10^3 s ^[26]. 而 $E_v + 2.8 \text{ eV}$ 的类施主型空穴陷阱作为深能级陷阱用来模拟由重离子造成的晶格缺陷.

3.3 漏极漏电流

图 7(a) 展示了在辐照前后泄漏电流随漏极电压的变化, 辐照前, 漏极电流与栅极电流重合, 辐照后, 在 $V_{ds} = 40 \text{ V}$ 的关态条件下, 器件的漏极电流提高, 而栅极电流减小到原来的 1/2. 图 7(b) 所示器件关态下源极电流由实验测得的漏极电流与栅极电流相减得到, 从图中可以看到, 源极电流增加大于两个数量级, 说明辐照大大增强了从漏极经 GaN 缓冲层流向源极的漏电流.

为了分析漏电流增大的机理, 对器件关态下的电学特性进行了仿真, 图 8 展示了 40 V 关态漏压下,

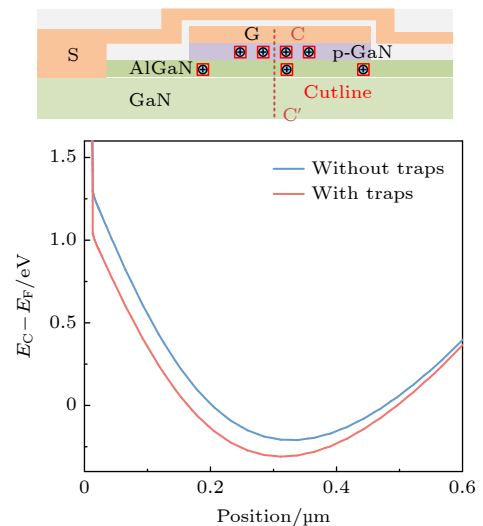


图 8 p-GaN 层和 AlGaIn 势垒层类施主空穴陷阱对栅极结构能带的影响

Fig. 8. Effect of donor like traps in p-GaN layers and AlGaIn barrier layers on band diagram at the gate.

栅叠层处的能带图, 明显可以看出, 加入 p-GaN 层和 AlGaIn 势垒层中的类施主型空穴陷阱后, 栅极下方沟道势垒明显降低. 势垒降低使得沟道 2DEG 的电子更容易从漏极侧越过势垒注入源极形成漏源间泄漏电流. 该陷阱类型与位置也与阈值电压漂移的分析一致, 印证了类施主型空穴陷阱作用的合理性. 图 9(a) 和图 9(b) 分别展示了无类施主型空穴陷阱和存在类施主型空穴陷阱时的电流密度分布图, 其中陷阱浓度与上文一致, 可以看出 p-GaN 层和 AlGaIn 势垒层施主陷阱的引入会大大增加从漏极经 GaN 缓冲层到源极的电流密度, 源漏之间通过增强的漏电通道泄漏了更多的电流, 这与实验结果一致.

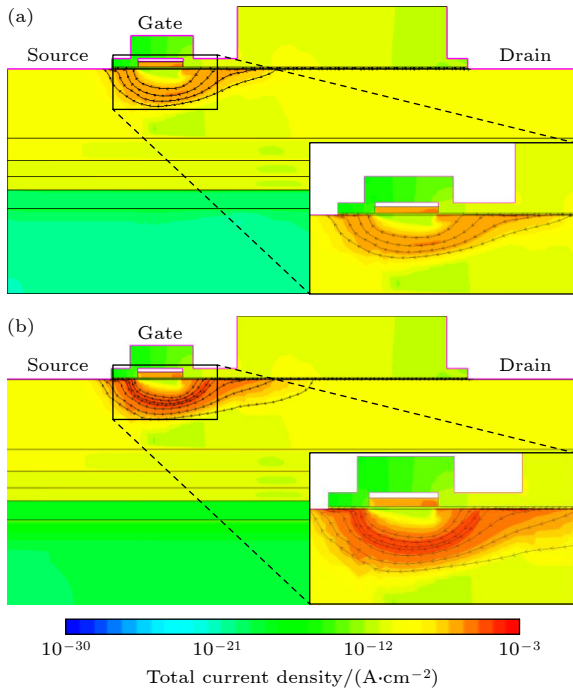


图 9 p-GaN 层和 AlGaIn 势垒层 (a) 无施主陷阱和 (b) 存在施主陷阱 p-GaN HEMT 器件电流密度示意图
Fig. 9. Schematic diagram of current density for p-GaN HEMT devices with (a) no donor traps and (b) donor traps present in the p-GaN layer and AlGaIn barrier layer.

3.4 栅极漏电

图 10(a) 对比了辐照前后栅极漏电的变化, 可以看出漏电在负栅压下基本没有变化, 而在正栅压下, 辐照后漏极电流减小, 且 7 d 后未恢复. 该现象可以通过图 2(b) 中等效栅极模型予以解释, 正栅压下, 栅金属与 pGaN 形成的等效肖特基二极管处于反偏状态, 栅极漏电大小主要由该结 (junction) 决定, 且反偏电流主要由空穴从金属向 p-GaN 层

的隧穿主导^[27]. 由上文的分析得到, 辐照后, p-GaN 的类施主型陷阱俘获空穴起到了补偿受主的作用, p-GaN 层中净空穴浓度下降, 而 SBD 二极管的耗尽区宽度与净空穴浓度的平方根成反比:

$$W_D = \left[\frac{2\epsilon_s}{qN} V_{bi} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

其中 W_D , ϵ_s , q , N 和 V_{bi} 分别为耗尽区宽度, 材料的介电常数、单个电荷所带电荷量、p-GaN 中净空穴浓度和内建电势.

因此耗尽区展宽, 空穴的隧穿作用减弱, 即正栅压下漏极漏电减小. 这一结果进一步印证了重离子辐照下 p-GaN 结构中存在类施主型陷阱填充的物理机理. 而通过一周的静置, 器件的栅极漏电并没有恢复, 进一步佐证了 p-GaN 中由重离子辐照产生了晶格缺陷.

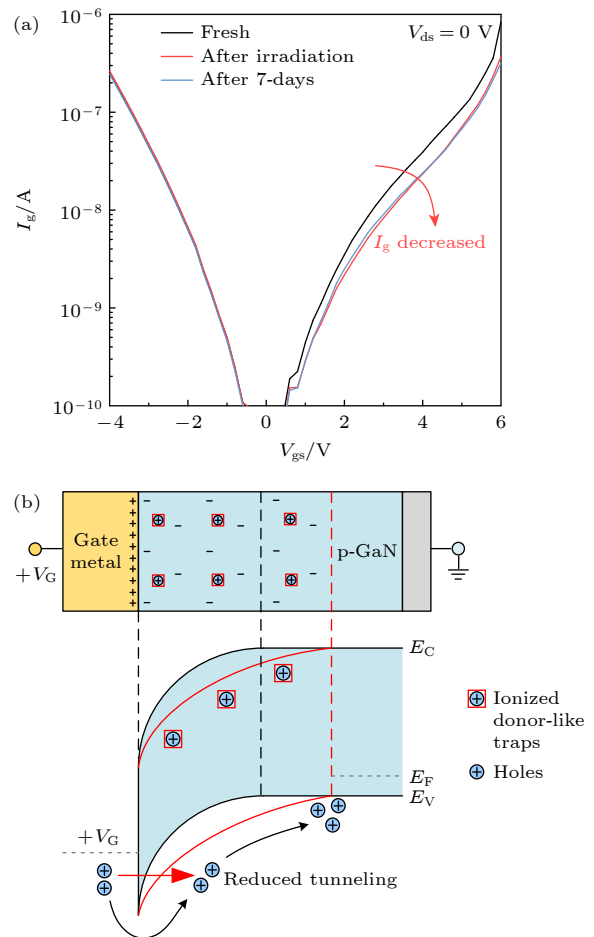


图 10 (a) 辐照前后栅极漏电特性曲线和 (b) p-GaN 施主陷阱对能带的影响

Fig. 10. (a) Gate leakage characteristics before and after irradiation and (b) effect of p-GaN donor traps on the band structure.

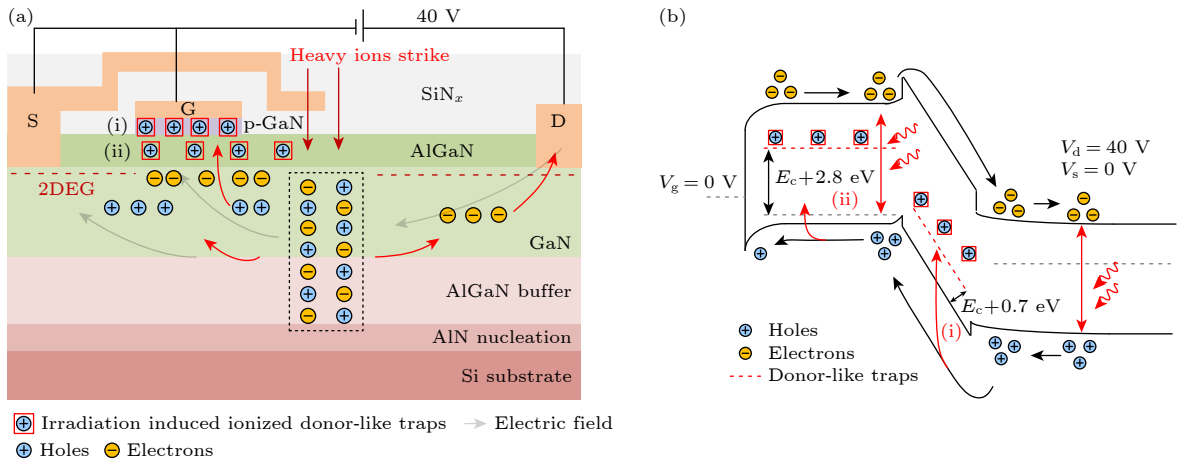


图 11 p-GaN HEMT 辐照损伤机制 (a) 辐照示意图; (b) 能带图

Fig. 11. Mechanism schematic on irradiation damage for p-GaN gate HEMTs: (a) Schematic diagram of the structure; (b) band diagram.

3.5 退化机制

重离子辐照对 p-GaN HEMT 造成电学特性的退化, 其核心机理源于高能离子在器件中产生的大量电子空穴对而引发的次级效应. 如图 11(a) 展示了所研究的低压 p-GaN HEMT 器件辐照损伤的机理示意图, 重离子入射会在器件有源区产生大量电子空穴对, 在高电场的作用下, 电子向漏极漂移, 空穴向栅极和源极漂移, 这从图 4(b) 中漏极瞬态电流随着周期性的离子束呈现周期性上升可以证明. 由于空穴迁移率较小, 空穴会在栅极区域聚集^[28], 这些空穴在栅极下方高电场的加速下翻越势垒, 一部分空穴被 AlGaN 势垒层中类施主型空穴陷阱俘获, 如图 11(b) 所示的过程 (i), 形成的固定正电荷会增强 AlGaN/GaN 异质结的极化电场, 从而降低栅下沟道势垒, 引起阈值电压的负漂和漏到源之间漏电流的增大. 一部分空穴继续向 p-GaN 层中移动, 会被 p-GaN 层中的类施主型空穴陷阱俘获形成正电中心, 如图 11(b) 所示的过程 (ii), 该过程会补偿 Mg 受主 (负电中心) 的掺杂浓度, 导致 p-GaN 中净空穴浓度的下降, 相当于抬升了该层的费米能级, 降低了 p-GaN 层的势垒高度, 这直接削弱了 p-GaN 对下方 2DEG 沟道的耗尽能力, 从而需要施加更负的栅极电压才能完全关断沟道, 宏观上表现为阈值电压的负向漂移, 不仅如此, 净空穴浓度的下降还降低了正栅压下的栅极漏电流. 同时, 辐照过程中栅极电流增大一瞬间后就开始下降也可以通过施主陷阱的填充解释, 即正电中心的存在会反过来阻碍更多空穴向栅极流动, 导致了辐照过程中的栅极电流的减小. 总的来说, 该重离子辐照过程

中, 器件的退化主要由 AlGaN 势垒层的类施主型空穴陷阱和 p-GaN 层晶格缺陷形成的类施主型空穴陷阱的共同影响, 辐照过程中, 过多空穴陷阱填充造成的势垒降低效应会使得源漏之间漏电流急剧增大, 从而可能使电源系统异常开启, 甚至烧毁器件以及其他电路.

4 结论

本文以 40 V p-GaN HEMT 商用器件为对象, 通过 $^{84}\text{Kr}^{18+}$ 重离子 ($\text{LET} = 37.9 \text{ MeV}/(\text{mg} \cdot \text{cm}^2)$) 辐照实验与器件仿真相结合的方法, 系统地探究了器件在重离子辐照下的电学特性退化规律、烧毁临界条件及内在物理机制. 实验发现在漏源电压 40 V、总剂量 $5 \times 10^6 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的辐照条件下, 器件阈值电压负向漂移 0.26 V、漏极漏电流显著增大、栅极漏电流呈下降趋势、正栅压下栅极漏电流降低, 这些现象源于重离子辐照作用下产生的大量非平衡载流子, 以及类施主型陷阱对载流子运输的调控作用. 通过结合 TCAD 仿真验证了“p-GaN 类施主型陷阱俘获空穴削弱二维电子气耗尽能力、AlGaN 势垒层类施主型陷阱形成固定正电荷增强异质结极化电场”的协同退化机理, 明确了阈值电压负漂、漏源泄电流增大等参数变化的物理根源. 本研究发现低压器件与高压器件常见的缓冲层产生陷阱诱导器件烧毁不同, 该低压器件的损伤主要发生在栅叠层, 阈值电压等参数退化严重且出现了永久性退化现象. 该研究为评估器件长期辐照下的性能稳定性提供了参考, 为进一步开展抗辐照加固设计与器件在太空中的应用提供了支撑.

参考文献

- [1] Baliga B J 2019 *Wide Bandgap Semiconductor Power Devices* (Cambridge: Woodhead Publishing) pp150–208
- [2] Meneghini M, Meneghesso G, Zanoni E 2017 *Power GaN Devices: Materials, Applications and Reliability* (Berlin: Springer) pp2–6
- [3] Yuan M, Niroula J, Xie Q, Rajput N S, Fu K, Luo S 2023 *IEEE Electron Device Lett.* **44** 1068
- [4] Amano H, Baines Y, Beam E, Borga M, Bouchet T, Chalker P R, Charles M, Chen K J, Chowdhury N, Chu R M, Santi C D, De Souza M M, Decoutere S, Cioccio L D, Eckardt B, Egawa T, Fay P, Freedman J J, Guido L, Häberlen O, Haynes G, Heckel T, Hemakumara D, Houston P, Hu J, Hua M Y, Huang Q Y, Huang A, Jiang S, Kawai H, Kinzer D, Kuball M, Kumar A, Lee K B, Li X, Marcon D, März M, McCarthy R, Meneghesso G, Meneghini M, Morvan E, Nakajima A, Narayanan E M S, Oliver S, Palacios T, Piedra D, Plissonnier M, Reddy R, Sun M, Thayne I, Torres A, Trivellin N, Umni V, Uren M J, Hove M V, Wallis D J, Wang J, Xie J, Yagi S, Yang S, Youtsey C, Yu R, Zanoni E, Zeltner S, Zhang Y H 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 163001
- [5] Mohammad S N, Salvador A A, Morkoc H 1995 *Proc. IEEE* **83** 1306
- [6] Shah V 2017 *M. S. Thesis* (Northridge: California State University)
- [7] Poling B S, Via G D, Bole K D, Johnson E E, McDermott J M 2016 *Microelectron. Reliab.* **68** 13
- [8] Chen K J, Häberlen O, Lidow A, Tsai C L, Ueda T, Uemoto Y, Wu Y F 2017 *IEEE Trans. Electron Devices* **64** 779
- [9] Baliga B J 2013 *Semicond. Sci. Technol.* **28** 074011
- [10] Yin T X 2023 *M. S. Thesis* (Xian: Xidian University) (in Chinese) [尹太续 2023 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [11] Bai R X, Guo H X, Zhang H, Wang D, Zhang F Q, Pan X Y, Ma W Y, Hu J W, Liu Y W, Yang Y, Lü W, Wang Z M 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 012401 (in Chinese) [白如雪, 郭红霞, 张鸿, 王迪, 张凤祁, 潘霄宇, 马武英, 胡嘉文, 刘益维, 杨业, 吕伟, 王忠明 2023 物理学报 **72** 012401]
- [12] He H, Bai Y R, Tian S, Liu F, Zang H, Liu W B, Li P, He C H 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 052402 [何欢, 白雨蓉, 田赏, 刘方, 臧航, 柳文波, 李培, 贺朝会 2024 物理学报 **73** 052402]
- [13] Kuo H M, Chang T C, Chang K C, Lin H N, Kuo T T, Yeh C H, Lee, Y H, Lin J H, Tsai X Y, Huang J W, Sze S 2023 *IEEE Trans. Electron Devices* **70** 2216
- [14] Zhu T, Zheng X F, Yin T X, Zhang H, Wang X H, Yue S Z, Wang T, Han T, Ma X H, Hao Y 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 183502
- [15] Huan G, Xin Z, Zhao W, Wen Y, Qi Z, Bo Z 2025 *37th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* Kumamoto, Japan, June 01–05, 2025 p233
- [16] Kuboyama S, Maru A, Shindou H, Ikeda N, Hirao T, Abe H, Tamura Ta 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2734
- [17] Sauveplane J B, Dufour A, Marcault E, Orsatelli M, Duran G, Burky J, Forgerit B, Tilhac F, Guerre F X 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **68** 2488
- [18] Zhang C 2023 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Xidian University) (in Chinese) [张弛 2023 博士学位论文 (南京: 东南大学)]
- [19] Zerarka M, Crepel O, Weulersse C, Morand S, Binois C, Mazurek M 2020 *20th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)* Toulouse, France, October 19–November 20, 2020 pp206
- [20] Scheick L Z 2008 *Testing Guideline for Single Event Gate Rupture (SEGR) of Power MOSFETs* Pasadena, CA, USA Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration p4
- [21] Sasikumar A, Zhang Z, Kumar P, Zhang E X, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Saunier P, Lee C, Ringel S A, Arehart A R 2015 *IRPS*, CA, USA, April 19–23 2015 p2E.3.1
- [22] Chris V, Jörg N J 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 3851
- [23] Reshchikov M A, Morkoc H 2006 *Physica B* **376** 428
- [24] Fang Z Q, Farlow G C, Clafin B, Look D C, Green D S 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 123
- [25] Bakeroot B, Stockman A, Posthuma N, Stoffels S, Decoutere S 2018 *IEEE Trans. Electron Devices* **65** 79
- [26] Ozaki S 2019 *Ph. D. Dissertation* (Hokkaido: Hokkaido University)
- [27] Qiu R, Liu Y H, Li B K 2021 *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)* **38** 227 (in Chinese) [邱然, 刘禹涵, 李百奎 2021 深圳大学学报 (理工版) **38** 227]
- [28] Luo X, Wang Y, Hao Y, Li X J, Liu C M, Fei X X, Yu C H, Cao F 2019 *IEEE Trans. Electron. Devices* **66** 1118

SPECIAL TOPIC—Semiconductor physics and devices

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

YANG Fukang¹⁾ ZHU Jianggen²⁾ WU Keping¹⁾³⁾ LIU Wenzheng¹⁾
GAO Huan²⁾ ZHOU Chunhua³⁾ ZHANG Bo²⁾ ZHOU Qi^{1)2)4)†}

1) (*Shenzhen Institute of Advanced Study, University of Electronic Science and Technology of China, Shenzhen 518172, China*)

2) (*School of Integrated Circuit Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*)

3) (*Shenzhen Pinghu Laboratory, Shenzhen 518111, China*)

4) (*Institute of Electronic and Information Engineering in Dongguan, University of Electronic Science and Technology of China, Dongguan 523808, China*)

(Received 19 November 2025; revised manuscript received 14 January 2026)

Abstract

Gallium nitride (GaN) high-electron-mobility transistors (HEMTs) are emerging as critical components in aerospace power systems due to their superior radiation tolerance and high-frequency capabilities. While radiation effects on high-voltage devices are well documented, the degradation mechanisms of low-voltage p-GaN HEMTs remain less understood. This study investigates the Single Event Effects (SEE) and subsequent electrical degradation of commercial 40 V Schottky-type p-GaN HEMTs under $^{84}\text{Kr}^{18+}$ heavy ion irradiation ($\text{LET} = 37.9 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$). Experimental results indicate a Single Event Burnout (SEB) threshold of 52 V. Following irradiation under a safe off-state bias of 40 V, the device exhibited distinct degradation patterns: the drain-source leakage current (I_{ds}) increased by over two orders of magnitude, and the threshold voltage (V_{th}) shifted negatively by 0.26 V. Conversely, the gate leakage current (I_{gss}) showed an anomalous decrease. Combined TCAD simulations and energy band theory analysis reveal that, unlike high-voltage devices where damage typically occurs in the drift or buffer regions, degradation in these low-voltage devices is concentrated within the gate stack. The proposed mechanism attributes this to irradiation-induced holes accumulating near the gate and being captured by donor-like hole traps located in both the p-GaN layer (deep-level defects at $E_{\text{V}}+2.8 \text{ eV}$) and the AlGaN barrier ($E_{\text{V}}+0.7 \text{ eV}$). These trapped positive charges lower the electron potential barrier in the channel, causing the negative V_{th} shift and increased subthreshold leakage. Simultaneously, the compensation of acceptors in the p-GaN layer by these hole traps widens the depletion region of the Schottky junction, resulting in reduced gate leakage. These findings provide essential physical insights for the reliability assessment and radiation-hardening design of low-voltage GaN power modules for space applications.

Keywords: gallium nitride, high electron mobility transistor, heavy ion irradiation, single event effects

DOI: [10.7498/aps.75.20251571](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251571)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251571](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251571)

* Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2024ZD06049××), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62174019, 62504034), the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2024A1515012139), the Sichuan Science and Technology Program, China (Grant No. 2026YFHZ0138), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2025M770575).

† Corresponding author. E-mail: zhouqi@uestc.edu.cn

低压p-GaN高电子迁移率晶体管重离子辐照效应

杨富康 祝江根 吴克平 刘文正 高欢 周春华 张波 周琦

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

YANG Fukang ZHU Jianggen WU Keping LIU Wenzheng GAO Huan ZHOU Chunhua ZHANG Bo
ZHOU Qi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 080709 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251571

CSTR: 32037.14.aps.75.20251571

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251571>

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

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>

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>

氢离子注入GaN高电子迁移率晶体管栅极正向输运、退化与击穿

Forward transport, degradation, and breakdown of hydrogen-ion-implanted GaN high electron mobility transistor gate

物理学报. 2026, 75(5): 026103 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251343>

磷化铟高电子迁移率晶体管外延结构材料抗电子辐照加固设计

Structure parameters design of InP based high electron mobility transistor epitaxial materials to improve radiation-resistance ability

物理学报. 2022, 71(3): 037202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211265>

微波GaN器件温度效应建模

Modeling of temperature effect on DC characteristics of microwave GaN devices

物理学报. 2024, 73(17): 177101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240765>

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>