

# 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

张东楷<sup>1)</sup> 胡晴<sup>1)</sup> 郭玉龙<sup>1)</sup> 翟颖<sup>1)</sup> 刘栩珊<sup>1)</sup>  
王梓旭<sup>1)</sup> 于国浩<sup>2)</sup> 闫大为<sup>1)†</sup>

1) (江南大学集成电路学院, 无锡 214122)

2) (中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 苏州 215123)

(2025 年 9 月 29 日收到; 2025 年 12 月 10 日收到修改稿)

本文基于氢等离子体注入技术实现了增强型 p-GaN 高电子迁移率晶体管向耗尽型器件的转变, 研究了栅极正向电流的输运、电流退化与击穿行为. 通过变温电流-电压 ( $T$ - $I$ - $V$ ) 扫描、低频噪声测试与锁相红外成像技术, 获得以下结果: 1) 在双对数坐标系下栅极正向  $T$ - $I$ - $V$  曲线呈显著幂律关系, 斜率对温度不敏感, 对应热激活能仅约 52 meV, 电流噪声具有典型  $1/f$  特性, 表明正向电流应主要为缺陷辅助跳跃电流; 2) 在长时间正向栅压应力作用下, 器件  $I$ - $V$  特性退化为典型整流特性, 表明局部高阻 GaN 区重新形成 p-GaN, 半对数坐标系下, 电流线性区的理想因子高达 2.6, 电流噪声谱具有  $1/f$  特性, 证明缺陷辅助隧穿电流成为主要输运机制; 3) 通过锁相红外成像技术精准定位击穿“热点”位置, 并结合像素温度矫正技术测得“热点”处真实温度.

**关键词:** 氢离子注入, GaN 高电子迁移率晶体管, 输运机制, 退化, 击穿

**DOI:** 10.7498/aps.75.20251343

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251343

## 1 引言

GaN 材料因其宽禁带 ( $\sim 3.4$  eV)、高热稳定性、高击穿场强 ( $> 3$  MV/cm), 以及高电子饱和漂移速度 ( $\sim 2.5 \times 10^7$  cm/s) 等优异特性, 已成为雷达、航空航天、5G 通信基站等高频大功率微波应用中的关键半导体材料<sup>[1,2]</sup>. 在 AlGaIn/GaN 异质结高电子迁移率晶体管 (HEMT) 中, 界面处的自发极化与压电极化共同作用, 形成高面密度 (面密度  $> 1 \times 10^{13}$  cm<sup>-2</sup>) 的二维电子气 (2DEG), 赋予器件优异的高频与高功率性能<sup>[3,4]</sup>. 为了实现增强型器件与耗尽型器件的单片集成, 需要一种方法能在同一片晶圆上“选择性”地制造这两种器件<sup>[5]</sup>. 对于 GaN 数字电路, 目前普遍采用 p-GaN HEMT 作

为核心增强型器件, 采用高能离子刻蚀选择性去除部分 p-GaN 层以将增强型器件转化为耗尽型<sup>[6]</sup>. 然而, 刻蚀过程会引入表面晶格损伤, 较高的界面态密度, 并可能形成栅极边缘漏电通道, 导致器件动态导通电阻增大与长期可靠性下降<sup>[7]</sup>. 为应对上述挑战, 氢离子注入作为一种非破坏的掺杂调控策略被提出. 其原理是利用氢等离子体将氢原子注入 p-GaN 层, 与 Mg 受主杂质形成电中性的 Mg-H 复合物, 从而使 p 型导电区域转变为高阻 GaN 层<sup>[8]</sup>. 此方法无需对半导体材料进行物理刻蚀, 避免了沟道损伤和 2DEG 输运特性的退化, 能有效维持器件性能与可靠性.

近年来, 研究氢离子注入 GaN HEMT 器件的输运机制与可靠性主要依赖变温电流测试和电压应力退化分析等方法<sup>[9,10]</sup>. 相较之下, 利用低频噪

† 通信作者. E-mail: daweyan@jiangnan.edu.cn

声谱分析和锁相红外热成像技术进行相关研究报道较少. 低频噪声技术能灵敏地探测器件中存在的微观缺陷及其能级分布<sup>[11]</sup>, 而锁相红外技术则能定位因缺陷导致的局部发热点<sup>[12]</sup>. 鉴于此, 本文制备了氢离子注入耗尽型 GaN HEMT 器件, 结合变温电流-电压 ( $T$ - $I$ - $V$ ) 扫描, 低频噪声技术与红外锁相显微镜研究了栅极正向电流的输运机制, 电流退化与击穿行为. 结果表明: 1) 在双对数坐标系下, 栅极正向电流曲线遵循良好幂律特性, 且斜率对温度不敏感, 电流噪声具有典型  $1/f$  特性, 表明栅极正向电流的主要传导机制应为缺陷辅助跳跃; 2) 在正向栅压应力作用下, 器件的栅极正向电流显著增大 4 个量级, 但反向电流基本维持不变, 退化后器件在线性区的电流的理想因子约为 2.6, 表明此时导电机理已转变为缺陷辅助隧穿; 3) 栅极电流击穿发生在特定局部区域, 在注入功率为 0.106 W 时, 击穿“热点”处的温度最高, 约为 33 °C.

## 2 器件制备与测试

图 1(a) 所示为氢离子注入 GaN HEMT 的横截面结构示意图. 该器件外延层结构采用金属有机

化学气相沉积技术生长在 Si (111) 衬底上, 自下而上依次包括: 4  $\mu\text{m}$  AlGaN 缓冲层、150 nm GaN 沟道层、1 nm AlN 插入层、18 nm  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  势垒层与 70 nm p-GaN 层 (Mg 掺杂浓度为  $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ). 器件的主要制备工艺流程如下.

1) 欧姆接触区定义与 p-GaN 刻蚀: 通过标准光刻和 lift-off 工艺定义 N 型欧姆接触区, 随后采用感应耦合等离子体 (ICP) 干法刻蚀对 p-GaN 层进行选择性地刻蚀.

2) 欧姆接触形成: 采用电子束蒸发工艺沉积 Ti/Al/Ni/Au 金属叠层 (厚度分别为 20/130/50/50 nm), 并在氮气氛围中经 60 s 快速热退火 (RTA) 形成欧姆接触.

3) p-GaN 高阻化处理: 将样品置于 ICP 反应腔中进行氢离子注入, 实现 p-GaN 向高阻态 GaN 转化. 具体工艺参数为  $\text{H}_2$  流量 30 sccm (1 sccm = 1 mL/min), 射频功率 2 W, ICP 功率 300 W, 腔室压强 8 mTorr (1 Torr = 133.322 Pa), 温度 25 °C, 处理时间 5 min. 随后转移至 RTA 腔体进行 350 °C, 5 min 的损伤修复退火.

4) 栅极欧姆接触制备: 通过光刻定义正电极区域, 采用电子束蒸发沉积 Ni/Au 金属层 (厚度

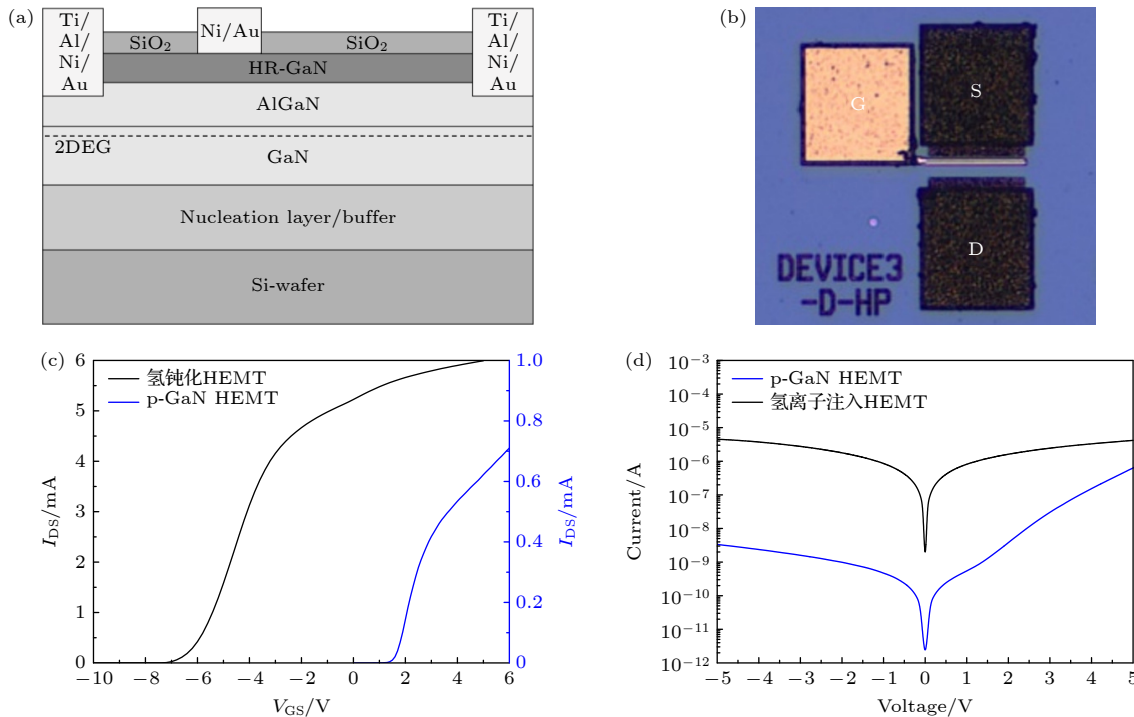


图 1 (a) 氢离子注入 GaN HEMT 横截面结构示意图; (b) 样品表面俯视图; (c) 转移特性曲线; (d) 栅极漏电流曲线

Fig. 1. (a) Cross-sectional schematic diagram of the hydrogen-ion-implanted GaN HEMT; (b) top-view of the sample surface; (c) transfer characteristic curve; (d) gate leakage current curves.

50/200 nm), 并在氮气氛围中经 450 °C, 60 s 快速热退火形成欧姆接触.

图 1(b) 为实际器件的俯视图, 其中栅极宽度为 100  $\mu\text{m}$ , 栅极长度为 7  $\mu\text{m}$ , 栅-源距离为 3  $\mu\text{m}$ , 栅-漏距离为 14  $\mu\text{m}$ . 图 1(c) 对比了  $V_{\text{ds}} = 2.5 \text{ V}$  条件下氢离子注入前后样品的转移特性曲线, 表明氢离子注入已经成功将增强型 p-GaN HEMT ( $V_{\text{th}} = 1.5 \text{ V}$ ) 转化为耗尽型 GaN HEMT ( $V_{\text{th}} = -7.5 \text{ V}$ ). 图 1(d) 对比了氢离子注入前后栅极漏电流曲线. 可见, 离子注入后栅极漏电流明显增大, 表明离子注入产生的大量缺陷态已成为主要的漏电通道.

本文使用高精度变温探针台与半导体参数分析仪 (4200 SCS, Keithley) 测量样品的  $T$ - $I$ - $V$  特性, 采用国产 (超) 低频噪声测试系统 (LFN-2000, 无锡芯鉴半导体技术有限公司) 测量器件在不同偏压或注入电流条件下的电流低频噪声特性, 利用国产锁相红外显微镜系统 (Thermos-2000, 无锡芯鉴半导体技术有限公司) 获取器件的具体击穿“热点”位置与微观温度分布.

### 3 结果与讨论

图 2(a) 所示为氢离子注入 GaN HEMT 的栅极正向  $T$ - $I$ - $V$  特性曲线. GaN HEMT 栅极结构本质上是异质结二极管, 其电流行为通常采用以下经验公式描述<sup>[13]</sup>:

$$I = I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\}, \quad (1a)$$

$$I_0 \propto \exp \left( -\frac{E_g}{nkT} \right), \quad (1b)$$

式中,  $I_0$  为反向饱和电流,  $q$  为基本电荷,  $R_s$  为串联电阻,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $E_g$  为有效禁带宽度,  $n$  为理想因子. 特别需要注意的是, 由于 GaN 材料内部含有大量本征缺陷态, 在热平衡条件下其饱和电流通常远大于理想扩散电流. 因此, (1b) 式中必须引入理想因子  $n$  以准确描述实际的载流子输运过程. 然而, 在多数现有文献中, 研究者往往默认  $n = 1$ . 这种简化处理会严重低估实际禁带宽度, 并导致错误的温度依赖关系推导, 从而影响后续的物理机制分析. (1) 式表明, 在半对数坐标系下的  $I$ - $V$  曲线应呈现良好的线性关系, 且反向饱和和电流的激活能应直接对应材料的本征禁带宽度. 图 2 的实验结果清晰地揭示了两个关键现

象: 首先, 在恒定温度条件下,  $\log(I)$ - $V$  曲线呈现出明显的非线性特征; 其次, 通过拟合获得的反向饱和和电流激活能仅为 52 meV, 这一数值远低于 GaN 材料的本征禁带宽度 ( $\sim 3.4 \text{ eV}$ ). 以上实验结果表明, 传统的经验 pn 结公式无法合理解释氢离子注入 GaN HEMT 栅极正向电流的实际行为特征.

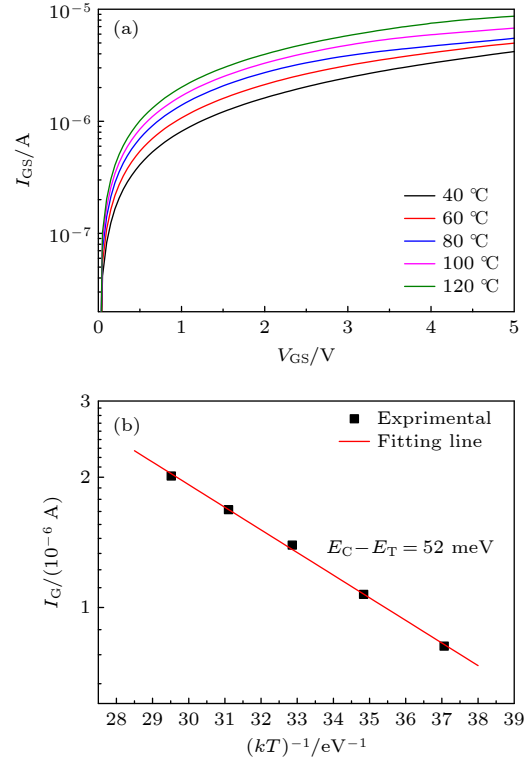


图 2 (a) 栅极正向变温电流-电压关系; (b) 栅极电流的温度依赖关系  
Fig. 2. (a) Gate forward bias temperature-dependent current-voltage characteristics; (b) temperature dependence of the gate current.

图 3(a) 所示为氢离子注入 GaN HEMT 在双对数坐标系下的栅极正向  $T$ - $I$ - $V$  特性, 其表现为良好的幂律关系, 且电流斜率对温度不敏感. 这一特性与空间限制电流 (SCLC) 的典型特性相似, 其电流关系为<sup>[14]</sup>

$$I \propto V^\beta, \quad (2a)$$

$$\beta = T_C/T + 1, \quad (2b)$$

$$n_t(E) \propto e^{-E/kT_C}, \quad (2c)$$

式中,  $\beta$  为幂律指数,  $n_t(E)$  为缺陷态密度分布函数,  $E = E_C - E_T$  为缺陷态能级与导带底的能量差,  $T_C$  为与缺陷能态密度的分布有关的特征温度. SCLC 模型的典型特征与缺陷密度有关: 当材料中

缺陷态密度极低 ( $n_t \approx 0$ ) 时, 载流子输运主要由电场驱动的漂移过程主导, 此时  $\beta = 2$ , 电流与电压呈严格的平方关系 ( $I \propto V^2$ ); 当材料中存在大量缺陷态 ( $n_t \gg 0$ ) 时, 缺陷态会捕获载流子, 导致有效迁移率降低, 此时  $\beta \gg 2$  (通常  $\beta$  随缺陷密度增大而增大), 电流随电压的提升更为剧烈<sup>[15]</sup>. 对图 3(a) 的电流斜率进行拟合得  $\beta = 1$ , 这显然与 SCLC 模型不符.

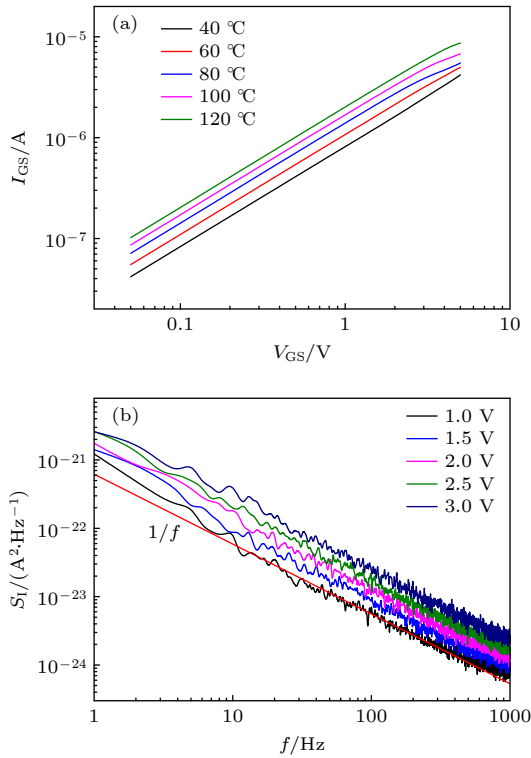


图 3 (a) 双对数坐标正向栅极  $T$ - $I$ - $V$  特性; (b) 不同偏压下的低频噪声谱密度  
Fig. 3. (a) Forward gate  $T$ - $I$ - $V$  characteristics plotted in log-log scale; (b) low-frequency noise spectral density under different biases.

图 3(b) 所示为氢离子注入 GaN HEMT 在不同栅压下的电流噪声功率谱密度, 其频率特性可由以下经验公式描述<sup>[16]</sup>:

$$S_1 = S_0 \frac{I^2}{f^\gamma}, \quad (3)$$

式中,  $S_0$  为噪声系数,  $I$  为对应偏压下暗电流,  $f$  为测试频率,  $\gamma$  为拟合参数. 在双对数坐标中,  $\gamma$  为噪声谱的斜率, 其数值反映载流子的主要输运机制为: 1)  $\gamma = 1$ , 噪声主要源于缺陷态对载流子连续的捕获与释放过程 (载流子在缺陷态间反复跃迁, 产生低频闪烁噪声); 2)  $\gamma = 2$ , 噪声主要由缺陷相关的产生-复合过程主导 (载流子在缺陷态与导带/

价带间直接跃迁, 产生高斯噪声); 3)  $1 < \gamma < 2$ , 则缺陷态捕获与产生-复合过程协同影响载流子输运.

图 3(b) 的实验结果表明: 随着栅压 (或注入电流) 的增大, 噪声强度 ( $S(f)$ ) 显著增大, 但斜率  $\gamma$  始终保持在 1 左右, 未发生明显变化. 这一结果表明, 栅极正向漏电流的输运机制主要由缺陷态对载流子的连续捕获与释放过程主导. 进一步结合正向栅压下的器件特性分析, AlGaIn/GaN 异质结界面的 2DEG 沟道中, 电子在强电场作用下容易隧穿至势垒层 (AlGaIn 层), 形成主要的电流通路. 因此, 正向电流的主要电荷载体为电子, 其输运过程受缺陷态 (如界面陷阱、体陷阱) 的捕获与释放效应显著影响, 实际上这与噪声分析中  $\gamma = 1$  的主导机制一致.

等离子注入极易在注入 GaN 区域引入高密度缺陷态. 当这些缺陷态的平均间距仅为纳米量级, 且相邻缺陷态之间的能量差仅为几个热力学温度对应的能量 (几  $kT$ , 其中  $kT \sim 26$  meV@300 K) 时, 载流子 (电子) 在高温条件下将表现出显著的跳跃输运机制, 即电子有较大概率从一个局域化的缺陷态跳跃至相邻的另一个孤立缺陷态, 从而形成缺陷辅助跳跃电流<sup>[17,18]</sup>. 根据 p-GaN 与 AlGaIn 势垒层的典型厚度, 可估算出在 5 V 栅压下, 器件内部产生的平均横向电场强度较低 (约  $6 \times 10^5$  V/cm). 在此低电场条件下, 缺陷辅助跳跃电流可描述为

$$I \propto V \exp\left(\frac{-E_A}{kT}\right), \quad (4)$$

式中  $E_A$  为跳跃激活能参数. 值得注意的是, (4) 式在数学形式上与图 3(a) 所呈现的低场栅极正向电流特性曲线完全吻合 (即电流随电压/电场的非指数型缓变规律, 区别于高场隧穿或欧姆传导的典型特征). 通过拟合实验数据获得的正向电流激活能  $E_A = 52$  meV, 相当于  $2kT$ . 从输运物理角度解释: 当激活能  $E_A$  接近或低于  $2kT$  时, 电子在热涨落作用下更容易跨越缺陷态间的能垒, 从而显著增强缺陷辅助跳跃传输的概率. 结合前述缺陷态密度高、间距小的条件, 以及低电场下隧穿概率受限的特征, 可推断器件栅极正向电流的主要机制应为缺陷辅助跳跃电流.

当材料中存在高密度缺陷时, 器件在长期电应力作用下易发生性能退化<sup>[19]</sup>. 图 4(a) 对比了氢离子注入 GaN HEMT 在正栅压应力作用下退化前后

的栅极  $I$ - $V$  曲线. 退化后, 正向电流显著增长约 4 个数量级, 而反向电流基本保持稳定, 整体呈现典型的二极管整流行为. 值得注意的是, 在 0.5—1 V 低电压区间, 正向电流与栅压呈现良好的线性关系, 其斜率对应的理想因子  $n = 2.6$  (远高于理想 pn 结的  $n = 1$ ), 表明缺陷辅助隧穿电流占主导<sup>[13]</sup>. 图 4(b) 展示了线性电流区的噪声功率谱密度. 可见, 噪声强度随栅压 (或注入电流) 的升高单调递增, 但斜率  $\gamma = 1$  保持恒定, 进一步证明了缺陷辅

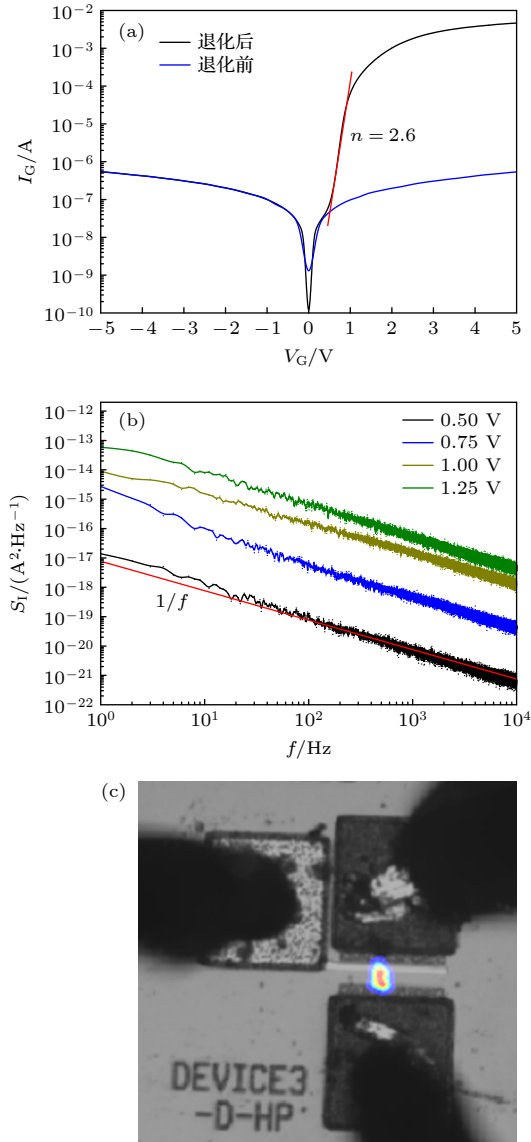


图 4 (a) 氢离子注入 GaN HEMT 栅极退化前后的  $I_G$ - $V_G$  特性曲线; (b) 不同栅压下的噪声功率谱密度; (c) 微光显微镜“热点”图

Fig. 4. (a)  $I_G$ - $V_G$  characteristics of the hydrogen-ion-implanted GaN HEMT gate before and after degradation; (b) noise power spectral density under different gate biases; (c) “hot spot” image obtained by electroluminescence microscopy.

助隧穿电流的可靠性. 我们提出以下退化物理图像: 在持续正栅压应力下, 局部高电场与高电流密度区域会产生显著焦耳热, 导致原本钝化的 Mg—H 复合键断裂 (去氢化), 使 p-GaN 层中的 Mg 受主杂质重新激活. 这一过程在器件局部形成 p 型导电通道, 与 n 型沟道共同构成微型 pn 结结构, 从而诱发正向缺陷辅助跳跃电流向隧穿电流的转变. 为定位退化后的漏电“热点”, 采用近红外微光显微镜 (EMMI) 对漏电位置进行成像, 如图 4(c) 所示. 结果显示: 漏电“热点”呈现高度局域化分布 (红色标记区域), 其强度显著高于周围区域, 直接证明了退化过程的非均匀性特征, 即缺陷聚集或局部电场集中区域优先发生失效.

器件发生退化后, 继续增大栅极电压超过 10 V 时, 将引发电流热击穿现象. 图 5(a) 对比展示了器件击穿前后  $I$ - $V$  特性曲线: 击穿后电流行为由典型的整流特性转变为欧姆特性, 此时可测得的串联电阻约为 1.38 k $\Omega$ . 为精确定位实际击穿位置, 本研究采用锁相红外热成像技术捕捉漏电产生的局部发热“热点”. 该技术的核心原理是抑制非锁相频率以外的噪声信号, 极大提高热成像图的信噪比, 在小功率下提取微弱的“热点”信号<sup>[20]</sup>, 具体流程包括: 1) 利用脉冲源表输出周期性功率, 在“热点”处产生相同频率的动态热信号; 2) 红外相机以固定帧频连续采集样品图像, 获得不同相位角的热分布图; 3) 以加热频率为解锁频率, 对热成像图进行快速傅里叶变换与叠加处理, 获得动态强度图 (或相位图), 直至出现明显“热点”. 图 5(b) 所示为最终获得的“热点”图, 其中红色点位置代表电流击穿的实际位置.

值得注意的是, 锁相热成像虽可在低功率下实现“热点”检测, 但由于未校准材料发射率, 其结果仅为相对热分布而非绝对温度值<sup>[21]</sup>. 针对温度定量分析的需求, 本研究进一步采用逐像素校正技术获取真实微观温度分布, 具体步骤为: 1) 使用标准黑体在多个温度点标定红外相机, 建立像元灰度值与黑体温度的精确映射关系; 2) 阶梯式调节样品温度, 采集系列热成像图, 并计算各像素点的表面热发射率; 3) 在目标电功率条件下获取稳态热像, 结合热发射率图谱计算得到绝对温度分布. 校正过程中需特别注意机械振动控制, 像元位移误差可能导致发射率计算偏差. 图 5(c) 所示为 0.106 W ( $V = 8$  V,  $I = 13.26$  mA) 功率条件下器件表面温度分布图:

相较于其他区域, 击穿“热点”处呈现显著高温特性, 实测最高温度达 33 °C. 必须指出, 黑体矫正时取的温度数值越密, 最终得到的样品温度准确度就越高. 同时, 受红外相机像元尺寸与物镜倍率的限制, 最大温度空间分辨率为 3 μm.

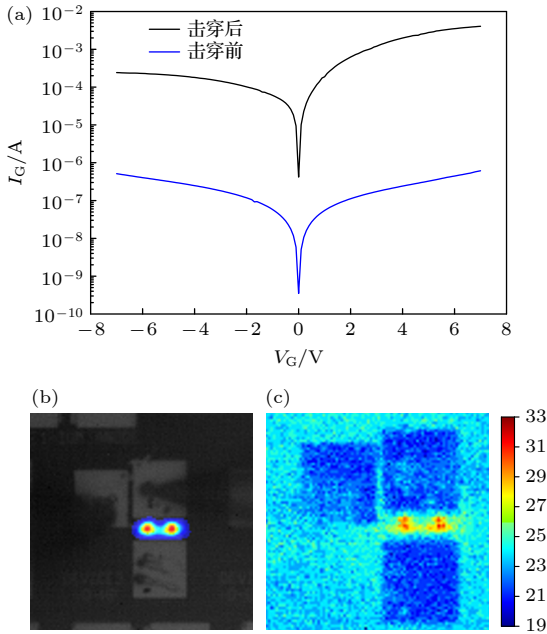


图 5 (a) 击穿前后  $I-V$  特性曲线; (b) 锁相红外“热点”图; (c) 微观温度分布图  
Fig. 5. (a)  $I-V$  characteristics before and after breakdown; (b) lock-in infrared “hot spot” image; (c) microscopic temperature distribution.

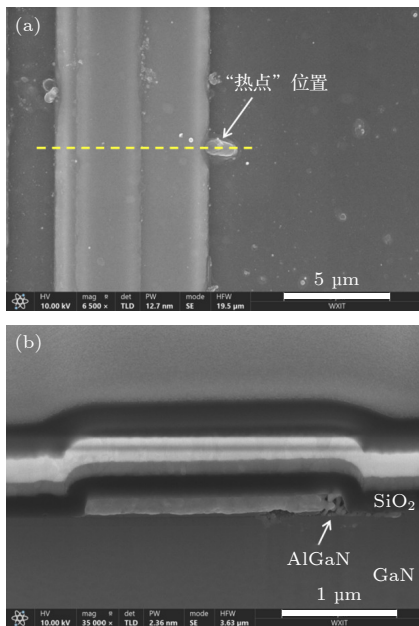


图 6 (a) FIB 切割位置; (b) “热点”处栅极横截面结构  
Fig. 6. (a) FIB milling surface site; (b) cross-sectional structure of the gate electrode at the “hotspot”.

为了分析具体的击穿过程, 我们在“热点”位置进行聚焦离子束 (FIB) 切割. 图 6(a) 的黄色虚线为 FIB 切割的位置, 图 6(b) 所示为栅极的横截面结构. 可见, 在栅极靠近源极一侧的金属和高阻 GaN 区产生了严重的烧伤, 材料由于过流发热而形变. 我们认为, 该位置具有最大的电场强度, 局部缺陷很容易形成高密度的漏电流, 产生大量的焦耳热, 导致 Mg-H 热解形成 p-GaN, 反过来进一步耗尽沟道和增大电场强度, 形成正反馈引发电流击穿.

## 4 结论

本文通过氢离子注入技术制备了耗尽型 GaN HEMT 器件, 结合  $T-I-V$  测试、低频噪声分析及红外锁相显微技术, 系统研究了栅极正向电流的输运机制、退化行为与击穿特性. 主要结论如下: 栅极正向电流的主导输运机制为缺陷辅助的跳跃传导, 其过程为电子在高温作用下从一个孤立的缺陷态跳跃至临近的另一个孤立的缺陷态. 退化后器件在电流线性区的理想因子约为 2.6, 说明导电机制从缺陷辅助跳跃转变为缺陷辅助隧穿. 通过红外锁相显微镜观测发现, 栅极击穿发生于特定局部区域, 而非均匀分布. 在注入功率为 0.106 W 时, 击穿“热点”的最高温度约为 33 °C.

## 参考文献

- [1] Shen L, Heikman S, Moran B, et al. 2001 *IEEE Electron Device Lett.* **22** 457
- [2] Ahmed N, Dutta G 2024 *Microelectron. J.* **143** 106047
- [3] Ambacher O, Foutz B, Smart J, et al. 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 334
- [4] Mishra U K, Parikh P, Wu Y F 2002 *Proc. IEEE* **90** 1022
- [5] Cai Y, Cheng Z, Tang W C W, Lau K M, Chen K J 2006 *IEEE Trans. Electron Device* **53** 2223
- [6] Tang G, Kwan A M H, Wong R K Y, et al. 2017 *IEEE Electron Device Lett.* **38** 1282
- [7] Hao R H, Li W Y, Fu K, et al. 2017 *IEEE Electron Device Lett.* **38** 1567
- [8] Huang X J, Xing Y H, Yu G H, Song L, Huang R, Huang Z L, Han J, Zhang B S, Fan Y M 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 108501 (in Chinese) [黄兴杰, 邢艳辉, 于国浩, 宋亮, 黄荣, 黄增立, 韩军, 张宝顺, 范亚明 2022 *物理学报* **71** 108501]
- [9] Gu Y T, Wang Y Q, Chen J X, Chen J X, Chen B L, Wang M J, Zou X B 2021 *IEEE Trans. Electron Devices* **68** 3290
- [10] Wen Q, Zheng X, Meng X, Feng S W, Xu P, Zhang Y M 2024 *Microelectron. Reliab.* **152** 115298
- [11] Lee J, Bosman G 2003 *Solid-State Electron.* **47** 1973
- [12] Liu J Y, Liu Y, Wang F, Wang Y 2015 *Infrared Phys. Techn.* **71** 448
- [13] Scheer R 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 104505

- [14] Shen X M, Zhao D G, Liu Z S, Hu Z F, Yang H, Liang J W 2005 *Solid-State Electron.* **49** 847
- [15] Xia X Y, Xian M H, Fares C, Ren F, Tadjer M, Pearson S J 2021 *J. Vac. Sci. Technol. A* **39** 053405
- [16] Lai Y M, Li H P, Kim D K, Diroll B T, Murray C B, Kagan C R 2014 *ACS Nano* **8** 9664
- [17] Zhao L N, Chen L L, Yu G H, Yan D W, Yang G F, Gu X F, Liu B, Lu H 2017 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **29** 1447
- [18] Chen L L, Jin N, Yan D W, et al. 2020 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **67** 841
- [19] Mazumdar K, Kala S, Ghosal A 2019 *Superlattices Microstruct.* **125** 120
- [20] Xu C 2008 *M. S. Thesis* (Beijing: Capital Normal University) (in Chinese) [徐川 2008 硕士学位论文 (北京: 首都师范大学)]
- [21] Vellvehi M, Perpiñà X, Lauro G L, Perillo F, Jordà X 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 114901

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

ZHANG Dongkai<sup>1)</sup> HU Qing<sup>1)</sup> GUO Yulong<sup>1)</sup> ZHAI Ying<sup>1)</sup>  
LIU Xushan<sup>1)</sup> WANG Zixu<sup>1)</sup> YU Guohao<sup>2)</sup> YAN Dawei<sup>1)†</sup>

<sup>1)</sup> (School of Integrated Circuits, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

<sup>2)</sup> (Suzhou Institute of Nano-Tech-Bionics (SINANO), Chinese Academy of Science, Suzhou 215123, China)

( Received 29 September 2025; revised manuscript received 10 December 2025 )

## Abstract

For GaN digital circuits, the p-GaN high electron mobility transistor (HEMT) is widely adopted as an enhancement-mode device. To convert enhancement-mode devices into depletion-mode ones, traditional methods of achieving depletion-mode operation rely on high-energy ion etching to selectively remove portions of the p-GaN layer. However, this etching process often leads to surface lattice damage and increase in interface state density, resulting in the formation of gate-edge leakage paths. These issues lead dynamic on-resistance to increase and long-term reliability to decrease. Instead, hydrogen ion implantation has been used as a non-destructive doping modulation technique to mitigate these challenges. In view of this, in this study hydrogen ion implanted technology is adopted to achieve the transition of enhancement-mode p-GaN HEMTs to depletion-mode HEMTs. By employing temperature-dependent current-voltage ( $T$ - $I$ - $V$ ) sweeping, low-frequency noise analysis, and lock-in infrared imaging techniques, the forward current transport, degradation and breakdown behaviors are investigated. The results are shown below. 1) The gate forward  $T$ - $I$ - $V$  curves exhibit a significant power-law relationship in double logarithmic coordinates, the current slope is insensitive to temperature, and the activation energy is derived to be  $\sim 52$  meV. Neither of the classic pn junction theory and the space charge limited current model can explain the current behavior, whereas a defect-mediated electron hopping mechanism is identified as the dominant transport mechanism. 2) A long term of gate bias stress leads to the degradation into a typical rectifying behavior, indicating that the p-GaN region undergoes reconstruction in certain areas. The forward current exhibits an ideality factor of approximately 2.6 and a typical  $1/f$  noise spectrum, indicating that the defect-assisted tunneling current is dominant. 3) High gate bias induces a current breakdown. Lock-in infrared imaging and pixel-by-pixel correction techniques are used to respectively obtain the breakdown site and the “hot spots” temperature.

**Keywords:** hydrogen ion implanted, GaN high electron mobility transistor, transport mechanism, degradation, breakdown

DOI: [10.7498/aps.75.20251343](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251343)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251343](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251343)

† Corresponding author. E-mail: [daweiyan@jiangnan.edu.cn](mailto:daweiyan@jiangnan.edu.cn)



## 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

张东楷 胡晴 郭玉龙 翟颖 刘栩珊 王梓旭 于国浩 闫大为

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

ZHANG Dongkai HU Qing GUO Yulong ZHAI Ying LIU Xushan WANG Zixu YU Guohao YAN Dawei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 050705 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251343

CSTR: 32037.14.aps.75.20251343

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251343>

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>

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>

具有阻挡层的H等离子体处理增强型p-GaN栅AlGaIn/GaN HEMT研究

Study on H plasma treatment enhanced p-GaN gate AlGaIn/GaN HEMT with block layer

物理学报. 2022, 71(10): 108501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212192>

喷墨打印高迁移率铟锌锡氧化物薄膜晶体管

Inkjet printing high mobility indium-zinc-tin oxide thin film transistor

物理学报. 2024, 73(12): 128501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240361>

电子注入层迁移率对Rubrene/C<sub>60</sub>基发光二极管半带隙开启电压的调控

Modulation of half-band-gap turn-on electroluminescence in Rubrene/C<sub>60</sub> based OLEDs by electron injection layer mobility

物理学报. 2024, 73(21): 217202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240864>

离子注入诱导成核外延高质量AlN

Ion implantation induced nucleation and epitaxial growth of high-quality AlN

物理学报. 2024, 73(19): 196101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240674>