文章编号:1000-8608(2024)01-0090-06

AlGaN/GaN HEMT 器件高温栅偏置应力后栅极泄漏电流机制分析

陈欢欢¹,张贺秋^{*1},邢 鹤¹,夏晓川¹,张振中¹,蔡 涛¹, 叶宇帆¹,郭文平²,席庆南²,黄慧诗³,梁晓华⁴,梁红伟¹

(1.大连理工大学集成电路学院,辽宁大连116024;
2.元旭半导体科技股份有限公司,山东潍坊 261000;
3.江苏新广联科技股份有限公司,江苏无锡 214192;
4.中国科学院高能物理研究所,北京 100049)

摘要: AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT)的栅特性会受到温度应力和电应力的影响.在高温栅偏置(HTGB)应力下,器件的栅特性会发生退化,如栅极泄漏电流增大.为了研究退化机理,分析了 AlGaN/GaN HEMT 在栅电压为一2 V 时,250 ℃高温应力作用后的栅极泄漏电流机制. 随着 HTGB 时间的增加,栅极泄漏电流持续增大,受到应力器件在室温下静置后栅极泄漏电流密度恢复约 20%.结果表明,在正向偏置范围内,栅极泄漏电流是由热电子发射(TE)引起的.在反向偏置范围内,普尔-弗伦克尔(PF)发射在小电压范围内占主导地位. 阈值电压附近的范围由势垒层中的陷阱辅助隧穿(TAT)引起;在大电压范围内,福勒-诺德海姆(FN)隧穿导致栅极发生泄漏.

关键词: AlGaN/GaN HEMT;高温栅偏置应力;栅极泄漏电流机制 中图分类号:TN386.3 **文献标识码:**A **doi**:10.7511/dllgxb202401011

0 引 言

由于 GaN 材料具有较大禁带宽度,AlGaN/ GaN HEMT 器件在高温等方面有极大的应用潜 力,如在商业和军事、能源工业的石油和天然气勘 探、汽车和航空航天应用等^[1-2].虽然 AlGaN/ GaN HEMT 器件在高温微波大功率领域有较大 的优势,但是由于其材料的性质及其复杂结构,器 件在高温应用中产生很多缺陷,造成器件性能变 差,如阈值电压的漂移、大的栅极泄漏电流等^[3-4]. AlGaN/GaN HEMT 器件的沟道中二维电子气 (2DEG)通过肖特基栅极调控,栅极泄漏电流增 大会导致器件的功耗增大,可靠性发生很大程度 的退化^[5].因此,研究栅极泄漏电流机制对器件的 高温可靠性是非常重要的.

2017 年 Lee 等研究了 325 ℃下器件高温存储 48 h 后的特性变化,认为是由栅极金属扩散导

致器件发生退化^[6]. 2019 年 Kargarrazi 等将器件 在 500 ℃下存储 25 h 后,认为是由 AlGaN/GaN 界面发生应变使器件栅极泄漏电流发生较大程度 的退化^[7]. 2021年Lu等研究了栅极-10V、漏极 60 V 电压应力下,150 ℃存储 300 h 后器件特性, 发现界面陷阱导致阈值电压漂移,势垒层的退化 是造成福勒-诺德海姆(Fowler-Nordheim, FN)隧 穿和陷阱辅助隧穿(trap assisted tunneling, TAT)的原因^[8]. 栅极泄漏电流的途径有很多,高 温存储后器件栅极泄漏电流已经远远超过热电子发 射所造成的泄漏,普尔-弗伦克尔(Poole-Frenkel, PF)发射电流被认为是反向低偏压下主导的泄漏 机制,低至中偏压下,陷阱辅助隧穿机制主导栅极 泄漏电流,高偏压下则由福勒-诺德海姆隧穿主 导^[9-11].本文通过对 AlGaN/GaN HEMT 器件进 行高温存储研究栅极泄漏电流的退化机制.

收稿日期: 2022-12-14; 修回日期: 2023-11-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11975257,12075045,11875097,62074146);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (DUT20RC(3)042,DUT19RC(3)074,DUT19LK45).

作者简介:陈欢欢(1997—),女,硕士生,E-mail:1375354632@qq.com;张贺秋*(1974—),女,博士,副教授,硕士生导师,E-mail: hqzhang@dlut.edu.cn;梁红伟(1978—),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:hwliang@dlut.edu.cn.

1 实 验

AlGaN/GaN HEMT 器件结构如图 1 所示. 通过有机金属化学气相沉积法 (metal-organic chemical vapor deposition,MOCVD)生长的蓝宝 石衬底上方的异质结构由 2 μm GaN 缓冲层、 400 nm GaN 沟道层、0.8 nm AlN 插入层、23 nm AlGaN 势垒层(Al 组分为 23%)和 2.5 nm GaN 帽层(从下到上)组成. 在沉积源极和漏极金属之 前,通过干法蚀刻阻挡二维电子气(2DEG)以达 到器件隔离的目的.源极和漏极结构均为 Ti(30 nm)/Al(240 nm)/Ti(30 nm)/Au(50 nm)/ Pt(30 nm),在 850 ℃的 N₂ 气氛中退火 2 min 形 成欧姆接触.源极和漏极是对称的,它们之间的距 离为 50 µm. AlGaN/GaN HEMT 器件在沉积栅极金 属之前用 SiO₂ 钝化以提高其防水性能. 钝化层开 窗口后,沉积 Pt(50 nm)/Au(100 nm)以形成肖特 基接触的栅极,其长度为 30 µm,宽度为 500 µm.

源极	SiO ₂	栅极	SiO ₂	漏极
GaN帽层				
AlGaN势垒层				
AIN插入层				
GaN沟道层				
GaN缓冲层				
Al ₂ O3衬底层				

图 1 AlGaN/GaN HEMT 器件结构 Fig. 1 Structure of AlGaN/GaN HEMT device

具体实验过程是在高温装置 mK2000B 上加 热器件,温度设置为 250 ℃,mK2000B 的探针连 接安捷伦 B1505 半导体参数分析仪.在加热过程 中,对栅极施加-2 V 电压应力,并定期测试器件 肖特基特性,直到器件失效.测试参数设置:漏-源 电压 V_{ds} 为 0 V;栅-源电压 V_{g} 从 - 8 V 扫描至 1 V,步长为 0.1 V.

2 结果和分析

2.1 高温存储

图 2(a)显示了器件在 250 ℃下施加应力0~

420 min 后的肖特基特性,间隔为 10 min. 可以看出,栅极泄漏电流随着应力时间的增加而增大,这 表明栅极退化程度随着应力时间的增加而变得剧 烈.

图 2(b)是无应力、应力后及在室温下静置后的器件栅极泄漏电流密度对比图.3 种状态的器件测试条件相同,漏-源电压均为 0 V,栅-源电压 从-8 V 扫描至 1 V,温度条件均为室温.与受到 应力后的器件相比,无应力器件的栅极泄漏电流 密度增加了两个数量级,受到应力器件在室温下 静置后栅极泄漏电流密度恢复了约 20%.



Fig. 2 The Schottky characteristic of device ($V_{ds} = 0$ V)

在图 3 中,电容-电压特性显示了受到应力后 器件的阈值电压正向漂移,这是势垒层电荷和应 力期间产生的界面状态共同作用的结果.为了分 析 HTGB 后栅极泄漏电流机制,需要 AlGaN 势 垒层的电场.电场的表达式如式(1)^[12]所示,其中 *n*_{pol}为极化电荷面密度,其与 Al 组分 *x* 的关系由 式(2)给出.

$$E = \frac{q(n_{\text{pol}} - n_{\text{s}})}{\varepsilon_{0} \varepsilon_{\text{AlGaN}}}$$
(1)

(2)



图 3 无应力器件和室温下静置后器件的电容-电压特性

Fig. 3 The capacitance-voltage characteristics of device fresh and after standing at room temperature

$$qn_{\rm pol} = P_{\rm GaN}^{\rm sp} - (P_{\rm AlGaN}^{\rm sp} + P_{\rm AlGaN}^{\rm pc}) = (0.059\ 3x + 0.049\ 2x^2)C/m^2$$

式中:x 为 0.23,C 为电容密度, ε_0 为真空介电常数,q 为电荷量, n_s 为沟道中电子的面密度,P 为极化强度. AlGaN 的相对介电常数 ε_{AlGaN} 与 Al 组分x 的关系由下式^[13]给出:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{AlGaN}}(x) = 10.4 - 0.3x \tag{3}$$

沟道中电子的面密度 n_s由式(4)^[5]给出,其 中 C 可通过图 3 获得, V_{on}为开态电压,取 0 V, V_{off}为关态电压,取-8 V.

$$n_{\rm s} = \frac{1}{q} \int_{V_{\rm off}}^{V_{\rm on}} C \mathrm{d}V \tag{4}$$

根据上述参数和式(1),可获得受到应力器件 在室温下静置后的电场,如图4所示,其中插图显 示了器件电容和二维电子气(2DEG)面密度.



图 4 受到应力器件在室温下静置后的电场

Fig. 4 Electric field of the stressed device after standing at room temperature

2.2 栅极泄漏电流机制分析

器件栅极泄漏电流的机制包括热电子发射

(thermionic emission, TE)、普尔-弗伦克尔发射、 福勒-诺德海姆隧穿和陷阱辅助隧穿^[14].示意图 如图 5 所示,其中 $E_{\rm fm}$ 和 $E_{\rm fs}$ 分别代表栅极和 GaN 的费米能级.





2.2.1 热电子发射 首先分析正向偏置下的栅 极泄漏电流机制,在这个电压偏置范围,考虑是热 电子发射引起栅极泄漏电流^[5].肖特基接触的栅 极泄漏电流方程如下式所示:

$$J = J_{s} \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \tag{5}$$

式中:J。为反向饱和电流密度;n为理想因子;T 为热力学温度,取值为298 K;k为玻尔兹曼常数.

反向饱和电流密度 J_s 由下式给出:

$$J_{s} = A^{*} T^{2} \exp\left(\frac{-q \varphi_{b}}{kT}\right)$$
(6)

式中:A*为理查逊常数,取值为 33.5 A/(cm² • K²); *9*_b为肖特基势垒高度.

式(7)、(8)分别由式(5)、(6)变形得到:

$$\ln J = \ln J_s + \frac{qV}{nkT} \tag{7}$$

$$\varphi_{\rm b} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A^* T^2}{J_{\rm s}}\right) \tag{8}$$

根据式(7)可以做出电流密度-电压($\ln J-V_g$) 曲线,如图 6 所示,根据其截距可求出饱和电流密 度 J_s ,斜率可求出理想因子 n,其值为 2.07.肖特 基势垒高度可根据式(8)求得,其值为 0.67 V.

2.2.2 普尔-弗伦克尔发射 经过计算,由热电 子发射引起的反向偏置电流远小于实际测得的电 流(负几十次方量级),因此忽略反向偏置下热电 子发射引起的漏电.在小反向偏置电压下栅极泄 漏电流考虑由普尔-弗伦克尔发射引起,其电流由 下式^[9]给出:



图 6 热电子发射的电流密度-电压曲线

Fig. 6 Current density-voltage curve of thermionic emission

$$J_{\rm PF} = c E \exp\left(-\frac{q \,\varphi_{\rm t} - \sqrt{q E/\pi \,\varepsilon_0 \varepsilon_{\rm AIGaN}}}{k \,T}\right) \quad (9)$$

式中:c为常数,E为电场强度, φ_{t} 为电子从缺陷 能级发射的势垒高度.由式(9)变形可得

$$\ln(J_{\rm PF}/E) = m(T)E^{\frac{1}{2}} + c(T)$$
(10)

其中

$$m(T) = \frac{q}{kT} \sqrt{\frac{q}{\pi \,\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{AlGaN}}}} \tag{11}$$

$$c(T) = -\frac{q \varphi_t}{kT} + \ln c \qquad (12)$$

若由普尔-弗伦克尔发射引起栅极泄漏电流,则 $\ln(J_{\rm PF}/E)$ 与 $E^{1/2}$ 应有较好的线性关系.

根据式(10),结合图 2(b)与图 4,可以做出 $\ln(J_{PF}/E)$ 与 $E^{1/2}$ 曲线,如图 7 所示,对应电压为 $-0.4 \sim -3.6$ V. 图中线性拟合较好,说明在此 电压范围内,栅极泄漏电流由普尔-弗伦克尔发射 引起.





2.2.3 陷阱辅助隧穿 在阈值电压附近,栅极泄 漏电流由陷阱辅助隧穿机制主导^[10].陷阱辅助隧 穿电流 *J*_{TAT}由下式^[15]给出:

$$J_{\rm TAT} \propto \exp\left(\frac{-8\pi \sqrt{2qm_{\rm n}^* \varphi_{\rm t}^3}}{3hE}\right) \qquad (13)$$

式中:m^{*},为电子有效质量,h为普朗克常数.

图 8 为 ln J_{TAT} 与 E^{-1} 曲线. 若电流由陷阱辅助隧穿引起,则二者呈良好线性关系. 对应电压为 $-4.5 \sim -5.4$ V.



图 8 ln J_{TAT} 与 E^{-1} 曲线 Fig. 8 Curve of ln J_{TAT} with E^{-1}

2.2.4 福勒-诺德海姆隧穿 在大反向偏置电压 下,栅极泄漏电流由福勒-诺德海姆隧穿引起^[11]. 福勒-诺德海姆隧穿概率由下式^[16]给出:

$$P = \exp\left[-\frac{4}{3\bar{h}}(2m_{n}^{*})^{\frac{1}{2}}E_{g}^{\frac{3}{2}}(qE)^{-1}\right] \quad (14)$$

式中: \overline{h} 为约化普朗克常数; E_g 为 AlGaN 禁带宽度,由下式^[17]给出:

 $E_{g}^{AIGaN} = x E_{g}^{AIN} + (1-x) E_{g}^{GaN} + x(1-x)$ (15)

Al 组分 x 为 0.23. AlN 禁带宽度为 6.2 eV, GaN 禁带宽度为 3.4 eV,得到 AlGaN 禁带宽度 为 4.2 eV.

在大反向偏置电压下器件电场达到饱和,为 1.75 MV/cm,在该电场下福勒-诺德海姆隧穿概 率为 99.9%,接近 1.隧穿电流密度 J_{FN}与电场 *E* 的关系由下式^[5]给出:

$$J_{\rm FN} = AE^2 \exp\left(-\frac{B}{E}\right) \tag{16}$$

其中

$$B = \frac{8\pi \sqrt{2m_{\rm n}^* (q \varphi_{\rm eff})^3}}{3qh}$$
(17)

式中: *q*_{eff} 为有效势垒高度. 式(16)经过变形得

$$\ln(J_{\rm FN}/E^2) = \ln A - B/E \qquad (18)$$

图 9 为 $\ln(J_{FN}/E^2)$ 与 E^{-1} 曲线. 若电流由福 勒-诺德海姆隧穿引起,则二者呈良好线性关系. 对应电压为-6.0~-7.9 V.



图 9 $\ln(J_{\text{FN}}/E^2)$ 与 E^{-1} 曲线 Fig. 9 Curve of $\ln(J_{\text{FN}}/E^2)$ with E^{-1}

3 结 语

AlGaN/GaN HEMT 器件的性能会受到栅 极泄漏的影响.不同电压下栅极泄漏电流受到不 同的调控机制.在正向偏置范围内,栅极泄漏电流 由热电子发射引起.在反向偏置范围内,普尔-弗 伦克尔发射在小电压范围内占主导地位;阈值电 压附近的范围由势垒层中的陷阱辅助隧穿引起; 在大电压范围内,福勒-诺德海姆隧穿主要导致栅 极泄漏电流.

参考文献:

- [1] PALACIOS P, WEI M D, ZWEIPFENNIG T, et al. AlGaN/GaN high electron mobility transistor oscillator for high temperature and high frequency [J]. Electronics Letters, 2021, 57 (3): 148-150.
- [2] LIN Y S, GOA W H. High-temperature stability of improved AlGaN/AlN/GaN HEMT with pre-gate metal treatment [J]. IEICE Electron Express, 2019, 16(5): 20181046.
- [3] SURIA A J, YALAMARTHY A S, SO H Y, et al. DC characteristics of ALD-grown Al₂O₃/ AlGaN/GaN MIS-HEMTs and HEMTs at 600 ℃ in air [J]. Semiconductor Science and Technology, 2016, 31(11): 115017.
- [4] HUANG L H, YEH S H, LEE C T, et al. AlGaN/GaN metal-oxide-semiconductor high-electron mobility transistors using oxide insulator grown by photoelectrochemical oxidation method [J]. IEEE Electron Device Letters, 2008, 29(4): 284-286.
- [5] TURUVEKERE S, KARUMURI N, RAHMAN A A, et al. Gate leakage mechanisms in AlGaN/GaN

and AlInN/GaN HEMTs: Comparison and modeling [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(10): 3157-3165.

- [6] LEE J M, MIN B G, JU C W, et al. High temperature storage test and its effect on the thermal stability and electrical characteristics of AlGaN/GaN high electron mobility transistors [J]. Current Applied Physics, 2017, 17(2): 157-161.
- [7] KARGARRAZI S, YALAMARTHY A S, SATTERTHWAITE P F, et al. Stable operation of AlGaN/GaN HEMTs for 25 h at 400 °C in air [J].
 IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2019, 7: 931-935.
- [8] LU Meng, CHEN Yiqiang, LIAO Min, et al. Degradation mechanism of D-mode GaN HEMT based on high temperature reverse bias stress [C]//
 2021 IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia, WiPDA Asia 2021. Wuhan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021: 167-170.
- [9] LUMBANTORUAN F, WU C H, ZHENG X X, et al. Analysis of leakage current mechanism for Ni/Au Schottky contact on InAlGaN/GaN HEMT [J]. Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science, 2018, 215(11): 1700741.
- LIANG Jingxian, LAI Longkun, ZHOU Zhaokun, et al. Trap-assisted tunneling current of ultrathin InAlN/GaN HEMTs on Si (111) substrate [J].
 Solid-State Electronics, 2019, 160: 107622.
- [11] ZHAO Shenglei, HOU Bin, CHEN Weiwei, et al. Analysis of the breakdown characterization method in GaN-based HEMTs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1517-1527.
- [12] ZHEN Zixin, WANG Quan, QIN Yanbin, et al. Comparative study on characteristics of AlGaN/GaN metal-insulator-semiconductor high-electron-mobility transistors [J]. Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science, 2022, 219(10): 2200010.
- [13] AMBACHER O, FOUTZ B, SMART J, et al. Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaN/GaN heterostructures [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(1): 334-344.
- [14] DEBNATH A, DASGUPTA N, DASGUPTA A.

Charge-based compact model of gate leakage current for AlInN/GaN and AlGaN/GaN HEMTs [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(3): 834-840.

- LIU Z H, NG G I, ARULKUMARAN S, et al. Temperature-dependent forward gate current transport in atomic-layer-deposited Al₂O₃/AlGaN/ GaN metal-insulator-semiconductor high electron mobility transistor [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(16): 163501.
- [16]尚春宇,杜艳秋,吴 研. p-n结的隧道击穿模型研究[J]. 半导体光电,2010,31(2):263-265.
 SHANG Chunyu, DU Yanqiu, WU Yan. Model research on p-n junction tunnel breakdown [J].
 Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(2): 263-265. (in Chinese)
- [17] BRUNNER D, ANGERER H, BUSTARRET E, et al. Optical constants of epitaxial AlGaN films and their temperature dependence [J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(10): 5090-5096.

Mechanism analysis of gate leakage current of AlGaN/GaN HEMT devices after high temperature gate bias stress

CHEN Huanhuan¹, ZHANG Heqiu^{*1}, XING He¹, XIA Xiaochuan¹, ZHANG Zhenzhong¹, CAI Tao¹, YE Yufan¹, GUO Wenping², XI Qingnan², HUANG Huishi³, LIANG Xiaohua⁴, LIANG Hongwei¹

- (1. School of Integrated Circuits, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 - 2. Yuanxu Semiconductor Technology Co., Ltd., Weifang 261000, China;
 - 3. Jiangsu Xinguanglian Technology Co., Ltd., Wuxi 214192, China;
 - 4. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The gate characteristics of AlGaN/GaN high electron mobility transistors (HEMT) are affected by both temperature stress and electrical stress. Under the high temperature gate bias (HTGB) stress, the gate characteristics of the device are degraded, for example the gate leakage current is increased. To study the degradation mechanism, the mechanism of gate leakage current of AlGaN/GaN HEMT is analyzed after high temperature stress at 250 °C while the gate voltage is -2 V. With the increase of HTGB time, the gate leakage current increases continuously, and the gate leakage current density of stressed device recovers about 20% after standing at room temperature. The result shows that the gate leakage current is caused by thermionic emission (TE) in the forward bias range. In the reverse bias range, the Poole-Frenkel (PF) emission dominates in the small voltage range; In the range near the threshold voltage, the gate leakage current is caused by the trap assisted tunneling (TAT) in the barrier layer; In the large voltage range, the Fowler-Nordheim (FN) tunneling causes the gate leakage.

Key words: AlGaN/GaN HEMT; high temperature gate bias stress; mechanism of gate leakage current