

微波 GaN 器件温度效应建模*

王帅¹⁾²⁾ 葛晨²⁾ 徐祖银²⁾ 成爱强²⁾ 陈敦军^{1)†}

1) (南京大学电子科学与工程学院, 南京 210033)

2) (南京电子器件研究所, 南京 210016)

(2024 年 5 月 30 日收到; 2024 年 7 月 19 日收到修改稿)

通过对 GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 在不同温度下直流特性变化的现象与机理分析, 本文基于 EEHEMT 等效电路模型, 针对 GaN HEMT 漏源电流 I_{ds} 提出了一种温度效应模型. 该模型考虑到温度对 GaN HEMT 阈值电压、膝点电压、饱和电流等方面的影响, 对原始 EEHEMT 模型中的 I_{ds} 公式进行修改, 将 I_{ds} 公式中的关键参数与温度建立起适当的函数关系式. 修改后的模型能够准确反映 GaN HEMT 在不同温度下的电性能变化趋势. 为了进一步验证该温度效应模型的精确度, 本文在片测试了由南京电子器件研究所研制的 0.25 μm 工艺不同尺寸 GaN HEMT 在 -55, -25, 25 和 75 $^{\circ}\text{C}$ 温度下的直流特性. 对比在不同温度下的模型仿真数据与测试结果, 两者相对误差均小于 5%, 表明本文提出的温度效应模型在 -55—75 $^{\circ}\text{C}$ 温度下能够精准表征 GaN 器件的输出特性及转移特性.

关键词: AlGaIn/GaN, 高电子迁移率晶体管, 模型, 直流特性**PACS:** 71.55.Eq, 85.30.De**DOI:** 10.7498/aps.73.20240765

1 引言

凭借第三代半导体材料的良好性能, 氮化镓高电子迁移率晶体管 (HEMT) 广泛应用于高频大功率等领域, 并在极端环境温度中表现出巨大的工作潜力^[1-3]. 为了有效优化器件工艺及结构、指导电路设计和提高电路性能, 精确的 GaN HEMT 模型尤为重要^[4]. 其中, EEHEMT 等效电路模型将 DC 和 AC 参数分离, 一方面降低了模型参数提取复杂度, 大大缩短了模型提取时间; 另一方面将 DC 和 AC 参数分离后, 模型仍然能够精确表征 GaN HEMT 的电学特性, 并且在电路仿真过程中具有良好的收敛性. 因此 EEHEMT 模型成为当前工程应用最为广泛的模型之一^[5-7].

GaN HEMT 常应用于不同环境温度的整机系统中, 其性能也会随环境温度的变化而发生明显改变, 主要表现为阈值电压的漂移、膝点电压的移动、跨导和输出电流的变化^[8-11], 如图 1 所示. GaN HEMT 电学性能主要由异质结处二维电子气 (2DEG) 的状态决定, 2DEG 的迁移率和浓度受沟道温度的影响较大, 而沟道温度与环境温度紧密相关^[12,13]. 因此, 建立一个能够精确表征 GaN HEMT 在不同环境温度下的电性能模型, 对于器件输入输出电路的精准设计是至关重要的.

本文基于 EEHEMT 模型, 对漏源电流公式中的关键参数提出了温度缩放函数. 通过关键参数关于温度的合理缩放, 漏源电流公式可以准确反映出 GaN 器件电学性能在不同温度下的变化, 对工作在极端环境温度下的 GaN 器件设计具有重要指导意义.

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF0707800, 2022YFF0707801) 和江苏省重点研发计划产业前瞻与关键核心技术 (批准号: BE2022070, BE2022070-2) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: djchen@nju.edu.cn

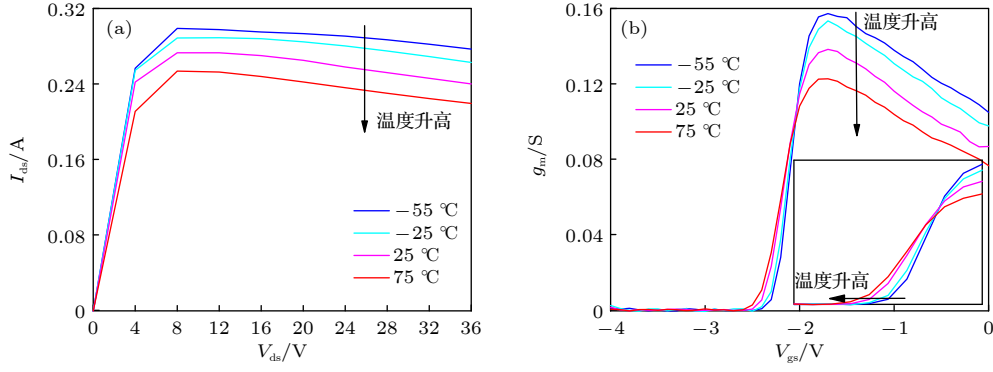


图 1 不同温度下 GaN HEMT 直流特性曲线 (a) 输出特性; (b) 转移特性

Fig. 1. I - V characteristic curves of the GaN device under different ambient temperatures: (a) The transfer characteristics; (b) the output characteristics.

2 温度效应模型

2.1 EEHEMT 漏源电流 I_{ds} 模型

EEHEMT 模型根据跨导 g_m 分布将漏源电流 I_{ds} 分为 4 个不同区域, 如图 2 所示, 分别为截止区、线性区、饱和区和压缩区 [14]. 具体漏源电流公式如下 [15–18]:

$$I_{ds} = \frac{I'_{ds}}{1 + P_{diss}/P_{eff}}, \quad I'_{ds} = I_{dso} \cdot (1 + K_{apa} \cdot V_{ds}) \cdot \tanh\left(\frac{3V_{ds}}{V_{sat}}\right), \quad P_{diss} = I'_{ds} \cdot V_{ds},$$

$$I_{dso} = \begin{cases} 0, & V_{gs} \leq V_t, \\ \frac{G_{mmax}}{2} \cdot [G(V_{gs}) + V(V_{gs}) - (V_{to} - V_{ch})], & V_t < V_{gs} \leq V_g, \\ G_{mmax} \cdot \left(V(V_{gs}) - \frac{V_{go} + V_{to}}{2} + V_{ch}\right), & V_g < V_{gs} \leq V_c, \\ G_{mmax} \cdot \left(V(V_{gs}) - \frac{V_{go} + V_{to}}{2} + V_{ch}\right) - I_{dsv}(V_{gs}), & V_{gs} > V_c, \end{cases} \quad (1)$$

其中, V_{gs} 为栅源电压, V_{ds} 为漏源电压, G_{mmax} 为跨导峰值, V_{ch} 为跨导参数 G_{amma} 不再影响 I - V 曲线时的栅源电压, K_{apa} 为输出电导, V_{sat} 为饱和电压参数, P_{eff} 为沟道自热参数.

对于划分区域的 V_t , V_g 及 V_c , 有:

$$V_t = \frac{V_{to} - V_{ch}}{1 + G_{amma} \cdot (V_{dso} - V_{ds})} + V_{ch}, \quad (2a)$$

$$V_g = \frac{V_{go} - V_{ch}}{1 + G_{amma} \cdot (V_{dso} - V_{ds})} + V_{ch}, \quad (2b)$$

$$V_c = V_{co} + M_u \cdot (V_{dso} - V_{ds}), \quad (2c)$$

其中, V_{to} 为器件阈值电压, V_{go} 为跨导最大值对应的栅源电压, V_{co} 为跨导开始下降时对应的栅源电压, V_{dso} 为器件正常工作时的漏源电压, M_u 为跨

导补偿参数.

中间变量 $V(V_{gs})$, $G(V_{gs})$ 以及 $I_{dsv}(V_{gs})$ 的表达式为

$$V(V_{gs}) = (V_{gs} - V_{ch}) \cdot [1 + G_{amma} \cdot (V_{dso} - V_{ds})], \quad (3a)$$

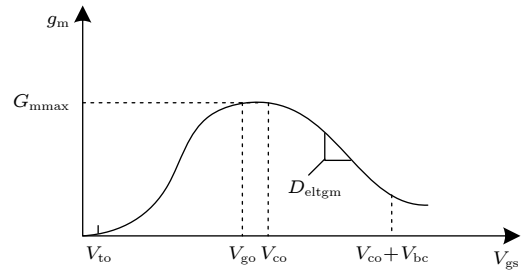


图 2 GaN 器件 EEHEMT 模型跨导曲线示意图

Fig. 2. g_m - V_{gs} in EEHEMT model of the GaN device.

$$G(V_{gs}) = \left(\frac{V_{to} - V_{go}}{\pi} \right) \sin \left[\pi \cdot \frac{V(V_{gs}) - (V_{go} - V_{ch})}{V_{to} - V_{go}} \right], \quad (3b)$$

$$I_{dsv}(V_{gs}) = D_{eltgm} \cdot \left[\frac{(V_{gs} - V_c) \cdot m}{2} - \frac{\alpha^2}{2} \right] \times \log \left(\frac{(V_{gs} - V_c) + m}{\alpha} \right) - \alpha \cdot (V_{gs} - V_c), \quad (3c)$$

$$m = \sqrt{\alpha^2 + (V_{gs} - V_c)^2}, \quad (3d)$$

其中, α 为跨导从饱和区域到压缩区域的变化参数, D_{eltgm} 为跨导压缩特性的斜率.

2.2 温度缩放模型

源接触电阻 R_s 、漏接触电阻 R_d 为源/漏极金属通过 AlGaIn 势垒层连接到 2DEG 的电阻^[19], 而金属具有正电阻率温度系数, 且随温度线性变化^[20]. 阈值电压 V_{to} 为栅下 2DEG 完全耗尽时施加的栅源电压, 表达式如下:

$$V_{to} = \varphi_b - \Delta E_c - \frac{\sigma}{\varepsilon} d - V_p, \quad (4)$$

其中, φ_b 为肖特基势垒高度, ΔE_c 为 AlGaIn 和 GaN 的导带突变量, σ 为异质结界面的极化电荷密度, d 为 AlGaIn 层厚度, ε 为 AlGaIn 层介电常数.

根据 (4) 式可知, 阈值电压与肖特基势垒、导带不连续性、异质结界面总极化电荷密度等多种因素有关, 而这些因素均受温度影响, 文献^[21]指出阈值电压随温度近似线性变化. 跨导峰值 G_{imax} 是跨导曲线中的最大值, 跨导可以通过转移特性曲线中漏极电流 I_{ds} 对栅源电压 V_{gs} 的导数得到:

$$g_m = \frac{W}{L} C_{AlGaIn} \mu \cdot (V_{gs} - V_{to}), \quad (5)$$

其中, L 为栅长, W 为栅宽, C_{AlGaIn} 为势垒层电容, μ 为电子迁移率, n_{2DEG} 为二维电子气浓度. 当温度变化时, 二维电子气浓度并没有发生量级上的变化, 而迁移率受散射影响, 与温度呈指数变化关系^[22], 即 $\mu = A \cdot T^{-\beta}$, 因此, 跨导峰值 G_{imax} 随温度近似指数变化.

为了完善模型对不同温度 GaN HEMT 直流特性的精准表征能力, 本论文针对 EEHEMT 模型 I_{ds} 公式中的 V_{to} , V_{go} , G_{imax} , P_{eff} 和源接触电阻 R_s 、漏接触电阻 R_d 参数提出了关于温度的缩放函数, 具体公式如下:

$$R_s(T) = R_s \cdot [1 + T_{rs} \cdot (T - T_{nom})], \quad (6a)$$

$$R_d(T) = R_d \cdot [1 + T_{rd} \cdot (T - T_{nom})], \quad (6b)$$

$$V_{to}(T) = V_{to} \cdot [1 + T_{vto} \cdot (T - T_{nom})], \quad (6c)$$

$$V_{go}(T) = V_{go} \cdot [1 + T_{vgo} \cdot (T - T_{nom})], \quad (6d)$$

$$G_{imax}(T) = G_{imax} \cdot [1 + T_{gimax1} \cdot (T - T_{nom})] \times \left(\frac{T + 273}{T_{nom} + 273} \right)^{T_{gimax2}}, \quad (6e)$$

$$P_{eff}(T) = P_{eff} \cdot \left(1 + \frac{T - T_{nom}}{T_{nom} + 273} \right)^{T_{peff}}, \quad (6f)$$

式中 R_s , R_d , V_{to} , V_{go} , G_{imax} , P_{eff} 均为常温下提取的参数值, T_{rs} , T_{rd} , T_{vto} , T_{vgo} , T_{gimax1} , T_{gimax2} , T_{peff} 为温度效应模型相关参数. 另外, T 表示 GaN HEMT 实际工作温度, T_{nom} 表示常温, 即 $T_{nom} = 25$ °C.

3 测试系统与温度模型提取结果

本文采用 MPI 公司 TS2000-SE 高低温探针台和 Maury 公司 IVCAD 系统对 GaN HEMT 进行了不同温度下的脉冲直流特性测试. 整套测试系统包括高低温探针台、控制单元、栅电源、漏电源, 如图 3(a) 所示. 其中, 栅电源 AM3211、漏电源 AM3221 分别为器件栅极、漏极提供信号, 控制单元 AM3203 用于驱动栅电源和漏电源. 为了进一步验证本论文提出的温度效应模型的普适性, 本次实验采用了由南京电子器件研究所研制的 3 种不同尺寸的 GaN HEMT, 如图 3(b) 所示, 栅宽分别为 400, 800 和 1200 μm .

GaN HEMT 直流特性测试包括输出特性 I_{ds} - V_{ds} 和转移特性 I_{ds} - V_{gs} , 测试条件设置成 V_{ds} 为 0—36 V、步长为 2 V, V_{gs} 为 -4.0—0.0 V、步长为 0.1 V. 本文分别利用 -55, -25, 25 和 75 °C 四种温度下的 GaN HEMT 直流特性测试数据进行温度效应模型参数提取. 通过模型参数提取发现, R_s , R_d , V_{to} , V_{go} , G_{imax} , P_{eff} 受温度影响较为明显, 提取结果如图 4—图 7 所示, 温度效应模型相关参数如表 1 所示.

由于温度升高, 2DEG 漂移速度下降, 源/漏等效串联电阻增大, 沟道电场强度降低, 此时需要更高的漏极电压才能使电子达到饱和速度, 因此膝点电压会向正向移动^[23]. R_d 和 R_s 随温度升高呈线性增大, 且 R_d 和 R_s 关于温度的缩放与不同温

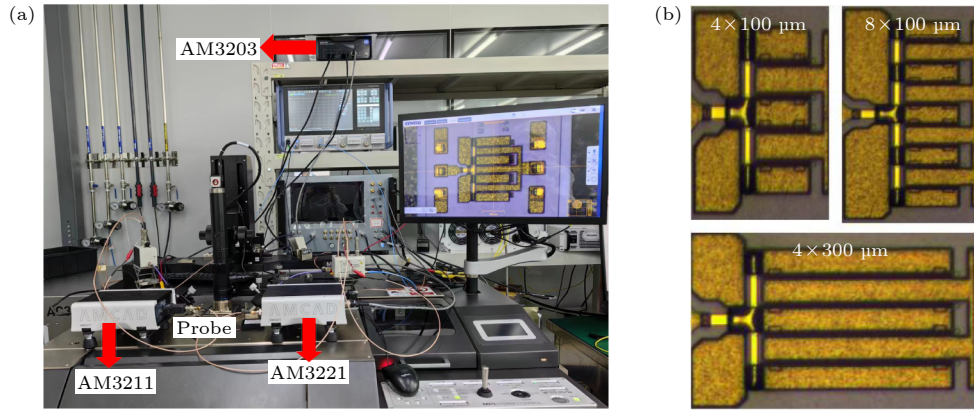


图3 测试系统 (a) 直流特性测试平台; (b) 不同尺寸 GaN HEMT 实物图

Fig. 3. The test system: (a) Measurement for the DC characteristics; (b) photographs of GaN HEMTs.

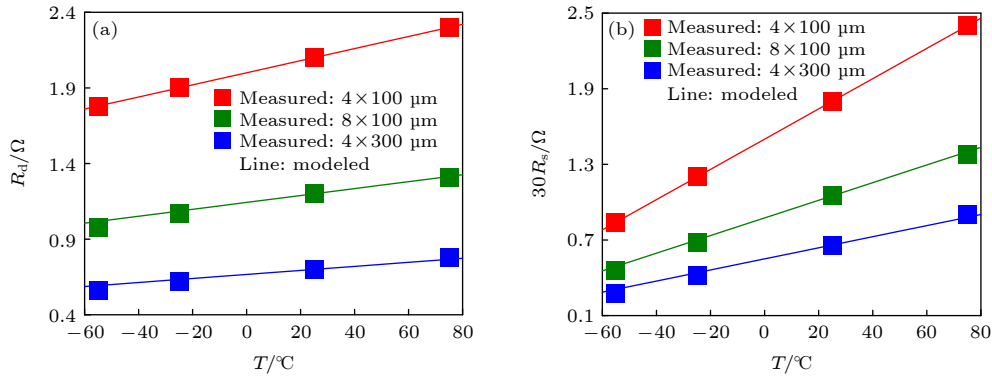
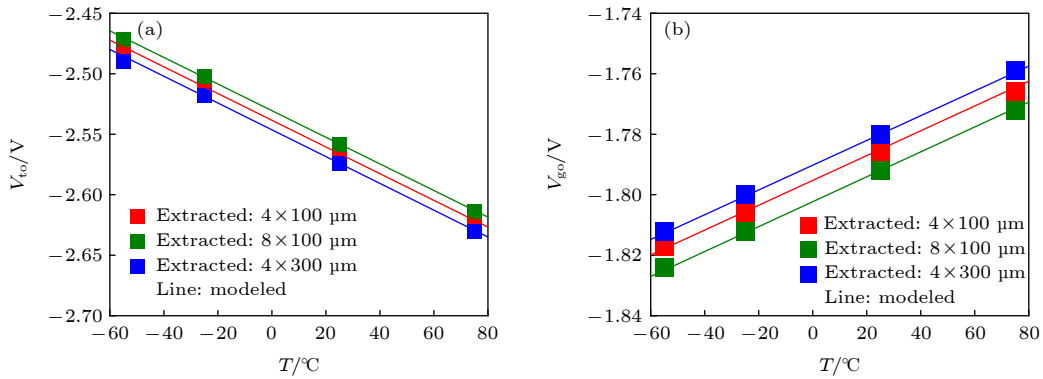
图4 不同温度下仿真和实测的 R_d/R_s 对比Fig. 4. Comparison between modeled and measured results of R_d and R_s under different temperatures.图5 不同温度下仿真和实测的 V_{to} 和 V_{go} 对比Fig. 5. Comparison between modeled and measured results of V_{to} and V_{go} under different temperatures.

表1 温度效应相关参数

Table 1. Values of the parameters related to temperature effect.

参数	T_{rd}	T_{rs}	T_{vto}	T_{vgo}	T_{peff}	T_{gmmax1}	T_{gmmax2}
数值	1.91×10^{-3}	6.67×10^{-3}	4.30×10^{-4}	-2.30×10^{-4}	-0.81	-2.66×10^{-3}	0.44

度下提取的值基本吻合, 如图4所示. 与此同时, 同一温度下, R_d , R_s 随器件尺寸变化而变化, 尺寸越大, 电路结构可以等效为电阻并联, 即电阻值变小^[24].

对于 GaN HEMT, 阈值电压与环境温度的正、负相关性均有研究报道^[25,26]. 本文中所测试的 GaN HEMT 的阈值电压随温度升高而降低, 呈现出负线性相关性. 器件峰值跨导对应的栅源电压

V_{go} 也会发生改变, 随温度升高而线性增大, 如图 5 所示, V_{to} , V_{go} 关于温度的缩放与不同温度下提取的值相吻合. 由于 3 只器件采用的工艺相同, 故器件栅极对沟道的控制能力也是相同的, 所以同一温度下, 不同尺寸器件的 V_{to} , V_{go} 基本保持不变, 由于测试误差, 图 5 中不同尺寸下 V_{to} , V_{go} 稍有波动, 但相对变化率均小于 1%, 可忽略不计.

随着环境温度的上升, 大量的 2DEG 在运动过程中遭到散射, 电子迁移率与温度的 $3/2$ 次方成反比, 而跨导与载流子迁移率呈正向关系, 因此, 峰值跨导 G_{mmax} 随温度上升呈指数下降, 如图 6 所示, 温度越高, 峰值跨导下降的趋势越为陡峭. 跨导为漏源电流对于栅源电压的一阶导数, 而漏源电流的大小取决于 GaN 器件异质结 2DEG 浓度, 所以同一温度下, 器件尺寸变大, 2DEG 浓度变大, 漏源电流越大, 相应地, 跨导峰值也随之变大.

微波 GaN HEMT 器件的沟道温度对器件电性能有较大影响, 温度依赖的电阻率、载流子浓度、迁

移率等都会造成器件最大电流的退化, 而器件的大多退化机理是随温度指数加速的, 因此, 电流崩塌程度随温度升高呈指数增加. 参数 P_{eff} 即表征电流崩塌程度, 且电流崩塌程度越大, P_{eff} 值越小, 如图 7 所示. 同一温度下, 电流崩塌由自热效应引起, 而单位自热效应程度取决于单位面积功耗的大小, 虽然尺寸增加, 但是单位面积功耗不变, 因此单位面积电流崩塌程度不变, 即 P_{eff} 与尺寸呈正相关.

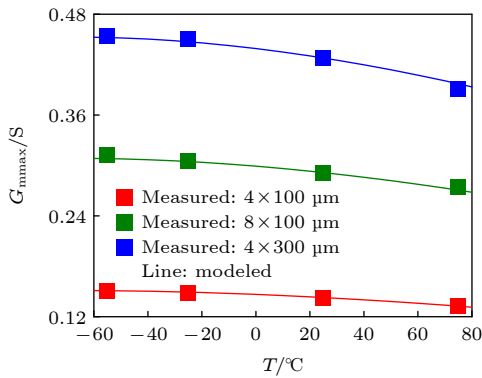


图 6 不同温度下仿真和实测的 G_{mmax} 对比

Fig. 6. Comparison between modeled and measured results of G_{mmax} under different temperatures.

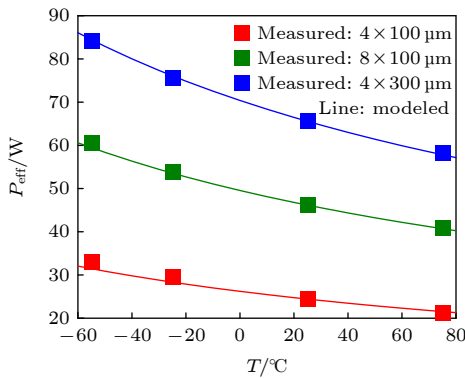


图 7 不同温度下仿真和实测的 P_{eff} 对比

Fig. 7. Comparison between modeled and measured results of P_{eff} under different temperatures.

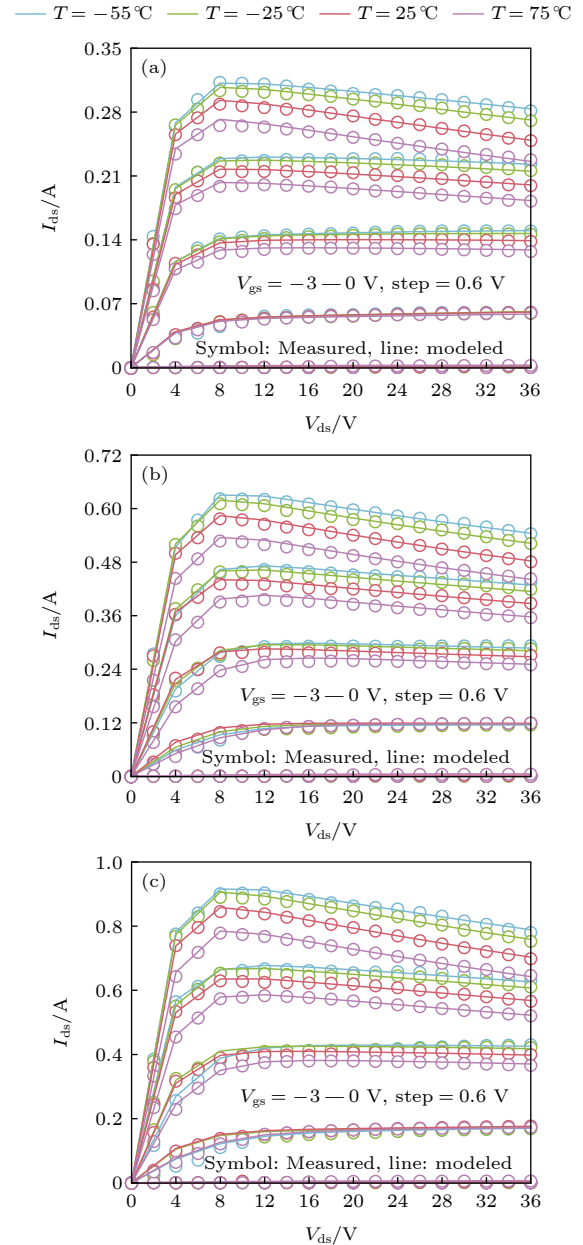


图 8 不同温度下输出特性拟合结果 (a) 400 μm 器件; (b) 800 μm 器件; (c) 1200 μm 器件

Fig. 8. The fitting result of the output characteristics I_{ds} - V_{ds} under different ambient temperatures: (a) The 400- μm -wide device; (b) the 800- μm -wide device; (c) the 1200- μm -wide device.

4 模型验证

本文通过 Verilog-A 代码将关键参数随温度的缩放函数加入到 EEHEMT 模型中, 对 GaN HEMT 进行不同温度下直流特性的拟合. 最终, 一个模型可实现不同温度下直流特性的精准表征, 如图 8 和图 9 所示.

由图 8 可知, 在器件工作温度从 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 过程中, 由于迁移率的退化, 源漏电流降

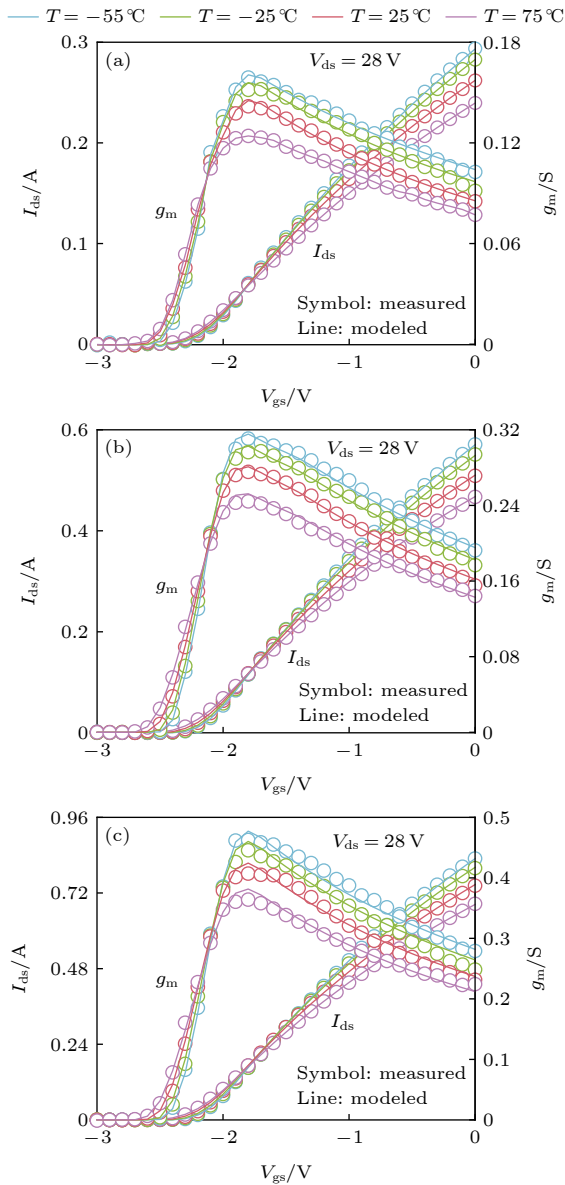


图 9 不同温度下转移特性拟合结果 (a) $400\text{ }\mu\text{m}$ 器件; (b) $800\text{ }\mu\text{m}$ 器件; (c) $1200\text{ }\mu\text{m}$ 器件

Fig. 9. The fitting result of the transfer characteristics $I_{\text{ds}}-V_{\text{gs}}$ under different ambient temperatures: (a) The $400\text{-}\mu\text{m}$ -wide device; (b) the $800\text{-}\mu\text{m}$ -wide device; (c) the $1200\text{-}\mu\text{m}$ -wide device.

低, 同时, 随着温度的升高, 表面陷阱对沟道电子的俘获的能力增强, 因此源漏电流在不断的减小. 另外, 饱和区电流崩塌现象变得更加明显. 加入温度效应的 EEHEMT 模型可以准确地表现出该变化, 实现了高低温环境下对输出特性的精准表征.

转移特性是 GaN HEMT 另外一个重要的直流特性, 其可以直接反映器件的栅控能力. 对转移特性进行一阶求导, 可以得到器件跨导, 拟合结果如图 9 所示 (本文选取 $V_{\text{ds}}=28\text{ V}$). 同样地, 器件的转移特性和跨导随温度的变化表现出与输出特性相同的规律. 在 $-55\text{--}75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 峰值跨导随温度升高而减小, 仿真数据与测试数据高度吻合. 输出特性与转移特性两者的拟合误差均小于 5% , 表明本文提出的温度效应模型在 $-55\text{--}75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下能够精准表征 GaN 器件的直流特性.

5 结论

本文在 EEHEMT 等效电路模型的基础上, 考虑温度对 GaN 器件电学特性的影响, 修正了漏源电流公式, 提出了一种直流特性温度效应模型. 经由测试数据验证, 该温度效应模型能够更加准确反映不同环境温度下 GaN 器件性能的变化趋势, 更加精确表征 GaN 器件在不同环境温度下的直流特性. 表明本文提出的温度效应模型对不同温度下电路的直流性能分析和高可靠性设计极具指导意义. 为进一步拓展本文所提模型的普适性, 后续将对本征电容的温度效应开展研究.

参考文献

- [1] Mishra U K, Parikh P, Wu Y F 2002 *Proc. IEEE* **90** 1022
- [2] Quay R 2008 *Gallium Nitride Electronics* (Berlin: Springer-Verlag) pp23–30
- [3] Zhao Z P 2015 *Semicond. Tech.* **40** 1 (in Chinese) [赵正平 2015 半导体技术 **40** 1]
- [4] Maas S A 2003 *Nonlinear Microwave and RF Circuits Second Edition* (Norwood: Artech House Publisher) pp29–55
- [5] Baylis C, Dunleavy L, Connick R 2009 *IEEE 10th Annual Wireless and Microwave Technology Conference* Clearwater, USA, April 20–21, 2009 p1
- [6] Eskandari S, Hamedani F T 2012 *Proceedings of the 19th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems* Warsaw, Poland, May 24–26, 2012 p360
- [7] Hajji R, Poulton M, Crittenden D B, Gengler J, Xia P 2014 *9th European Microwave Integrated Circuit Conference* Rome, Italy, October 6–7, 2014 p373
- [8] Darwish A M, Huebschman B D, Viveiros E, Hung H A 2009 *IEEE T. Microw. Theory* **57** 3205

- [9] Ghosh S, Sharma K, Agnihotri S, Chauhan Y S, Khandelwal S, Fjeldly T A, Yigletu F M, Iñiguez B 2014 *IEEE 2nd International Conference on Emerging Electronics* Bengaluru, India, December 3–6, 2014 p1
- [10] Huque M A, Eliza S A, Rahman T, Huq H F, Islam S K 2009 *Solid-State Electron.* **53** 341
- [11] Lin Q, Jia L N, Hu D H, Chen S W, Liu L S, Liu C, Liu J L 2022 *J. Nanjing Univ. Posts Telecommun.* **42** 42 (in Chinese) [林倩, 贾立宁, 胡单辉, 陈思维, 刘林盛, 刘畅, 刘建利 2022 南京邮电大学学报 **42** 42]
- [12] Khan M K, Alim M A, Gaquiere C 2021 *Microelectron. Eng.* **238** 111508
- [13] Tokuda H, Yamazaki J, Kuzuhara M 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 104509
- [14] Zomorrodian V, Pei Y, Mishra U K, York R A 2010 *Phys. Status Solidi* **7** 2450
- [15] Chang Y H, Chang J J 2007 *IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits* Tainan, Taiwan, December 20–22, 2007 p237
- [16] Curtice W R 1980 *IEEE T. Microw. Theory* **28** 448
- [17] Dhar J, Garg S K, Arora P K, Rana S S, 2007 *International Symposium on Signals, Circuits and Systems* Iasi, Romania, July 13–14, 2007 p1
- [18] Cheng A Q, Wang S, Zu Z Y, He J, Zhang T C, Bao H G, Ding D Z 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 147103 (in Chinese) [戚爱强, 王帅, 徐祖银, 贺瑾, 张天成, 包华广, 丁大志 2023 物理学报 **72** 147103]
- [19] Alex L, John S, Michael D R, David R (translated by Duan B X, Yang Y T) 2008 *GaN Transistors for Efficient Power Conversion Second Edition* (Beijing: China Machine Press) pp36–37 (in Chinese) [亚历克斯·利多, 约翰·斯其顿, 迈克尔·德罗伊, 戴维·罗伊施 (段宝兴, 杨银堂译) 2018 氮化镓功率晶体—器件、电路与应用第二版 (北京: 机械工业出版社) 第36—37页]
- [20] Cuervo R, Pedrós J, Navarro A, Braña A F, Paul J L, Muñoz E, Calle F 2008 *Mater. Electron.* **19** 189
- [21] Hatano M, Kunishio N, Chikaoka H, Yamazaki J, Makhzani Z B, Yafune N, Sakuno K, Hashimoto S, Akita K, Yamamoto Y, Kuzuhara M 2010 *CS MANTECH Conference* Oregon, USA, May 17–20, 2010 p101
- [22] Zhang X B, Liu N Z, Yao R H 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 157303 [张雪冰, 刘乃漳, 姚若河 2020 物理学报 **69** 157303]
- [23] Ren C J, Chen T S, Jiao G, Li X 2007 *Res. Prog. Solid State Electron.* **27** 329 (in Chinese) [任春江, 陈堂胜, 焦刚, 李肖 2007 固体电子学研究与进展 **27** 329]
- [24] Gao J J 2007 *RF Microwave Modeling Technology for Field Effect Transistors* (Beijing: Electronic Industry Publishing) pp75–125 (in Chinese) [高建军 2007 场效应晶体管射频微波建模技术 (北京: 电子工业出版社) 第75—125页]
- [25] Wang Y H, Liang Y C, Samudra1 G S, Chang T F, Huang C F, Yuan L, Lo G Q 2013 *Semicond. Sci. Tech.* **28** 125010
- [26] Islam S, Alim M A, Chowdhury A Z, Gaquiere C 2022 *JTAC* **147** 10991

Modeling of temperature effect on DC characteristics of microwave GaN devices^{*}

Wang Shuai¹⁾²⁾ Ge Chen²⁾ Xu Zu-Yin²⁾

Cheng Ai-Qiang²⁾ Chen Dun-Jun^{1)†}

1) (*School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210033, China*)

2) (*Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China*)

(Received 30 May 2024; revised manuscript received 19 July 2024)

Abstract

Due to the advantages of high power density, high efficiency, and great potential in extreme temperature environments, the GaN high electron mobility transistor (HEMT) device is widely used in circuit systems at high or low temperatures. However, its electrical performance is sensitive to the ambient temperature. Therefore, it is essential to build a model that can accurately characterize the electrical performance of GaN HEMTs at different ambient temperatures, which is also essential for precise circuit design. With the analysis of experiment and theory on the GaN HEMT at different ambient temperatures, an improved model for temperature effect on the DC characteristics of the GaN HEMT is proposed based on EEHEMT model. Considering the influence of the ambient temperature on electrical properties of the GaN HEMT, such as the threshold voltage, the knee voltage, and the saturated current, the model establishes a temperature-dependent function for key parameters in the formula of the drain-source current. Through Verilog-A implementation and simulation on the ICCAP software, the improved model accurately reflects the trend of the electrical performance changes of the GaN HEMT at different ambient temperatures. To further verify the model in this work, the on-wafer measurements at different temperatures including -55 , -25 , 25 and 75 °C are carried out for GaN HEMTs with different sizes, which are developed by Nanjing Electronic Devices Institute. Compared with the measured data, the output characteristics and the transfer characteristics simulated by the proposed model are accurate in an ambient temperature range of -55 – 75 °C, with a relative fitting error less than 5%. The result shows that the improved model is of guiding significance in analyzing the direct current performance and high reliability design of circuits at different temperatures.

Keywords: AlGaIn/GaN, high electron mobility transistor, model, direct current characteristics

PACS: 71.55.Eq, 85.30.De

DOI: [10.7498/aps.73.20240765](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240765)

^{*} Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2022YFF0707800, 2022YFF0707801) and the Primary Research & Development Plan of Jiangsu Province, China (Grant Nos. BE2022070, BE2022070-2).

[†] Corresponding author. E-mail: djchen@nju.edu.cn



微波GaN器件温度效应建模

王帅 葛晨 徐祖银 成爱强 陈敦军

Modeling of temperature effect on DC characteristics of microwave GaN devices

Wang Shuai Ge Chen Xu Zu-Yin Cheng Ai-Qiang Chen Dun-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 177101 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240765

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240765>

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

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管的栅极电容模型

Gate capacitance model of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor

物理学报. 2021, 70(21): 217301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210700>

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管温度传感器特性

Characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor temperature sensor

物理学报. 2020, 69(4): 047201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190640>

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>

AlGaIn/GaN高电子迁移率器件外部边缘电容的物理模型

The physics-based model of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor outer fringing capacitances

物理学报. 2020, 69(7): 077302 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191931>

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

Ionizing radiation damage mechanism and biases correlation of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor devices

物理学报. 2020, 69(7): 078501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191557>

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管器件中子位移损伤效应及机理

Neutron-induced displacement damage effect and mechanism of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor

物理学报. 2020, 69(20): 207301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200714>