

一种 AlGaIn/GaN HEMT 非线性器件模型参数提取的方法

常永明* 毛维 杜林 郝跃

(西安电子科技大学宽禁带半导体重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文提出一种新的绝对误差函数,应用该函数进行非线性模型参数提取可以避免计算误差,显著降低参数提取的不准确性。由于氮化物半导体器件,尤其是 AlGaIn/GaN HEMT 器件已经开始得到广泛应用,其模型和参数对射频和电力电子器件和电路设计至关重要,分别使用 3 种误差函数对 AlGaIn/GaN HEMT 器件模型进行了参数提取并对比,对比结果表明该文提出的误差函数更加精确和有效。同时为今后的电子器件的模型参数提取提供了一种有效且精确的方法。

关键词: AlGaIn/GaN HEMT; 绝对误差函数; 参数提取; 遗传算法

中图分类号: O47

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)12-3039-06

DOI: 10.11999/JEIT170097

A Method for AlGaIn/GaN HEMT Nonlinear Device Model Parameter Extraction

CHANG Yongming MAO Wei DU Lin HAO Yue

(Key Laboratory of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A new absolute error function is presented in this paper. The function is applied to extract parameters of the nonlinear model, which can avoid the calculation error and reduce the inaccurate parameter extraction significantly. Nitride semiconductor devices are widely used, especially the AlGaIn/GaN HEMT devices. The AlGaIn/GaN HEMT model and parameters is very important to radio frequency, power electronic devices and circuit design. The new absolute error function is applied to extract the parameters of AlGaIn/GaN HEMT nonlinear devices model. Through comparing three kinds of error function, the results show that the proposed error function is more accurate and effective. At the same time, a precise and effective method is provided to extract the parameters of electronic devices in the future.

Key words: AlGaIn/GaN HEMT; Absolute error function; Parameter extraction; Genetic algorithm

1 引言

在半导体集成电路的生产和制造过程中,器件模型参数的提取是一个很重要的环节。由不同的工艺条件下制造出的电子器件,该器件的特性和测试数据也有所不同,需要提取出一组能够准确描述该工艺条件下制造的器件特性模型参数。器件模型参数提取就是求得一组参数使得测试数据与模型拟合数据之间误差最小。随着半导体工艺的发展^[1],器件中的各种非线性效应变得越来越复杂,同时对参数提取的精度要求越来越高。AlGaIn/GaN HEMT 器

件作为一种新型的 III-V 族氮化物宽禁带化合物半导体器件,其具有高击穿电压^[2-4],耐高温^[5],高频率^[6],抗辐照^[7,8],高功率密度^[9]等优良的特性在大功率微波领域有着广阔的应用前景。但是,HEMT 器件模型是一类非线性模型,特性变化比较复杂,模型函数存在不连续或者不可导等情况。常用的最小二乘法^[10-13]或者比例误差函数均难于精确地描述误差^[14-16],因此本文提出一种新的绝对误差函数。另外由于模型函数也往往是比较复杂的函数或者是多峰函数,存在不连续或者不可导等情况。特别使用误差函数相加后,形成多峰值函数,传统优化算法难以计算,同时传统优化算法有许多缺点,往往要求一个好的初始点,要求目标函数的连续性和可导性。本文提出一种新的绝对误差函数,并应用改进的遗传算法成功解决了算法对参数初值的依赖和多峰值函数的优化问题,可求得模型参数的全局最优解。

收稿日期: 2017-01-24; 改回日期: 2017-09-18; 网络出版: 2017-10-27

*通信作者: 常永明 yongmingchang@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61574112), 陕西省自然科学基金研究计划(605119425012)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61574112), The Natural Science Foundation Research Project of Shaanxi Province (605119425012)

2 新绝对误差函数构造

通常的器件模型参数提取的目标函数是最小二乘法构架,即用模型计算值和实验数值直接进行相减后平方相加,由于 AlGaIn/GaN HEMT 器件的电流的变化幅度较大,误差数值变化也较大,从而造成误差的失真。针对最小二乘法构架误差函数的缺点,本文提出一种新的绝对误差函数,首先每一个数值除以自己的数量级,使得其数值大于等于 1 且小于 10,然后相减取绝对值,这样既消除了大数和小数相加的问题,避免计算误差,新的绝对误差函数如式(1):

$$AEOR = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left| \frac{I_{ij}^{ds}}{\theta_{ij}} - \frac{I_{ij}^{mea}}{\theta_{ij}} \right| \quad (1)$$

其中, I_{ij}^{ds} 和 I_{ij}^{mea} 分别是模型计算值和实验测量值, N 是测试时不同栅电压偏置的数目, M 是在不同的栅电压偏置测试点的数目, θ_{ij} 是第 ij 个点的数量级。

3 器件模型与参数提取方法

本文使用的 AlGaIn/GaN HEMT 器件采用的异质结材料由 MOCVD 制备,衬底为(0001) 面双面抛光蓝宝石,层结构自下而上依次为 100 nm AlN 成核层, 1.4 μm GaN 缓冲层, 1.5 nm AlN 插入层, 23 nm AlGaIn 势垒层和 2 nm GaN 帽层,各层材料均未有有意掺杂。AlGaIn 层的 Al 组分为 30% 的 AlGaIn/GaN HEMT, 室温 Hall 效应测量显示材料的方块电阻为 360 Ω/\square , 电子迁移率为 1418 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 电子面密度为 $1.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 。器件栅长均为 0.6 μm , 源漏间距为 5 μm , 栅漏间距为 3.7 μm , 栅宽为 100 μm 。实验数据使用 Keithley 4200-SCS 半导体特性测试仪测试所得^[17]。AlGaIn/GaN HEMT 器件结构如图 1 所示。

AlGaIn/GaN HEMTs 直流特性可用 Kelvin Yuk 模型表示^[18,19], 该模型能较准确地描述器件的输出、转移特性、高频大功率的大型号射频特性。但其包含有 28 个参数的高维非线性模型, 具体为

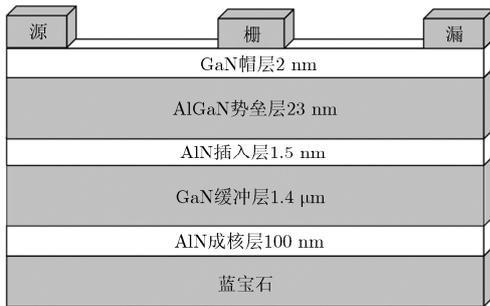


图 1 AlGaIn/GaN HEMT 器件结构

$$\left. \begin{aligned} I_{ds} &= I_{pk} (1 + M_{IPK} \tanh(\varphi)) \tanh(\alpha V_{ds}) \\ \varphi &= P_{1th} (V_{gs} - V_{pk1}) + P_{2th} (V_{gs} - V_{pk2})^2 \\ &\quad + P_{3th} (V_{gs} - V_{pk3})^3 \\ M_{IPK} &= 1 + (1/2) \Delta M_{IPK} (1 + \tanh(\varphi_M)) \\ \varphi_M &= Q_M (V_{gs} - V_{gsM}), \Delta M_{IPK} = M_{Ipkb} - 1 \\ P_n &= (P_{n0} + P_{n1} V_{ds}) \tanh(\alpha_{pn} V_{ds}) + P_{no}, n=1,2,3 \\ M_{Ipkb} &= (P_{M0} + P_{M1} V_{ds} + P_{M2} V_{ds}^2 + P_{M3} V_{ds}^3) \\ &\quad \times \tanh(\alpha_M V_{ds}) + P_{Mo} \\ Q_M &= (P_{Q0} + P_{Q1} V_{ds}) \tanh(\alpha_Q V_{ds}) + P_{Qo} \end{aligned} \right\} (2)$$

其中, P_n 是关于多项式 φ 的相关系数, M_{IPK} 是双曲正切函数乘子。 φ_M 是关于 V_{gs} 和 V_{gsM} 的函数, Q_M 是 φ_M 的相关系数。 P_{n0}, P_{n1}, P_{no} 和 α_{pn} 是描述 V_{ds} 和 p_n 之间关系的系数。 $P_{M0}, P_{M1}, P_{M2}, P_{M3}, \alpha_M, P_{Mo}$ 描述 V_{ds} 和 M_{Ipkb} 之间的关系。 P_{Q0}, P_{Q1}, α_Q 和 P_{Qo} 描述 V_{ds} 和 Q_M 之间的关系的拟合系数。

为了测试本文提出的误差函数的精确性和有效性, 使用常见的其他两种误差函数作为对比函数进行对照:

最小二乘法误差函数^[10-13]:

$$GLS = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (I_{ij}^{mea} - I_{ij}^{mod})^2 \quad (3)$$

比例误差函数^[14-16]:

$$RMS = \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{(I_{ij}^{mea} - I_{ij}^{mod})^2}{I_{ij}^{mea}} \right]^{1/2} \quad (4)$$

采用遗传算法:

Kelvin Yuk 模型包含有 28 个参数, 首先估计每个参数的取值范围, 设其取值区间 $[L, U] = \{(x_1, x_2, \dots, x_N)^T\}$, $l_i \leq x_i \leq u_i, 1 \leq i \leq N$, x_i 代表模型中的参数, $N = 28$, 在取值区间随机均匀产生 Num 个个体, 记做 X_1, X_2, \dots, X_{Num} 。

(1) 适应度函数构建: 本文使用 3 种误差函数分别进行模型参数进行提取, 适应度函数也从基于 3 种误差函数进行误差函数构建, 3 种适应度函数分别如式(5)-式(7):

$$F_1 = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (I_{ij}^{mea} - I_{ij}^{mod})^2 \quad (5)$$

$$F_2 = - \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{(I_{ij}^{mea} - I_{ij}^{mod})^2}{I_{ij}^{mea}} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$F_3 = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left| \frac{I_{ij}^{ds}}{\theta_{ij}} - \frac{I_{ij}^{mea}}{\theta_{ij}} \right| \quad (7)$$

(2) 交叉算子: $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ 和 $y = [y_1,$

$y_2, \dots, y_N]$ 是选择交叉的个体, $z = [z_1, z_2, \dots, z_N]$ 是交叉后的个体, $z_i = x_i \times r_i + y_i \times (1 - r_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, $r_i \in (-d, 1 + d)$, 服从均匀分布的随机数, $d = 0.25$ 。

(3) 变异算子: 设 $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ 是选择变异的个体, $X' = [x'_1, x'_2, \dots, x'_N]$ 是变异后的个体, $x'_i = x_i + \Delta x_i$, $\Delta x_i \sim N(0, \sigma_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 其中 $N(0, \sigma_i)$ 表示均值为 0, 方差为 σ_i 是正态分布的方差。

遗传算法的具体步骤:

步骤 1 (初始化) 设 $k = 0$, 产生初始种群 $p(k) = \{X_1, X_2, \dots, X_{\text{Num}}(k)\}$, 设置种群规模为 Num, 交叉概率为 p_c , 变异概率为 p_m , 最大进化代数 T ;

步骤 2 (交叉) 在区间 $(0, 1)$ 上产生随机数 r , 同时在区间 $[1, \text{Num}]$ 上随机产生 2 个整数 r_1, r_2 , 若 $r < p_c$, 则父代的两个个体分别为 X_{r_1}, X_{r_2} , 由交叉算子产生后代个体, 由交叉产生种群, 记 $S(k)$;

步骤 3 (变异) 产生一个随机数 $r_3 \in (0, 1)$, 若 $r_3 < p_m$, 则变异算子产生变异产生后代个体, 由变异算子产生种群, 记做 $H(k)$;

步骤 4 (选择) 按照保持精英选择策略, 在 $p(k) \cup S(k) \cup H(k)$ 中选出 $[Num/3]$, 然后在剩余的个体中随机选出 $Num - [Num/3]$, 由这 Num 个体作为下一代;

步骤 5 (终止条件) 若 $k = T$, 算法终止, 输出最优个体作为近似全局最优解, 否则, 令 $k = k + 1$, 转步骤 2。

4 参数提取结果和讨论

本文使用了 3 种误差函数作为尺度函数, 应用同样的交叉算子, 变异算子和选择策略以及相同的交叉概率, 相同的变异概率, 相同的进化代数, 唯有不同的是适应的函数的构造不同, 分别对 Kelvin

Yuk AlGaIn/GaN HEMTs 高维非线性模型参数进行参数提取, 3 种计算方法所占的计算机资源和计算时间相当。图 2, 图 4, 图 6 为输出特性曲线, 图 3, 图 5, 图 7 为转移特性曲线对比图, 其分别对应的是最小二乘法误差函数, 相对比例误差函数和本文建立的新绝对误差函数提取的参数的模型计算值和实验测量数据的输出特性曲线对比图和转移特性对比图。表 1 给出了应用 3 种误差函数提取的参数值, 其模型计算值和实验值之间的相对平均误差分别为 6.85%, 6.26% 和 5.52%, 以及相对误差的标准方差为 4.08%, 4.13%, 3.77%。对比结果表明图 4 和图 7 应用新绝对误差函数提取的参数模型计算值和实验测量值比其他两种误差函数计算的结果准确。图 8 为每个栅压下输出特性的整体误差对比和图 9 转移特性的整体对比, 表明本文提出的误差函数提取的模型参数, 整体误差分布均匀。由于栅电压和漏电压的变化, 引起电流的变化较大, 栅电压和漏电压较小时, 电流很小, 栅电压和漏电压较大时, 电流值也较大, 差别较大。最小二乘法将大电流和小电流直接相加会造成计算误差。相对比例误差函数同样会存在电流变化较大, 这是因为 $|I_{ij}^{\text{mod}} - I_{ij}^{\text{mea}}| = k\sqrt{I_{ij}^{\text{mea}}}$, k 是比例系数平方根。在同一比例系数下就会造成电流较大时的误差就较大, 较小的时候误差较小的缺点, 从而会造成误差的失真和不均匀。本文建立新的绝对误差函数, 使得所有的电流值都在同一个数量级上, 都介于大于等于 1 且小于 10 之间, 避免了数量级大小的影响, 这样既可以避免最小二乘法造成的小电流情况不准确也可以避免比例误差造成的大电流的情况不准确, 从而使用该误差函数提取的模型参数较为准确, 误差分布较为均匀, 适用于各种电流变化。

表 2 为 3 种误差函数的相对平均误差和相对误差的标准方差。

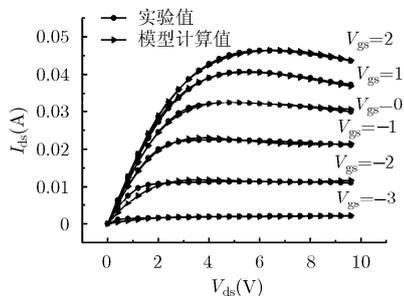


图 2 使用最小二乘法误差函数提取的模型参数计算值 ($I_{ds} - V_{ds}$) 输出特性曲线 ($V_{gs} = -3, -2, -1, 0, 1, 2$) 与实验测试数据对比

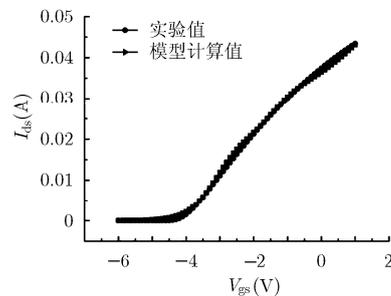


图 3 使用最小二乘法误差函数提取的模型参数计算值 ($I_{ds} - V_{gs}$) 转移特性曲线 ($V_{ds} = -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2$) 与实验测试数据对比

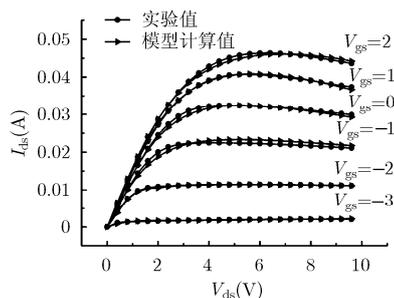


图 4 使用相对比例误差函数提取的模型参数计算值 ($I_{ds}-V_{ds}$) 输出特性曲线 ($V_{gs} = -3, -2, -1, 0, 1, 2$) 与实验测试数据对比

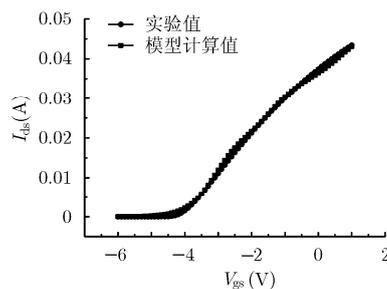


图 5 使用相对比例误差函数提取的模型参数计算值 ($I_{ds}-V_{gs}$) 转移特性曲线, ($V_{gs} = -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2$) 与实验测试数据对比

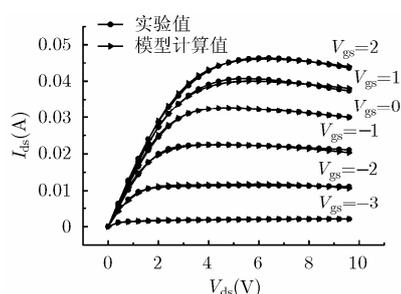


图 6 使用本文绝对误差函数提取的模型参数计算值 ($I_{ds}-V_{ds}$) 输出特性曲线 ($V_{gs} = -3, -2, -1, 0, 1, 2$) 与实验测试数据对比

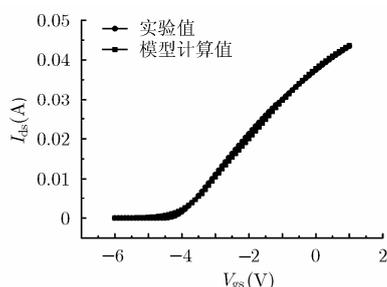


图 7 使用本文绝对误差函数提取的模型参数计算值 ($I_{ds}-V_{gs}$) 转移特性曲线 ($V_{gs} = -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2$) 与实验测试数据对比

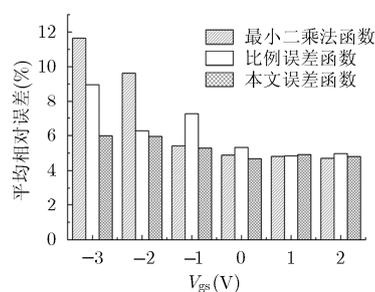


图 8 使用 3 种误差函数求解的模型计算值, 在每个栅压下的输出曲线 ($V_{gs} = -3, -2, -1, 0, 1, 2$) 与实验测试数据平均相对误差对比

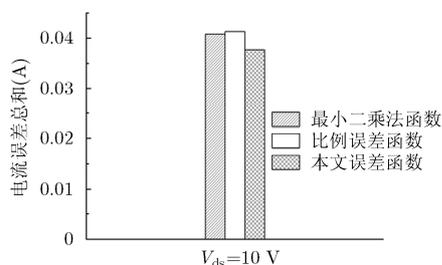


图 9 使用 3 种误差函数求解的模型计算值 ($I_{ds}-V_{gs}$) 转移特性曲线 ($V_{gs} = -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2$) 与实验测试数据整体绝对误差对比

5 结论

本文提出了一种新的绝对误差函数, 并应用于 AlGaIn/GaN HEMT 器件非线性直流模型参数提取。分别使用本文提出的新绝对误差函数, 最小二乘法误差函数和比例误差函数 3 种误差函数对 Kelvin Yuk 模型进行参数提取, 通过和实验数据进行对比, 结果表明使用最小二乘法误差函数提取的模型参数对于小电流不精确, 应用比例相对误差函数提取的模型参数, 对于较大电流不精确, 应用本

文提出的绝对误差函数提取的模型参数对于大电流和小电流都较为精确, 每个栅压下的整体误差分布较为均匀, 可以避免以上两种误差函数的缺点, 使得模型计算值与实验测量值拟合得很好, 从而使得模型更加准确地描述器件特性。同时表明本文提出的新绝对误差函数应用于 AlGaIn/GaN HEMTs 器件直流模型参数提取的有效性和精确性。该误差函数和提取方法具有很好的移植性, 其可应用于其他器件的各种模型的参数提取, 从而提供了一种精确

表 1 使用 3 种尺度函数提取的模型参数值

参数	本文	最小二乘法	比例误差	参数	本文	最小二乘法	比例误差
P_{10}	-0.3855	0.2929	0.1039	V_{pk3}	0.0465	0.2429	-3.1484
P_{11}	0.0060	-0.0024	0.0027	P_{M0}	-1.1124	0.5160	-0.8101
α_{p1}	-0.1488	0.0422	0.4103	P_{M1}	-1.0028	-0.0052	0.0320
P_{1o}	-0.1296	-0.1022	-0.1137	P_{M2}	0.0499	0.0013	-0.0040
V_{pk1}	1.7082	4.9992	4.9133	P_{M3}	-0.0000	-0.0052	-0.0000
P_{20}	-0.2031	-0.9514	0.1819	α_M	-0.4195	-0.0013	0.0282
P_{21}	-0.0004	0.0002	0.0001	P_{M0}	-0.1810	0.0000	0.0825
α_{p2}	-0.0514	0.0822	0.0431	P_{Q0}	0.9618	0.1700	-0.3335
P_{2o}	-0.1851	0.8642	-0.2972	P_{Q1}	-0.0197	0.0470	1.7354
V_{pk2}	0.0032	-0.9701	-1.5501	α_Q	1.7424	-0.0510	1.3896
P_{30}	0.2598	-0.0767	0.1797	P_{Qo}	0.5086	1.3309	4.2685
P_{31}	0.0004	0.0001	-2.7535	V_{gsM}	-3.2817	-3.0749	4.0092
α_{p3}	0.0645	0.0994	-0.0200	I_{pk}	-0.0472	0.0342	0.0241
P_{3o}	-0.0134	0.2066	0.0728	α	-0.3139	0.4315	0.3451

表 2 3 种误差函数的相对平均误差(%)

模型	相对平均误差	相对误差的标准方差
最小二乘法误差函数	6.85	4.08
相对比例误差函数	6.26	4.13
本文绝对误差函数	5.25	3.77

而有效的器件模型参数提取方法同时为器件应用于电路设计和制造提供有效的方法。

参 考 文 献

- [1] XU Ke, WANG Jianfeng, and REN Guoqiang. Progress in bulk GaN growth[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(6): 1-16. doi: 10.1088/1674-1056/24/6/066105.
- [2] ZHANG Zhili, YU Guotao, ZHANG Xiaodong, et al. 16.8 A/600 V AlGaIn/GaN MIS-HEMTs employing LPCVD-Si₃N₄ as gate insulator[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(15): 1201-1203. doi: 10.1049/el.2015.1018.
- [3] DU Jiangfeng, CHEN Nanting, PAN Peilin, et al. High breakdown voltage AlGaIn/GaN HEMT with high-K/low-K compoundpassivation[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(1): 104-106. doi: 10.1049/el.2014.3252.
- [4] HIROSHI O, KANEDA N, FUMIMASA H, et al. Vertical GaN p-n junction diodes with high breakdown voltages over 4 kV[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, 36(11): 1180-1182. doi: 10.1109/LED.2015.2478907.
- [5] SUN H, POMEROY J W, SIMON R B, et al. Temperature-dependent thermal resistance of GaN-on-diamond HEMT wafers[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2016, 37(5): 621-624. doi: 10.1109/LED.2016.2537835.
- [6] TANG Y, SHINOHARA K, REGAN D, et al. Ultrahigh-speed GaN high-electron-mobility transistors with f_T/f_{max} of 454/444 GHz[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, 36(6): 549-551. doi: 10.1109/LED.2015.2421311.
- [7] GREENLEE J D, SPECHT P, ANDERSON T J, et al. Degradation mechanisms of 2 MeV proton irradiated AlGaIn/GaN HEMTs[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(8): 287-290. doi: 10.1063/1.4929583.
- [8] XI Yuyin, HWANG Y H, HSIEH Y L, et al. Effect of proton irradiation on DC performance and reliability of circular-shaped AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. *ECS Transactions*, 2014, 61(4): 179-185. doi: 10.1149/06104.0179ecst.
- [9] FITCH R C, WALKER D E, GREEN A J, et al. Implementation of high power density X-band AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors (HEMTs) in a millimeter-wave monolithic microwave integrated circuit (MMIC) process[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, 36(10): 1004-1007. doi: 10.1109/LED.2015.2474265.
- [10] SABAT S L, COELHO L D S, and ABRAHAM A. MESFET DC model parameter extraction using quantum particle swarm optimization[J]. *Microelectronics Reliability*, 2009, 49(6): 660-666. doi: 10.1016/j.microrel.2009.03.005.
- [11] HALCHIN D, MILLER M, GOLIO M, et al. HEMT models for large signal circuit simulation[C]. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1994, 2: 985-988. doi: 10.1109/MWSYM.1994.335191.
- [12] WANG K and YE M. Parameter determination of Schottky-

- barrier diode model using differential evolution[J]. *Solid-State Electronics*, 2009, 53(2): 234-240. doi: 10.1016/j.sse.2008.11.010.
- [13] HAOUARI MERBAH M, BELHAMEL M, TOBIAS I, *et al.* Extraction and analysis of solar cell parameters from the illuminated current-voltage curve[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2005, 87(1-4): 225-233. doi: 10.1016/j.solmat.2004.07.019.
- [14] KATABOGA N, KOCKANAT S, and DOGAN H. The parameter extraction of the thermally annealed Schottky barrier diode using the modified artificial bee colony[J]. *Applied Intelligence*, 2013, 38(3): 279-288. doi: 10.1007/s10489-012-0372-x.
- [15] MEMON Q D, AHMED M M, MEMON N M, *et al.* An efficient mechanism to simulate DC characteristics of GaAs MESFETs using swarm optimization[C]. IEEE International Conference on Emerging Technologies, Ankara, Turkey, 2013: 1-5. doi: 10.1109/ICET.2013.6743542.
- [16] THAKKER R A, PATIL M B, and ANIL K G. Parameter extraction for PSP MOSFET model using hierarchical particle swarm optimization[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, 22(2): 317-328. doi: 10.1016/j.engappai.2008.07.001.
- [17] 毛维, 杨翠, 郝跃, 等. 场板抑制 GaN 高电子迁移率晶体管电流崩塌的机理研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(1): 586-591. MAO Wei, YANG Cui, and HAO Yue. Study on the suppression mechanism of current collapse with field-plates in GaN high-electron mobility transistors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(1): 586-591.
- [18] YUK K S, BRANNER G R, and MCQUATE D J. A wideband multiharmonic empirical large-signal model for high-power GaN HEMTs with self-heating and charge-trapping effects[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2009, 57(12): 3322-3332. doi: 10.1109/TMTT.2009.2033299.
- [19] YUK K, BRANNER G R, and MCQUATE D. An improved empirical large-signal model for high-power GaN HEMTs including self-heating and charge-trapping effects[C]. IEEE International Microwave Symposium Digest, Boston, America, 2009: 753-756. doi: 10.1109/MWSYM.2009.5165806.
- 常永明: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为 GaN 器件建模、仿真与遗传算法.
- 毛维: 男, 1981 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为宽禁带半导体微波功率器件与半导体器件的理论建模.
- 杜林: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为微波器件及电路设计.
- 郝跃: 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽禁带半导体材料与器件、微纳米半导体新器件及其可靠性.