文章编号：2095-4980(2019)01-0162-07

一种 HEMT 器件可缩放的非线性紧凑模型

陈勇波[1]，刘　文[1]，汪昌思[1]，孔　欣[1]，赵　佐[2]

(1.中国电子科技集团公司 第二十九研究所，四川 成都 610036；2.成都海威华芯科技有限公司，四川 成都 610299)

摘　要：提供了一种应用于高电子迁移率晶体管(HEMT)的非线性紧凑模型。该模型针对传统的EE-HEMT模型理想缩放规律不准确的问题，提出采用一元函数拟合、二元曲面拟合方法，对其尺寸缩放和温度缩放规律进行修正。修正后的非线性模型可以准确地模拟HEMT器件的直流*I-U*、*S*参数和大信号特性。并将该模型应用于一款0.25 μm栅长的GaAs pHEMT工艺，对比不同尺寸的器件在高低温条件下模型仿真结果和实测结果，两者吻合良好，验证了该模型的准确性。

关键词：EE-HEMT 模型；高电子迁移率晶体管；非线性模型；紧凑模型

中图分类号：TN386　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201901.0162

A scalable non-linear compact model applied to HEMT devices

CHEN Yongbo[1]，LIU Wen[1]，WANG Changsi[1]，KONG Xin[1]，ZHAO Zuo[2]

(1.The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation，Chengdu Sichuan 610036，China；
2.Chengdu HiWafer Semiconductor Co., Ltd.，Chengdu Sichuan 610299，China)

Abstract： A scalable Enterprise Edition High Electron Mobility Transistor(EE-HEMT) based non-linear model is presented. One dimensional function fitting as well as binary surface fitting methods are employed to rectify the original ideal scaling routines of EE-HEMT model, which makes this new model scale with device dimension and temperature more precisely and capable of predicting the Direct Current(DC) *I-U*, *S*-parameters and large signal performance. The accuracy of the model has been proved by comparing the simulation results with the measurement data of a 0.25 μm GaAs pHEMT process under different ambient temperatures for various device dimensions.

Keywords： EE-HEMT model；High Electron Mobility Transistor；non-linear model；compact model

高电子迁移率晶体管(HEMT)相比于双极型晶体管具有出色的微波噪声和高频特性，被广泛应用于通信、雷达、电子战等领域，其中以 GaAs pHEMT 器件和 GaN HEMT 器件为代表[1-3]。HEMT 器件的模型对于设计微波单片集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit，MMIC)具有非常重要的作用，器件模型的精确度决定 MMIC 设计的成败和迭代次数。过去的几十年中，HEMT 器件模型得到广泛研究[4-10]。

1993 年，由当时的安捷伦公司提出的 EE-HEMT 模型，是一种广泛应用于 HEMT 器件的非线性紧凑模型[7-8]。为了更准确地模拟 HEMT 器件的直流 *I-U* 特性和跨导曲线，EE-HEMT 模型采用分段函数来表示漏极电流源 I_{ds}；同时，该模型还考虑了直流/交流(DC/AC)的色散效应，使模型能更加准确地模拟 HEMT 器件的射频特性。EE-HEMT 模型属于紧凑模型，可以很方便地植入各种商用的电路仿真软件，方便设计者进行 MMIC 设计。

MMIC 设计者所选取的 HEMT 器件尺寸和工作环境温度不相同，要求 HEMT 器件工艺代工厂提供的器件模型必须具有随尺寸和环境温度缩放的功能。虽然 EE-HEMT 模型自身带有随尺寸和温度的缩放功能，由于其采用的是理想的缩放规律，造成 EE-HEMT 模型不能准确地模拟不同尺寸和不同环境温度下的 HEMT 器件的特性[11]。因此，其缩放规律需根据具体的 HEMT 器件工艺特性进行修正。

本文针对传统的 EE-HEMT 模型采用理想缩放规律造成模型不准确的问题，提出一种新的缩放方法，对其原来的理想缩放规律进行修正。并将修正后的模型成功应用于海威华芯公司商用的 GaAs pHEMT 器件工艺建模中。通过对比器件模型仿真结果和测试结果，验证了新的缩放方法的正确性。

收稿日期：2018-08-31；**修回日期：**2018-11-12

1　GaAs pHEMT 器件工艺特性

本文展示的可缩放的非线性紧凑模型基于海威华芯公司商用的 0.25 μm 栅长 AlGaAs/InGaAs 耗尽型 pHEMT 器件工艺(工艺名称:PPA25)。PPA25 工艺主要针对 20 GHz 以下的微波功率放大器应用，其典型的工艺性能特性如表 1 所示。PPA25 典型的器件工艺截面如图 1 所示,其中包含了 pHEMT 器件和电阻、电容器件。pHEMT 器件采用 T 型栅结构，可以减小栅极的寄生电阻，器件的源极由空气桥相互连接。

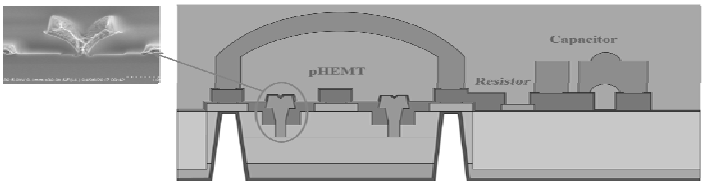


Fig.1 HiWafer's 0.25 μm AlGaAs/InGaAs depletion-mode pHEMT process profile
图 1 海威华芯 0.25 μm AlGaAs/InGaAs 耗尽型 pHEMT 器件工艺界面图

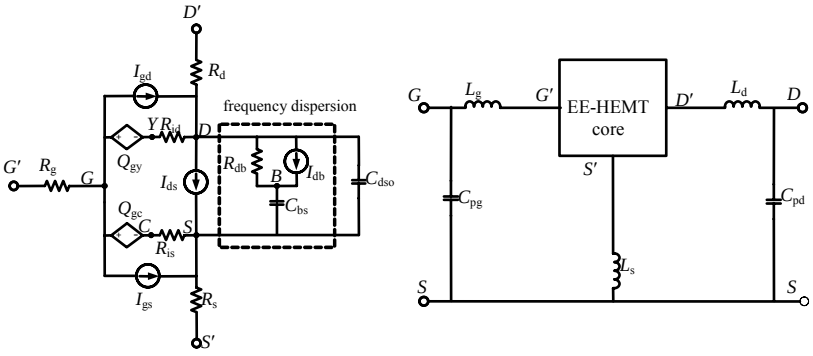
表 1 PPA25 典型的工艺特性
Table1 Typical characteristics of PPA25

performance	index
gate length	0.25 μm
max drain bias	8 V
maximum g_m@U_{ds}=1.5 V	370 mS/mm
I_{dmax}@U_{gs}=0.5 V & U_{ds}=1.5 V	480 mA/mm
I_{dss}@U_{gs}=0 V & U_{ds}=1.5 V	350 mA/mm
f_t@U_{ds}=1.5 V & 0.5I_{dss}	67 GHz
f_{max}@U_{ds}=1.5 V & 0.5I_{dss}	195 GHz
P_{sat}@U_{ds}=8 V&0.5I_{dss},10 GHz,2 μm×75 μm	21.8 dBm(1 000 mW/mm)

2　非线性紧凑模型

2.1 模型等效电路拓扑

本文介绍的 HEMT 器件非线性紧凑模型基于 EE–HEMT 模型，可用于模拟器件的直流 *I–U*、*S* 参数和大信号等特性。EE–HEMT 模型的等效电路拓扑如图 2(a)所示，它由受控电流源、受控电荷源、电阻和电容等集总元件构成，每个元件都具有对应的物理意义[12–13]。其中，非线性栅极电荷源(Q_{gy} 和 Q_{gc})和非线性漏极电流源(I_{ds})是非线性模型中最关键的元件。图 2(a)虚线框中为色散参数网络，用于模拟 HEMT 器件直流和射频条件下的色散效应。EE–HEMT 模型中各个受控源和参数的具体表达式可参考安捷伦 ADS(Advanced Design System)软件的文档[11]。



(a) EE–HEMT core model　　(b) whole model including parasitic reactive elements

Fig.2 Equivalent circuit topology of the EE–HEMT based model
图 2 EE–HEMT 模型等效电路拓扑

随着频率升高进入微波、毫米波频段后，寄生效应对器件性能的影响变得十分明显，在 HEMT 器件模型中必须考虑电极的寄生参数。如图 2(a)所示，原来的 EE–HEMT 模型中，仅考虑了 HEMT 器件栅极、漏极和源极的寄生电阻。本文在此基础上，在 3 个电极新增了描述器件寄生效应的寄生电感和寄生电容，如图 2(b)所示，图中方框内的部分即为图 2(a)的电路拓扑。C_{pg} 和 C_{pd} 分别表示栅极和漏极的寄生电容；L_g,L_d 和 L_s 分别表示栅极、漏极和源极由于电极金属引线造成的寄生电感。

2.2 模型参数提取流程

EE–HEMT 模型属于经验基的模型，具有几十个参数，其中仅有少数参数具有明确的物理意义(如夹断电压 U_{to}、最大跨导 G_{mmax}、栅极反向饱和电流 I_s 等)[11]，剩下的大部分参数为经验参数，需要根据器件的直流 *I–U*,*S* 参数等测试数据进行拟合。为了使提取的模型参数值更加可信和有效，需要制定系统的参数提取流程，针对特定的测试数据，提取对应的拟合参数[8]。本文采用的可缩放 EE–HEMT 模型参数提取流程示意图如图 3 所示。用安捷伦 IC–CAP 软件进行器件测试，测试完成后，将数据导入安捷伦 ADS 软件，并进行后续的参数提取和模型验证[14]。

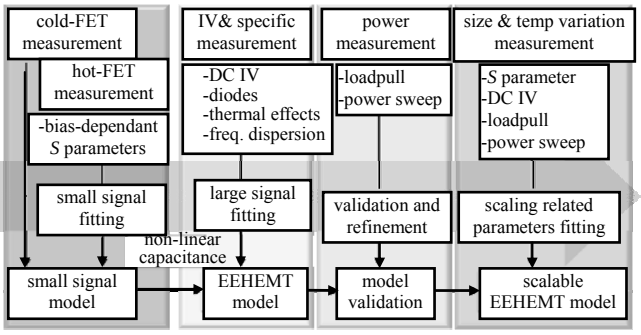


Fig.3 Parameters extraction process of the scalable EE–HEMT based non-linear model
图 3 可缩放的 EE–HEMT 模型的参数提取流程

本文提出的可缩放的 EE–HEMT 模型参数提取流程，如图 3 所示。首先提取器件的外部寄生参数。外部寄生参数值的精确程度将直接影响到器件本征参数的提取精确度。采用文献[15]提出的方法提取 HEMT 器件的外部寄生参数，该方法可以高效地提取不同尺寸的器件寄生参数，利于本文研究寄生参数随器件尺寸的缩放关系。

提取器件的直流特性相关参数。栅极正向电流测试曲线用于提取栅极二极管相关参数(I_s 和理想因子 n)；用跨导曲线和漏极电流转移曲线提取跨导(G_m)相关的直流参数；剩下的直流相关参数根据直流 I–U 曲线进行拟合。

接下来，提取器件的射频特性相关参数，包括栅极的非线性电容、漏极输出电容和 DC/AC 色散效应相关参数。为了使 EE–HEMT 模型更准确地模拟器件的小信号射频特性，本文采用 ADS 软件提供的参数优化功能，通过拟合多偏置的 S 参数测试数据，来准确提取这些射频相关参数。

最后，分别采用 A 类和 AB 类 2 种偏置条件下的大信号负载牵引测试数据，验证得到的非线性模型的准确性。负载牵引测试数据包括：源极牵引得到的等增益圆图、漏极牵引得到的等功率圆图、等效率圆图、固定阻抗条件下的功率扫描曲线。

2.3 模型的缩放

虽然 EE–HEMT 模型本身包含随尺寸(单指栅宽 W_u 和栅指数 N)和温度(T)的缩放关系，其模型参数与尺寸和温度的关系采用的是理想缩放规律。以最大跨导 G_{mmax} 和自热效应参数 P_{eff} 为例，EE–HEMT 假设其随器件总栅宽 T_GW($T_GW=N\times W_u$)呈理想的正比例缩放关系，如式(1)~(2)所示[11]。

$$G_{mmax}^{new} = G_{mmax} T_GW \tag{1}$$

$$P_{eff}^{new} = P_{eff} T_GW \tag{2}$$

通过对 GaAs pHEMT 器件大量的测试研究发现，EE–HEMT 模型参数并不是随尺寸和温度理想缩放。如果继续采用原来的理想缩放规律，将造成模型模拟不同尺寸器件特性和高低温特性时产生较大的误差。因此，本文提出根据器件的特性，对 EE–HEMT 模型的缩放规律进行修正，从而提高模型精确度。缩放规律修正过程如下：

1) 对各种不同尺寸的器件，按照 2.2 节的模型参数提取流程，在常温环境下(25 ℃)进行参数提取。本文研究的 GaAs pHEMT 器件涉及的尺寸范围包含不同的 N(2 指、4 指、6 指和 8 指)和 W_u(25 μm,50 μm,75 μm,100 μm,150 μm)的组合，共 20 种器件。

2) 观察各个模型参数随尺寸的变化规律，找出随尺寸非理想缩放的参数，采用一元函数拟合、二元曲面拟合等方法对尺寸缩放规律其进行修正。将修正后的模型参数值带入 EE–HEMT 模型中，验证模型精确度。

3) 为研究模型参数随环境温度(T_{amb})的缩放规律，同时还需要考虑器件尺寸和环境温度的交互效应对模型参数的影响。选取多个尺寸的器件，按照 2.2 节的模型参数提取流程，在多个环境温度条件下进行参数提取。本文选取 4 个尺寸的器件进行多温度参数提取，选取的器件分别为 2 μm×75 μm,4 μm×75 μm,4 μm×25 μm,4 μm×150 μm；选取 3 个环境温度，分别为–20 ℃,25 ℃和 125 ℃。

4) 观察不同尺寸器件的各个模型参数随 T_{amb} 的变化规律，找出随 T_{amb} 非理想缩放的参数，同样采用一元函数拟合或二元曲面拟合的方法对 T_{amb} 缩放规律进行修正。将修正之后的模型参数值带入 EE–HEMT 模型中，验证模型精确度。

表 2 部分修正后的模型参数随尺寸和 T_{amb} 的缩放公式

Table2 Modified scaling relationship among the model parameters and device dimension, T_{amb}

parameters	scaling relationship
G_{mmax}	$\left(1.1\times W_u^{-1.48}+0.15\right)\times\left(-7\times10^{-4}\times T_{amb}+1.2\right)$
P_{eff}	$\left(7032\times T_GW^{-1.36}+1.19\right)\times\left(6.27\times10^{9}\times T_{amb}^{-3.79}+1.48\right)\times$ $\left(3.47\times10^{-6}\times T_{amb}\times T_GW-1.05\times10^{3}\times T_{amb}-3\times T_GW+0.31\right)$
C_{12sat}	$6.46\times N\times W_u^{-1.1}+2.78\times10^{-4}\times T_GW+495\times W_u^{-1.1}+0.21\times N+16.42$
C_{dso}	$64.7\times\left(W_u/N\right)^{-0.84}+34.3$
C_{11o}	$0.29\times T_GW^{0.53}+417$
G_{mmaxac}	$\left(1.29\times T_GW^{-0.87}+0.086\right)\times\left(10\times T_{amb}^{-0.41}+0.0057\right)$
U_{to}	$-3.3\times10^{-13}\times T_{amb}^{4.35}-1.26$
n	$2.06\times10^{-2}\times T_{amb}^{0.706}-0.24$

3 结果和讨论

第 2 节中介绍的修正后的可缩放非线性紧凑模型，可以准确模拟不同尺寸的 HEMT 器件在高低温环境下的直流 I–U、小信号 S 参数和大信号特性。将该方法应用于本文研究的 PPA25 工艺的 GaAs pHEMT 器件，部分修正后的模型参数随尺寸和 T_{amb} 的缩放公式如表 2 所示。部分参数随器件尺寸和环境温度的缩放关系如图 4、图 5 所示。

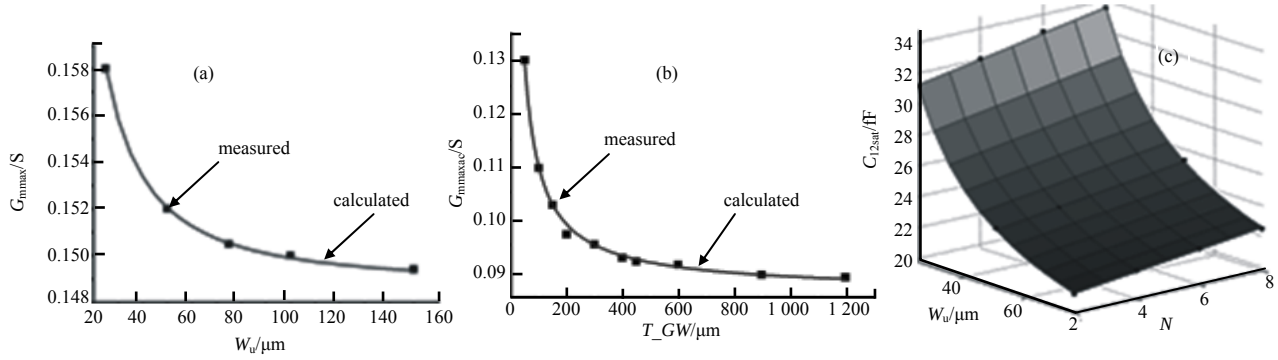


Fig.4 Modified scaling relationship between the model parameters and device dimension
图 4 部分修正后的模型参数随器件尺寸的缩放关系；符号为测试提取值，实线为公式计算值

从表 2 可以看出，部分模型参数仅与器件的一个尺寸变量相关(如仅与单指栅宽 W_u 或总栅宽 T_GW 相关)，即表现为 N 与 W_u 的交互效应不明显，如 G_{mmax},C_{11o} 等，这类模型参数的缩放规律可以采用一元函数拟合的方式进行修正。但也有些参数表现出 N 与 W_u 的交互效应，如 C_{12sat} 等，这类模型参数需要采用二元曲面拟合的方法进行修正(N 和 W_u 为自变量)，本文采用 Matlab 提供的二元曲面拟合工具进行参数拟合，得到的 C_{12sat} 随 N 和 W_u 的二维关系曲面如图 4(c)所示。

从表 2 中还可以看出，大部分参数忽略了器件尺寸与环境温度的交互效应，如 G_{mmax},G_{mmaxac} 等。这类型参数随尺寸和 T_{amb} 的缩放关系，可以分解为一个仅与尺寸相关的函数 $f_1(N,W_u)$和一个仅与环境温度相关的函数 $f_2(T_{amb})$的乘积。在参数提取过程中发现，参数 P_{eff} 必须考虑器件尺寸与环境温度的交互效应，同样采用二元曲面拟合的方法进行修正(T_GW 和 T_{amb} 为自变量)，得到的 P_{eff} 随 T_GW 和 T_{amb} 的二维关系曲面如图 5(c)所示。

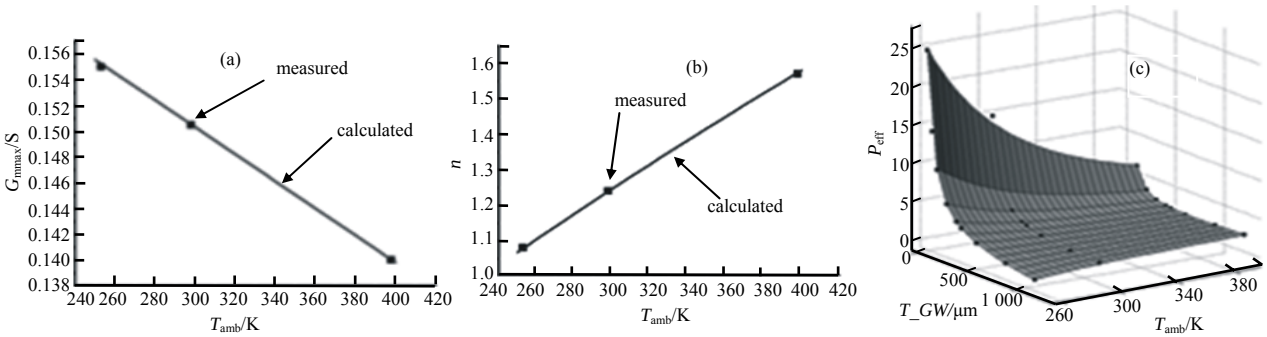


Fig.5 Modified scaling relationship between the model parameters and T_{amb}
图 5 部分修正后的模型参数随 T_{amb} 的缩放关系；符号为测试提取值，实线为公式计算值

为验证修正后的 EE-HEMT 模型的精确度，图 6~图 10 显示了不同尺寸的器件在不同环境温度下，模型仿真的直流 I–U、S 参数和大信号特性与测试结果的对比。图 6 为在 25℃环境温度下，4 μm×75 μm 和 2 μm×75 μm 两种器件的跨导(G_m)和漏极电流(I_{ds})随栅压(U_{GS})的关系。另外，图 7 为这 2 个器件的直流 I–U 曲线的模型仿真(实线)和测试结果(点)的对比。可以看出，修正后的模型可以很好地模拟不同尺寸器件的直流特性。

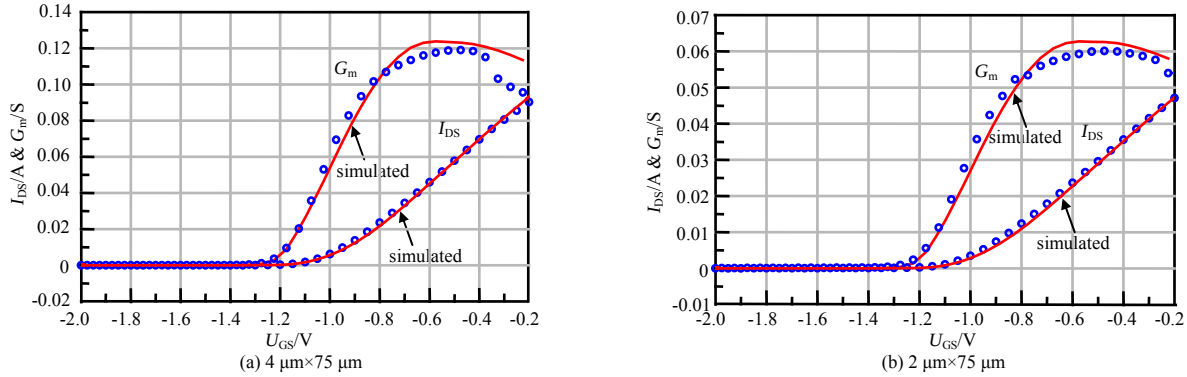
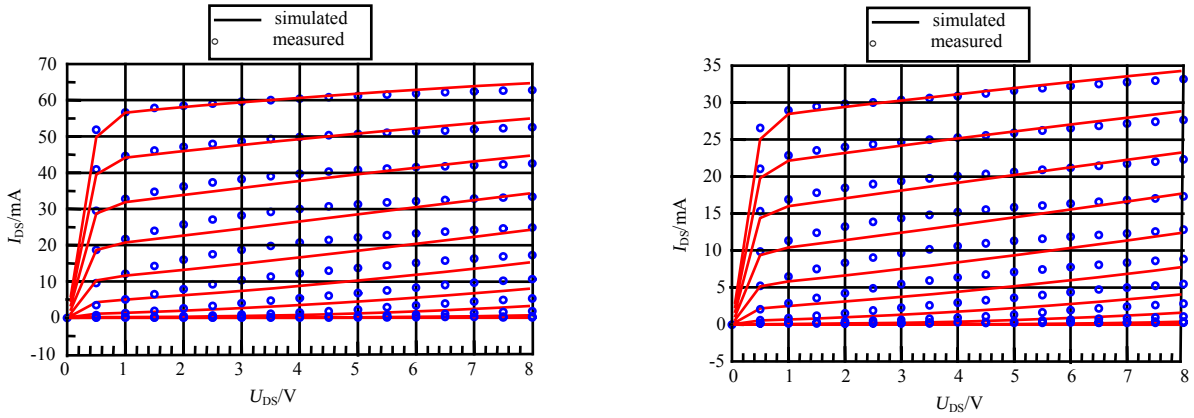


Fig.6 Trans-conductance(G_m) and drain current(I_{DS}) versus U_{GS}(U_{DS}=2 V and T_{amb} =25℃)
图 6 器件跨导 G_m 和漏极电流 I_{ds} 随 U_{GS} 的变化关系

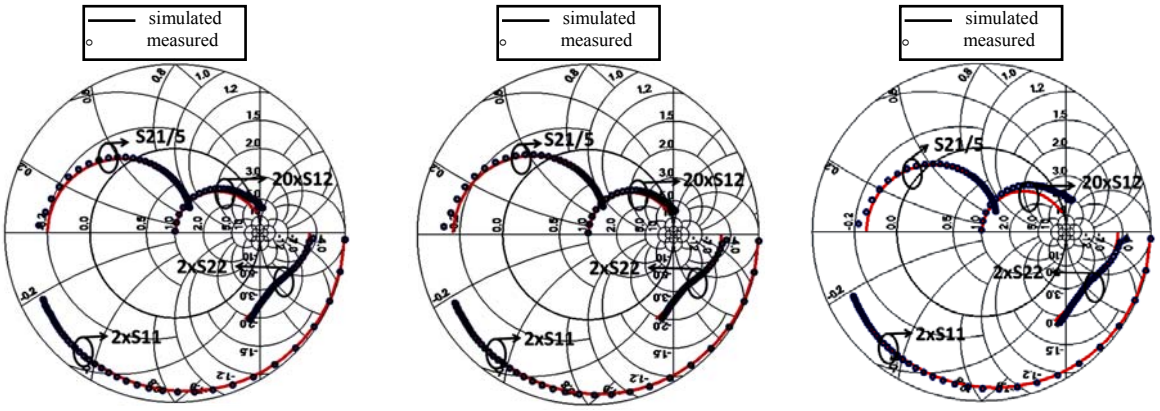
图 8 为 4 μm×75 μm 器件在 3 个不同温度下，模型仿真(实线)的 *S* 参数与测试结果(点)的对比。从图中可以看出，修正后的模型具有较好的温度缩放功能。也可以看出，修正后的非线性紧凑模型仿真的 *S* 参数与测试结果仍然有一定误差，这是由于非线性模型自身的缺陷造成的，因为它需要兼顾各个偏置点和大信号特性模拟的精确度。本文得到的非线性模型的 *S* 参数模拟精确度能满足对放大器电路设计。



(a) 4 μm×75 μm (b) 2 μm×75 μm

Fig.7 DC *I–U* curves,U_{DS}= 0 to 8 V,*step*=0.5 V,U_{GS}=–1.5 to –0.5 V,*step*=0.1 V,T_{amb}=25 ℃

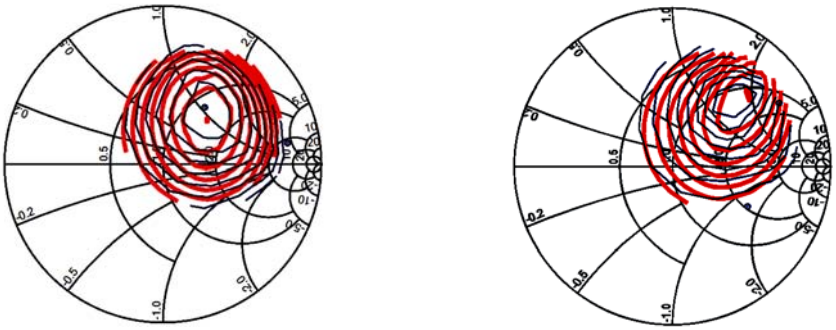
图 7 器件直流 *I–U* 曲线 U_{DS}= 0 to 8 V,*step*=0.5 V,U_{GS}=–1.5 to –0.5 V,*step*=0.1 V,T_{amb}=25 ℃



(a) 25 ℃ (b) -20 ℃ (c) 125 ℃

Fig.8 *S*-parameters fitting results for the 4 μm×75 μm device at three different ambient temperatures, U_{DS}=8 V,U_{GS}=–0.7 V,frequency range from 100 MHz to 20.1 GHz

图 8 不同环境温度条件下，4 μm×75 μm 器件的 *S* 参数仿真(实线)与测试(点)结果对比 U_{DS}=8 V U_{GS}=-0.7 V，频率:100 MHz 至 20.1 GHz



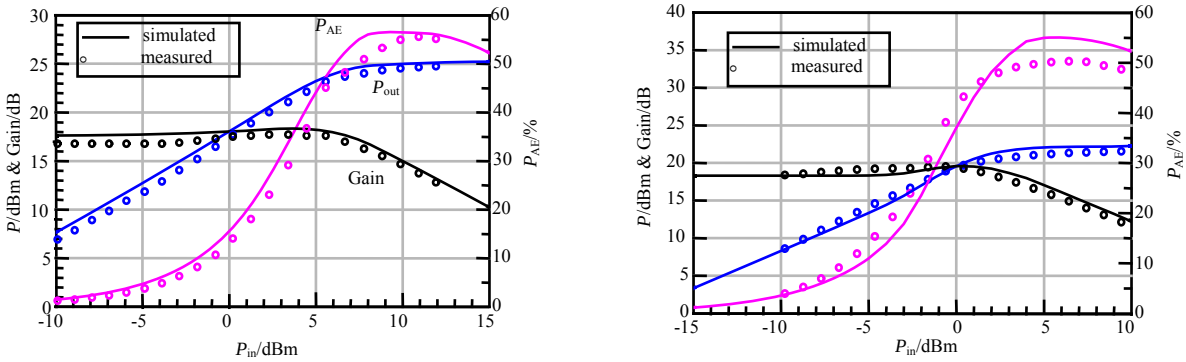
(a) P_{out} contours (b) P_{AE} contours

Fig.9 Simulated(thick lines) and measured(fine lines) loadpull contours for the 4 μm×75 μm device at U_{DS}=8 V and U_{GS}=–0.7 V,*f*=10 GHz

图 9 4 μm×75 μm 器件的负载牵引仿真(粗线)与测试(细线)结果对比,U_{DS}=8 V,U_{GS}=–0.7 V,*f*=10 GHz

对非线性模型而言，其模拟器件大信号特性的精确度是模型成败的关键。图 9 显示了 4 μm×75 μm 器件的大信号负载牵引得到的等输出功率(P_{out})圆图和等功率附加效率(Power Added Efficiency，PAE)圆图。另外，图 10

显示了 4 μm×75 μm 和 2 μm×75 μm 两种器件，在最大输出功率匹配条件下，P_{out},P_{AE} 和增益(Gain)随输入功率 P_{in} 的变化关系。从图 9 和图 10 可以看出,修正后的非线性模型,可以很好地模拟不同尺寸器件的大信号特性。



(a) 4 μm×75 μm device maximum P_{out} loadlines　　(b) 2 μ m×75 μm device,maximum P_{out} loadlines

Fig.10 Measured and simulated gain,P_{out} and P_{AE} versus input power P_{in}

图 10 在最大输出功率匹配条件下，器件的输出功率 P_{out}、效率 P_{AE} 和增益 *Gain* 随输入功率 P_{in} 的变化关系，仿真(实线)与测试(点)结果对比，U_{DS}=8 V,U_{GS}=−0.7 V,f=10 GHz

为说明对 EE-HEMT 的理想尺寸缩放规律进行修正的必要性，图 11 采用理想尺寸缩放参数 2 μm×75 μm 器件模型仿真的大信号特性与测试结果对比,从图 11 中可以看出，与图 10(b)的结果相比，模型仿真的误差增大，特别是对于线性区的输出功率和效率的模拟误差增大。同样，为说明对 EE-HEMT 的理想温度缩放规律进行修正的必要性，图 12 为在 125 ℃环境温度下，4 μm×75 μm 器件模型仿真的直流 *I*-*U* 曲线与测试结果对比，图 12 中实线为修正后的温度缩放模型的结果，虚线为理想温度缩放的模型结果，可以看出后者的误差明显增大，特别是在 *I*-*U* 曲线的高功耗区域(右上区域)。除图 11 和图 12 提供的对比结果以外，对于其他器件尺寸和温度条件，本文提供的缩放模型，也能达到同样的精确度。

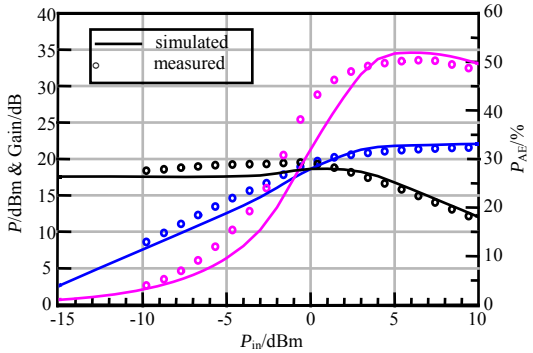


Fig.11 Measured and simulated gain, P_{out} and P_{AE} versus input power P_{in} for the 2 μm×75 μm device,the model employs the ideal scaling routines

图 11 采用理想缩放规律的 2 μm×75 μm 器件模型的功率扫描曲线的仿真(实线)与测试(点)结果对比

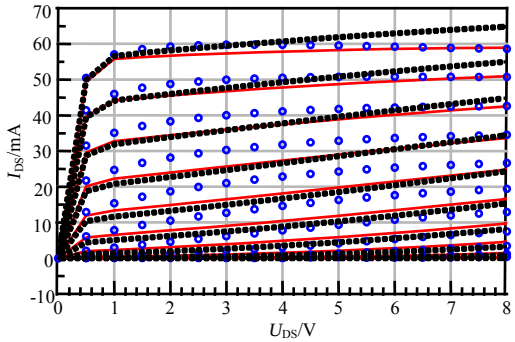


Fig.12 DC *I*-*U* curves for the 4 μm×75 μm device, T_{amb}=125 ℃, the model employs the modified temperature scaling routines(solid lines), the model employs the ideal temperature scaling routines(dash lines)

图 12 4 μm×75 μm 器件模型的直流 *I*-*U* 曲线的仿真与测试结果(点)对比，修正后的模型(实线)，采用理想缩放规律的模型(虚线)

4　结论

本文展示了一种可缩放的非线性紧凑模型，可用于 HEMT 器件的建模。该模型在传统 EE-HEMT 模型基础上，提出了一种新的缩放方法，并将该建模方法成功应用于一款 0.25 μm 栅长的 GaAs pHEMT 器件工艺。通过多个尺寸器件在多个温度环境下，模型仿真结果和测试结果的对比，结果显示，该模型能更准确地模拟 HEMT 器件的直流、小信号和大信号特性，验证了本文提出的新的缩放方法的正确性。

参考文献：

[1] 赵正平. 微波、毫米波 GaN HEMT 与 MMIC 的新进展[J]. 半导体技术，2015,40(1):1-7. (ZHAO Zhengping. New progress of the microwave and millimeter wave GaN HEMT and MMIC [J]. Semiconductor Technology, 2015,40(1):1-7.)

[2] MEGHDADI M,MEDI A. Design of 6-18 GHz high-power amplifier in GaAs pHEMT technology[J]. IEEE Translation Microwave Theory Technology, 2017,65(17):2353-2360.

[3] 曾建平,安宁,李志强,等. 电子束实现 210 nm 栅长 115 GHz GaAs 基 mHEMT 器件[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,

2018,16(1):17–20. (ZENG Jianping,AN Ning,LI Zhiqiang,et al. 210 nm T-gates of GaAs-based HEMT with *fmax*=115 GHz by one-step E-beam lithography approach[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):17–20.)

[4] 何美林,刘亚男,胡志富,等. 太赫兹 InP HEMT 器件的建模[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(3):349–353. (HE Meilin,LIU Yanan,HU Zhifu,et al. Modeling of terahertz InP HEMT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(3):349–353.)

[5] CURTICE W R,ETTENBER M. A nonlinear GaAs FET model for use in the design of output circuits for power amplifiers[J]. IEEE Translation Microwave Theory Technology, 1985,33(12):1383–1394.

[6] WU Q,XU Y,CHEN Y,et al. A scalable multiharmonic surface-potential model of AlGaN/GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions Microwave Theory Technology, 2018,66(3):1192–1200.

[7] KHARABI F,POULTON M J,HALCHIN D,et al. A classic nonlinear FET model for GaN HEMT devices[C]// 2007 IEEE Compound semiconductor integrated circuits symposium. Portland,OR,USA:[s.n.], 2007:1–4.

[8] ZOMORRODIAN V,PEI Y,MISHRA U K,et al. A scalable EE–HEMT based large signal model for multi-finger AlGaN/GaN HEMTs for linear and non-linear circuit design[J]. Physical Status Solidi C, 2010,7(10):2450–2454.

[9] ANGELOV I,ZIRATH H,ROSMAN N. A new empirical nonlinear model for HEMT and MESFET devices[J]. IEEE Transactions Microwave Theory Technology, 1992,40(12):2258–2266.

[10] WEN Z,XU Y,CHEN Y,et al. A quasi-physical compact large-signal model for AlGaN/GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions Microwave Theory Technology, 2017,65(12):5113–5122.

[11] PENG A S,WU L K. An improved EEHEMT RF noise model for 0.25 μm InGaP pHEMT transistor using verilog-a language[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2017,E100C(5):424–429.

[12] JARNDAL A,KOMPA G. A new small-signal modeling approach applied to GaN devices[J]. IEEE Transactions Microw Theory Technology, 2005,53(11):3440–3448.

[13] CHEN Y,GUO Y,HUANG W,et al. Accurate distributed and semidistributed models of field effect transistors for millimeter wave applications[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2011,21(3):272–278.

[14] CHEN Y,XU Y,LUO Y,et al. A reliable and efficient small-signal parameter extraction method for GaN HEMTs[J]. International Journal of Numerical Modelling-electronic Networks Devices and Fields, 2018(31):e2540.

[15] CHEN Y,XU Y,WANG F,et al. A scalable and multi-bias parameter extraction method for a small-signal GaN HEMT Model[J]. International Journal of Numerical Modelling-electronic Networks Devices and Fields, 2018,31(5):e2347.

作者简介：

陈勇波(1985–)，男，四川省乐山市人，博士，主要研究方向为微波化合物半导体器件机理、模型、电路.email:chenyb@alu.uestc.edu.cn.

孔　欣(1987–)，男，湖北省荆门市人，博士，主要研究方向为氮化镓量产工艺技术研发及氮化镓微波功率放大器.

刘　文(1985–)，男，杭州市人，在读博士研究生，主要研究方向为基于模型的系统工程理论、工程化应用.

汪昌思(1983–)，男，四川省资阳市人，博士，主要研究方向为微波化合物半导体器件机理与模型、单片微波电路.

赵　佐(1992–)，男，太原市人，硕士，主要研究方向为微波化合物半导体器件机理、模型和电路.