

微波场板GaN HEMTs大信号特性及其模型研究

汪昌思, 徐跃杭, 闻 彰, 陈志凯, 赵晓冬, 徐锐敏

(电子科技大学电子工程学院 成都 611731)

【摘要】针对栅、源两种场板氮化镓(GaN)高电子迁移率晶体管(HEMTs),提出了一种包含非线性热网络的电热大信号模型。该模型基于电热耦合理论,采用有限元电热仿真方法,提取了两种场板器件的热阻和热容参数,建立了与功耗相关的非线性热网络,并嵌入到改进的Angelov经验模型中;分析了场板结构对微波小信号特性和大信号负载阻抗的影响等。在片测试及仿真结果表明,针对两种场板GaN HEMTs器件,在0~40 GHz频带内,该模型能较精确地预测S参数、输出功率(Pout)、增益(Gain)和功率附加效率(PAE)等参数;为成功地完成电路设计,提供了较为精确的电热大信号模型。

关键词 场板; 氮化镓; 大信号模型; 自热效应; 热阻

中图分类号 TN304.2

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.03.002

Large-signal Characterization and Modeling for Microwave Field-Plate GaN HEMTs

WANG Chang-si, XU Yue-hang, WEN Zhang, CHEN Zhi-kai, ZHAO Xiao-dong, and XU Rui-min

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract An electro-thermal large-signal model including a nonlinear thermal network for Gallium Nitride high electron mobility transistors (GaN HEMTs) with gate and source field plates is presented in this paper. This model including the nonlinear thermal network with respect to power dissipation is embedded in the improved Angelov model. Based on the electro-thermal principle, the thermal resistance and capacitance for the two field plates of the devices are identified by utilizing the electro-thermal finite element method (FEM) simulations. And the characteristics of small signal and load impedance for the two devices with different field plates have been analyzed in microwave frequency range. Accurate predictions of the quiescent currents, S-parameters up to 40 GHz, and large-signal harmonic performance for the devices with different gate peripheries have been achieved by the proposed model.

Key words field plate; GaN; large-signal model; self-heating effect; thermal resistance

GaN HEMTs具有功率密度大、电子迁移率高、耐高温等优势,正被广泛应用于微波毫米波通信与雷达系统中^[1-2]。为进一步提高GaN HEMTs的功率密度,在器件中引入各种场板结构成为目前研究的重点^[3-5]。例如,通过将栅极向栅漏区域延伸,形成栅场板结构(gate-field plate, G-FP),它调制了栅极下电场分布,减小了栅极下面靠近漏端的峰值电场强度,使得场板GaN HEMTs的击穿电压提高到1.9 kV^[3],功率密度超过40 W/mm^[4]。然而,栅场板也会增大寄生效应、栅电容及耗尽层长度,引起器件的增益下降,因此往往需要在击穿电压和增益之间折中考虑。为更好地解决该问题,斜场板、双场板或多场板等结构被用于功率器件中^[4-5],在栅场板基础上,

增加了源场板(source-field plate, S-FP)结构,能起到降低反馈电容(C_{gd})和改善大信号增益特性的作用;该场板下的耗尽区域不会受输入信号调制的影响,能够改善器件的线性度。此外,场板结构能降低表面陷阱的影响,减小色散特性,进而起到改善跨导、增益、减小泄漏电流和增强器件的稳定性等作用^[4]。因此,场板结构广泛应用于GaN HEMTs等功率器件中。

目前,有关场板GaN HEMTs器件的模型研究主要集中在利用解析或者数值仿真法优化场板结构及分析场板对器件性能的影响^[6-8];而针对不同场板GaN HEMTs的通用大信号模型研究较少,以及利用该模型对器件大信号特性的分析少有研究。

收稿日期: 2015-10-30; 修回日期: 2016-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(61474020)

作者简介: 汪昌思(1983-),男,博士生,主要从事半导体器件建模及MMIC方面的研究。

本文针对栅、源两种场板GaN HEMTs, 提出了一种包含非线性热网络的电热大信号模型。采用Ansys(v. 14)热仿真的方法, 提取了两种场板器件的热阻和热容参数, 并嵌入到改进的Angelov经验模型中; 分析了两种场板结构对寄生参数、小信号特性和大信号负载阻抗等的影响。最终将该大信号模型嵌入到ADS仿真软件中, 完成在片测试与仿真结果对比, 验证了该模型的准确性。

1 GaN HEMTs大信号模型

虽然栅、源场板器件在结构上不同, 寄生效应也有所区别, 但可以用一个通用的大信号等效电路拓扑来模拟, 如图1所示。图2为本文所采用的电热大信号等效电路模型。它包括外部的寄生电阻、电容和电感, 内部的本征电容、漏源电流和栅极电流等元件, 以及表征器件自热效应的热网络参数。

完整的模型建模流程如图3所示, 从小信号 S 参数测试出发, 提取寄生参数和本征参数; 由直流(DC-IV)和脉冲(Pulsed-IV)测试获得电流特性和色散特性; 用FEM热仿真得到自热效应参数。最终将模型用符号定义器件(symbolically-defined device, SDD)嵌入到ADS软件中, 并将仿真结果与大信号测试结果对比, 完成模型的验证。

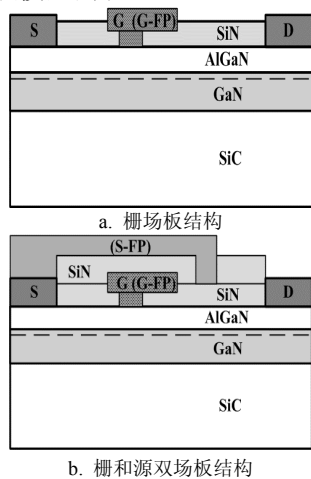


图1 场板器件示意图

1.1 漏源电流 I_{ds} 模型

Angelov经验模型广泛用于场效应晶体管(field effect transistors, FETs)大信号紧凑模型中^[9-11]。由于GaN HEMTs有较明显的自热和陷阱效应, 故本文在Angelov模型基础上, 采用改进的 I_{ds} 公式^[9]:

$$I_{ds} = I_{pkth} (1 + M_{ipkth} \tanh(\psi)) \tanh(\alpha V_{ds}) \quad (1)$$

其中,

$$I_{pkth} = I_{pk0} (1 + k_{ipk0} \Delta T_{ch}') \quad (2)$$

$$M_{ipkth} = (1 + 0.5(M_{ipkl} - 1)(1 + \tanh(qm \times (V_{gseff} - V_{gsm})))) (1 + k_M \Delta T_{ch}') \quad (3)$$

$$\psi = P_{k1th} (V_{gseff} - V_{pk1}) + P_{k2th} (V_{gseff} - V_{pk2})^2 + P_{k3th} (V_{gseff} - V_{pk3})^3 \quad (4)$$

$$V_{gseff} = V_{gs} + k_{surf} (V_{gsq} - V_{gspinchoff}) (V_{gs} - V_{gspinchoff}) + k_{subs} (V_{dsq} + V_{dssub0}) (V_{ds} - V_{dsq}) \quad (5)$$

$$P_{knth} = (k_{n0} + (k_{n0} + k_{n1} V_{ds}) \tanh(\alpha_n V_{ds})) \times (1 + k_{pn} \Delta T_{ch}') \quad n = 1, 2, 3 \quad (6)$$

$$\Delta T_{ch}' = P_{diss} R_{th} (P_{diss}) (1 - \exp(-t/\tau)) \quad (7)$$

$$R_{th} (P_{diss}) = R_{th0} (1 + k_{R1} \exp(k_{R2} P_{diss})) \quad (8)$$

$$C_{th} = \tau / R_{th} P_{diss} \quad (9)$$

式中, I_{pk0} 表示最大跨导(gm)处的漏源电流; M_{ipkth} 是以栅压为函数的双曲正切函数倍乘因子; V_{pk1} 、 V_{pk2} 和 V_{pk3} 用于拟合HEMTs随栅压变化的非对称“钟型”gm特性; α 代表饱和电压参数; V_{gseff} 用于表征器件表面陷阱和体陷阱效应的栅电压修正参数; $\Delta T_{ch}'$ 是沟道的温度变化量, 用于描述器件的自热效应; 其余参数为拟合系数。

1.2 非线性热网络

自热效应广泛存在于HEMTs功率器件中, 引起沟道温度升高, 电子迁移率降低, 进而恶化器件的电性能^[12]。为准确地表征该特性, 常用由热阻(R_{th})和热容(C_{th})构成的热子电路来模拟自热效应^[10-11]。通常, R_{th} 和 C_{th} 的提取采用恒温下的脉冲IV测试来完成, 但热阻往往随功耗呈非线性变化, 且脉冲IV测试系统往往过于复杂和耗时^[13]。故本文针对两种场板GaN HEMTs器件(如图1所示), 采用有限元热稳态和瞬态仿真的方法, 提取两种结构的热参数^[14]。虽然器件的沟道温度对器件的封装形式和散热系统敏感, 但可以采用等效的方法来简化器件的分析。通过在衬底底部设置适当厚度的散热材料和环境温度来模拟器件实际的工作环境。例如, 本文采用1 mm厚的铜块与衬底接触, 边界设为环境温度300 K, 在栅指上加上一定的功耗。热仿真结构及热分布如图4a所示, 通过仿真结果可以发现, 热量集中在栅指上, 由于外延层非常薄, 可以认为其温度为沟道温度。提取的 R_{th} 如图4b所示, 相比于单栅场板器件, 双场板器件在散热方面更优, 故 R_{th} 更小; 表征热动态变化的 C_{th} 则变化不大。式(8)和式(9)用于拟合 R_{th} 和 C_{th} 。热时间常数 τ 由热瞬态仿真获得。建立的非线性热网络如图2中的虚框所示。

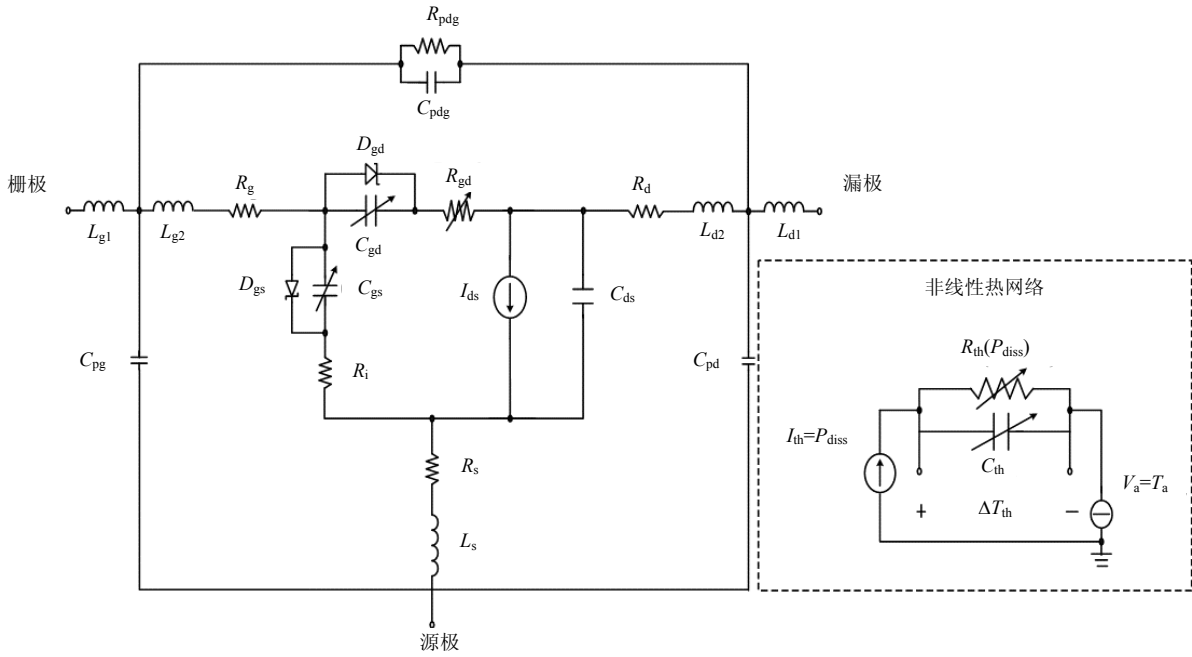


图2 电热大信号模型拓扑结构

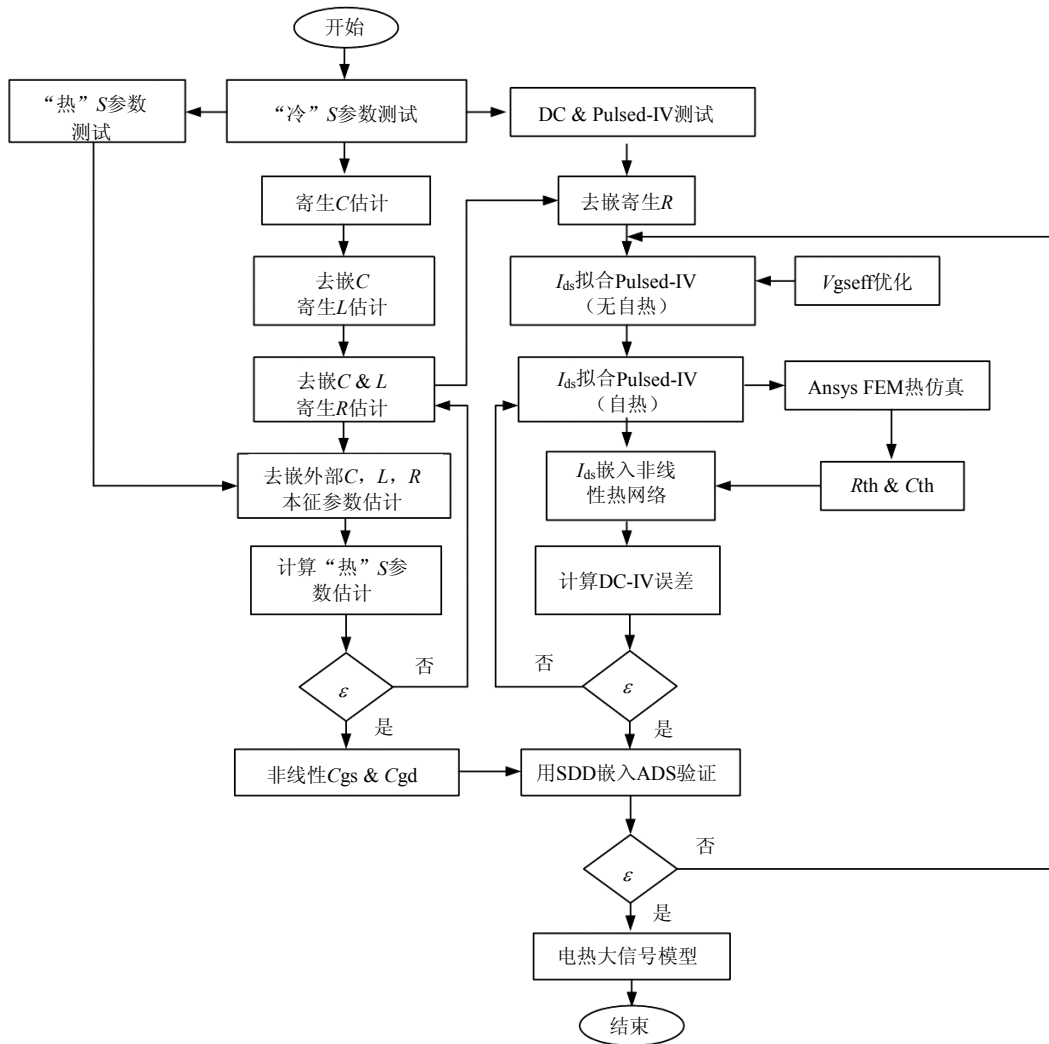


图3 大信号模型建模流程

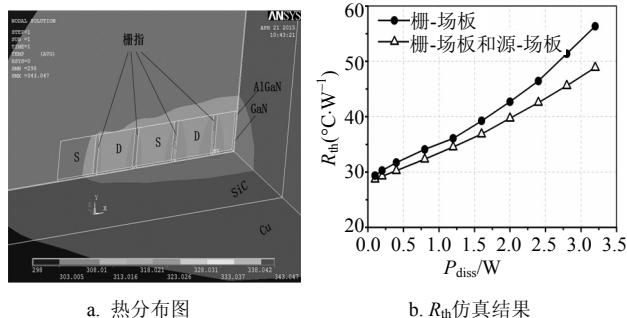


图4 器件热仿真分析

1.3 寄生参数和本征参数

多偏置小信号S参数用于提取器件的寄生和本征参数^[15-16]。在0.1 ~ 40 GHz频率范围内,使用安捷伦矢量网络分析仪(E8364B)测量两种场板器件的S参数。利用低频段“Cold-FET”夹断状态的S参数提取器件的寄生电容;高频段“Cold-FET”正偏置条件下提取寄生电感和电阻参数;内部本征参数由“Hot-FET”S参数嵌寄生参数后获得。通过窄脉冲(350 ns)动态IV测试仪(Auriga/Au4850),在低占空比(0.1%)、不同静态偏置下,测量器件的Pulsed-IV特性,从而得到器件表面陷阱和体陷阱效应特性,并用 I_{ds} 公式中的修正参数 $V_{gs\text{eff}}$ 来描述。得到器件各参数初值后,利用随机及梯度迭代算法,对参数进行整体优化。最终得到的两种结构器件寄生参数和部分本征参数如表1和图5所示,可以看出,两种结构的寄生参数值区别较小,但本征参数值区别较大,这与双场板结构引入了更大的 C_{gs} 和 C_{ds} 的物理特性是一致的,同时,由于双场板结构在栅-漏方向延伸了耗尽层长度,所以与单场板相比, C_{gd} 更小。图5给出了非线性电容拟合结果,所用电容公式为^[12]:

$$C_{gs} = C_{gsp} + C_{gs0}(1 + \tanh(\phi_1))(1 + \tanh(\phi_2)) \quad (10a)$$

$$\phi_1 = M_{10} + M_{11}V_{gs} + P_{111}V_{ds} \quad (10b)$$

$$\phi_2 = M_{20} + M_{21}V_{gs} + M_{22}V_{ds} \quad (10c)$$

$$C_{gd} = C_{gdp} + C_{gd0}(1 + \tanh(\phi_3))(1 + \tanh(\phi_4) + 2P_{111}) \quad (11a)$$

$$\phi_3 = M_{30} - M_{31}V_{ds} \quad (11b)$$

$$\phi_4 = M_{40} + M_{41}V_{gs} - P_{111}V_{ds} \quad (11c)$$

表1 两种场板器件的模型参数对比

参数	类型	
	单栅场板(G-FP)	双场板(G-FP+S-FP)
R_g/Ohm	2.895	2.768
R_d/Ohm	0.592	0.583
R_s/Ohm	0.011	0.012

(续表)

参数	类型	
	单栅场板(G-FP)	双场板(G-FP+S-FP)
L_g/pH	46.19	52.09
L_d/pH	46.57	46.66
L_s/pH	7.63	6.22
C_{pg}/pF	1.34e-4	6.17e-4
C_{pd}/pF	7.28e-4	7.34e-4
C_{pgd}/pF	0.048	0.023
C_{ds}/pF	0.068	0.113

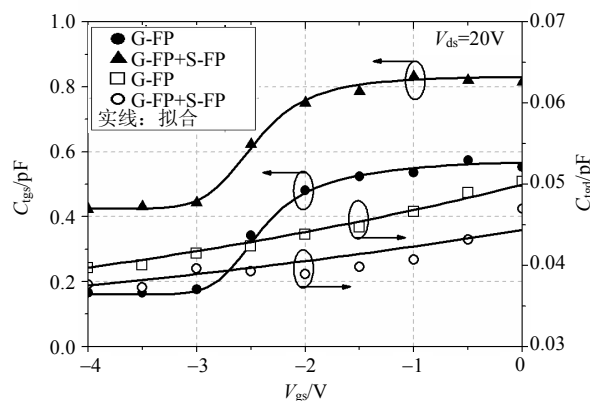
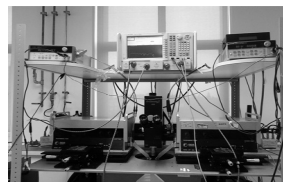


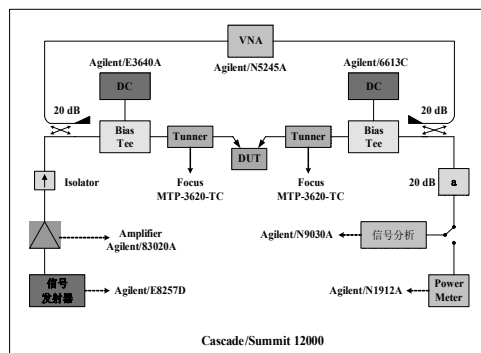
图5 C_{gs} 和 C_{gd} 拟合与提取的结果对比

2 模型分析与验证

将以上两种场板GaN HEMTs器件的模型参数通过ADS软件的SDD嵌入到仿真软件中^[17],用于器件的电流、小信号及大信号特性仿真。利用负载牵引测试平台(Focus/MPT-3620-TC)测试器件的阻抗与大信号输出特性,用于与该模型的仿真结果进行对比验证,探针在片测试平台和测试装置如图6所示。



a. 在片探针测试台



b. 测试装置示意图

图6 负载牵引测试平台及测试框图

2.1 直流特性对比

图7为直流特性的仿真与测试对比图。由于自热效应的影响,在较高功耗的情况下,电流随 V_{ds} 的增大出现了明显的下降(如图7a和7b),而该模型嵌入了非线性热网络,准确地模拟了热效应。在膝点区域,仿真与实测结果略有误差,主要原因是与原始Angelov I_{ds} 公式相比,本文减少了 I_{ds} 公式中的 ψ 和 α 对 V_{ds} 和 V_{gs} 的依赖性^[9],但通过后文的模型验证可以看出,该误差的影响较小, I_{ds} 模型具有足够的精度。此外,相比于单场板器件,双场板器件的最大饱和电流大了约15 mA(如图7c所示),这与后者具有更大的功率密度是一致的。

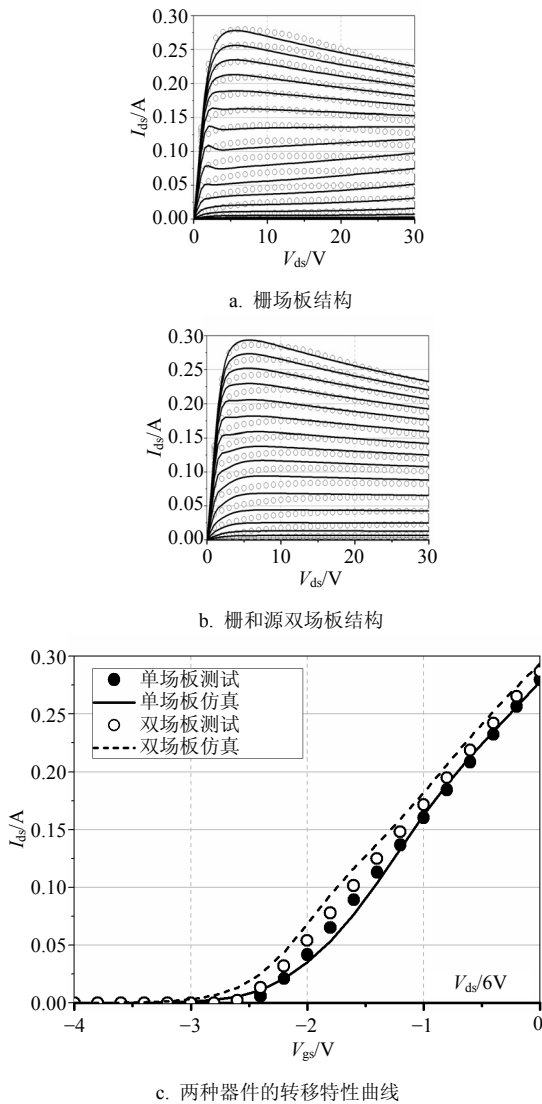


图7 DC-IV仿真与测试结果对比

2.2 小信号特性对比

图8给出了器件在偏置电压 $V_{ds} = 10\text{ V}$ 时, gm 和最大电流增益截止频率(f_T)随栅压变化的仿真与测试结果。可以看出,两者的 gm 值基本相同;与双场

板相比,单栅场板器件的 C_{gd} 虽然更大,但它的 C_{gs} 更小,以致于后者的 f_T 更大一些,为46 GHz。仿真与测试结果表明,该模型能准确地预测两种场板GaN HEMTs的增益特性。

为了验证大信号模型对小信号特性预测的一致性,对比了两种场板器件的小信号S参数仿真与测试结果,如图9所示。可以看出,在0.1~40 GHz频率范围内,该模型能较准确地预测器件的小信号特性。

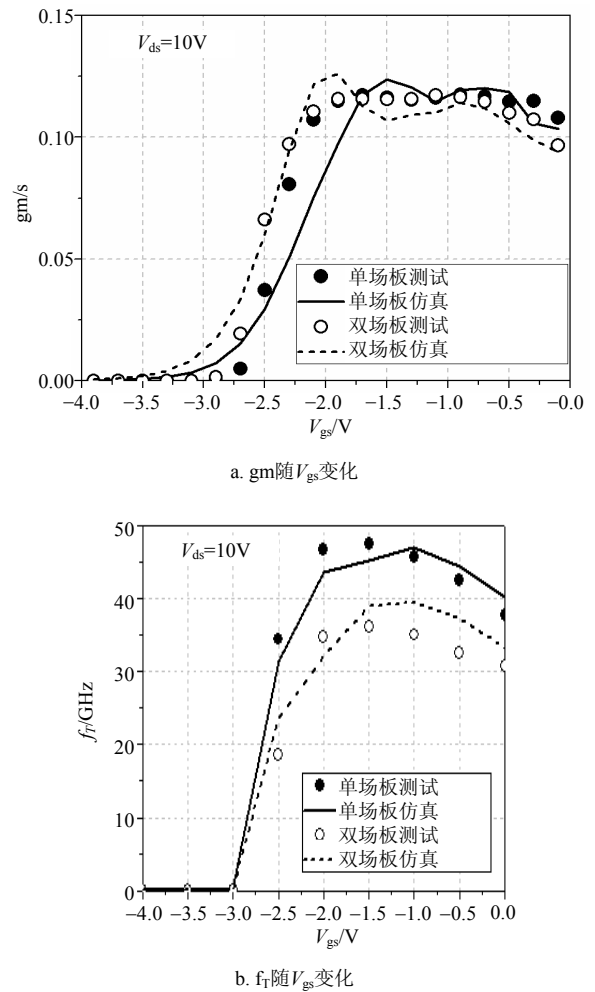
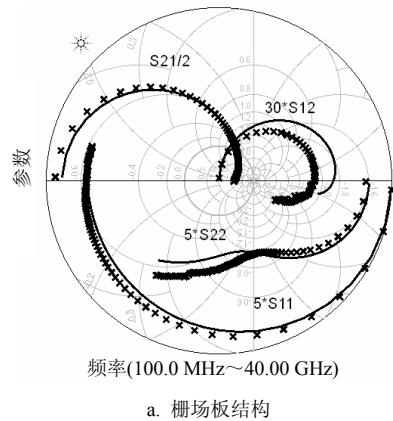
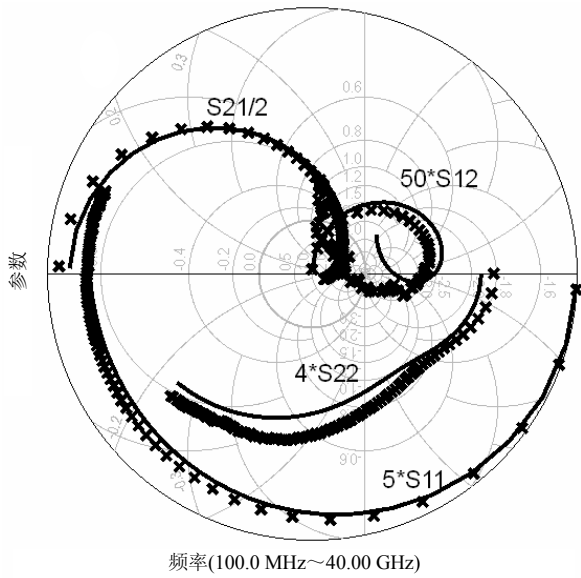


图8 仿真(实线)与测试(符号)的 gm 和 f_T 结果对比



a. 栅场板结构



b. 栅和源双场板结构

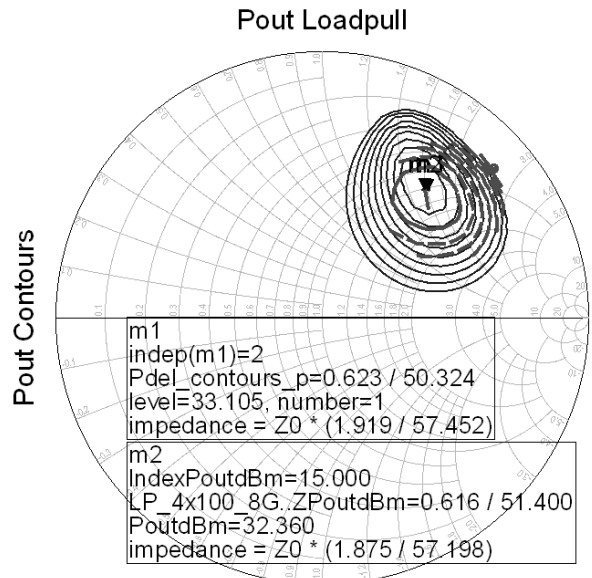
图9 S参数仿真(实线)与测试(符号)结果对比, $V_{gs} = -2\text{ V}$, $V_{ds} = 28\text{ V}$

2.3 阻抗特性对比

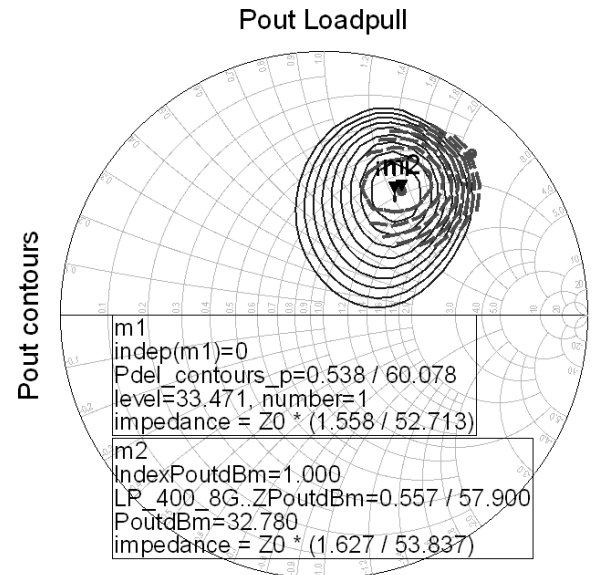
器件输入输出负载阻抗是微波电路设计的重要参数,场板结构的不同引起的阻抗变化影响着电路匹配的难易程度。同时,准确地预测器件在不同工作状态下的阻抗特性,是最终实现最佳电路性能的关键。图10给出了两种场板器件的负载牵引结果对比, m_1 和 m_2 点分别代表仿真和测试的最大输出功率(P_{out})值。可以看出,在相同偏置状态、工作频率和输入功率的情况下,双场板器件具有更大的输出功率,而它们的最优负载阻抗点位置有所差别,其归一化幅度偏差达到0.25左右。因此,该模型准确地预测了两种场板器件的最优负载阻抗差异,能为功率放大器匹配电路设计提供较准确的指导。

2.4 大信号验证

为了验证该大信号模型的大信号输出特性,在片测试了两种场板器件的 P_{out} 、增益(Gain)和功率附加效率(PAE)特性。图11给出了工作状态为AB类、偏置电压 $V_{gs} = -2.5\text{ V}$ 、 $V_{ds} = 28\text{ V}$ 、输入频率为8 GHz时,输出特性随输入功率变化的仿真与实测结果对比。可以看出,与单栅场板器件相比,调谐在几乎相同PAE的条件下,双场板器件的 P_{out} 和Gain均比单场板器件大了约1.4 dB,表明双场板器件具有更大的输出功率密度。仿真与实测结果吻合较好,证明该大信号模型能准确地预测两种场板器件的大信号输出特性。

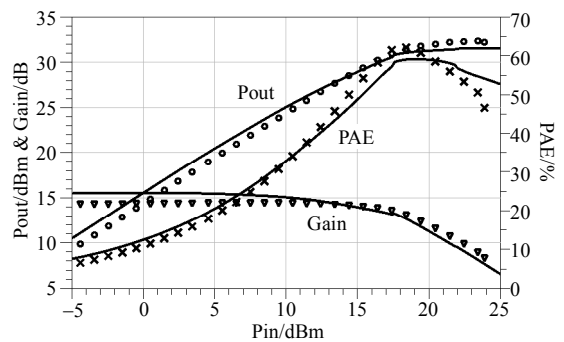


a. 栅场板结构

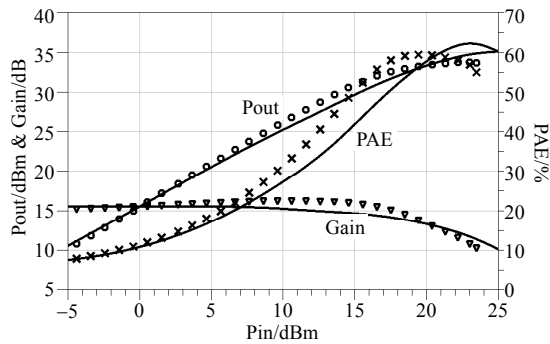


b. 栅和源双场板结构

图10 负载牵引仿真(实线)与测试(虚线)对比($V_{gs} = -2.5\text{ V}$, $V_{ds} = 28\text{ V}$, $\text{freq} = 8\text{ GHz}$, $P_{in} = 20\text{ dBm}$)



a. 栅场板结构



b. 栅和源双场板结构

图11 大信号仿真(实线)与测试(符号)结果对比

3 结束语

本文针对单栅场板和栅-源双场板GaN HEMTs器件, 提出了一种带有非线性热网络的电热大信号模型。通过有限元热仿真方法提取了它们的热阻和热容参数, 建立了一种非线性热网络, 并嵌入到漏源电流经验公式中。利用该大信号模型, 准确地分析和预测了两种场板GaN HEMTs的小信号特性、大信号负载阻抗及输出特性的差异。为场板GaN HEMTs器件用于微波功率放大器的电路设计与优化, 提供了较为精确的大信号模型。

参考文献

- [1] PENGELLY R S, WOOD S M, MILLIGAN J M, et al. A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(6): 1764-1783.
- [2] 张波, 邓小川, 陈万军, 等. 宽禁带功率半导体器件技术[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 618-623.
ZHANG Bo, DENG Xiao-chuan, CHEN Wan-jun, et al. Wide bandgap semiconductors for power electronics [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 618-623.
- [3] DORA Y, CHAKRABORTY A, MCCARTHY L, et al. High breakdown voltage achieved on AlGaIn/GaN HEMTs with integrated slant field plates[J]. IEEE Electron Device Letters, 2006, 27(9): 713-715.
- [4] WU Y F, MOORE M, SAXLER A, et al. 40-W/mm double field-plated GaN HEMTs[C]//64th Device Research Conference. State College, PA: IEEE, 2006: 151-152.
- [5] COFFIE R. Slant field plate model for field-effect transistors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(8): 2867-2872.
- [6] 杜江峰, 赵金霞, 伍捷, 等. 具有场板结构GaN HEMT电场分布解析模型[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(2): 297-300.
DU Jiang-feng, ZHAO Jin-xia, WU Jie, et al. Electric field distribution analytic model for field-plated GaN HEMT[J].

- Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(2): 297-300.
- [7] COFFIE R. Analytical field plate model for field effect transistors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(3): 878-883.
- [8] OPRINS H, STOFFELS S, BAELMANS M, et al. Influence of field-plate configuration on power dissipation and temperature profiles in AlGaIn/GaN on silicon HEMTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62(8): 2416-2422.
- [9] ANGELOV I, BENGTTSSON L, GARCIA M. Extensions of the Chalmers nonlinear HEMT and MESFET model[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1996, 44(10): 1664-1674.
- [10] YUK K S, BRANNER G R, 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 and Techniques, 2009, 57(12): 3322-3332.
- [11] WANG C S, XU Y H, YU X M, et al. An electrothermal model for empirical large-signal modeling of AlGaIn/GaN HEMTs including self-heating and ambient temperature effects[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(12): 2878-2887.
- [12] BENBAKHTI B, SOLTANI A, KALNA K, et al. Effects of self-heating on performance degradation in AlGaIn/GaN-based devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009, 56(10): 2178-2185.
- [13] FLORIAN C, SANTARELLI A, CIGNANI R, et al. Characterization of the nonlinear thermal resistance and pulsed thermal dynamic behavior of AlGaIn-GaN HEMTs on SiC[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(5): 1879-1891.
- [14] WANG J H, WANG X H, PANG L, et al. Modeling, simulation and analysis of thermal resistance in multi-finger AlGaIn/GaN HEMTs on SiC substrates[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(8): 088502.
- [15] CHEN G, KUMAR V, SCHWINDT R S, et al. A low gate bias model extraction technique for AlGaIn/GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(7): 2949-2953.
- [16] CRUPI G, XIAO D P, SCHREURS D M M-P, et al. Accurate multibias equivalent-circuit extraction for GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(10): 3616-3622.
- [17] 徐跃杭, 国云川, 徐锐敏, 等. SiC MESFET非线性模型及其嵌入研究[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(3): 443-446.
XU Yue-hang, GUO Yun-chuan, XU Rui-min, et al. Modeling and embedding of SiC MESFET nonlinear model[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(3): 443-446.

编辑 叶芳