

# GaN HEMT 器件 22 元件小信号模型

刘 丹<sup>†</sup> 陈晓娟 刘新宇 吴德馨

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

**摘要:** 采用了新型的包含 22 元件的 GaN HEMT 小信号模型, 通过增加与栅源电容  $C_{gs}$  和栅漏电容  $C_{gd}$  并联的电导  $G_{gsf}$  和  $G_{gdf}$  来表征 GaN HEMT 栅漏电情况. 结果表明 22 元件小信号模型拟合度提高, 物理意义更为明确. 同时重点改进了寄生电容参数的提取方法, 可有效地提取新型栅场板、源场板器件小信号参数. 由算法提取的参数值可准确反映 GaN HEMT 器件的物理特性.

**关键词:** GaN HEMT; 小信号; 优化; 模拟

**PACC:** 7340L **EEACC:** 2570A

**中图分类号:** TN814<sup>+</sup>.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)09-1438-05

## 1 引言

GaN HEMT 器件在国际国内都有广泛的研究<sup>[1~4]</sup>, 目前已逐渐走向电路应用<sup>[5,6]</sup>, GaN HEMT 器件具有宽禁带的特点, 主要应用于功率电路, 因此需要提供大信号模型, 以实现电路的 CAD 设计, 并能够准确模拟和分析电路特性. 为了得到大信号模型, 需要提取小信号器件模型, 再加入非线性, 自热效应、陷阱效应等大信号特性, 从而建立比较准确的大信号模型. 在一定偏置条件下, 准确的小信号模型参数提取是建立大信号模型的基础, 并且要求能够准确反映器件的物理特性. 本文使用的小信号等效电路包含了 22 个元件, 物理意义更加明确, 且寄生参数提取算法不受器件对称性的限制, 可对新型非对称器件进行小信号等效电路参数提取, 使新型器件的研究更加深入.

## 2 22 元件小信号模型

本文采用了 22 元件<sup>[7]</sup> 等效电路图 (见图 1 (b)), 与 15 元件小信号等效电路<sup>[8]</sup> (见图 1 (a)) 相比, 增加了电导  $G_{gdf}$  和  $G_{gsf}$ , 能够较好地反映 GaN HEMT 器件的栅漏电. 其中  $C_{pgi}$ ,  $C_{pdi}$  和  $C_{gdi}$  构成了栅、源和漏极间和交叉电容.  $C_{pga}$ ,  $C_{pda}$  和  $C_{gda}$  构成了测量设备、探针和探针与器件接触的寄生电容. 等效电路的物理意义更加明确.

理想情况下, 器件处于截止状态, 沟道中没有电流通过. 在以往的等效电路中, 当频率不高时, 都不考虑器件的电感和电阻. 实际上, 器件漏电较大时, 还应该考虑器件的等效漏电电阻, 器件等效为图 2

(a) 的形式, 因此可得出器件的 Y 参数为:

$$Y_{11} = j\omega(C_{gso} + C_{gdo}) + G_{gs} + G_{gd} \quad (1)$$

$$Y_{22} = j\omega(C_{dso} + C_{gdo}) + G_{gd} + G_{ds} \quad (2)$$

$$Y_{12} = -j\omega C_{gdo} - G_{gd} \quad (3)$$

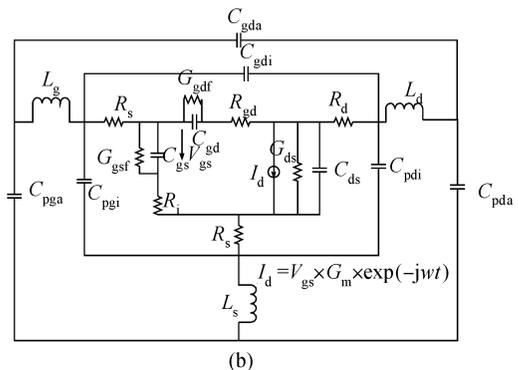
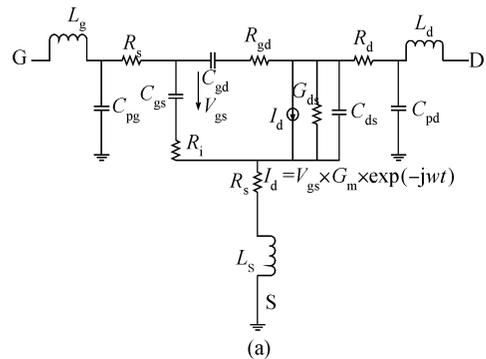


图 1 GaN HEMT 的 15 元件(a)和 22 元件(b)小信号等效电路图

Fig.1 15-element (a) and 22-element (b) small signal models of GaN HEMT

<sup>†</sup> 通信作者. Email: caroliudan@hotmail.com

2007-03-06 收到, 2007-04-19 定稿

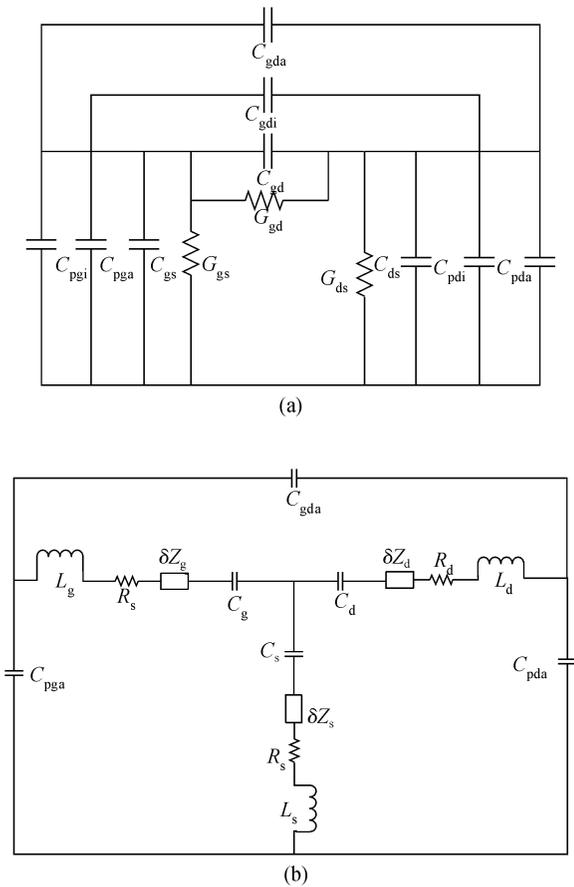


图 2 (a) GaN HEMT 器件截止态低频下的等效电路图; (b) GaN HEMT 器件截止态高频下的等效电路图  
Fig. 2 (a) Cold pinch-off equivalent circuit of GaN HEMT device at low frequency; (b) Cold pinch-off equivalent circuit of GaN HEMT device at high frequency

其中  $C_{gdo} = C_{gda} + C_{gdi} + C_{gd}$ ;  $C_{gso} = C_{pga} + C_{pgi} + C_{gs}$ ;  $C_{dso} = C_{pda} + C_{pdi} + C_{ds}$ .

当频率增大时,器件中的寄生电感和电阻的影响都不能忽略,因此器件又可等效为图 2(b)形式,将寄生参数  $C_{pga}$ ,  $C_{pda}$  和  $C_{gda}$  的值从器件的  $Y$  参数中去嵌,然后将  $Y$  参数转换为  $Z$  参数如下:

$$Z_{11} = R_g + R_s + j\omega(L_g + L_s) + \frac{1}{j\omega} \left( \frac{1}{C_g} + \frac{1}{C_s} \right) + \delta Z_g \quad (4)$$

$$Z_{22} = R_d + R_s + j\omega(L_d + L_s) + \frac{1}{j\omega} \left( \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_s} \right) + \delta Z_d \quad (5)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + \delta Z_s \quad (6)$$

其中  $\delta Z_g$ ,  $\delta Z_d$  和  $\delta Z_s$  代表了与模型本征参数相关的修正项. 修正项在截止态下的值非常小,可忽略.  $Z$  参数乘以  $\omega$ ,可以由  $\omega \text{Im}[Z_{ij}]$  随  $\omega^2$  变化的曲线斜率提取  $L_g$ ,  $L_d$  和  $L_s$ . 去嵌的  $Z$  参数乘以  $\omega^2$ ,寄生

的影响会降低. 因此将去嵌的  $Z$  参数乘以  $\omega^2$ ,可通过  $\omega^2 \text{Re}[Z_{ij}]$  随  $\omega^2$  变化的曲线斜率提取  $R_g + R_s$ ,  $R_d + R_s$  和  $R_s$ . 截止态下得到的电阻值作为初始值,漏源电压  $V_{ds} = 0$  且栅源电压  $V_{gs} > 0$  时的寄生电阻作为最终的电阻值.

### 3 非对称结构器件电容提取方法的改进

为了得到更大的功率,改善器件的电流崩塌,并且提高击穿电压, GaN HEMT 器件经过不断发展,出现了很多新的结构,例如栅场板、源场板<sup>[9,10]</sup>等. 由于场板结构的特性,这些器件为非对称器件,栅源和栅到漏的距离是不等的,因此在一定的栅压下,栅源电容  $C_{gs}$  和栅漏电容  $C_{gd}$  就不相等了,基于对称器件的小信号参数提取算法也就不适用了(对称器件算法中假设  $C_{gs} = C_{gd}$ ). 为了解决这一问题,本文提出了一种改进的小信号参数提取方法,适用于新结构的 GaN HEMT 器件参数提取.

如前所示,寄生电容中,只有总电容  $C_{gdo}$ ,  $C_{gso}$  和  $C_{dso}$  可直接由  $Y$  参数提取,总电容中的各个分支电容未知. 分析 9 个分支电容,  $C_{gda}$ ,  $C_{gdi}$ ,  $C_{pga}$ ,  $C_{pgi}$ ,  $C_{pda}$  和  $C_{pdi}$  这 6 个寄生电容值都非常小,分别只占总电容的百分之几十甚至百分之几. 可将这 6 个未知电容作为算法中的循环变量,按其物理意义取一定范围进行循环,则通过  $C_{gdo}$ ,  $C_{gso}$  和  $C_{dso}$  的表达式,  $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$  和  $C_{ds}$  在每一次循环中的值可由上述 6 个电容值得到. 但实验中发现,如果将这 6 个未知电容都作为算法中的循环变量,计算量非常大. 观察器件的形状可得到  $C_{pga} = C_{pda}$ , 实验中又发现设  $C_{pdi} = 2C_{pda}$ , 可以得到比较满意的结果,因此只将  $C_{gda}$ ,  $C_{gdi}$ ,  $C_{pgi}$  和  $C_{pda}$  这 4 个电容作为循环的变量,计算时间大大缩短. 且此算法只基于最小的误差函数值,避免了  $C_{gs}$  和  $C_{gd}$  相等,从而保证器件处于偏栅等其他非对称结构时,仍然能够准确提取器件的寄生参数值. 这对于研究新型器件特别是非对称结构的器件是十分有用的.

在每一次循环中,去嵌电容值,得到其他的寄生参数. 每次得到的等效电路中的所有寄生参数值用于仿真器件的  $S$  参数,仿真的  $S$  参数同测量的  $S$  参数比较得到误差函数  $\epsilon = \sqrt{\frac{1}{3}(\epsilon_s^2 + \epsilon_k^2 + \epsilon_G^2)}$ . 在所有计算得到的误差函数值中以最小误差  $\epsilon_{\min}$  对应的寄生参数值作为最终提取的寄生参数值. 在器件应用中,我们比较关心器件的稳定因子  $K$  和增益  $G$ ,因此,在误差函数中也加入这两个参量的误差. 这样,结合了  $S$  参数,稳定因子  $K$  以及增益  $G$  的误差函数,用这一优化函数得到的参数值更有意义,更实用化.

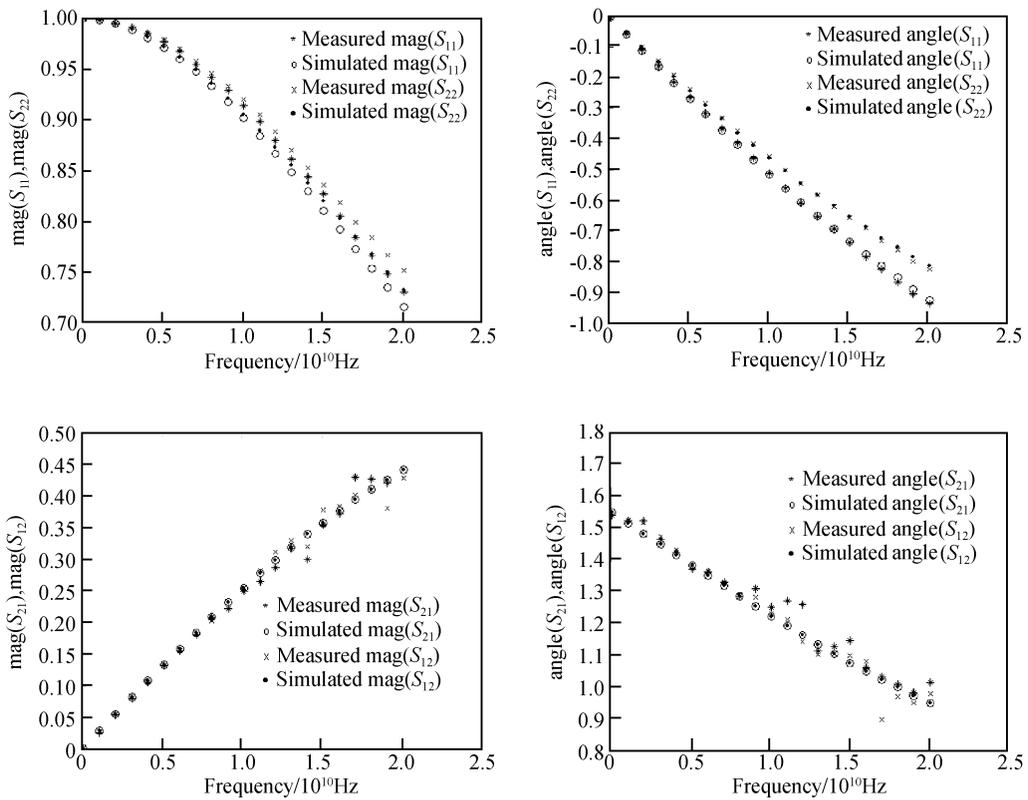


图 3 GaN HEMT 器件 cold pinch-off  $S$  参数的仿真和测量参数对比

Fig.3 Comparison of measured and simulated cold pinch-off  $S$  parameters of GaN HEMT device

### 4 小信号模拟结果与讨论

本文所用的 HEMT 器件的 AlGaIn/GaN 材料是由中国科学院半导体研究所提供的,采用金属有机物化学气相淀积 (MOCVD) 技术生长,衬底为 SiC.用于测试的 GaN HEMT 管芯的尺寸为  $10\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} \times 0.8\mu\text{m}$ ,器件隔离采用 ICP 干法刻蚀实现,源漏欧姆接触采用 Ti/Al/Ti/Au 金属结构,栅金属采用 Ni/Au.

在对本征部分参数进行提取时,本文运用了 Jarndal 等人<sup>[7]</sup>提出的方法.精确的数值可由先进的组合优化方法,例如遗传算法,模拟退火算法得到.

本文的  $S$  参数范围为 100MHz 到 10.1GHz,由以上算法得到小信号等效电路的各个参数值如表 1 所示.

实验中发现,当器件漏电小时,  $G_{\text{gdf}}$  和  $G_{\text{gsf}}$  的数值相对很小,达到  $10^{-6}$  甚至  $10^{-7}$  量级,而器件漏电大时,其数值相对较大,达到  $10^{-4}$  量级以上,说明这两个电导可反映器件的栅漏电.

15 元件和 22 元件模型仿真的  $S$  参数与测量  $S$  参数对比如图 4 所示.

其中 15 元件模型拟和的误差  $P = 0.14$ ,而 22 元件模型拟和的误差  $P = 0.05$ ,与测量  $S$  参数更接近.且由于误差函数的特点,拟合结果具有更精确的物理意义和更大的实用性.

表 1 利用 matlab 程序提取的 22 元素小信号等效电路参数值

Table 1 Values of 22 elements small signal equivalent circuit parameters extracted using matlab program

$C_{\text{pga}}$	0.01fF	$C_{\text{pgi}}$	0.01fF	$C_{\text{gs}}$	277.39fF	$G_{\text{m}}$	0.0158S
$C_{\text{pda}}$	0.01fF	$C_{\text{pdi}}$	0.01fF	$G_{\text{gsf}}$	$8.59 \times 10^{-6}\text{S}$	$\tau$	2.94ps
$C_{\text{gda}}$	0.435fF	$C_{\text{gdi}}$	0.435fF	$R_{\text{i}}$	15.60 $\Omega$	$C_{\text{ds}}$	26.24fF
$L_{\text{g}}$	22pH	$R_{\text{g}}$	7.023 $\Omega$	$C_{\text{gd}}$	30.35fF	$G_{\text{ds}}$	0.0015S
$L_{\text{d}}$	13.72pH	$R_{\text{d}}$	10.95 $\Omega$	$G_{\text{gdf}}$	$5.47 \times 10^{-7}\text{S}$		
$L_{\text{s}}$	126.63pH	$R_{\text{s}}$	7.23 $\Omega$	$R_{\text{gd}}$	86.30 $\Omega$		

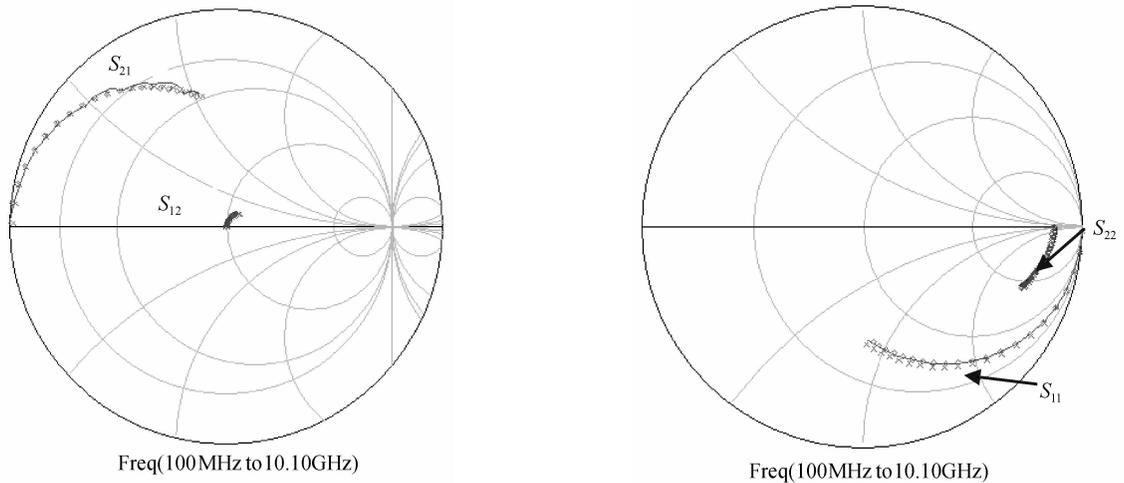


图4 测量与仿真  $S$  参数图 其中  $\times$ ,  $\diamond$  分别为 15, 22 元件小信号模型仿真  $S$  参数,  $-$  为测量  $S$  参数.

Fig. 4  $S$  parameters between modeled and measured data  $\times$  and  $\diamond$  represent the modeled  $S$  parameters of 15 and 22 elements small signal model,  $-$  represents the measured  $S$  parameters.

## 5 结论

本文给出了一个完整的小信号提参过程. 运用了较能真实反映器件特性的误差函数, 可得到质量较高的寄生参数值. 本征部分运用 Jarndal 等人提出的方法提取参数值, 得到的模型更实用化. 为了精确提取器件参数值, 本文中的算法无过多假设, 因此对于非对称(如偏栅器件)等特殊形状的器件也适用. 由算法提取的参数值可准确反映器件的物理特性. 另外, 在截止态下, 考虑了器件的漏电影响, 加入了能反映截止态下器件漏电的电阻. 使得模型参数的提取更加准确.

## 参考文献

- [1] Therrien R, Singhal S, Johnson J W, et al. A 36mm GaN-on-Si HFET producing 368W with 70% drain efficiency. IEEE International Electron Devices Meeting, 2005; 568
- [2] Ueda H, Sugimoto M, Uesugi T, et al. High current operation of GaN power HEMT. Proc ISPSD, 2005; 311
- [3] Zhang Xiaoling, Lü Changzhi, Xie Xuesong, et al. Research on AlGaIn/GaN HEMT. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(8): 847 (in Chinese) [张小玲, 吕长治, 谢雪松, 等. AlGaIn/GaN HEMT 器件的研制. 半导体学报, 2003, 24(8): 847]
- [4] Chen Xiaojuan, Liu Xinyu, Shao Gang, et al. AlGaIn/GaN HEMT on sapphire using FC bonding. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(5): 990 (in Chinese) [陈晓娟, 刘新宇, 邵刚, 等. 基于 Flip-Chip 技术的 AlGaIn/GaN HEMTs. 半导体学报, 2005, 26(5): 990]
- [5] Lee S Y, Cetiner B A, Torpi H, et al. An X-band GaN HEMT power amplifier using an artificial neural network modeling technique. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48: 495
- [6] Kimball D F, Jeong J, Hsia C, et al. High-efficiency envelope-tracking W-CDMA base-station amplifier using GaN HFETs. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2006, 54: 3848
- [7] Jarndal A, Kompas G. A new small-signal modeling approach applied to GaN devices. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2005, 53: 3440
- [8] Dambrine G, Cappy A, Heliodore F, et al. A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1988, 36: 1151
- [9] Xu Hongtao, Sanabria C, Chini A, et al. A new field-planted GaN HEMT structure with improved power and noise performance. International Journal of High Speed Electronics and Systems, 2004, 14: 810
- [10] Koudymov A, Adivarahan V, Yang J, et al. Mechanism of current collapse removal in field-plated nitride HFETs. IEEE Electron Device Lett, 2005, 26: 704

## A 22-Element Small-Signal Model of GaN HEMT Devices

Liu Dan<sup>†</sup>, Chen Xiaojuan, Liu Xinyu, and Wu Dexin

(*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

**Abstract:** This paper uses a new GaN HEMT small signal model that includes 22 elements and increases the conductance of  $G_{gsf}$  and  $G_{gdf}$  and has parallel gate-source capacitance  $C_{gs}$  and gate-drain capacitance  $C_{gd}$ , which can reflect the gate's leakage current. The results show that this model can improve the fitting precision and makes more sense in the physical domain. This paper improves the extraction method for extrinsic capacitance parameters, which can extract the new gate-field plate and source-field plate devices' small-signal parameters effectively. It can reflect the physical characteristics of GaN devices accurately from the extracted parameters.

**Key words:** GaN HEMT; small-signal; optimize; modeling

**PACC:** 7340L      **EEACC:** 2570A

**Article ID:** 0253-4177(2007)09-1438-05

---

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: caroliudan@hotmail.com

Received 6 March 2007, revised manuscript received 19 April 2007