

# AlGaIn/GaN HEMT 器件小信号等效 电路参数值的提取\*

刘 丹<sup>†</sup> 陈晓娟 罗卫军 李诚瞻 刘新宇 和致经

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 利用国际通用的 ColdFET 以及宽带小信号提取方法对 AlGaIn/GaN HEMT 器件进行小信号参数的提取, 用仿真软件 ADS(advanced design system)建立 HEMT 小信号等效电路模型, 并对参数值进行优化. 可快速提取器件的小信号参数并给予工艺一些反馈和指导.

关键词: AlGaIn/GaN HEMT; 小信号等效电路; 参数提取

EEACC: 2560S

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0411-03

## 1 引言

AlGaIn/GaN HEMT 器件是目前国际上研究的热点, 已经取得巨大的进展, 近年来国内也开展了关于 AlGaIn/GaN HEMT 器件的研究<sup>[1,2]</sup>. 器件的一些物理参数值, 诸如器件的栅电阻  $R_g$ , 栅源电容  $C_{gs}$ , 栅漏电容  $C_{gd}$  等, 对器件电学特性影响极大. 为了得到这些参数值, 对 HEMT 器件建立小信号模型是十分必要的. 且建立 HEMT 器件小信号等效电路, 还可以根据得到的参数值对工艺进行指导, 更好地优化器件结构, 得到性能更好的 GaN 基 HEMT 器件.

## 2 小信号等效电路参数值推导

HEMT 的小信号等效电路图如图 1 所示. 该等效电路分为外围寄生元件网和内部本征电路两个部分. 其中外围寄生元件主要有:  $C_{pg}$ ,  $C_{pd}$  和栅、源、漏的寄生电感和电阻  $R_g$ ,  $R_d$ ,  $R_s$ ,  $L_g$ ,  $L_d$ ,  $L_s$ . 本征部分组成  $\pi$  型网络. 其中  $C_{pg}$  是栅对地的寄生电容,  $C_{pd}$  是漏对地的寄生电容, 由于源接地, 故无对地电容.

在漏源电压  $V_{ds} = 0$ , 且栅源电压  $V_{gs} < V_p$  ( $V_p$  为夹断电压) 时, HEMT 的小信号等效电路可简化为图 2 形式. 在器件处于截止态的时候, 若器件结构是对称的, 可把器件内部等效为 3 个相等的电容, 外部寄生元件不变. 而在低频下, 电感的作用可忽略不

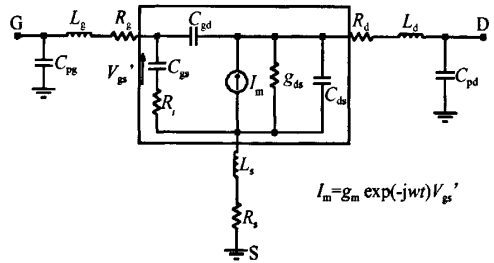


图 1 HEMT 器件小信号等效电路图

Fig. 1 Small signal equivalent circuit of HEMT

计, 由文献[3]得到电容与 Y 参数虚部之间的关系, 在上述偏置条件下, 可以通过 Z 参数得到寄生电阻和电感的值.

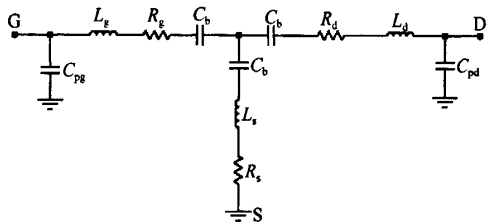


图 2  $V_{ds} = 0, V_{gs} < V_p$  时 HEMT 器件小信号等效电路图

Fig. 2 Small signal equivalent circuit of HEMT when  $V_{ds} = 0, V_{gs} < V_p$

由图 1 方框中的本征部分电路图, 可得到本征部分的 Y 参数组<sup>[3]</sup>:

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2002CB311903)及中国科学院重点创新(批准号:KGCX2-SW-107)资助项目

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

2006-12-12 收到, 2006-12-28 定稿

$$\begin{cases} Y_{11} = \frac{R_i C_{gs}^2 \omega^2}{D} + j\omega \left( \frac{C_{gs}}{D} + C_{gd} \right) \\ Y_{12} = -j\omega C_{gd} \\ Y_{21} = \frac{g_m \exp(-j\omega\tau)}{1 + jR_i C_{gs} \omega} - j\omega C_{gd} \\ Y_{22} = g_{ds} + j\omega(C_{ds} + C_{gd}) \end{cases}$$

其中  $D = 1 + \omega^2 C_{gs}^2 R_i^2$ .

ColdFET 方法<sup>[4]</sup>假设  $D \approx 1$ , 这就要求  $f < 5\text{GHz}$ . 有一种比文献[4]更好的方法<sup>[5]</sup>能够不作近似假设, 直接提取各种本征参数, 从而实现了在很宽的频率范围内提取小信号参数的可能. 在上述方程组的基础上, 利用数学变换, 得到各参数表达式:

$$\begin{aligned} C_{ds} &= \frac{\text{Im}(Y_{22}) - \omega C_{gd}}{\omega}, g_{ds} = \text{Re}(Y_{22}), \\ C_{gs} &= \frac{\text{Im}(Y_{11}) - \omega C_{gd}}{\omega} \left( 1 + \frac{(\text{Re}(Y_{11}))^2}{(\text{Im}(Y_{11}) - \omega C_{gd})^2} \right) \\ C_{gd} &= -\frac{\text{Im}(Y_{12})}{\omega}, g_m = \\ &= \frac{\sqrt{((\text{Re}(Y_{21}))^2 + (\text{Im}(Y_{21}) + \omega C_{gd})^2)(1 + \omega^2 C_{gs}^2 R_i^2)}}{\omega} \\ R_i &= \frac{\text{Re}(Y_{11})}{(\text{Im}(Y_{11}) - \omega C_{gd})^2 + (\text{Re}(Y_{11}))^2}, \\ \tau &= \frac{1}{\omega} \arcsin\left( \frac{-\omega C_{gd} - \text{Im}(Y_{21}) - \omega C_{gs} R_i \text{Re}(Y_{21})}{g_m} \right) \end{aligned}$$

在  $V_{ds} > 0$  的情况下, 上述表达式对整个测量频段都有效, 因此比文献[4]中的表达式适用于更宽的频段.

通过上述推导, 可得到全部的小信号等效电路参数值.

### 3 HEMT 小信号等效电路参数值提取与仿真

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, 衬底为蓝宝石. 用于测试的 GaN HEMT 管芯的尺寸为  $0.8\mu\text{m} \times 120\mu\text{m}$ , 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 Pt/Ti/Au.

利用上述原理, 建立 matlab 程序进行器件小信号等效电路参数提取, 并在 ADS 中建立等效电路进行优化, 得到特定偏压下 ( $V_{gs} = -3\text{V}$ ,  $V_{ds} = 10\text{V}$ ), 一组小信号等效电路元件值, 如表 1 所示.

得出的结果同测量结果比较, 如图 3 所示. 可看出用算得的小信号等效电路元件值进行拟合得到的 S 参数与测量的 S 参数非常接近.

表 1 HEMT 器件小信号等效电路元件参数值

Table 1 Parameter values of the HEMT small-signal equivalent circuit

$C_{pg}$	$C_{pd}$	$R_d$	$R_s$	$R_g$	$L_d$	$L_s$	$L_g$
25.588fF	5.429fF	29.17Ω	14.97Ω	3.568Ω	0.061nH	0.045nH	0.0854nH
$C_{gd}$	$C_{gs}$	$g_m$	$\tau$	$R_i$	$R_{ds}$	$C_{ds}$	
0.025pF	0.558pF	39.89mS	0.285ps	13.4Ω	1084Ω	0.017pF	

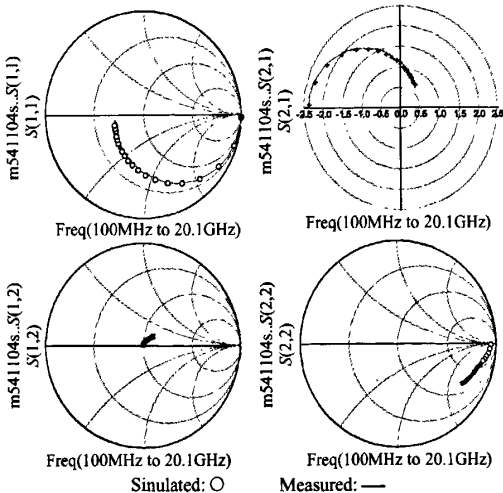


图 3 利用 ADS 仿真的 S 参数与测量的 S 参数的比较  
Fig. 3 Measured S parameters versus S parameters modeled by ADS

利用上述模型, 对 3 种管芯结构: 源场板、栅场板和常规结构的 GaN HEMT 管芯进行了小信号等效电路参数的提取. 选取其中具有代表性的数据进行对比, 如表 2 所示.

表 2 器件的一部分小信号等效电路参数值

Table 2 A part of the parameter values of the HEMT small-signal equivalent circuit

参数	常规结构	栅场板	源场板
$L_s/\text{nH}$	114.75	102.14	97.709
$R_g/\Omega$	5.388	6.855	7.31
$R_s/\Omega$	6.036	2.063	0.978
$C_{gs}/\text{fF}$	397.03	341.99	374.98
$C_{gd}/\text{fF}$	18.067	21.54	18.099
$g_m/\text{mS}$	24.205	22.35	22.542

从稳定性方面来看, 源场板结构的管芯其  $R_g$  较大, 且源处的寄生电阻  $R_s$  和电感  $L_s$  较小, 可知其稳定性要好于其他两种管芯, 这与表 3 中显示的 K 因子值也相符合; 从频率特性来看,  $f_T$  和  $f_{max}$  是

HEMT 器件的两个十分有用的参数,暗含了用已知器件设计电路,使电路能够达到最好性能的信息.用器件的小信号等效电路参数可表达这两个参数:

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$

$$f_{max} \cong \frac{f_T}{2\sqrt{(R_g + R_{gs} + R_s)/R_{ds} + 2\pi f_T R_g C_{gd}}}$$

通过器件的小信号参数可以得到两个频率参数的值.常规结构的两个电容虽然比其他两种稍大,但它的增益  $g_m$  也大于其他两种,由公式可得其截止频率要大于其他两种.由于电阻的作用,源场板的  $f_T$  虽然比其他两种都小,但其  $f_{max}$  却比较大.实际应用中,可根据不同的需要选取不同的管芯,且可根据参数值的反馈,在工艺中针对不同的参数对管芯结构等进行改进,达到提高器件性能的目的,如表 3 所示.

表 3 从  $S$  参数中得到的器件参数

Table 3 Device parameters from the  $S$  parameters

	常规结构	栅场板	源场板
$f_T$	9.1	9.9	8.5
$f_{max}$	15.05	14.588	15.459
$K$	0.613	0.551	0.667

## 4 结束语

本文利用 ColdFET 方法和宽带小信号提取方

法提取了 AlGaIn/GaN HEMT 小信号等效电路参数值.并在 ADS 中建立了小信号等效电路,并对电路中元件参数值进行了优化,得到很好的拟合结果.可根据这些参数了解器件的一些基本物理参数,并给予工艺指导.

## 参考文献

- [1] Zhang Jinwen, Yan Guizhen, Zhang Taiping, et al. Fabrication of Au-AlGaIn/GaN HFET and its properties. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(4): 424 (in Chinese) [张锦文, 闫桂珍, 张太平, 等. Au-AlGaIn/GaN HFET 研制与器件特性. 半导体学报, 2002, 23(4): 424]
- [2] 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]
- [3] White P M. Improved equivalent circuit for determination of MESFET and HEMT parasitic capacitances from 'Coldfet' measurements. IEEE Microw Guided Wave Lett, 1993, 3(12): 453
- [4] Gilles D, Alain C, Frederic H, et al. A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1988, 36(7): 1151
- [5] Berroth M, Bosch R. Broad-band determination of the FET small-signal equivalent circuit. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1990, 38(7): 891

## Extraction of the Small-Signal Equivalent Circuit Parameters of the AlGaIn/GaN HEMT Device\*

Liu Dan<sup>†</sup>, Chen Xiaojuan, Luo Weijun, Li Chengzhan, Lin Xinyu, and He Zhijing

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

**Abstract:** This paper uses ColdFET and broadband small-signal extracting methods to extract the AlGaIn/GaN HEMT small-signal parameters. And it uses analog software (ADS) to build a small-signal equivalent circuit model and optimize the values of the parameters. It can be quick to extract the parameters and gives the device process some information and advices.

**Key words:** AlGaIn/GaN HEMT; small-signal equivalent circuit; parameters extraction  
EEACC: 2560S

**Article ID:** 0253-4177(2007)S0-0411-03

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (No. 2002CB311903) and the Key Innovation of Chinese Academy of Sciences (No. KGX2-SW-107)

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

Received 12 December 2006, revised manuscript received 28 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics