

# 一种新的 AlGaIn/GaN HEMT 半经验直流特性模型

刘 丹<sup>†</sup> 陈晓娟 刘果果 和致经 刘新宇 吴德馨

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

**摘要:** 在 EEHEMT1 模型的基础上给出一种新的 AlGaIn/GaN HEMT 半经验直流特性模型, 考虑了栅源电压对膝点电压的影响, 得到描述 AlGaIn/GaN HEMT 器件  $I-V$  特性的方程. 此模型可以应用于蓝宝石和 SiC 两种不同衬底 AlGaIn/GaN HEMT 器件的  $I-V$  特性模拟. 仿真结果和实验测量结果拟合误差小于 3%.

**关键词:** AlGaIn/GaN HEMT; 模型; 膝点电压; 衬底

**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(2006)11-1984-05

## 1 引言

AlGaIn/GaN HEMT 器件是目前国际上发展的热点. GaN 基 HEMT 的研究已经取得很好的进展, 硅衬底 AlGaIn/GaN HEMT 器件的最大输出功率可达 368W<sup>[1]</sup>, 最大漏电流达到 30A 以上<sup>[2]</sup>, 近年来国内也开展了关于 AlGaIn/GaN HEMT 器件的研究<sup>[3~5]</sup>. 器件研制的最终目的是为了走向电路研制, GaN HEMT 器件走向电路应用是必然趋势. 为了在仿真时预测器件的 1dB 压缩点输出功率, 以及对电路进行谐波、交调仿真, 对 GaN HEMT 器件进行大信号模型的建模是十分必要的. 模型的精度越高, 仿真结果与实际测量结果差异越小. 然而由于受到自热和电流崩塌效应的影响, GaN 模型的发展却没有及时跟上器件的进展, 这给 GaN 基 HEMT 器件的应用和 MMIC 电路的研制带来了很大困难.

提取器件大信号模型有多种方法, 主要分为四类: 经验模型、半经验模型、分析模型和数据模型. 通常开发的模型包含了以上两种或者更多的方法. 半经验模型是经验模型和分析模型折衷的结果, 它结合了这两种模型的优点, 既有经验模型的直观方便, 又对器件进行了一定的物理分析, 提供了简便的计算.

Agilent 公司给出的 EEHEMT1 模型能够比较准确描述 HEMT 器件饱和区的直流特性, 然而方程复杂, 涉及到庞大的参数数目, 且在拟合器件  $I-V$  特性曲线时, 并未考虑到电压  $V_{gs}$  对膝点电压的影响, 使得模型在线性区的拟合精度不够. 本文提出一种新的半经验模型来模拟 AlGaIn/GaN HEMT 直流特性, 目的就是要建立既精确, 计算又比较快捷的

模型. 同时为了改善  $I-V$  特性曲线中膝点电压的拟合精确度, 模型在器件的线性区引入  $V_{gs}$  的影响.

## 2 HEMT 器件 $I-V$ 特性模型推导

HEMT 器件的  $I-V$  特性曲线一般可分为两个区, 即饱和区和线性区, 本模型分别针对这两个区, 分析 HEMT 器件的直流特性.

在 HEMT 的饱和区内, 分析器件的直流特性. 将漏源电压设为固定电压  $V_{dso}$ , 分析栅源电压  $V_{gs}$  对漏电流  $I_{ds}$  的影响. 结合跨导  $g_m$  与  $V_{gs}$  关系和漏源电流  $I_{ds}$  与  $V_{gs}$  关系的曲线图来说明. 图 1 示出器件在漏源电压  $V_{dso}$  条件下的转移特性曲线.

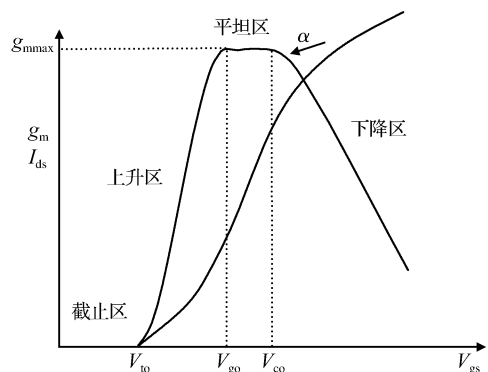


图 1 HEMT 器件  $g_m-V_{gs}$  和  $I_{ds}-V_{gs}$  特征曲线示意图  
Fig.1  $g_m-V_{gs}$  and  $I_{ds}-V_{gs}$  curves of the HEMT device

图中各个电压参数的意义为:  $V_{to}$ : 器件截止电压;  $V_{go}$ : 达到  $g_{mmax}$  的电压;  $V_{co}$ :  $g_m$  达到最大值后开始向下滑的电压. 其中  $g_{mmax}$  为器件在  $V_{dso}$  电压下的最大跨导. 上述电压都可以由测出的转移曲线事先确定下来.

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

2006-04-18 收到, 2006-06-16 定稿

图 1 所示的跨导曲线可分为四个区域：截止区、上升区、平坦区（线性区）、下降区。

当  $V_{gs} < V_{to}$  时，有

$$\begin{cases} g'_m = 0 \\ I'_{ds} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

此时处于器件截止区，无电流通过。

当  $V_{to} < V_{gs} < V_{go}$  的时候，器件跨导处于上升区，有

$$\begin{aligned} I'_{ds} &= \frac{g_{mmax}}{2} \left( \frac{V_{to} - V_{go}}{\pi} \sin\left(\pi \frac{V_{gs} - V_{go}}{V_{to} - V_{go}}\right) + V_{gs} - V_{to} \right) \\ g'_m &= \frac{g_{mmax}}{2} \left( \cos\left(\pi \frac{V_{gs} - V_{go}}{V_{to} - V_{go}}\right) + 1 \right) \end{aligned} \quad (2)$$

观察  $I'_{ds}$  的方程，在  $V_{gs}$  接近  $V_{to}$  时， $\sin$  函数值接近于 0， $V_{gs} - V_{to}$  值也接近于 0。

由于  $\sin$  函数的泰勒级数展开为无穷项，因此在接近于  $V_{to}$  的区域可模拟器件的谐波特性，且谐波次数不受限制。模拟接近于截止区的  $I_{ds}$  曲线也很准确。当  $V_{gs} = V_{go}$  时，由  $g'_m$  方程式可得  $g'_m = g_{mmax}$ ，这样跨导曲线可以平滑地进入平坦区。

当  $V_{go} < V_{gs} < V_{co}$  时，器件跨导处于平坦区，可得：

$$\begin{aligned} I'_{ds} &= g_{mmax} \left( V_{gs} - \frac{V_{go} + V_{to}}{2} \right) \\ g'_m &= g_{mmax} \end{aligned} \quad (3)$$

过了平坦区，由于栅的调制能力逐渐减弱，在  $I_{ds}-V_{gs}$  图上，表现为非线性。在  $g_m-V_{gs}$  曲线上，表现出  $g_m$  的值随着  $V_{gs}$  的增大而减小。其中假设曲线下降的斜率为  $\Delta g_m$ 。

当  $V_{gs} > V_{co}$  时，将  $g_m$  的表达式写为如下形式：

$$g'_m = g_{mmax} - \Delta g_m \left( \sqrt{a^2 + (V_{gs} - V_{co})^2} - a \right)$$

在  $V_{gs} > V_{co}$  条件下， $g'_m$  的表达式中，当  $V_{gs} - V_{co} \approx 0$  时， $a$  在平方根这一项中起着调节  $g_m$  曲线弯曲度的作用，当  $V_{gs} - V_{co} \gg 0$  时， $a$  的作用较小， $g'_m$  近似线性下降。并且根据模拟结果， $a$  值越大，弯曲的程度越明显。

对  $V_{gs}$  积分，得到：

$$\begin{aligned} I'_{ds} &= g_{mmax} \left( V_{gs} - \frac{V_{go} + V_{to}}{2} \right) - \\ \Delta g_m &\left[ \frac{1}{2} \left( (V_{gs} - V_{co}) \sqrt{a^2 + (V_{gs} - V_{co})^2} - \right. \right. \\ &\left. \left. a^2 \lg \frac{(V_{gs} - V_{co}) + \sqrt{a^2 + (V_{gs} - V_{co})^2}}{a} \right) - \right. \\ &\left. a(V_{gs} - V_{co}) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

在 HEMT 的线性区内，分析 HEMT 器件的直流特性。双曲正切  $\tanh$  函数是一个连续函数，改善了膝点拟合的准确度，已经被很多通用的半经验大

信号模型所采用。在  $V_{ds}$  对  $I-V$  特性的影响这部分中，采用 Curtice 等人提出的  $(1 + \lambda V_{ds}) \tanh(\alpha V_{ds})$  的形式<sup>[6]</sup>，表达式中， $1 + \lambda V_{ds}$  项模拟了在饱和区的  $I_{ds}$  随  $V_{ds}$  曲线变化的直流输出电导斜率。

根据前面推导得出的固定源漏电压  $V_{ds}$  下跨导  $g_m$  和源漏电流  $I_{ds}$  的公式，得到如下表达式：

$$\begin{aligned} g_m &= g'_m (1 + \lambda V_{ds}) \tanh\left(\frac{\alpha V_{ds}}{V_{knee}}\right) \\ I_{ds} &= I'_{ds} (1 + \lambda V_{ds}) \tanh\left(\frac{\alpha V_{ds}}{V_{knee}}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

模拟出器件的  $I-V$  特性，如图 3(a) 所示。其中  $V_{knee}$  是器件在栅压  $V_{gs}$  为 1V 时的膝点电压。

对于 HEMT 的线性区，Curtice 提出用函数  $\tanh(\alpha V_{ds})$  来进行膝点电压拟合，用  $f(V_{ds})$  来表示，也即函数只包括自变量  $V_{ds}$ ，膝点电压是一个定值。然而我们发现，在器件  $I-V$  特性曲线的一簇曲线中，对于不同的  $V_{gs}$ ，输出曲线  $I_{ds}-V_{ds}$  有不同的膝点电压，如图 3(a) 中测量曲线所示。但目前为止，几乎所有报道的 GaN HEMT 模型（文献[8,9]等）在拟合膝点电压的时候均没有考虑到  $V_{gs}$  的影响。HEMT 器件中，当  $V_{gs}$  大于夹断电压  $V_p$ ，小于阈值电压  $V_t$ ，在漏端从 0V 加一个电压  $V_{ds}$ ，当  $V_{ds}$  值增大到一定值时，二维电子气沟道中的电子迁移率达到饱和，沟道电流也达到饱和。可近似认为使漏端电流开始饱和的栅漏电压  $V_{gd}$  为一个定值，即  $V_{gs} - V_{ds} = \text{const}$ ， $V_{ds}$  与  $V_{gs}$  在漏端电流开始饱和的时候近似线性关系。定义膝点电压为电流刚刚达到饱和点的  $V_{ds}$  值的 95%<sup>[7]</sup>，则膝点电压与  $V_{gs}$  近似线性关系。为了引进  $V_{gs}$  的影响，将膝点电压的拟合函数写成  $f(V_{ds}, V_{gs})$  的形式。观察器件的  $I-V$  测量曲线，随着  $V_{gs}$  的减小，曲线的膝点电压随着慢慢减小，而现有模型认为膝点电压是一个定值，如图 2 所示。

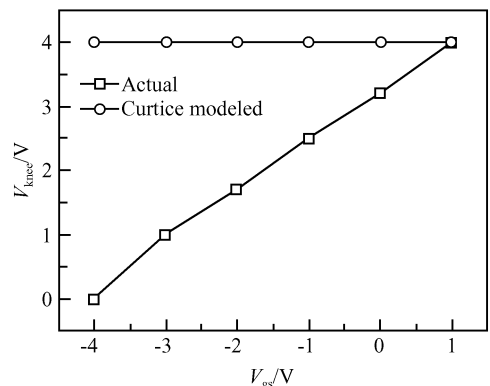


图 2 实测与现有模型拟合  $I-V$  特性曲线中膝点电压随  $V_{gs}$  的变化关系对比

Fig.2  $V_{gs}$  versus knee voltage of the  $I-V$  characteristic between measured and simulated by the model in existence

用  $\varphi(V_{gs})$  表示膝点电压, 可得到如下表达式:

$$\varphi(V_{gs}) = \beta + \frac{V_{gs}}{\chi} \quad (6)$$

因此引出函数  $\tanh\left[\frac{\alpha V_{ds}}{\beta + \frac{V_{gs}}{\chi}}\right]$  用来描述  $I$ - $V$  特性曲线的形状. 这样引入  $V_{gs}$  后, 方程可更准确地拟合膝点电压.

$I_{ds}$  的表达式可写成如下形式:

$$g_m = g'_m (1 + \lambda V_{ds}) \tanh\left[\frac{\alpha V_{ds}}{V_{knee} + \frac{-1 + V_{gs}}{\chi}}\right]$$

$$I_{ds} = I'_{ds} (1 + \lambda V_{ds}) \tanh\left[\frac{\alpha V_{ds}}{V_{knee} + \frac{-1 + V_{gs}}{\chi}}\right] \quad (7)$$

表达式(6)中,  $V_{knee}$  表示器件栅压  $V_{gs}$  为 1V 时的膝点电压,  $V_{knee} + \frac{-1 + V_{gs}}{\chi}$  这一项表示的是相应的  $V_{gs}$  下曲线的膝点电压. 如图 3(b) 所示, 引入栅源电压  $V_{gs}$  之后, 对膝点电压模拟的精确度大大提高.

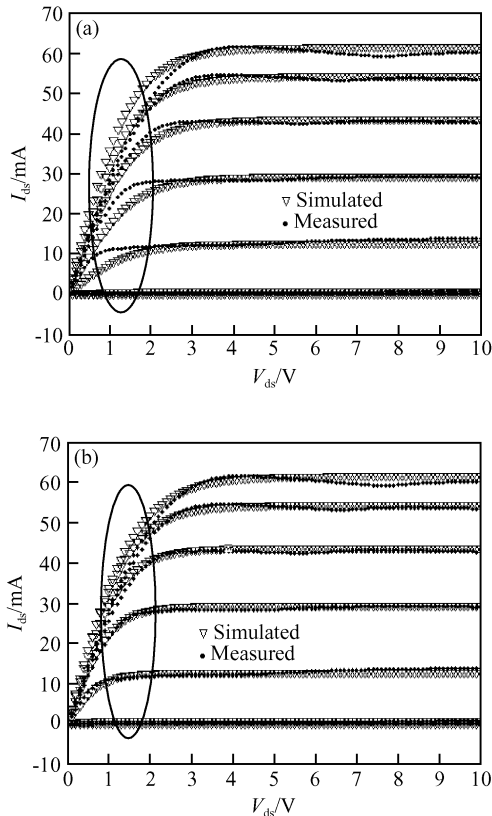


图 3 拟合膝点电压时, 未加入  $V_{gs}$  和加入  $V_{gs}$  影响的器件  $I$ - $V$  特性曲线  
Fig.3  $I$ - $V$  characteristics with and without the influence of  $V_{gs}$  in fitting knee voltage

### 3 HEMT $I$ - $V$ 特性模型仿真与分析

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  $0.8\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$ , 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.

器件的特性曲线是在 HP4155 仪器上测试的. 基于上述原理, 采用 Matlab 编程, 对测量的曲线进行仿真.

图 4 显示的分别是器件的转移特性和跨导的仿真和测量的结果, 拟合较好, 在模型应用中能够准确地描述器件的转移特性.

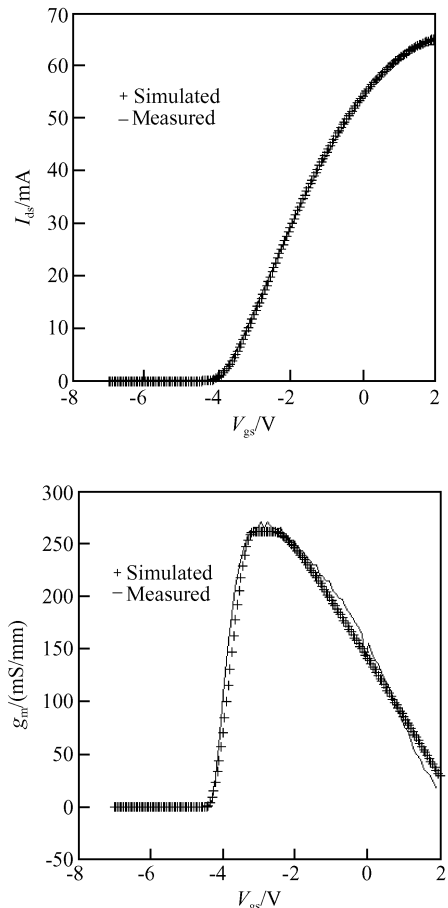


图 4  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  转移特性曲线以及  $g_m$ - $V_{gs}$  跨导曲线图  
Fig.4  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  and  $g_m$ - $V_{gs}$  curves

拟合膝点时, 模型加入  $V_{gs}$  的影响, 可看出上述方程能够较好地拟合器件  $I$ - $V$  曲线的膝点电压. 在  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  以及  $V_{ds}$  关系的基础上, 利用最终的漏电流表达式, 可得到图 5(a) 的仿真结果. 各种参数值如表 1.

表 1 两种衬底的模型参数值

Table 1 Model parameter values of two substrates

Substrate	SiC	Sapphire
$V_{to}/V$	-4.45	-2.25
$V_{go}/V$	-3.15	-0.71
$V_{co}/V$	-2.65	1.2
$g_{mmax}/(S/mm)$	0.262	0.23
$\Delta g_m$	0.057	0.03
$a$	0.6	0.7
$\lambda$	-0.0005	-0.02
$V_{knee}/V$	4.05	6
$\alpha$	2.45	2.3
$\chi$	2	2

本文在拟合 SiC 衬底 HEMT 器件的同时,也对蓝宝石衬底 HEMT 器件进行了拟合( $V_{ds}$  与  $V_{gs}$  的范围与前者相同),如图 5(b). 利用误差函数  $e = \frac{|I_{model} - I_{measure}|}{I_{measure}}$ , 可算出 SiC 衬底器件  $I-V$  曲线拟

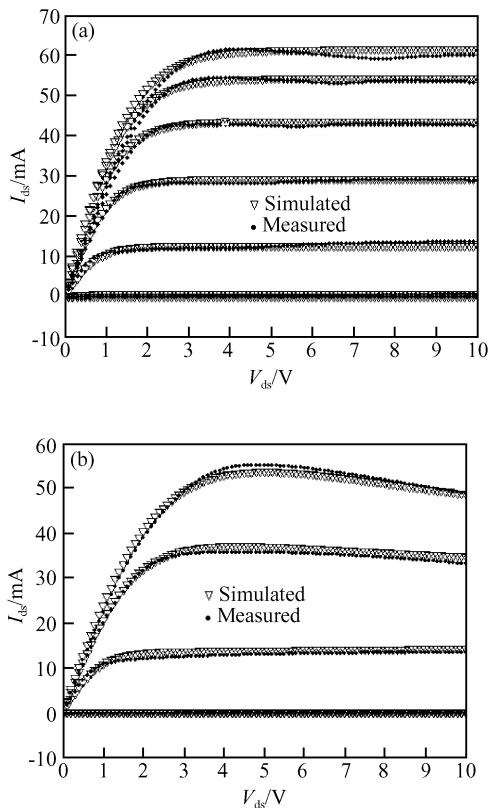


图 5 (a) SiC 衬底  $0.8\mu m \times 60\mu m$  GaN HEMT 器件  $I-V$  特性曲线;(b)蓝宝石衬底  $0.8\mu m \times 120\mu m$  GaN HEMT 器件  $I-V$  特性曲线

Fig.5 (a)  $I-V$  characteristics of  $0.8\mu m \times 60\mu m$  GaN HEMT device based on SiC substrate;(b)  $I-V$  characteristics of  $0.8\mu m \times 120\mu m$  GaN HEMT device based on sapphire substrate

合的误差为 2.9%,蓝宝石衬底器件  $I-V$  曲线拟合的误差为 2.1%,两者误差都在 3%之内,证明此模型可以很好地应用于不同衬底 AlGaIn/GaN HEMT 器件的直流仿真中.

## 4 结束语

本文在 Curtice 模型以及 Agilent 公司的 EE-HEMT1 模型的基础上,首次加入栅源电压对器件膝点特性的影响,得出较准确的 HEMT 器件  $I-V$  特性曲线的模拟结果.同时给出 SiC 衬底和蓝宝石衬底 HEMT 器件的  $I-V$  曲线.本文给出的模型仿真快捷、结果精确.可以作为实际拟合不同衬底 HEMT 器件  $I-V$  特性曲线以及跨导特性曲线的方法.

## 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. IEDM Technical Digest, IEEE International, 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 ] 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]
- [ 5 ] 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]
- [ 6 ] Curtice W R, Ettenberg M. A nonlinear GaAs FET model for use in the design of output circuits for power amplifiers. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1985, 33(12): 1383
- [ 7 ] Cripps S C. RF power amplifiers for wireless communications. Artech House, 1999; 61
- [ 8 ] Van Raay F, Quay R, Kiefer R, et al. Large signal modeling of AlGaIn/GaN HEMTs with  $P_{sat} > 4W/mm$  at 30GHz suitable for broadband power applications. Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International, 2003, 1: 451
- [ 9 ] Lee J W, Webb K J. A temperature-dependent nonlinear analytic model for AlGaIn-GaN HEMTs on SiC. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2004, 52(1): 2

## A New AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT Semiempirical DC Model

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

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

**Abstract:** A new AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT semiempirical DC model is given. This is the first model that takes into account the effect of the gate source voltages  $V_{gs}$  on the knee voltage. Functions describing the DC characteristic of the AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT are obtained. The model can be used to model the DC characteristic of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs based on sapphire as well as SiC. The error between results simulated by the model and the measured results is less than 3%.

**Key words:** AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT; model; knee voltage; substrate

**EEACC:** 2570A

**Article ID:** 0253-4177(2006)11-1984-05

---

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

Received 18 April 2006, revised manuscript received 16 June 2006