

Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs HEMT 结构参数优化提取

刘 诺 谢孟贤 石迎春

(电子科技大学微电子科学与工程系 成都 610054)

摘要 采用近年发展的两种电荷控制模型及改进的两区 v - E 模型推导了“反向”器件模型, 从直流 I - V 特性分析求解了 Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs HEMT 的结构参数。因非线性电荷控制模型有效地反映了 2DEG 浓度 n_s 随栅压的实际变化, 所提取结构参数与文献报道基本相符。

EEACC: 2500, 2560, 2560S, 2560B

1 引言

HEMT 已成为用于数字电路和微波电路的最有希望的基本器件。随着器件新材料及结构的快速发展与演变, 进行特殊电路设计要求特定的器件结构参数。因此, 结构参数提取的问题显得日益重要。通常是测量 s 参数^[1]或 y 参数^[2]再通过相应的“反向”器件模型来提取结构参数, 但难以避免杂散电感、边缘电容、芯片寄生效应和材料陷阱效应。为此, 本文推导了“反向”器件模型, 直接通过室温下的直流 I - V 特性分析求解 AlGaAs/GaAs 的结构。

2 器件模型

2.1 HEMT 电荷控制模型与二维电子气(2DEG)速-场(v - E)模型

常规 HEMT AlGaAs 层有两个耗尽层:一个由 Schottky 栅造成, 另一个由异质结产生并通过量子阱中的 2DEG 平衡。因 2DEG 由栅压 V_g 控制, 两个区域必须同时合并使 AlGaAs 层夹断, 在量子阱和 Schottky 势垒间获得大量电荷输运。当 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} < n_s < 1.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时, AlGaAs 层的 Poisson 方程解与 Drummond 的 2DEG Fermi 势线性近似解为

$$n_s(y) = [\epsilon_2/q(d + \Delta d)] [V_g - V(y) - V_{th}]$$

其中 $V_{th} = \varphi_0 - (qN_d d_{d^2})/(2\epsilon_2) + E_{f_0}/q - \Delta E_c/q$, $V(y)$ 为沟道电势, E_{f_0} 为 $T = 300\text{K}$ 时的费米能级, N_d 、 ϵ_2 、 d 分别是 n-AlGaAs 层的掺杂浓度、相对介电常数和层厚, Δd 系 2DEG 距异质界面的距离, 近似取为 8nm。

刘 诺 女, 1963 年生, 讲师, 目前主要从事 HEMT 和 HBT 理论研究与 CAI 开发
谢孟贤 男, 1938 年生, 教授, 目前主要从事 HEMT 和 HBT 研究与 CAI 开发

石迎春 男, 1972 年生, 硕士, 目前主要从事电路研制

1996 年 5 月 6 日收到初稿, 1996 年 10 月 18 日收到修改稿

H. Rohdin^[3]的非线性电荷控制模型:

$$n_s(y) = n_{s0} \{ \alpha + (1 - \alpha) \tanh[(V_g - V_{gm})] V_1 \}$$

该关系与考虑两个子带的全数值模型结果相同,这里 V_1, V_{gm}, n_{s0} 和 α 是拟合参数,且 $V_{gm} = V_{th} + \alpha n_{s0}/K, V_1 = (1 - \alpha)n_{s0}/K$.

理想调制掺杂结构的输运特性与不掺杂 GaAs 的极其相似^[4]. 对短栅长器件作特殊考虑,电子速度达到饱和后,近似认为仍以峰值速度运行,H. Roblin 等给出了改进的 $v-E$ 模型:

$$\begin{cases} v(E) = \mu E / (1 + E/E_1) & E < E_c \\ v(E) = v_{sat} & E \geq E_c \end{cases}$$

μ 为低场迁移率; E_c 为临界电场; v_{sat} 为饱和速度; ΔE_c 系异质界面的导带不连续质; $E_1 = E_c / [\mu E_c / v_{sat} - 1]$.

2.2 直流 I-V 特性描述的 $f(x)$

由于 n_s 极大,而沟道短,不考虑扩散,对 2DEG 采用缓变沟道近似,则

$$I_{ds} = q n_s Z v \quad (Z \text{ 为栅宽})$$

取栅下靠近源的端点为坐标原点,靠近漏的端点为 $y=L$,在 $y=y_s$ 处电场达到临界电场,根据边界条件

$$\begin{cases} V(y)|_{y=0} = I_{ds} R_s \\ V(y)|_{y=L} = V_d - I_{ds} R_d \end{cases} \quad (E < E_c) \quad \text{和} \quad \begin{cases} V(y)|_{y=0} = I_{ds} R_s \\ V(y)|_{y=y_s} = V_c(y_s) \\ V(y)|_{y=L} = V_d - I_{ds} R_d \end{cases} \quad (E \geq E_c, \text{注:器件工作在线性区与饱和区并存状态})$$

即推导得到.

2.2.1 由线性电荷控制推导的目标函数的 $f(x)$

$$\begin{aligned} f_1 &= I_{ds} L - [A(V_g - V_{th}) - I_{ds}/E_1](V_d - I_{ds}R_s - I_{ds}R_d) - A[(V_d - I_{ds}R_d)^2 - (I_{ds}R_s)^2]/2 \\ f_2 &= V_d - I_{ds}R_d - (V_g - V_{th} - \Delta V I_{ds}/I_m) - (2dE_c/\pi)\sinh[\pi(L - y_s)/(2d)] \\ f_3 &= I_{ds}y_s - [A(V_g - V_{th}) - I_{ds}/E_1][(V_g - V_{th} - \Delta V I_{ds}/I_m) - I_{ds}R_s] - A[(V_g - V_{th} - \Delta V I_{ds}/I_m)^2 - (I_{ds}R_s)^2]/2 \end{aligned}$$

其中 $A = q\mu Z K (K = 1.29 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}/V); I_m = qZn_{s0}v_{sat}; L, Z$ 分别为栅长、栅宽.

2.2.2 由非线性电荷控制模型推导的目标函数的 $f(x)$

$$\begin{aligned} f_1 &= I_{ds}L - [B\alpha n_{s0} - I_{ds}/E_1](V_d - I_{ds}(R_s + R_d)) - B(1 - \alpha)n_{s0}V_1 \{\ln \cosh[(V_g - V_d - I_{ds}R_d - V_{gm})/V_1] - \ln \cosh[(V_g - I_{ds}R_s - V_{gm})/V_1]\} \\ f_2 &= V_d - I_{ds}R_d - \{V_g - V_{gm} - V_1 \tanh^{-1}[(I_{ds}/I_m - \alpha)/(1 - \alpha)]\} - (2dE_c/\pi)\sinh[\pi(L - y_s)/(2d)] \\ f_3 &= I_{ds}y_s - (B\alpha n_{s0} - I_{ds}E_1)\{V_g - V_{gm} - V_1 \tanh^{-1}[\frac{I_{ds}\mu/(Bn_{s0}v_{sat}) - \alpha}{1 - \alpha}] - I_{ds}R_s\} + Bn_{s0}(1 - \alpha)V_1 \{\ln \cosh\{(V_g - V_{gm} - V_c(y_s))/V_1\} - \ln \cosh(V_g - V_{gm} - I_{ds}R_s)/V_1\} \end{aligned}$$

这里 $B = E_c \cosh[\pi(L - y_s)/2d]$.

3 参数提取程序流程

程序流程见图 1.

4 结果与讨论

结果如表 1 所示。 $I-V$ 值由文献读取;以便于与文中所用对应结构参数进行对照比较。采用非线性电荷控制模型提取的参数与文献数据相当接近,而模型 1 的结果与文献数据有一定差距,原因在于:首先,非线性电荷控制模型是与实验拟合而获得的,正确地反映了 n_s 随 V_g 饱和的实际情况,而线性电荷控制模型是在一定的近似下推出的,有一定误差;其次,非线性电荷控制模型对亚阈区及饱和区进行了一定的修正,而线性电荷控制模型则在亚阈区给出了过低的电荷量,在饱和区又给出过高的电荷量。从表 1 还可看出,采用模拟退火法(SA) 算法计算精度更高,这是由于 SA 算法搜索全局最小而避免了局部最小所致。

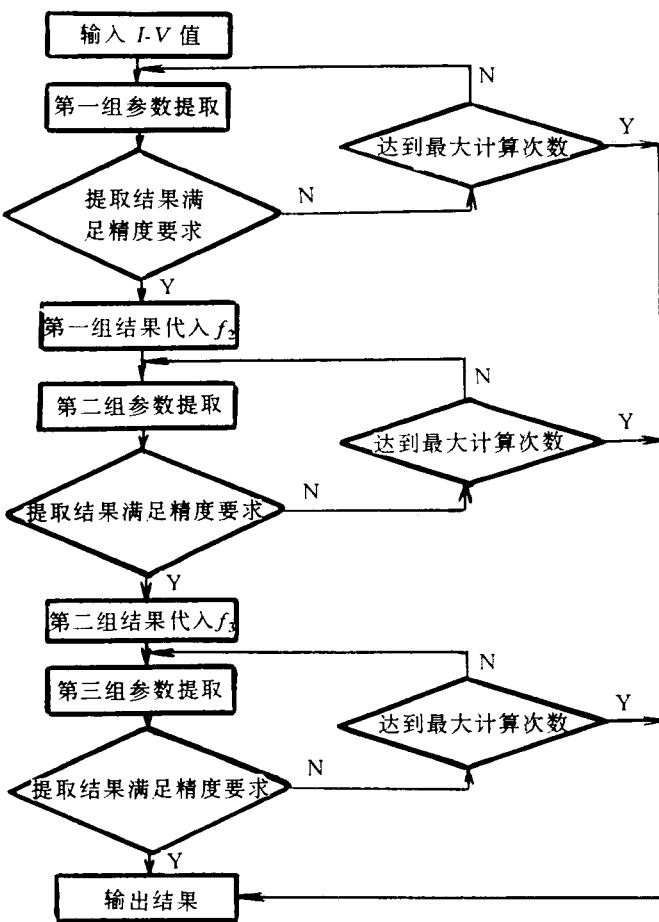


图 1

表 1

参数名称	模型一(线性电荷控制模型)		模型二(非线性电荷控制模型)		文献[3]
	算法 1(牛顿法)	算法 2(模拟退火法)	算法 1(牛顿法)	算法 2(模拟退火法)	
栅长 $L/\mu\text{m}$	1.53	1.45	1.12	1.09	1.0
栅宽 $Z/\mu\text{m}$	162.82	154.99	137.76	142.34	145
源电阻 R_s/Ω	3.61	3.57	3.72	3.61	3.5
漏电阻 R_d/Ω	3.61	3.57	3.72	3.61	3.5
AlGaAs 厚度 d/nm	67.113	58.909	48.013	45.825	45.0
$2\text{DEG } v_{\text{sat}}/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	4.58×10^6	8.09×10^6	2.20×10^7	1.68×10^7	1.0×10^7
N_d/cm^{-3}	2.3×10^9	0.79×10^{19}	5.8×10^{19}	0.67×10^{19}	0.1×10^{19}

参 考 文 献

- [1] P. Ladbroke, J. Bridge and A. Hill, "CAD for GaAs MMIC manufacture-ability", IEEE GaAs IC Symp., New Orleans, LA, 1990, 335~338.
- [2] P. Ladbroke, MMIC Design, GaAs FETs and HEMTs. Dedham, MA. Artech House, 1989, ch. 8.
- [3] Hans Rohdin and Patrick Roblin, IEEE-ED, 1983, 33(5):664~672.
- [4] T. J. Drummond, W. Kepp, H. Morkoc *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1982, 41:777.

Parameters Extraction of $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ HEMT

Liu No, Xie Mengxian and Shi Yingchun

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Received 6 May 1996, revised manuscript received 18 October 1996

Abstract A "reverse" device model of $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ HEMT is developed by using the two charge control models and the improved velocity-field characteristics. We achieve the structural parameters by the DC I - V characteristics. The results correspond well with the reported parameters^[3], because the nonlinear charge control model describes the changes between 2DEGs concentration and V_g correctly.

EEACC: 2500, 2560, 2560S, 2560B