

一个关于砷化镓场效应晶体管稳态特性的新的分析模型

汪 正 孝

(中国科学院半导体研究所)

1982年7月16日收到

提 要

本文提出了一个关于 GaAs FET's 的新的分析模型。与传统的一维“肖克来模型”^[1]不同，这个模型从一个新的概念——“非线性可变沟道电阻”出发来分析器件的工作机理。它不仅考虑了砷化镓材料的具有一段负微分迁移率区域的速度场特性，而且考虑了一些实际影响器件性能的因素，如有效的衬底电阻、载流子浓度与迁移率乘积在有源层内的分布等。此外，它还利用了一些二维数值分析的结果。

近年来，随着砷化镓场效应器件 (GaAs FET's) 及与之相联系的砷化镓集成电路 (GaAs IC) 的迅速发展，关于 GaAs FET's 的器件物理研究也正在朝深入方向发展。近十几年来有关 GaAs FET's 的器件物理研究大致可分为二大分支，一个分支是应用电子数字计算机对半导体输运方程进行严格的二维数值分析，从而获得有关器件工作的精确的物理图象。另一分支是研究探索各种能简捷、迅速和比较准确地反映出 GaAs FET's 端特性的分析模型。最近几年来由于 GaAs IC 的引人注目的高速性能(即开关速度比性能最好的 Si IC 还要快几倍)，关于 GaAs IC 的电路计算机辅助分析工作也在迅速发展。这项工作要采用关于 GaAs FET's 的分析模型。如采用二维数值分析的 GaAs FET's 的模型是不适宜的，因为二维分析要耗费相当多的计算机机时。因此，建立一个能较好地反映 GaAs FET's 端特性的分析模型是一项重要的工作。近几年来一些作者提出的关于 GaAs FET's 的分析模型^[2-5]有下述的缺点：(1) 这些分析模型的共同基础是肖克来的一维模型，而通过二维分析已证实肖克来模型对短栅的 GaAs FET's 是不适合的。(2) 这些分析模型对于器件在“线性区”和“饱和区”的端特性不能给出一个统一的表达式。(3) 这些分析模型只考虑理想的 FET 的状况，而不考虑一些重要的影响器件性能的实际因素。(4) 这些分析模型大多只考虑 GaAs 中的电子速度饱和现象而不考虑 GaAs 中的 NDM (负微分迁移率) 效应。本文提出的分析模型正是为了克服上述分析模型的缺点的一个尝试。其基本考虑是用宏观的、平均的观点来研究 GaAs FET's 的端特性。

一、一个关于 GaAs FET's 的新的分析模型

图 1 示出了 GaAs FET's 的基本结构及其直流等效电路。器件的沟道部分等效为一

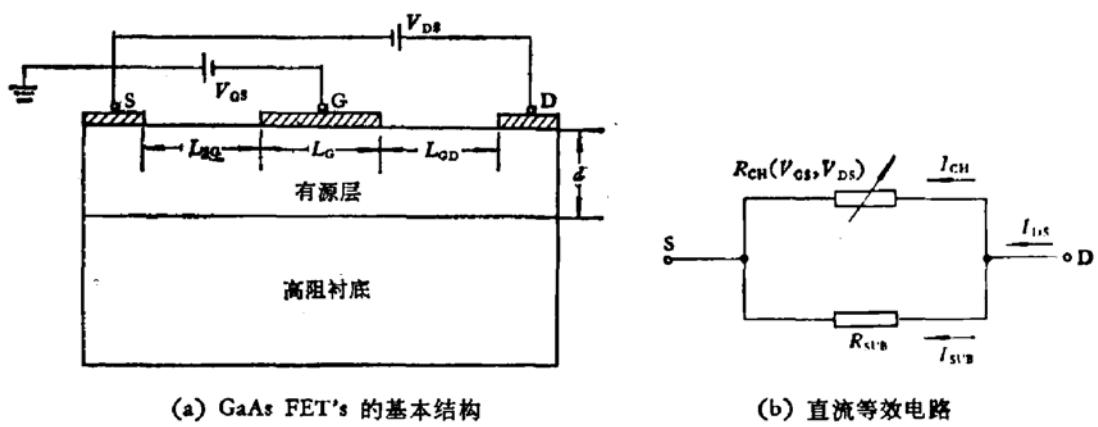


图 1

个“非线性可变电阻” R_{CH} , R_{CH} 是 V_{GS} , V_{DS} 的函数. 器件的有源层-衬底间的非理想界面及缓冲层或半绝缘衬底部分等效为一个“有效的衬底电阻” R_{SUB} . 总的漏源电流 I_{DS} 可表达为:

$$I_{DS} = \frac{V_{DS}}{R_{CH}(V_{GS}, V_{DS})} + \frac{V_{DS}}{R_{SUB}}. \quad (1)$$

GaAs FET's 的有源层靠近栅极部分的载流子耗尽层的厚度在 V_{DS} 很小时可近似用一维突变结公式来表示:

$$W(V_{GS}) = \sqrt{\frac{2e\sigma_0}{qN_p}(V_{Bi} - V_{GS})}. \quad (2)$$

其中 ϵ 为相对介电常数, ϵ_0 为自由空间电容率, q 为电子电荷, N_D 为有源层掺杂浓度(假定均匀掺杂), V_{Bi} 为栅自建电势, V_{GS} 为栅源偏压. 假定耗尽区在 x 、 y 二个方向同时扩展, 见图 2(a).

当 V_{DS} 较大时, 根据二维分析结果^[6], 耗尽区边界形状大致如图 2(b) 所示. 故平均的耗尽层厚度可表为:

$$\bar{W}(V_{GS}, V_{DS}) = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{qN_D} \left[(V_{Bi} - V_{GS}) + \frac{V_{DS}}{C_1} \right]}. \quad (3)$$

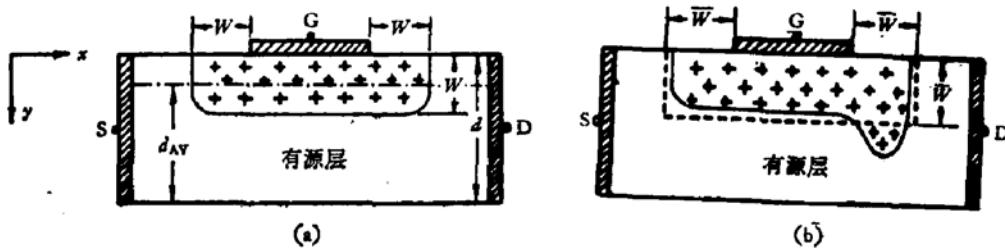


图2 GaAs FET's 有源层内耗尽区的边界形状

(a) V_{DS} 很小时 (b) V_{DS} 较大时

式中参数 C_1 的物理意义可理解为 V_{GS} 、 V_{DS} 两个偏压对 \bar{W} 的贡献的一个相对比例因子。 C_1 的值可通过计算或实测的 $C_{GS} = \frac{\Delta Q}{\Delta V_{GS}} \Big|_{V_{DS}=\text{const}}$ 及 $C_{GD} = \frac{\Delta Q}{\Delta V_{DS}} \Big|_{V_{GS}=\text{const}}$ 的比值来估计，一般为 20—30。

根据二维分析的结果^[6], 棚极部分沿 y 方向的载流子分布不是突变的。如将其等效为一个耗尽层厚度为 \bar{W}' 的突变式分布, 则 \bar{W}' 要比(3)式算出的 \bar{W} 略大一些, 即:

$$\bar{W}'(V_{GS}, V_{DS}) = C_2 \cdot \bar{W}(V_{GS}, V_{DS}). \quad (4)$$

C_2 的值约为 1.05—1.25。

从对直流电阻等效的观点可求出平均的沟道厚度 d_{AV} 为:

$$d_{AV}(V_{GS}, V_{DS}) = \frac{L}{(L_G + 2\bar{W}') \frac{1}{(d - \bar{W}')} + (L - L_G - 2\bar{W}') \frac{1}{d}}. \quad (5)$$

其中 $L = L_G + L_{GD} + L_{GS}$, d 为沟道厚度。

关于 GaAs 的 $v-E$ 特性采用能反映出 NDM 效应的实测曲线的拟合公式^[5,7]:

$$v(E) = \frac{\mu_l E + v_{sat}(E/E_0)^N}{1 + (E/E_0)^N}. \quad (6)$$

其中 μ_l 为载流子低场迁移率, E 为电场强度, v_{sat} 为饱和漂移速度, E_0 为一个特征电场值。故载流子迁移率的表达式为:

$$\mu(E) = \frac{v(E)}{E} = \frac{\mu_l + v_{sat}(E^{N-1}/E_0^N)}{1 + (E/E_0)^N}. \quad (7)$$

下面考虑(7)式中 μ_l 在有源层中的分布。通常 μ_l 在沿 x 方向变化很小, 故认为 μ_l 只是 y 方向的函数。本文的模型采用的 $\mu_l(y)$ 关系是文献[8]中实测的 μ_l 随 y 变化曲线的拟合表达式:

$$\mu_l(y) = \mu_l(0) \left(1 - \frac{3}{4} \frac{y^2}{d^2}\right). \quad (8)$$

这里要说明的一点是: 如在 GaAs FET's 的有源层-高阻衬底间加一层缓冲层的话, $\mu_l(y)$ 从 $y=0$ 到 $y=d$ 之间的变化比较平坦, 甚至在 $y=d$ 附近稍有上升。在这种情况下, 应当注意这样一个事实, 即有源层的掺杂浓度通常为 10^{17} cm^{-3} , 而缓冲层的掺杂浓度只有 $10^{13}-10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。因此在 $y=d$ 附近必定存在一个掺杂浓度从 10^{17} cm^{-3} 下降到 $10^{13}-10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的过渡区。因此即使 μ_l 随 y 的变化是平坦的, $n \cdot \mu_l$ 的乘积在 $y=d$ 附近仍然是迅速下降的。在下面要提到的计算 R_{CH} 及 I_{DS} 的公式中用到的是载流子浓度与迁移率的乘积, 而且为了计算方便, 令整个有源层内 $n = N_D$ 。因此从等效的观点看, 仍然可以认为(8)式的 $\mu_l(y)$ 关系是成立的。

GaAs FET's 的沟道部分的平均低场迁移率可表为:

$$\bar{\mu}_l = \int_{-\bar{W}'}^d \mu_l(y) dy / (d - \bar{W}') = \mu_l(0) \left[1 - \frac{1}{4d^2} (d^2 + d\bar{W}' + \bar{W}'^2)\right]. \quad (9)$$

故(7)式应改为:

$$\mu'(E) = \frac{\bar{\mu}_l + v_{sat}(E^{N-1}/E_0^N)}{1 + (E/E_0)^N}. \quad (10)$$

经过上述分析, $R_{CH}(V_{GS}, V_{DS})$ 可表为:

$$R_{CH}(V_{GS}, V_{DS}) = \rho(\bar{E}) \frac{L}{d_{AV}(V_{GS}, V_{DS}) \cdot Z} = \frac{L}{N_D \cdot q \cdot \mu'(\bar{E}) \cdot d_{AV}(V_{GS}, V_{DS}) \cdot Z}. \quad (11)$$

其中 Z 为栅宽, \bar{E} 为有源层内的平均电场, $\bar{E} = V_{DS}/L$, $\rho(\bar{E})$ 为有源层电阻率,

$$\rho(\bar{E}) = \frac{1}{N_D \cdot q \cdot \mu'(\bar{E})}.$$

故漏源电流可表为：

$$\begin{aligned} I_{DS}(V_{GS}, V_{DS}) &= \frac{V_{DS}}{R_{CH}(V_{GS}, V_{DS})} + \frac{V_{DS}}{R_{SUB}} \\ &= \frac{V_{DS} \cdot N_D \cdot q \cdot \mu'(\bar{E}) \cdot d_{AV}(V_{GS}, V_{DS}) \cdot Z}{L} + \frac{V_{DS}}{R_{SUB}}. \end{aligned} \quad (12)$$

二、计算结果和实验数据的比较

应用本文模型计算了一种典型的 $1\mu\text{m}$ 栅长量级的 GaAs MESFET 的 $I_{DS}(V_{GS}, V_{DS})$ 特性曲线族。其结构和材料参数如下表^[5]所示：

$L_G(\mu\text{m})$	$L_{SG}(\mu\text{m})$	$L_{GD}(\mu\text{m})$	$Z(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$	$N_D(\text{cm}^{-3})$
1.5	1.0	2.0	500	0.28	1×10^{17}
$\mu_i(0)(\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s})$	$E_0(\text{kV}/\text{cm})$	$v_{sat}(\text{cm}/\text{s})$	$V_{BI}(\text{V})$	N	$R_{SUB}(\Omega)$
4500	3.0	0.8×10^7	0.8	2	~ 300 ^[93, 110]

计算中取 $C_1 = 25$, $C_2 = 1.1$.

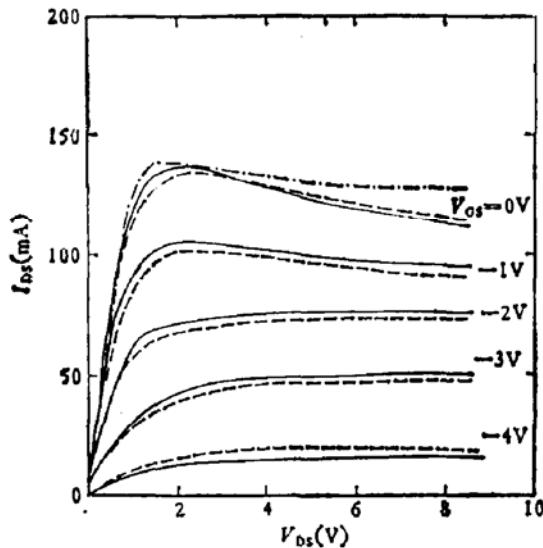


图 3 对典型的 GaAs MESFET 应用本文模型的计算结果与实测数据^[5]的比较
——实测数据，----本文模型计算结果，---TAKADA 等^[1]的计算结果

从图 3 可见，计算结果与实验数据^[5]符合得较好。

三、讨 论

1. 本文提出的关于 GaAs FET's 的分析模型与基于肖克来模型的其它分析模型相比

有下述特点：1) 从宏观的、平均的观点来研究问题，对器件内部的一些物理量，如耗尽层厚度、沟道厚度、电场强度及低场迁移率均取其平均值。2) 对于器件在“线性区”和“饱和区”的特性能给出一个统一的表达式。3) 考虑了两个重要的影响器件性能的实际因素：有效的衬底电阻和载流子迁移率与浓度乘积在有源层内的分布。还应用了一些二维分析的结论。4) 考虑了砷化镓的具有一段 NDM 区域的 $v-E$ 特性。

2. 本文模型的局限性是：1) I_{DS} 的表达式中有两个待定参数 C_1 和 C_2 。 C_1 和 C_2 要根据不同的器件结构加以调整。不过 C_1 和 C_2 的物理意义是明确的，变化范围也不大。2) 关于当 V_{DS} 较高时在栅区的漏端出现电偶极层的现象没有在本文模型中体现出来。一个补救办法是：把上述计算公式中的 $R_{CH}(V_{GS}, V_{DS})$ 改为 $R_{CH}(V_{GS}, V_{DS}) + R_{DOM}(V_{GS}, V_{DS})$ 。 $(R_{DOM}$ 是对应于电偶极层的等效电阻)。 $R_{DOM}(V_{GS}, V_{DS})$ 可参照 M. S. Shur 等给出的公式^[9]加以估算。

参 考 文 献

- [1] W. Shockley, *Proc. IRE.*, **40**, 1365 (1952).
- [2] R. A. Pucel, H. A. Haus and H. Statz, *Advance in Electron. Electron Phys.*, **38**, 195 (1975).
- [3] M. S. Shur, *IEEE Trans.*, **ED-25**, 612 (1978).
- [4] W. R. Curtice, *IEEE Trans.*, **MTT-28**, 448 (1980).
- [5] T. Takada, K. Yukoyama and M. Hirayama, *Electron. Lett.*, **17**, 132 (1981).
- [6] T. Wada and J. Frey, *IEEE J.*, **SC-14**, 398 (1979).
- [7] K. Yamaguchi, S. Asai and H. Kodera, *IEEE Trans.*, **ED-23**, 1283 (1976).
- [8] M. Ogawa, K. Ohata, T. Furutsuka and N. Kawamura, *IEEE Trans.*, **MTT-24**, 300 (1976).
- [9] M. S. Shur and L. F. Eastman, *IEEE Trans.*, **ED-25**, 606 (1978).
- [10] 叶禹康, 固体电子学研究与进展, **2**, 69 (1982).

A New Analytical Model for GaAs FET's

Wang Zhengxiao

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

A new analytical model for GaAs FET's is presented, and being different from the traditional 1D Shockley model, it analyses the operational mechanism of the device from a new concept—"nonlinear channel variable resistance". It takes into account some practical factors which influence device performances, such as the effective substrate resistance, distribution of the product of carrier concentration and mobility in the active layer, etc., as well as the effect of GaAs $v-E$ characteristics showing NDM. In addition, this model makes use of some results of 2D numerical simulation.