

# 离子注入 GaAs MESFET's 的 有限元二维数值分析

马秋鸣 陈敏麒 罗晋生

(西安交通大学微电子技术研究室, 西安)

1987年3月23日收到

本文用有限元方法对离子注入 GaAs MESFET's 的稳态特性进行了二维数值模拟和分析, 并与均匀掺杂器件作了比较。程序中, 对边界条件、网格剖分和初值选取方法进行了改进。所开发的程序可以对不同尺寸、不同掺杂分布的平面栅、凹形栅 GaAs MESFET's 进行二维数值分析, 得到其内部电位、电场、载流子浓度等物理量的二维分布和器件的  $I-V$  特性。本文还讨论了凹形栅的几何形状对器件内部电场强度的影响。最后, 对实际的离子注入凹形栅 GaAs MESFET 进行了模拟, 计算结果与实验数据基本吻合。

**主题词:** III-V 族化合物半导体; 金属-半导体场效应晶体管; 计算机辅助设计;  
有限元法

## 一、引言

近年来, 随着 GaAs 器件的迅速发展和日益小型化的需要, 许多人对均匀掺杂短栅 GaAs MESFET's 进行了二维数值模拟<sup>[1-4]</sup>, 所采用的二维分析方法主要是有限差分法和有限元法。但是, 对于离子注入 GaAs MESFET's 的二维分析报道还很少<sup>[5]</sup>, 对其特性的研究通常仍采用“二区间”或“三区间”等分析模型的方法<sup>[6]</sup>。为了比较精确地研究不同掺杂下短栅器件内部的物理过程和外部特性, 本文对平面栅和凹形栅结构离子注入 GaAs MESFET's 进行了二维数值分析, 并与实验结果进行了比较。

## 二、模型与程序设计

### 1. 基本方程的形成

GaAs MESFET's 是多数载流子工作器件, 其传输特性主要由电子决定, 空穴对总电流的贡献通常可以忽略不计。在这种假设下, 器件内部的载流子运动遵守下述泊松方程和电流连续性方程:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = -q(N_s - n) \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot J_s + G \quad (2)$$

在本文的计算中,产生-复合率 $G$ 取为零,并假设爱因斯坦关系式成立。 $\text{GaAs}$ 中电子所满足的速场特性采用参考文献[7]给出的实验拟合公式。

器件内部电子浓度由下式给出:

$$\begin{aligned} n &= n_i \exp[(E_F - E_i)/kT] \\ &= n_i \exp[(E_F - E_{F0})/kT + (E_{F0} - E_i)/kT] \\ &= n_i \exp[(\phi - \varphi_s)q/kT] \end{aligned} \quad (3)$$

这里,准费米势 $\varphi_s$ 和电势 $\phi$ 被定义为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_s = \frac{E_F - E_{F0}}{-q} \\ \phi = \frac{E_i - E_{F0}}{-q} - \frac{E_i - E_{F0}}{-q} + \frac{E_{F0} - E_{F0}}{q} \\ = V + \frac{kT}{q} \ln \frac{n_0}{n_i} \\ = \varphi_s + \frac{kT}{q} \ln \frac{n}{n_i} \end{array} \right. \quad (4)$$

其中, $n_0$ 、 $E_{F0}$ 和 $E_{F0}$ 分别是平衡态时器件内部电子浓度、费米能级和禁带中线,而 $n$ 、 $E_F$ 和 $E_i$ 分别对应于有外加电场的非平衡态时上述物理量。本文中 $\phi$ 和 $\varphi_s$ 的物理意义与通常的定义:

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi = \frac{E_i - E_{F0}}{-q} \\ \varphi_s = \frac{E_F - E_{F0}}{-q} \end{array} \right. \quad (5)$$

有所不同,这是因为定义式(4)反映了非均匀掺杂器件内部存在着的非均匀自建势,而定义式(5)不能反映这种自建势。而且,由(4)式的 $\phi$ 求得的电场是自建电场和外加电场的合成。

根据上述定义,可得到如下所示的边界条件:

① 源、漏极是欧姆接触:

$$\left\{ \begin{array}{l} n(x) = n_0(x) \\ \phi(x) = V + \frac{kT}{q} \ln \frac{n_0}{n_i} \\ \varphi_s(x) = V \end{array} \right. \quad (V \text{ 是外加电压}) \quad (6)$$

② 栅极是肖特基接触:

$$\left\{ \begin{array}{l} n(x) = n_0(x) \exp \left[ \frac{q}{kT} (V_{GS} - V_{bi}) \right] \\ \phi(x) = V_{GS} + V_{bi} + \frac{kT}{q} \ln \frac{n_0}{n_i} \\ \varphi_s(x) = 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

③ 除电极之外的自由边界:

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0, \quad (\text{在 } x = 0 \text{ 和 } d \text{ 时}) \quad (8)$$

将方程(1)一(8)和各物理量归一化处理,然后用有限元方法进行数值离散化,可导出泊松方程和电流连续性方程的有限元形式<sup>[8]</sup>如下:

$$\left\{ \sum_{j=1}^{NG} [H_{ij} + G_{ij}^{(k)}] \Delta \phi_j = - \left[ \sum_{j=1}^{NG} H_{ij} \phi_j^{(k)} + F_i^{(k)} \right] \right. \quad (9)$$

$$\left. \sum_{j=1}^{NG} K_{ij} \phi_{nj} = 0 \right. \quad (10)$$

其中,  $\Delta \phi_j = \phi_j^{(k+1)} - \phi_j^{(k)}$ ,  $k$  是泊松方程的内迭代次数,  $k = 0, 1, 2, \dots$ ,  $\phi_n = \exp(-\varphi_n)$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, MG$ ,  $NG$  是总的网格点数,  $MG$  是除去电极接触点后的未知节点总数,(9)、(10)式都是  $MG$  维的方程组. 本程序中采用了三角形单元、Lagrange 线性形状函数和一维稀疏带状矩阵单元存贮方法.

## 2. 模拟程序的形成

整个模拟程序分为四部分: 网格剖分、主程序、作图和微波参数计算. 主程序用 Scharfette-Gummel 迭代方法求得泊松方程和电流连续性方程的自治解. 由于泊松方程(9)是非线性偏微分方程, 所以采用了阻尼牛顿拉夫森迭代方法进行求解. 为了求得比较精确的结果, 主程序中收敛判断条件比较苛刻, 除要求  $\phi$ ,  $\phi_n$  满足一定的误差限以外, 还对所解得源漏电流的稳定性设置了较高的精度.

网格剖分和初值选取对于用有限元方法求解问题时解的收敛性和收敛速度有很大影响, 因此本文在网格优化方面做了较多的探索工作, 并在节点总数约 500 个, 单元总数约 800 个的网格剖分下, 求得了收敛性较好、比较合理的结果. 常规的初值选取方法有两种, 一是将前一点的计算结果作为本次计算的初值, 另一是估算预分布法, 本文将这两种方法结合起来, 从而使收敛速度大大加快.

## 三、计算结果和讨论

本文对如图1所示三种结构的 GaAs MESFET's 进行了计算. 在这三种器件中, 栅长均为  $0.5 \mu\text{m}$ , 有效沟道厚度均为  $0.2 \mu\text{m}$ , 并且都具有如(11)式所示的 Gaussian 掺杂分布<sup>[9]</sup>:

$$N_s(x) = N_{\max} \exp \left[ -\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right] \quad (11)$$

其中,  $N_{\max} = \frac{N_s}{\sqrt{2\pi\Delta R_p}}$  是峰值掺杂浓度,  $N_s$ —注入剂量,  $R_p$ —平均射程,  $\Delta R_p$ —标准偏差. 本文在计算中所采用的注入条件是, 对平面栅结构:  $N_s = 2 \times 10^{14}$

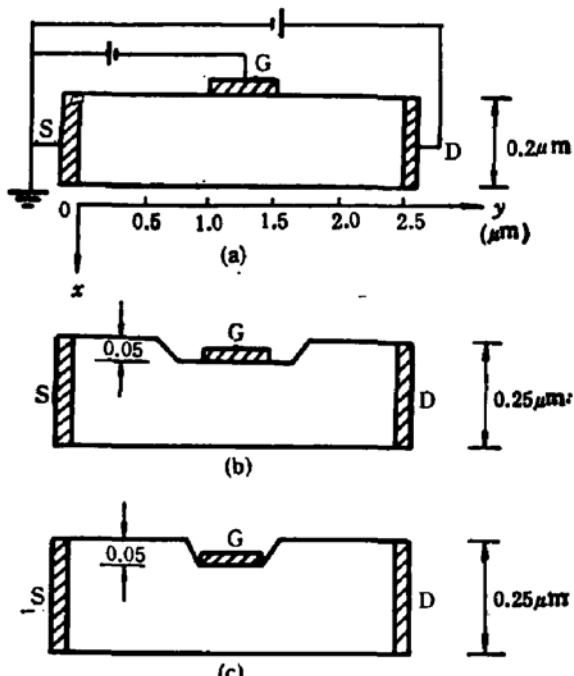


图1 本文中所分析的 GaAs MESFET 的三种结构。

(a) 平面栅结构, (b) 凹形栅结构 1,  
(c) 凸形栅结构 2

$\text{cm}^{-2}$ , 注入能量  $E_t = 100\text{keV}$  ( $R_s = 850\text{\AA}$ ,  $\Delta R_s = 442\text{\AA}$ ), 对两种凹形栅结构:  $N_d = 2.5 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ ,  $E_t = 130\text{keV}$  ( $R_s = 1114\text{\AA}$ ,  $\Delta R_s = 543\text{\AA}$ ).

在上述两种注入条件下, 栅下沟道内掺杂总数与平面栅均匀掺杂 ( $N_d = 1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ , 有源层厚度  $d = 0.2\text{\mu m}$ ) 的情形非常接近, 便于进行分析比较. 其他参数的选取如下<sup>[4]</sup>: 栅极金-半接触自建势:  $V_{bi} = 0.8\text{V}$ , 饱和漂移速度:  $v_{sat} = 8 \times 10^6\text{cm/s}$ , 特征电场:  $E_0 = 4200\text{V/cm}$ .

### 1. 平面栅结构

图 2 给出平面栅结构 GaAs MESFET's 内部 Gaussian 掺杂以及自扩散后电子浓度和自建势的剖面图.

图 3 给出均匀掺杂和 Gaussian 掺杂平面栅 FET 的  $I-V$  特性曲线, 图 4 给出 FET 内部相应电势和相对电子浓度 ( $\frac{n}{n_d}$ , 取  $n_d = 1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ) 分

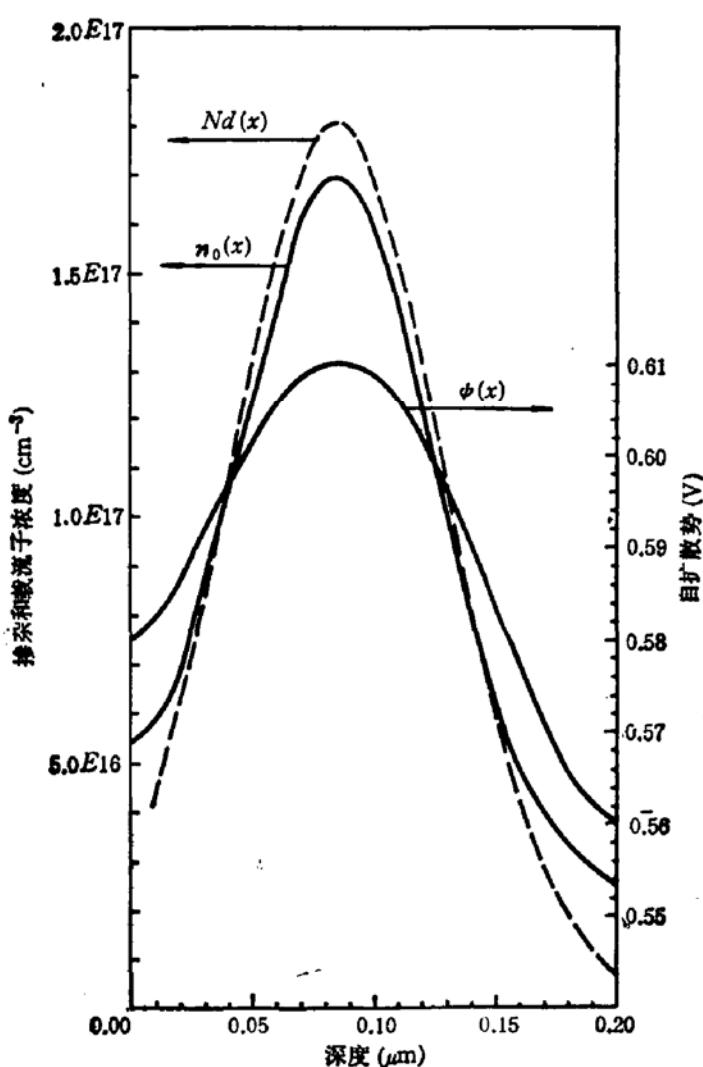


图 2 平面栅 GaAs MESFET 内部 Gaussian 掺杂以及自扩散后电子浓度和自建势的剖面图

布. 从图 3 可以看出, Gaussian 掺杂和平面栅 GaAs

MESFET's 在  $I-V$  特性上有两个不同之处: ① 由于耿斯的存在, 均匀掺杂器件具有静态负阻特性 (SNR)<sup>[5]</sup>, 而离子注入器件却没有. 分析图 2 和图 4 可以很容易地理解这一点, 即, 对于 Gaussian 掺杂器件, 有源层底部电子浓度很低, 栅下沟道区电子的堆积很弱, 不足以形成明显的耿斯, 因而没有静态负阻特性. ② 在图 3 中, 同样的  $V_G, V_D$  偏压下, 离子注入器件具有较小的源漏电流, 这是因为, 从图 4(b) 可以看出, 当  $V_G = -0.5\text{V}$  时, 耗尽层厚度约为  $1000\text{\AA}$ , 这比电子的峰值浓度位置  $850\text{\AA}$  大, 因此, 耗尽层外沟道内参加导电的电子总数比均匀掺杂时少, 因而具有较小的沟道电流.

### 2. 凹形栅结构

图 5 给出两种凹形栅结构 Gaussian 掺杂器件的  $I-V$  特性, 并与平面栅 Gaussian 掺杂器件作了比较. 图 6 给出这两种凹形栅 FET 内部相应的电势和相对电子浓度 ( $\frac{n}{n_d}$ ,  $n_d = 1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ) 分布. 从图 5 和图 6 可以得出下述结论: ① 离子注入凹形栅

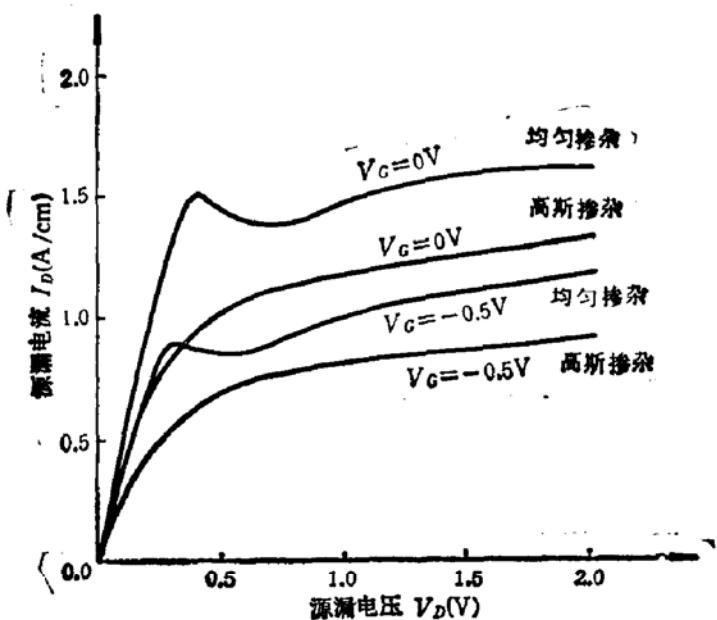


图3 平面栅结构 Gaussian 掺杂和均匀掺杂 FET's 的  $I$ - $V$  特性曲线

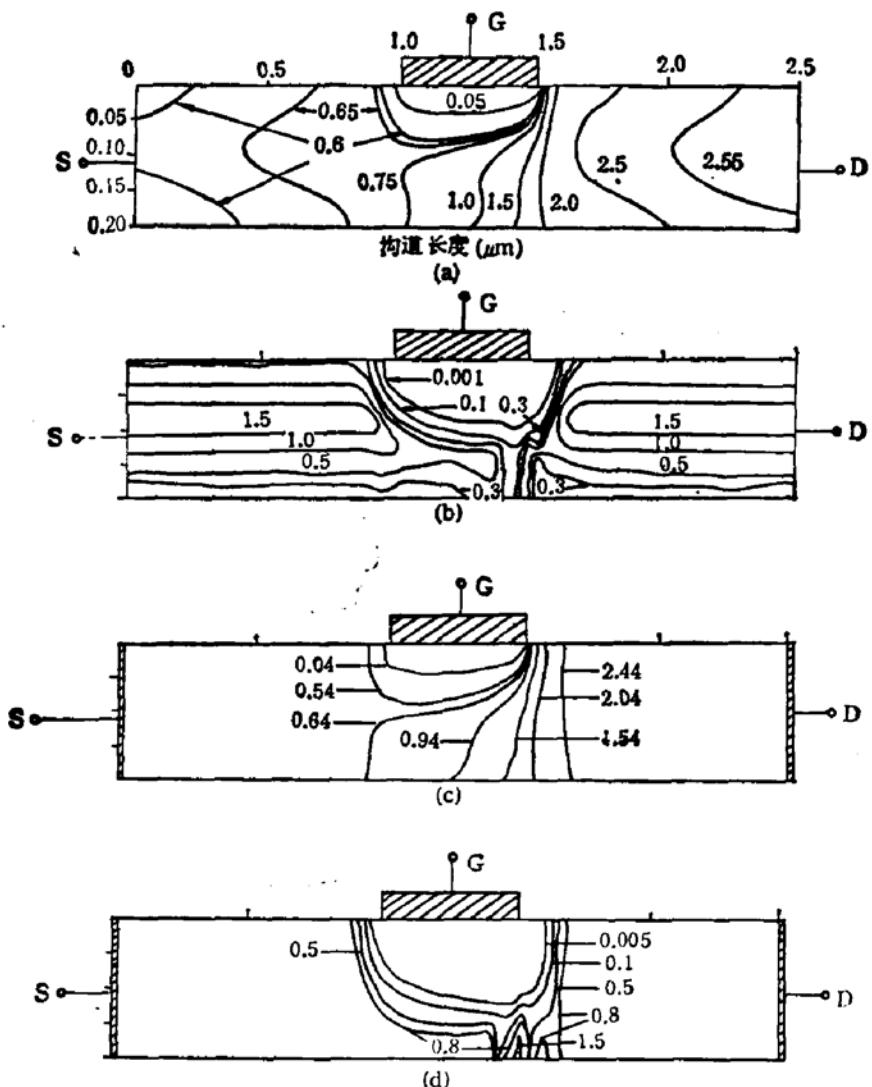


图4 平面栅 FET 内部的电位和电子浓度分布图。 (a) (b) 分别是 Gaussian 掺杂器件内部电位和电子浓度分布; (c) (d) 分别是均匀掺杂器件内部电位和电子浓度分布。 ( $V_{GS} = -0.5V$ ,  $V_{DS} = 2.0V$ )

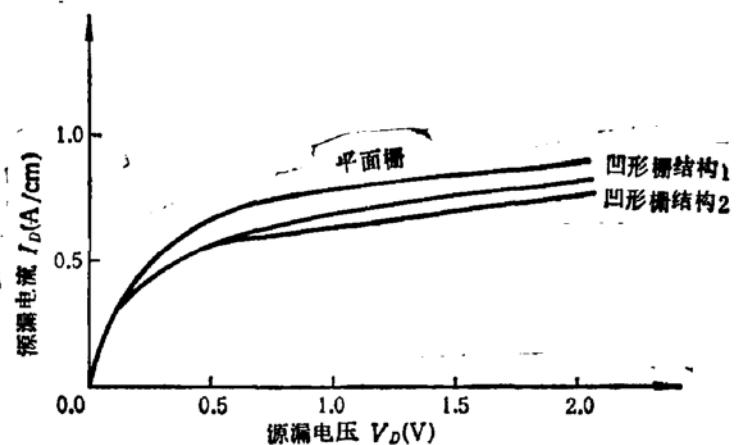


图5 两种凹形栅 Gaussian 摻杂 FET's 的  $I-V$  特性曲线, 平面栅 Gaussian 摻杂 FET 的  $I-V$  曲线也画出来作为比较. ( $V_G = -0.5V$ )

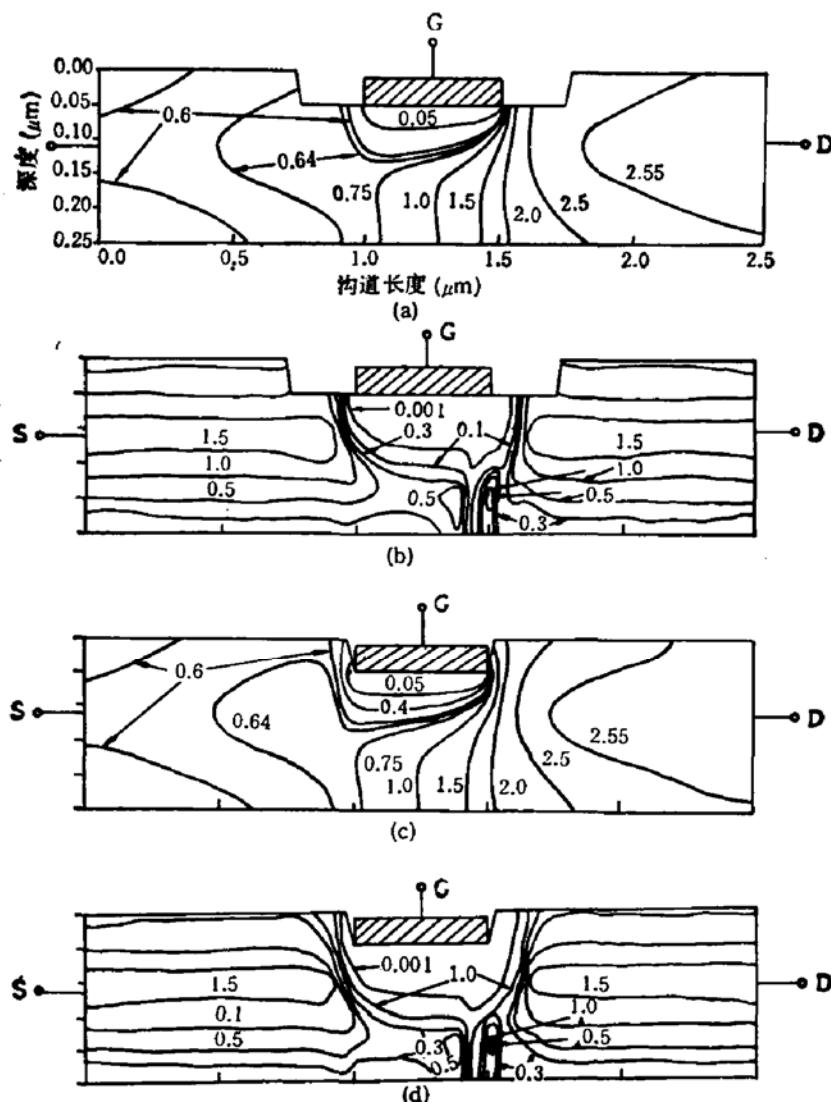


图6 Gaussian 摻杂凹形栅 FET 内部的电位和电子浓度分布图. (a) (b) 分别是凹形栅结构 1 内部电位和电子浓度分布; (c) (d) 分别是凹形栅结构 2 内部电位和电子浓度分布. ( $V_{GS} = -0.5V$ ,  $V_{DS} = 2.0V$ )

FET 同样没有静态负阻特性. ② 与平面栅结构相比, 凹形栅 FET 的源漏电流稍小一些, 这似乎与人们通常的观点, 即由于串联电阻的减小, 凹形栅结构比平面栅结构具有较

大的源漏电流这一结论相矛盾。原因是,对于离子注入器件,沟道内导电电子总数由下列多种因素决定:注入剂量、注入能量、凹槽深度、激活率等。在我们这里的计算中,在沟道内注入杂质总数非常相近的条件下,由于注入能量不同,对于凹形栅器件,电子浓度的峰值与栅极的距离小于平面栅结构器件,因此,凹形栅 FET 中,沟道内除耗尽层外参加导电的电子总数较少,沟道电流也较小。<sup>③</sup> 比较图 4(a)(b) 和图 6(a)、(b) 可以看出,凹形栅结构 1 内部的电子浓度和电势分布与平面栅结构的很相似,但是凹形栅器件中位于栅的漏边缘处的最大电场强度 ( $1.133 \times 10^6 \text{ V/cm}$ ,  $V_G = -0.5 \text{ V}$ ,  $V_D = 2.0 \text{ V}$ ) 却比同样偏压下同一位置处平面栅的最大电场强度 ( $9.26 \times 10^5 \text{ V/cm}$ ) 大。其原因之一是,对于 Gaussian 掺杂器件,凹形栅器件的栅电极处电子浓度较大,而平面栅结构栅电极处的电子浓度较小;另一个原因是,凹槽侧壁的存在阻止了耗尽层的横向扩展,这是使栅的漏边缘处电场强度增大的重要原因。<sup>④</sup> 由于最大电场强度 ( $E_{\max}$ ) 总是位于栅的漏边缘,为了减小  $E_{\max}$ ,我们计算了凹形栅结构 2,其中栅占据了整个凹槽底部。在凹形栅结构 2 中,紧靠栅极的斜面,给耗尽层的扩展提供了较大的空间,因此,等位线变疏,最大电场强度减小,例如,在  $V_G = -0.5 \text{ V}$ ,  $V_D = 2.0 \text{ V}$  时,对于凹形栅结构 1 和 2,  $E_{\max}$  分别为:  $1.13 \times 10^6 \text{ V/cm}$  和  $9.53 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 。由此可以看出,离子注入凹形栅 FET 的电特性不仅与注入条件有关,而且与其凹槽形状有较大关系。

### 3. 模拟计算结果与实验数据的比较

为了验证上述模拟计算的正确性,我们对一个实际的离子注入凹形栅 GaAs MESFET 进行了模拟。该器件的工艺参数如下:用双重离子注入法形成有源层,注入条件是:  $4 \times$

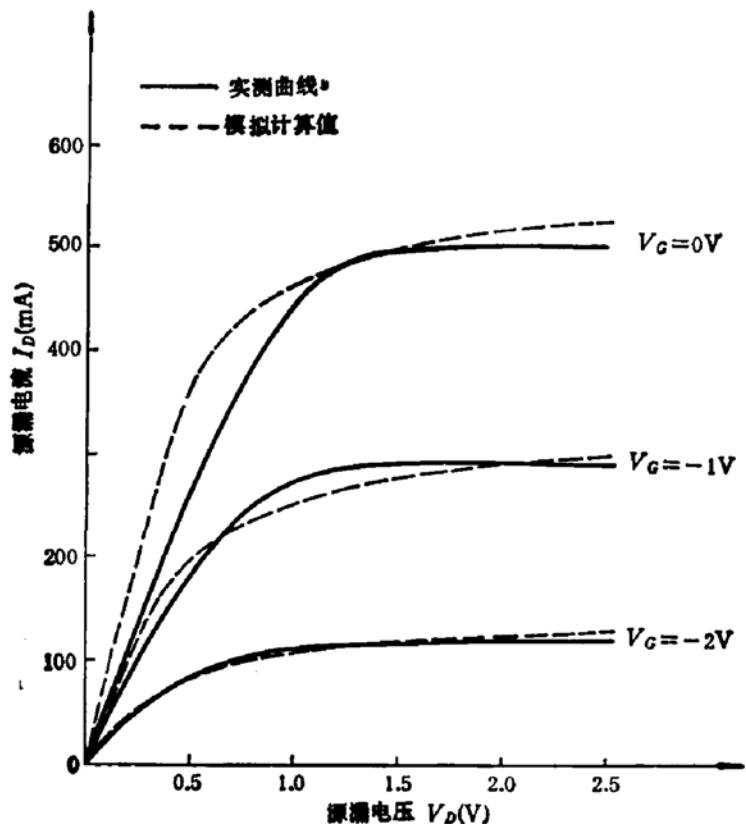


图 7 离子注入凹形栅 GaAs MESFET 的模拟计算和实测输出特性曲线比较

$10^{12} \text{ cm}^{-2}$  (50 keV) 和  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  (150 keV)，用无包封快速热退火法激活注入杂质，退火条件是：N<sub>2</sub>, 970°C, 10.5 秒。器件的几何参数为：栅长 1 μm, 栅源间距 1 μm, 栅漏间距 2 μm, 栅宽 3080 μm, 36 个栅指, 凹槽深度 0.11 μm, 有源层厚度约 0.31 μm。由于是快速热退火，时间短，杂质扩散很少，所以，掺杂分布仍用高斯分布。用霍耳法测得注入杂质的激活率约 80%。

图 7 给出了该器件输出特性曲线的模拟计算结果和实测数据，可以看出，二者基本上是吻合的。由于在模拟计算中忽略了源漏电极处的接触电阻和器件实际生产中的其他因素，因此实际器件的串联电阻比理论计算值大，所以，在非饱和区，理论计算曲线的上升速度比实测曲线快。在模拟计算中，为了简化计算所做的其它近似<sup>[10]</sup>，也造成了理论计算与实验数据之间的差别。

#### 四、结 论

本文给出了用有限元方法对离子注入平面栅和凹形栅 GaAs MESFET's 进行二维数值模拟和分析的方法和程序，其中采用了适合于非均匀掺杂器件的边界条件，以及比较合理的网格剖分和初值选取方法，从而加快了收敛速度。计算和分析表明，由于离子注入形成有源层的 FET 中，沟道底部电子的堆积现象比均匀掺杂器件小得多，因此离子注入器件没有静态负阻特性。本文还分析了不同栅结构对器件特性的影响，结果表明，凹形栅结构 2 的最大电场强度比凹形栅结构 1 的最大电场强度减小 15%。对一个实际凹形栅 GaAs MESFET 的模拟结果表明，理论计算与实测数据基本吻合，这说明本文的物理模型和模拟计算是合理的，并将对实际器件的生产和探索最佳器件有一定的指导作用。

在本文所用的离子注入 GaAs MESFET's 的制造和测试过程中，得到了南京固体器件研究所陈正明、谢春芳、黄亚萍等同志的大力帮助，在此，作者表示衷心地感谢。作者还得到了中国科学院半导体所汪正孝有益的讨论和帮助，在此一并致谢。

#### 参 考 文 献

- [1] John J. Barnes, and Ronald J. Lomax. *IEEE Trans. on Electron Devices*, ED-24, 1082(1977).
- [2] Peter R. H. Riemschneider, and Kang L. Wang, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-30, 1142(1983).
- [3] Ken Yamaguchi, Shojiro Asai, and Hiroshi Kodera. *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-23, 1283(1976).
- [4] 汪正孝, 半导体学报, 5, 178(1984).
- [5] N. Song, Dean P. Neikirk, and Tatsuo Itoh. *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-7, 208(1986).
- [6] Xu Huijian, Han Jihong, Wu Luxin, Mao Jinhui, Yu Tufa. *The Proceedings of the International Conference on Semiconductor and Integrated Circuit Technology*. pp. 386, World Scientific (1986).
- [7] P. A. Houston and A. G. Evans, *Electron Lett.*, 10, 332(1974).
- [8] 吴启明、王泽毅、秦树, 半导体学报, 5, 189(1984).
- [9] 罗晋生, 离子注入物理, pp. 34, 上海科学技术出版社, 1984.
- [10] Charles L. Wilson, and James L. Blue, *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, CAD-4, 504(1985).

## Two Dimensional Numerical Analysis of Ion-Implanted GaAs MESFETs by the Finite-Element Method

Ma Qiuming, Chen Minqi and Luo Jinsheng

(Institute of Microelectronic Technology, Xi'an Jiaotong University)

### Abstract

This paper analyzed the steady-state characteristics of ion-implanted GaAs MESFETs using finite-element method. Some improvements have been made on the boundary conditions, mesh generation and estimation of initial values in the program. The electron concentration and potential distribution inside the GaAs FETs and current-voltage characteristics were computed for recessed and planar gate devices. The results were analyzed and compared with uniform doping devices. Also, the effect of the geometric shape of the recessed gate on the field distribution inside the device was studied. At last, the simulation of a actual ion-implanted GaAs MESFET with a recessed structure was made, and the computational results were in good agreement with the experimental data.

**KEY WORDS:** III-V compound semiconductor, Metal-semiconductor field effect transistor Computeraided design, Finite-element method