

i -GaAlAs/GaAs HIGFETs 器件 参数的有限元分析*

顾 聪 王德宁 王渭源

(中国科学院上海冶金所, 上海 200050)

摘要 本文用有限元法对 i -GaAlAs/GaAs HIGFETs 的稳态特性进行了二维数值模拟和分析。为了在有限内存的微机中, 进行快速计算, 在程序中, 对边界条件, 网格剖分和初值选取等方面进行了改进。使计算的收敛速度和精度有了提高。可方便地得到器件内部的电位和载流子浓度等物理量的二维分布。其输出特性和实验数据基本吻合。

关键词 绝缘栅场效应晶体管; 有限元分析; 二维数值模拟

1. 引言

从 Dingle 等人^[1]观察到用 MBE 生长的 GaAlAs-GaAs 异质结材料具有高电子迁移率后, 各种结构的高电子迁移率 HEMT 器件大量涌现。但由于 HEMT 中存在着深能级中心, 器件的退化不易解决。1986年, Cirillo 等人^[2]为避免深中心, 采用 i GaAlAs- i GaAs 结构, 即用纯度 GaAs 代替掺杂 GaAs, 得到了良好的结果。文献 [3] 报道了将 HIGFETs 作为倒相器用于 GaAs 集成电路。为了在有限内存中实现快速有限元分析, 我们在边界条件, 网格剖分和取初值等方面作了一些改进, 使计算的收敛速度和精度有了显著的提高。开发出一套新的程序, 可对 HIGFETs 器件的内部电位和载流子等物理量的二维分布进行分析和讨论。计算得的 I-V 特性和实测值较为一致。这说明理论分析和计算方法是可靠的。

2. 器件的基本方程和边界条件

(1) 基本方程 图 1 示出了 n 沟 i -GaAlAs/ i GaAs HIGFETs 的结构。采取类似于 MESFET 的基本假定, 才能建立基本方程, 即

(a) 载流子渡越沟所需的时间远大于载流子的平均自由时间, 并采用单能谷近似, 使漂移扩散模型近似成立。

(b) 器件的栅宽 w 一般远大于栅长 L 和沟道厚度 d , 故可考虑载流子仅在 x - y 平面作二维运动

(c) 器件多子是二维电子气, 可忽略少子的影响。

(d) 基本方程中载流子迁移率 μ , 扩散系数 D 均是电场强度 E 的函数。在低场时, 爱

1991.06.10 收到, 1992.03.24 定稿。

* 国家自然科学基金资助课题。

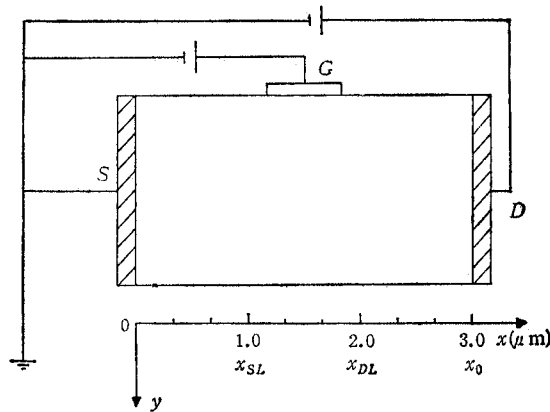


图 1 *i*-GaAlAs/*i*GaAs HIGFETs 器件的分析结构
 x_{SL} 和 x_{DL} 分别表示源-栅和漏-栅间的间距, x_0 为源-漏间距离)

因斯坦关系 $D = (kT/q)\mu$ 成立,这里 k 为波尔兹曼常数, T 为温度, q 为电子电荷。载流子飘移速度 $v = \mu E$ 。

(e) 沟道长度 $L = 1\mu\text{m}$, 尚未进入亚微米区, 可忽略速度过冲。

(f) 只考虑稳态情况。

(g) 因采用纯度 GaAs 和 GaAlAs 层, 因此深中心影响可忽略。

在上述假设下, 其基本方程为

$$\text{泊松方程 } \nabla^2 \phi = (q/\epsilon_2)n \quad (1)$$

$$\text{电流连续方程 } \Delta \cdot J_n = 0 \quad (2)$$

其中

$$J_n = -q\mu_n n \nabla \phi_n \quad (3)$$

为了减少计算的工作量, 以下物理量作归一化处理

- (a) 电位的归一化因子为热电势 $u = kT/q$ 。 (b) 载流子浓度的归一化因子为本征载流子浓度 n_i 。 (c) 距离和长度的归一化因子为本征德拜长度 $L_D = [kT\epsilon_2/(q^2 n_i)]^{1/2}$ (d) 电流密度的归一化因子为 $kT n_i / L_D$

于是(1),(2)和(3)式可简化为

$$\nabla^2 \phi = n \quad (4)$$

$$\nabla J_n = 0 \quad (5)$$

$$J_n = -\mu_n n \nabla \phi_n \quad (6)$$

这里 ϕ 为电位, $\phi_n = \exp(-\varphi_n)$, φ_n 为准费米能级, μ_n 为电子迁移率, ϵ_2 为相对介电常数。还需指出的是 ϕ, ϕ_n, J, n 均为坐标 x, y 的函数。 ∇ 为二维哈密顿算符。(1) 式中 n 项严格应为 $n - N_D$, 在纯度 GaAs 情况下, N_D 可忽略。

(2) 边界条件 在本器件结构中, 源、漏电极为理想欧姆接触, 栅为理想整流接触。器件中只有源漏电极间通过电流, 且源电极接地。 如以 ϕ 和 ϕ_n 为基本变量, 则边界条件:

$$\text{源极 } \phi = 0, \quad \phi_n = n \quad (7a)$$

$$\text{漏极 } \phi = -V_D, \quad \phi_n = n \exp(-V_D) \quad (7b)$$

$$\text{栅极} \quad \phi = V_G - V_{D_i}, \quad \phi_n = n \quad (7c)$$

其余各面上 ϕ, ϕ_n 的法向导数为零。式中 V_D 和 V_G 为漏和栅的偏置电压, V_{D_i} 为栅的自建电压。

3. 有限元数值分析方法

将(4)–(6)式用有限元法进行数值离散化,则按文献[3]可导出以 ϕ 和 ϕ_n 为基本变量的有限元形式的泊松方程和电流连续方程^[4]:

$$\sum_{j=1}^{NG} (H_{ij}(\phi_j^{(k)} + \delta\phi_j^{(k)} + f_i^{(k)} + \sum_{l=1}^{NG} G_{ij}^{(k)} \delta\phi_j^{(k)} - 0 \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{NG} Q_{ij} \cdot \phi_{n_j} = 0 \quad (9)$$

这里 $i = 1, 2, 3, \dots, MG$; $j = 1, 2, 3, \dots, NG$; $Q_{ij} = \int_{\Omega} \mu_n \exp(\phi) \nabla \theta_i \cdot \nabla \theta_j dx dy$; k 为泊松方程的内迭代次数, $k = 0, 1, 2, \dots, NG$ 为总的网格点数; MG 为除去电极接触点外的未知节点数。故(8)式和(9)式是 NG 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储方法。本程序的主程序用 Gummel 迭代方法求得(8)式和(9)式的自洽解。由于泊松方程(8)式是非线性偏微分方程,采用牛顿-拉夫森迭代方程求解。采用收敛性判断条件可提高计算的精确度。

本文在网格优选方面做了较多工作,如采用前一点计算结果作为本次计算的初值和估算预分布结合起来可大大加快收敛速度。又如网格划分采用密到疏的顺序(1)→(2)→(3)→(4)→(5)→(6)进行计算(如图2所示)即在栅区及其周围区域^[5](二维电子气区)网格分得密一些,在远的区域分得疏一些,这不仅大大降低计算工作量,又可提高计算精

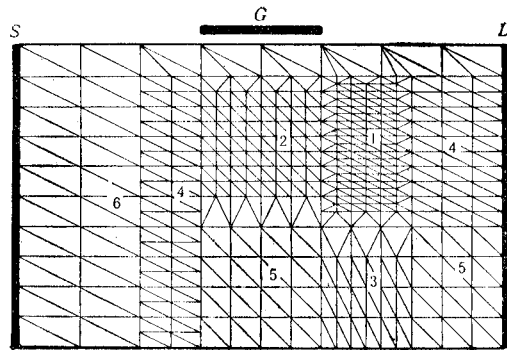


图2 网格划分示意图

(由密到疏顺序(1)→(2)→(3)→(4)→(5)→(6))

表1 计算中所用的参数

器件	d (μm)	μ ($\text{cm}^2/\text{v} \cdot \text{s}$)	ϵ_2	V_{sat} (cm/s)	E (V/cm)	V (V)	L_G (μm)	L_{SG} (μm)	L_{DG} (μm)
n 沟	0.5	8600	12.2	2.1×10^7	2.44×10^3	0.8	1.0	1.0	1.0
p 沟	0.5	720	13.2	9×10^6	1.25×10^3	-0.7	1.0	1.0	1.0

度。事实上,在本文所取 1500 个单点总数和 900 个单元总数情况下,收敛性和精确度都得到十分满意的结果。

4. 计算结果和讨论

计算中所采用的材料和器件结构参数如表 1 所示。表中 ϵ_2 为 *i*-GaAlAs 的相对介电常数。计算中除采用图 2 的网格划分外,还采用网格自适应剖分技术^[6],三角形元素和线性型函数。总的网格点数是 424 个。按本征德拜长度 $L = 0.025 \mu\text{m}$ 划分,总的元素是 644 个,电极接触上网格点数是 72 个,网格间距约为 $0.03 \mu\text{m}$,最大为 $0.06 \mu\text{m}$,最小为 $0.02 \mu\text{m}$ 。

图 3 分别示出了 $1 \mu\text{m}$ 栅长 *i*-GaAlAs/GaAs *n* 沟 HIGFETs 在不同栅漏的偏置电压下计算得的相对电子浓度和电位分布。在图示的 V_{GS} 和 V_{DS} 下,栅下靠近漏极处形成偶极层(高场静止畴),继续增加 V_{DS} ,沟道电子气被夹断。

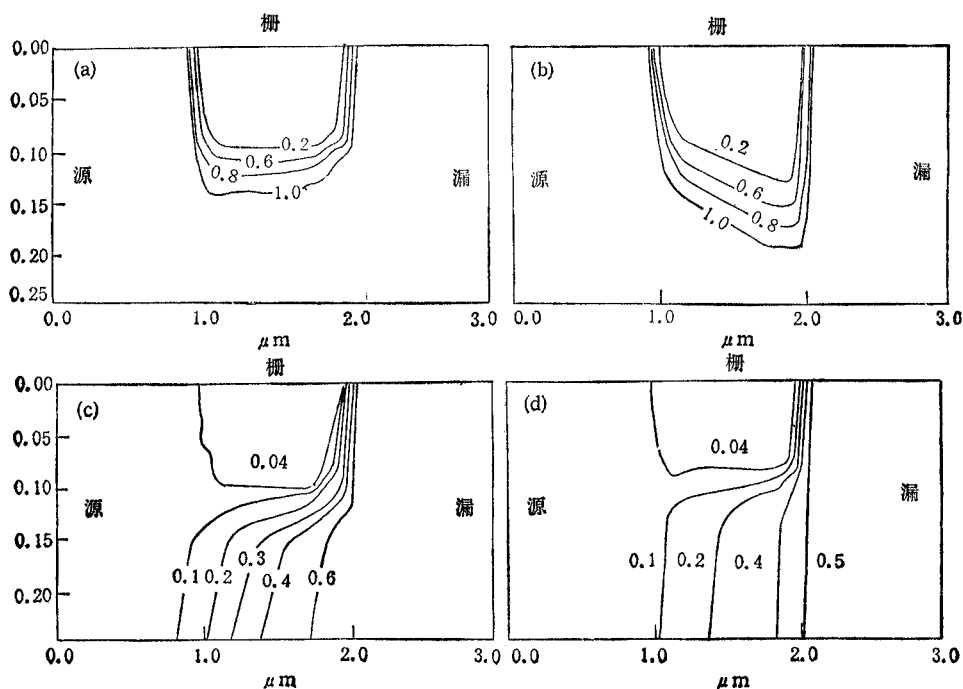


图 3 *n* 沟 HIGFETs 器件在不同 V_{GS} 和 V_{DS} 下相对电子浓度分布 [(a) 和 (b)] 和电位分布 [(c) 和 (d)]

表 2 图 3 中 V_{GS} 和 V_{DS} 数据

	(a)	(b)	(c)	(d)
$V_{GS}(\text{V})$	1.2	1.4	1.8	1.2
$V_{DS}(\text{V})$	1.0	1.5	2.0	1.5

p 沟 HIGFETs 器件的内部空穴浓度分布和电位分布情况类同于 *n* 沟,这里不再赘

述。

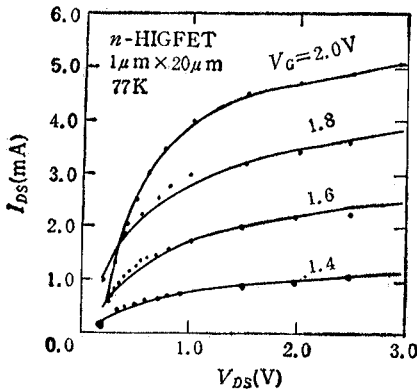


图4 n 沟 HIGFETs 器件 $I-V$ 特性的计算
值与实验值比较

···文献[2]的实验值,——计算值

收敛速度变快。计算结果与文献实验值相一致。

Shur^[7] 指出 HIGFETs 器件在高栅压下 ($V_{GS} > 3V$) 会出现负阻效应。本文模拟结果证实了这一点。

为了验证计算方法的可靠性,我们还应用本方法计算了 n 沟 HIGFETs 器件在不同栅压下的 $I-V$ 特性(示于图4),并与文献[2]的实测值进行了比较,结果十分吻合。这说明本文的理论推导和计算方法是正确的。

5. 结论

本文采用有限元法,对 i -GaAlAs/GaAs HIGFETs 器件参数作了二维数值分析。由于采用了网格自适应剖分技术以及与 Gummel 算法有所不同的新算法,使计算过程简化,工作量减少,收敛

参 考 文 献

- [1] K. Dingle et al., *Appl. Phys. Lett.*, 33(1976)3, 665—668.
- [2] N. C. Cirillo et al., *IEEE Electron Device Lett.*, 7(1986)7, 645—647.
- [3] 汪正孝, *半导体学报*, 5(1984)2, 178—188.
- [4] K. Natsumoto et al., *IEEE Electron Device Lett.*, 3(1986)7, 182—187.
- [5] J. J. Barner et al., *IEEE Trans. on ED*, ED-18(1977)4, 1082—1091.
- [6] 谈根林等, *电子学报*, 15(1987)2, 94—103.
- [7] N. S. Shur et al., *IEEE Electron Device Lett.*, 2(1986)7, 78—83.
- [8] K. Yamagushi et al., *IEEE Trans. on ED*, ED-23(1986)5, 1283—1294.

THE PARAMETER ANALYSIS OF i -GaAlAs/GaAs HIGFETs BY USING FINITE-ELEMENT METHOD

Gu Cong Wang Dening Wang Weiyuan

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai 200050)

Abstract

Two dimensional numerical simulation and analysis for the static state characteristics of i -GaAlAs/ i -GaAs HIGFETs by using finite-element method are presented. 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 etc. inside the HIGFETs are computed. The results of its output characteristics are in good agreement with the experimental data.

Key words

HIGFETs; Finite-element method; 2-D numerical simulation