

# VDMOS 全热程的温度分布\*

李肇基 俞洪全 陈星弼

(电子科技大学微电子所, 成都)

1989 年 6 月 26 日收到

本文提出一种 VDMOS 全热程的电模型, 给出用网络法计算包含有源区、衬底、支座和热沉在内的全热程温度分布。同时在稳态非等温条件下求解一组包括热导方程、泊松方程和连续性方程的偏微分方程组。两种方法所获得的有源区温度分布符合很好。

主题词 电模型, 偏微分方程组, 温度分布

## 一、引言

参数的温度特性是影响功率器件和高压功率集成电路的重要因素。器件的额定功率、正向转折电压和反向恢复时间等参数均受到其电流和温度分布均匀性的影响, 因此全热程温度分布的计算是进行器件优化设计所必须的。不少文章对双极晶体管、晶闸管及高压集成电路的温度分布进行了计算<sup>[1,2]</sup>。本文目的在于对 VDMOS 包括芯片有源区、衬底、支座、热沉及空气在内的全热程温度分布进行数值分析。首先提出全热程的电模型, 作出与二维五点式差分网格相对应的集中热路模型。根据相似理论类比为集中电路模型, 用电路分析程序计算整个电网络的电位分布, 从而获得全热程的温度分布, 本文同时利用二维数值分析方法, 求解在非等温稳态下的热导方程、泊松方程与连续性方程, 得到同一器件完全相吻合的有源区温度分布。

## 二、理 论

器件的全热导路径如图 1 所示。其中支座和热沉及热沉与空气之间的温度分布采用一维分析。 $R_s$  和  $R_t$  及  $R_a$  分别表示支座和热沉及热沉与空间之间的热阻,  $C_s$  和  $C_t$  分别表示支座和热沉的热容, 其计算式为:

$$\begin{cases} R = \frac{1}{K} \frac{nA}{l} \\ C = \rho\theta L A / n \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\rho$ 、 $\theta$  和  $K$  分别表示支座和热沉材料的密度、比热和热导率,  $L$  和  $A$  分别为它们的长度和散热面积,  $n$  为每一芯片的集成度。在图 1 中上述  $R$  和  $C$  可由给定的材料和尺寸按(1)

\* 本工作获得国家“七五”重点攻关项目的支持。

式计算。

对图 1 的有源区和衬底的温度分布则用二维数值分析进行求解。据热量守恒定律，对任意封闭曲面  $S$  所围成的小区域  $V$  有热平衡式及温度的二维表达式：

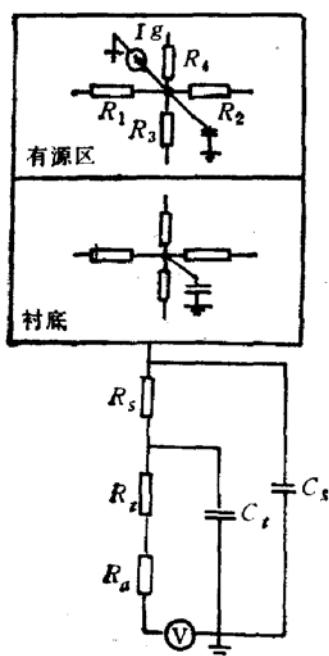


图 1 全热程等效电路

$$\int_{t_1}^{t_2} \left[ \iint_S \kappa \operatorname{grad} T dS \right] dt = \int_{t_1}^{t_2} \left[ \iiint_V \rho \theta \frac{\partial T}{\partial t} dV \right] dt \quad (2)$$

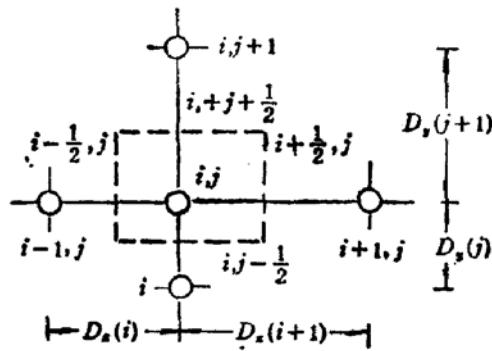


图 2 差分网格

$$\left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) + \frac{1}{K} Q(x, y, t) = \frac{\rho \theta}{K} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

上式利用了矢量分析中的高斯定理。在推导时未计及重掺杂效应和载流子的产生复合所引起的热效应。式中  $Q(x, y, t)$  为单位体积内的热产生。利用图 2 所示的差分网格可得到离散化二维热导方程：

$$\begin{aligned} & \xi_1 [T(i+1, j) - T(i, j)] + \xi_2 [T(i-1, j) - T(i, j)] \\ & + \xi_3 [T(i, j+1) - T(i, j)] + \xi_4 [T(i, j-1) - T(i, j)] \\ & + Q \cdot S(i, j) / K = \frac{\rho \cdot \theta}{K} S(i, j) \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} \xi_1 = \bar{D}_y / D_x(i+1) \\ \xi_2 = \bar{D}_y / D_x(i) \\ \xi_3 = \bar{D}_x / D_y(j+1) \\ \xi_4 = \bar{D}_x / D_y(j) \\ \bar{D}_x = [D_x(i) + D_x(i+1)]/2 \\ \bar{D}_y = [D_y(j) + D_y(j+1)]/2 \\ S(i, j) = \bar{D}_x \cdot \bar{D}_y \end{cases} \quad (5)$$

$S(i, j)$  为图 2 中虚线所围的面积。在电模型的分析中，根据电热相似理论，建立热量、热

流、温差、热阻和热容与电量、电流、电压、电阻和电容之间的对比关系,将图 1 所示集中等效热路单元转换为集中等效电路单元<sup>[3]</sup>。在温度分布的计算中,衬底与有源区的等效电路和计算方法几乎相同。只是前者无热源,因此在图 1 所示的等效电路中没有画出电流源。其中各元件值为

$$\begin{cases} R_1 = D_x(i)/\bar{D}, \\ R_2 = D_x(i+1)/\bar{D}, \\ R_3 = D_y(i)/\bar{D}_y, \\ R_4 = D_y(i+1)/\bar{D}_y, \\ I_g = Q \cdot S(i,j)/K \\ C = \rho \cdot \theta \cdot S(i,j)/K \end{cases} \quad (6)$$

计算中 Dirchlet 和 Neumann 边界条件分别为  $T|_{l=1} = T_0$ ,  $\partial T/\partial x|_{AC, BD} = 0$ ,  $\partial T/\partial y|_{AB} = 0$ , 在图 3 所示器件中,  $l$  表示下边界  $CD$ ,  $T_0$  为环境温度  $T_0 = 300K$ 。上述条件分别表示在  $CD$  边上接一个恒压源以及左、右和上边界电场的垂直分量为零。后一边界条件的离散形式可采用虚拟差分公式:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial x}|_2 = \frac{T(3) - T(1)}{D_x(1) + D_x(2)} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}|_2 = \frac{4[T(3) - T(2)]}{D_x(2)[D_x(2) + D_x(1)]} \end{cases} \quad (7)$$

式中 2 表示边界点, 3 表示内相邻点, 1 为其对称虚拟点;  $D_x(1)$  与  $D_x(2)$  分别为 1—2 与 2—3 之间距。假设有源区内电场为线性分布, 电流密度为均匀分布, 则有

$$\begin{cases} Q'_{i,j} = \bar{J}_{i,j} \cdot E_{i,j} \cdot S_{i,j} \\ \bar{E}(x, y) = \begin{cases} \frac{y}{y_m} E_m & x_m \geq x \geq x_1 \\ 0 & x_1 > x \geq 0 \end{cases} \\ \bar{J}(x, y) = \begin{cases} \frac{I_D}{x_m - L} & x_m \geq x \geq x_1 \\ 0 & x_1 > x \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $I_D$  为沟道电流,  $L$  为沟道长度。其余符号见图 3。沟道区内每个节点产生热为  $Q''_{i,j} = I_D V_D / (N_{xL} - 1)$ ,  $N_{xL}$  为沟道内节点数。根据(8), (4)和(5)式计算有源区内产生热和图 1 中电路单元的电阻、电容和电流源数值, 编写对应于二维热导方程的电路模拟程序, 用电路分析程序 SPICE 进行计算, 给出电路各点的电位分布, 从而获得有源区的温度分布。

为了对上述结果进行比较, 利用数值方法<sup>[4]</sup>求解在非等温和稳态条件下包括热导方程、泊松方程及连续性方程的归一化偏微分方程组:

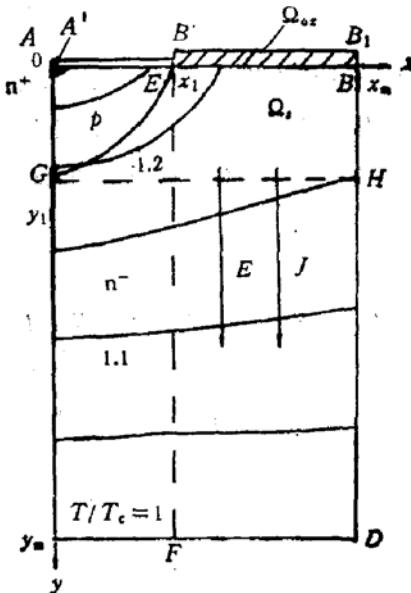


图 3 器件示意图与等温线分布

$$\nabla \cdot (K \nabla T) = -D_0 n_i k (\bar{J} \cdot \mathbf{E}) \quad (9)$$

$$\nabla^2 \varphi = -(p + N - n) \quad (10)$$

$$\nabla \cdot [\mu_p (p \nabla \varphi + T \nabla p)] = 0 \quad (11)$$

$$\nabla \cdot [\mu_n (n \nabla \varphi - T \nabla n)] = 0 \quad (12)$$

其中  $K$  和  $K$  为玻兹曼系数和热导率, 其余符号如常。上述方程包括了器件内部的自热效应, 忽略重掺杂效应与载流子的产生与复合作用。为便于处理自然边界条件和推广至任一网格, 利用格林公式可得泊松方程的积分形式<sup>[4]</sup>:

$$\oint_{l_{S(i,j)}} \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds = \int_{S(i,j)} f dx dy \quad (13)$$

其中  $l_{S(i,j)}$  为  $S_{i,j}$  所围的边界,  $ds$  为其上的小区间。 $f$  为泊松方程的右端项。求解方程组 (9—12) 的边界条件为  $V|_{A'B'} = V_s$ ,  $V|_{AB''} = V_s$ ,  $V|_{CD} = V_D$ ,  $T|_{CD} = T_2$ , 在  $AC, BD$  上  $\partial \varphi / \partial x = 0$ ,  $J_x = 0$ ,  $\partial T / \partial x = 0$ , 以及  $\partial T / \partial y|_{B'B_1} = 0$ ,  $J_y|_{EB} = 0$ 。在  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  界面上有

$$\begin{cases} e_s \frac{\partial \varphi}{\partial y}|_{Q_s} = e_{ox} \frac{\partial \varphi}{\partial y}|_{Q_{ox}} \\ \kappa_s \frac{\partial T}{\partial y}|_{Q_s} = \kappa_{ox} \frac{\partial T}{\partial y}|_{Q_{ox}} \end{cases} \quad (14)$$

其中  $Q_s$  和  $Q_{ox}$  分别表示在半导体与氧化层内,  $\kappa_s$  和  $\kappa_{ox}$  为半导体与氧化层的热导率。根据[4]物理模型参数为

$$\begin{cases} K(T) = 3110 T^{-4/3} \\ n_i = 3.88 \times 10^{16} T^{3/2} \exp(-7000/T) \\ \mu_{n,p}^b = \mu_{n,p} [1 + (E_{n,p}/(E_{n,p,b}^c))^{\beta_{n,p}}]^{-1/\beta_{n,p}} \\ \mu_{n,p}^s = \mu_{n,p}^0 \left(1 - \frac{F-1}{y y_{n,p}^0 + F}\right) \\ y_{n,p}^s = \frac{1 + E_{(n,p)s}/E_{(n,p)s}^c}{y_{n,p}^0} \\ F = 2 + E_{\perp}/E_{\perp,n,p}^c \end{cases} \quad (15)$$

其中  $E_{n,b}^c = 7 \times 10^3 \eta^{1.55} \text{V/cm}$ ,  $E_{p,b}^c = 1.8 \times 10^4 \eta^{1.68} \text{V/cm}$ ,  $\beta_n = 1.11 \eta^{0.66}$ ,  $\beta_p = 1.21 \eta^{0.17}$ ,  $\eta = T/300$ ,  $y_n^0 = 5 \times 10^{-7} \text{cm}$ ,  $y_p^0 = 4 \times 10^{-7} \text{cm}$ ,  $E_{n,s}^c = 10^4 \text{V/cm}$ ,  $E_{p,s}^c = 8 \times 10^3 \text{V/cm}$ ,  $E_{\perp,n}^c = 1.8 \times 10^5 \text{V/cm}$ ,  $E_{\perp,p}^c = 3.8 \times 10^5 \text{V/cm}$ ,  $y$  表示垂直于界面的距离。注角  $b$  和  $s$  分别表示体内与表面。其余符号意义如常。求解程序分内外循环。内循环解出  $\varphi, p$  和  $n$ , 外循环解出  $T$  值。该程序在 VAX-11/780 机上运行。

### 三、结果与讨论

利用上述理论对图 3 所示的单元 VDMOS 结构进行计算, 其中参数为  $x_m = 25 \mu\text{m}$ ,  $Y_m = 40 \mu\text{m}$ ,  $x_{i,p} = 10 \mu\text{m}$ ,  $N_b = 2 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 。根据所需要的工作电流数值, 单个 VDMOS

器件可含数四个单元。图 4\* 表示电子与空穴的浓度分布, 其最大浓度分别为  $10^{19} \text{cm}^{-3}$  和  $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。图 5\* 表示有源区漏电流  $I_{ds}$  的分布, 其相邻电流线的间距为  $\Delta I_{ds} = 1.0 \times 10^{-7} \text{A}/\mu\text{m}$ 。图 6 为利用上述两种方法计算的归一化温度与归一化距离  $x$  的关系, 其中  $a$  和  $b$  分别表示沿  $AB$  与  $GH$  线的温度分布。图 7 为归一化温度与  $y$  方向归一化距离的关系, 其中  $a$  和  $b$  分别表示沿  $EF$  和  $BD$  线的温度分布, 其位置分别是  $x$  的值为  $10 \mu\text{m}$  和  $25 \mu\text{m}$  处。从两图清楚地看到有源区内温度分布是非均匀的, 接近  $pn$  结边缘温度梯度大随  $x$  和  $y$  距离的增加温度变化逐渐变得平缓。从两图亦看到用两种方法所计算的温度分布非常一致。无论是  $x$  方向或  $y$  方向均如此。图 3 中给出了有源区内的等温线分布。

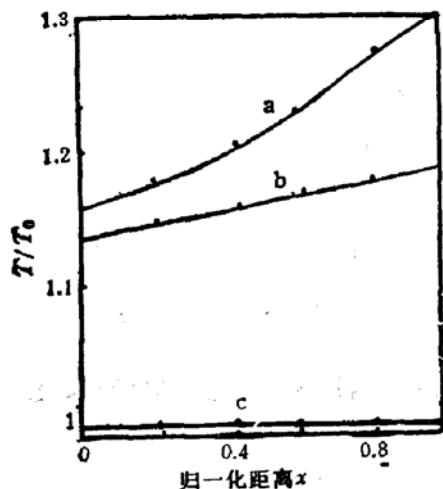


图 6  $T/T_0$  与  $X$  的关系  
——有限差分法·电模型法

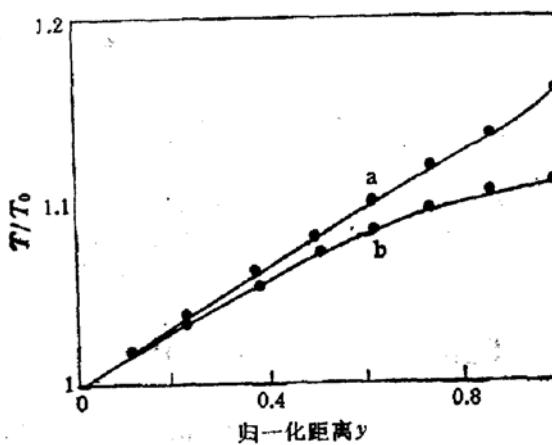


图 7  $T/T_0$  与  $Y$  的关系  
——有限差分法·电模型法

由于沟道端点电流密度大<sup>[6]</sup>、该处温度高、等温线密, 温度变化亦快。在  $B$  点附近电流密度小、等温线变稀。图 8 为衬底与支座上的温度降  $\Delta T_{sub}$  和  $\Delta T_b$  随  $V_D$  的变化。看出在该路径上产生的热量随  $V_D$  呈线性变化。这是由于  $\Delta T = R_T \cdot V_D \cdot I_D$ , 假定它们的热

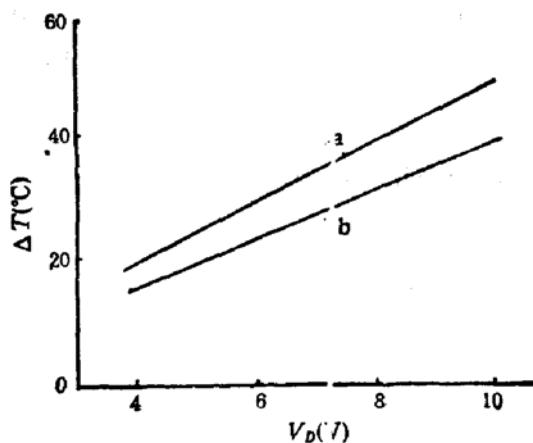


图 8  $\Delta T_{sub}$  和  $\Delta T_b$  与  $V_D$  关系  
●  $\Delta T_b$     ■  $\Delta T_{sub}$

\* 图 4, 图 5 见图版 1.

阻为常数值下得到的。衬底与支座上的温度梯度分别约为  $5^{\circ}\text{C}/\text{V}$  和  $4^{\circ}\text{C}/\text{V}$ ，因此在实际器件的热学设计中，热沉与支座材料的选择是十分重要的。

#### 四、结 论

本文提出一种 VDMOS 全热程的电模型及全热程温度分布的电网络计算法，获得包括有源区、衬底、支座和热沉在内的全热的温度分布。并求解有源区在稳态非等温条件下包含热导方程、泊松方程和连续性方程的偏微分方程组，计算得到的有源区的温度分布与电网络法的值吻合很好。

#### 参 考 文 献

- [1] A. Nakagawa *et al.*, *IEEE Trans. on Electron Devices*, ED-31, 1156 (1984).
- [2] V. C. Alwin *et al.*, *ibid* ED-24, 1297(1977).
- [3] K. Fukahori *et al.*, *IEEE J. S. S. C*, SC-11, 834(1976).
- [4] S. Selberherr, *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*, Springer-Verlag/Wien, (1984).
- [5] 陈星弼、李肇基、宋志庆、成都电讯工程学院学报, 17, 46(1988).
- [6] X. B. Chen, Z. Q. Song and Z. J. Li, *IEEE Trans. on Electron Devices*, ED-34, 2340(1987).

### Temperature Distribution of Full-Thermal path of VDMOS

Li Zhaoji, Yu Hongquan and Chen Xingbi

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

#### Abstract

An electronic model of the full-thermal path of VDMOS is proposed and the temperature distribution of the device including active region, substrate, support and heat sink is calculated by the electric network method. On the other hand, the approach taken in the paper is to solve a complete set of partial differential equations governing the device behavior under steady-state operation and nonisothermal conditions. The results from the two approaches are in excellent agreement.

**Key words** electronic model, a partial differential equations, temperature distribution