

MOSFET 中载流子能量输运 计算机辅助分析

张义门 滕建旭

(西安电子科技大学微电子所,西安)

摘要 本文提出了能量输运问题的二维 MOSFET 的数值模拟,其中计入了产生、复合以及载流子的温度梯度对器件特性的影响;还提出了改进的迁移率模型。对微米和亚微米 MOSFET 样品的模拟结果表明,本文所提出的模型和方法与实验符合得很好。

关键词 金属-氧化物-半导体场效应晶体管;能量输运;迁移率;数值模拟;CAD

一、引言

随着 VLSI 和 ULSI 的发展,器件的尺寸不断缩小,通常用于描述器件的经典模型已不能精确地描述微米和亚微米尺寸器件的特性,这时必须考虑能量守恒和能量输运问题。R. Stratton^[1] 最早对半导体势垒中的热电子和冷电子进行研究。对于硅金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET),只有当器件尺寸很小时,强场引起的热载流子效应的影响才比较明显。在70年代,随着器件尺寸的减小,人们对硅 MOSFET 中载流子能量输运问题的研究才又给以足够重视。通常在不作任何附加假设的情况下,由波尔兹曼方程导出的描述器件特性的基本方程形式非常复杂,给求解带来困难。人们在研究载流子能量输运问题时均作了许多假设,简化方程以便求解。进入80年代,无论是双极器件或是单极器件,载流子能量输运问题的研究十分活跃,并取得了一定的进展。但是在 MOSFET 的模拟中,K. Cook 和 J. Frey^[2], M. Fukuma 和 R. H. Uebbing^[3] 均忽略了载流子的产生和复合以及载流子温度梯度的影响,也没有给出明确的迁移率模型。W. Hänsch 和 S. Selberherr^[4] 虽然考虑了载流子的能量输运问题,但是没有通过求解能量守恒方程来模拟器件特性,只是在电流密度表达式中加上热扩散项,将热电势表示成迁移率的函数。H. Shin^[5] 没有考虑载流子的能量输运,只对迁移率模型作了修改。尽管以上各种模型在一定程度上与实验相符,但是其精度都不高。本文讨论了静态条件下硅 MOSFET 中载流子的能量输运问题,提出了一个改进的载流子迁移率模型,建立了 MOSFET 模拟程序 ETMOS。最后给出模拟结果和对结果的讨论。

二、物理模型

在经典的理论中,载流子的温度与晶格温度相等,载流子的运动规律用漂移扩散理论来描述。在微米和亚微米器件中和通常的工作电压下,载流子的温度和晶格温度相等的假设不再成立。这种差别来自能量输运。在考虑能量输运和能量守恒条件下,描述器件的基本方程为

$$\nabla^2 \phi = -\frac{q}{\epsilon} (N - n + p) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_n = qR \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_n = qn\mu_n \mathbf{E} + kT_n \mu_n \nabla n + kn\mu_n \nabla T_n \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{S}_n = \mathbf{J}_n \cdot \mathbf{E} - \frac{3}{2} kn \frac{T_n - T_0}{\tau_{en}} \quad (4)$$

$$\mathbf{S}_n = -\frac{k^2}{q} \Delta_n \mu_n T_n n \nabla T_n - \frac{k}{q} \delta_n T_n \cdot \mathbf{J}_n \quad (5)$$

其中 ϕ 为电势, q 为电荷, n 和 p 分别为电子和空穴浓度, ϵ 为介电常数, \mathbf{J}_n 为电子电流密度, R 为复合率, k 为波尔兹曼常数, μ_n 为电子迁移率, \mathbf{E} 是电场强度, T_n 为电子温度, T_0 为晶格温度, \mathbf{S}_n 为电子能量流密度, τ_{en} 为电子能量弛豫时间, Δ_n 和 δ_n 均为附加输运系数。

$$\Delta_n(T_n) = \left[\frac{\langle \tau_{en}^3 \rangle}{\langle \tau_{en} \rangle} - \left(\frac{\langle \tau_{en}^2 \rangle}{\langle \tau_{en} \rangle} \right)^2 \right] / (kT_n)^2 \quad (6)$$

$$\delta_n(T_n) = \frac{\langle \tau_{en}^2 \rangle}{\langle \tau_{en} \rangle} \quad (7)$$

(3) 式中除了漂移扩散项以外, 还有由于电子的温度梯度引起的输运电子电流密度 $kn\mu_n \nabla T_n$ 。(4) 式为能量守恒方程, (5) 式为能流输运方程。

通常迁移率与动量弛豫时间 τ_m 有下列关系:

$$\mu = \frac{q}{m^*} \tau_m \quad (8)$$

τ_m 与载流子在电场中运动时受到散射的几率以及载流子的分布函数有关。由文献[6], τ_m 和能量弛豫时间 τ_e 可直接由分布函数的三阶矩量求出。

$$\frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{\tau_{m0}} \left[1 + \eta \frac{W - W_0}{n} \right] \quad (9)$$

$$\frac{1}{\tau_e} = \frac{1}{\tau_{e0}} \quad (10)$$

W_0 和 W 分别为热平衡时和静态时的电子能量。 τ_{m0} 和 τ_{e0} 均与电场无关。 η 与弱场迁移率、量子沟道展宽效应、表面散射效应、饱和漂移速度以及能量弛豫时间有关。

$$\eta = \mu_{0f} / (q\tau_e v^2) \quad (11)$$

由(8)、(9)和(11)式可得

$$\mu = \mu_0 f / \{1 + (3/2)[k\mu_0 f(T - T_0)/(q\tau_e v_s^2)]\} \quad (12)$$

μ_0 为弱场迁移率, 主要由晶格散射、电离杂质散射以及载流子之间的散射来确定。 v_s 为饱和漂移速度。 f 为与量子沟道展宽效应以及表面散射效应有关的一个函数^[7]。

$$f = 1/[1 + \alpha_1 p_1 \mu_0 E_{\perp} / (1 + \beta E_{\perp}^{2/3})] \quad (13)$$

p_1 是与表面态密度和反型层中的电荷密度有关的量。本文采用了 Schwarz^[8] 给出的表达式来计算 p_1 。 α_1 和 β 均为常数, $\alpha_1 = 8 \times 10^{-8}$ s/cm, $\beta = 3.18 \times 10^{-4}$ (cm/V)^{-2/3}。 $1/(1 + \beta E_{\perp}^{2/3})$ 反映了量子沟道展宽效应的影响。很明显, (12) 式中既包含了能量弛豫时间以及载流子温度的影响, 又计入了量子沟道展宽效应的影响。

对于硅 MOSFET, 这里只考虑两种复合机制: 一是 SRH 复合, 二是表面复合。其复合率分别为:

$$R_{\text{SRH}} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (14)$$

$$R_{\text{SUR}} = \frac{np - n_i^2}{\frac{1}{s_p}(n + n_1) + \frac{1}{s_n}(p + p_1)} \delta(y) \quad (15)$$

其中 n_i 为本征载流子浓度, n_1 和 p_1 分别为费米能级与复合中心能级重合时导带和价带中的电子浓度和空穴浓度, τ_n 和 τ_p 分别为电子和空穴的寿命, s_n 和 s_p 分别为电子和空穴的表面复合速度, 通常为 $100-10^6$ cm/s, $\delta(y)$ 为 Delta 函数, $y = 0$ 时, $\delta(y) = 1$; $y \neq 0$ 时, $\delta(y) = 0$ 。

三、离散化方程和边界条件

在五点式有限差分网格单元上, 运用 Green 公式使 (1), (2) 和 (4) 式降阶, 从而得出相应的离散化方程。电流密度在 $1/2$ 网格点处的插值函数为

$$\begin{aligned} J_x\left(i + \frac{1}{2}, j\right) &= \frac{1}{h_i} \mu_n \left(i + \frac{1}{2}, j\right) \frac{\Delta T_{i+1}}{\ln [T(i+1, j)/T(i, j)]} \\ &\times \left\{ n(i+1, j) B \left[-\frac{\Delta \phi_{i+1}}{\Delta T_{i+1}} \ln \frac{T(i+1, j)}{T(i, j)} \right] \right. \\ &\left. - n(i, j) B \left[\frac{\Delta \phi_{i+1}}{\Delta T_{i+1}} \ln \frac{T(i+1, j)}{T(i, j)} \right] \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

能量流密度在 $1/2$ 网格点处的插值函数为

$$\begin{aligned} s_n \left(i + \frac{1}{2}, j\right) &= -\frac{1}{h_i} \delta_n \mu_n \left(i + \frac{1}{2}, j\right) \frac{\Delta T_{i+1}}{\ln [T(i+1, j)/T(i, j)]} \\ &\times \left\{ n(i+1, j) T(i+1, j) B \left[-\frac{\Delta \phi'_{i+1}}{\Delta T_{i+1}} \ln \frac{T(i+1, j)}{T(i, j)} \right] \right. \\ &\left. - n(i, j) T(i, j) B \left[\frac{\Delta \phi'_{i+1}}{\Delta T_{i+1}} \ln \frac{T(i+1, j)}{T(i, j)} \right] \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned}\Delta\phi_{i+1} &= -[\phi(i+1, j) - \phi(i, j)] + \Delta T_{i+1} \\ \Delta T_{i+1} &= T(i+1, j) - T(i, j) \\ \Delta\phi'_{i+1} &= -[\phi(i+1, j) - \phi(i, j)] + (\Delta_n/\delta_n)\Delta T_{i+1} \\ B(x) &= x/(e^x - 1), \text{ 为 Bernoulli 函数.}\end{aligned}$$

运用牛顿-拉夫森法对离散化方程进行线性化处理, 可得到下述形式的线性化方程:

$$\begin{aligned}A(i, j)X(i, j-1) + B(i, j)X(i-1, j) + C(i, j)X(i, j) \\ + D(i, j)X(i+1, j) + E(i, j)X(i, j+1) = F(i, j)\end{aligned}\quad (18)$$

在欧姆接触处的边界条件为

$$\left. \begin{aligned}\phi &= V_{ap} + V_{bi} \\ n &= \sqrt{(N/2)^2 + n_i^2} + N/2 \\ T &= T_0\end{aligned}\right\}\quad (19)$$

V_{bi} 为自建电位, V_{ap} 为外加电压.

在 Si 和 SiO₂ 界面处:

$$\left. \begin{aligned}\mathbf{n} \cdot (\epsilon_s \nabla \phi_s - \epsilon_f \nabla \phi_f) &= Q_s \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_n &= qR_{SUR} \\ \mathbf{n} \cdot \nabla T &= 0\end{aligned}\right\}\quad (20)$$

在人为的边界处, 采用 Neumann 边界条件:

$$\left. \begin{aligned}\mathbf{n} \cdot \nabla \phi &= 0 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_n &= 0 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{S}_n &= 0\end{aligned}\right\}\quad (21)$$

四、数值分析结果

按照上述的模型和边界条件建立的 MOSFET 模拟器 ETMOS 是一个可以模拟微米和亚微米 MOSFET 的装置. 程序用 FORTRAN-77 编写, 共 21701 条. 运用不考虑能量输运的经典二维模拟结果作初值, 采用强隐式法 (SIP) 对线性化方程组 (18) 式进行 Gummel 自洽迭代求解. 能量弛豫时间取值为 0.3—0.01 ps, 缺省值为 0.05 ps.

图 1 给出用 ETMOS 对 N 沟道 MOSFET 模拟与实验的比较. 沟道用 B 进行两次离子注入, 其条件为: 一次能量 33 keV, 剂量 $1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$; 另一次能量为 120 keV, 剂量 $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$; 退火温度 975°C, 退火时间为 1200 s. 栅氧化层厚度为 27 nm. 从图可看出, ETMOS 的模拟结果和实验符合得很好.

图 2 给出了 ETMOS 的模拟和 H. Shin^[5] 的模拟与实验结果的比较. 从图可看出, ETMOS 的模拟结果具有更高的精度.

图 3 为用本文迁移率模型所得出的电子漂移速度与实验结果^[5]的比较. 理论与实验的一致性进一步说明本文所采用的迁移率模型的正确性.

图 4 为 $L_{eff} = 0.9 \mu\text{m}$ 的器件在不同栅、漏电压下, 漏极能量通量(即流向漏极能量流密度的总和)的变化情况. 图 5 为 $L_{eff} = 0.6 \mu\text{m}$, $W = 10 \mu\text{m}$, $N_a = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

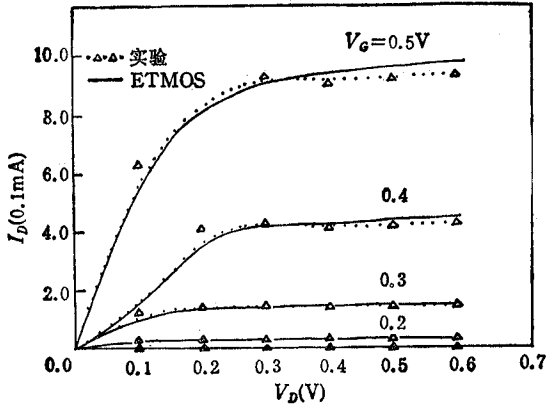


图1 MOSFET 的输出特性

(栅长 $L = 1 \mu\text{m}$, 栅宽 $W = 40 \mu\text{m}$, 衬底掺杂 $N_a = 2.5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, 源和漏均由 As 离子注入形成)

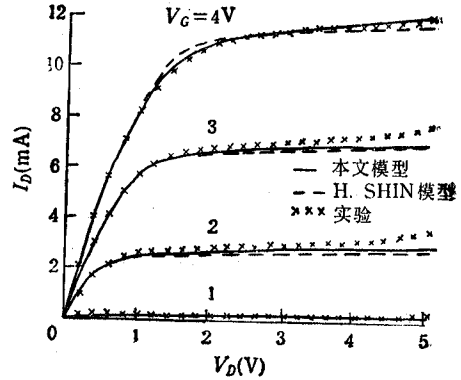


图2 MOSFET 的输出特性

(器件的有效沟道长度 $L_{\text{eff}} = 0.9 \mu\text{m}$, 有效沟道宽度 $W_{\text{eff}} = 49.4 \mu\text{m}$, 源和漏结深 $x_j = 0.3 \mu\text{m}$, 衬底掺杂 $N_a = 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 表面态密度 $N_f = 3.0 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$)

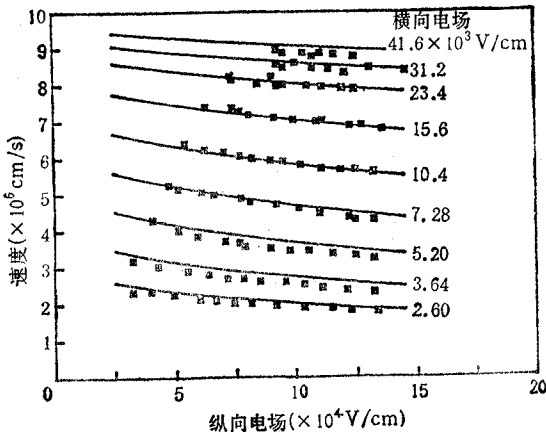


图3 电子漂移速度与电场的关系
(——本文模型, ■■■实验)

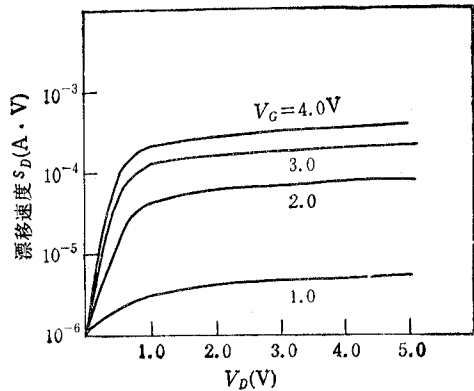
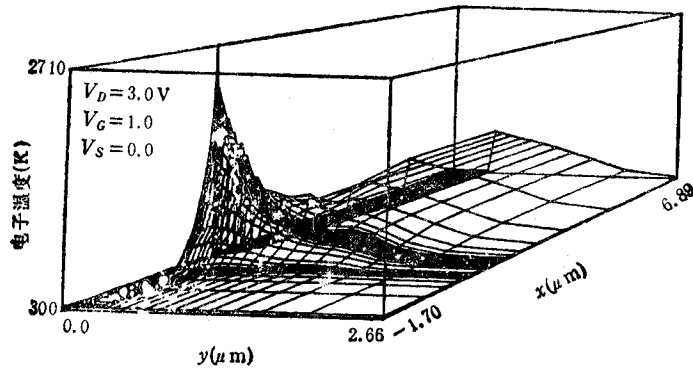
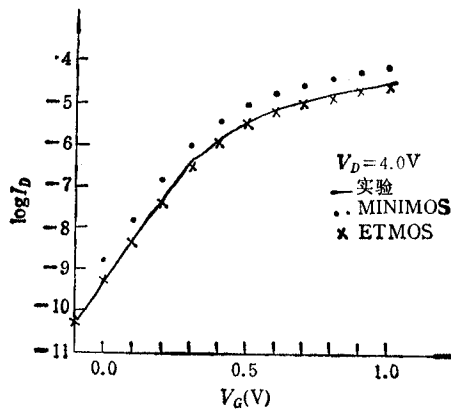


图4 漏极能量通量特性

的 MOSFET 的内部电子温度的分布情况。

作者对 $L = 2.56 \mu\text{m}$, $W = 21.5 \mu\text{m}$, 栅氧化层厚度 $T_{\text{ox}} = 53.0 \text{nm}$, $N_a = 1.2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的 MOSFET 也进行了模拟, 并与二维模拟器 MINIMOS 2.0 的模拟结果和实验结果^[10]进行了比较。图6为该器件的亚阈特性。由图可见, ETMOS 的结果更接近实验值。

图5 MOSFET 电子温度分布的内部 ($L_{eff} = 0.6\mu\text{m}$)图6 MOSFET 的亚阈特性 ($L = 2.56\mu\text{m}$)

五、结 论

考虑载流子能量输运和能量守恒并计入能量弛豫时间和量子沟道展宽效应对迁移率的影响的模型是分析微米和亚微米 MOSFET 的比较精确的模型。它正确地反映了器件的工作机理,所以在此基础上建立的模拟器 ETMOS 的模拟结果与实验符合得相当好。

清华大学微电子研究所徐葭生教授为本文的实验研究提供了宝贵的帮助,表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] R. Stratton, *Phys. Rev.*, **126**(1962), 2002.
- [2] R. K. Cook, J. Frey, *IEEE Trans. on ED*, **ED-29**(1982), 970.
- [3] M. Fukuma, R. H. Vebbing, *Two-dimensional MOSFET Simulation with Energy Transport Phenomena*, 1984 Int. Electr. Dev. Meeting Technical Digest, San Francisco, p. 621.
- [4] W. Hänsch, S. Selberherr, *IEEE Trans. on ED*, **ED-34**(1987), 1074.
- [5] H. Shin, et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-36**(1989), 1117.
- [6] W. Hänsch, M. Miura-Mattausch, *J. Appl. Phys.*, **60**(1986), 15.
- [7] A. Hiroki, et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-35**(1988), 1487

- [8] S. A. Schwarz, et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-30**(1983), 1634.
[9] J. A. Cooper, et al., *J. Appl. Phys.*, **54**(1983), 1445.
[10] W. Pichtner, et al., *Int. J. Electron.*, **46**(1979), 33.

COMPUTER AIDED ANALYSIS OF CARRIER ENERGY TRANSPORT IN MOSFETs

Zhang Yimen Teng Jianxu

(*Xidian University, Xi'an*)

Abstract The two-dimensional numerical simulation of energy transport for MOS FETs is presented, in which the effect of generation, recombination and temperature gradient of carriers on the characteristics of the devices are considered. An improved mobility model is also proposed. The numerical results of micrometer and submicrometer MOSFETs show that the present model fits experiment very well.

Key words MOSFET; Energy transport; Mobility; Numerical Simulation; CAD