

Monte Carlo 法研究短沟道 MOS 晶体管 V_T 的敏感度

赵 鸿 麟

(天津大学电子工程系)

1985年2月24日收到

本文用 Monte Carlo 法研究了 MOSFET 的几何尺寸、工艺参数在实际范围内波动时, 阈值电压 V_T 的离散及其对氧化膜厚度 t_{ox} 、表面态电荷密度 Q_{ss} 、衬底杂质浓度 N_A 及沟道长度 L 等六个变量的敏感度. 结果表明: V_T 是正态分布; 随着沟道变短进入短沟道区域, V_T 对 L 的敏感度急剧上升, 对 t_{ox} 、 Q_{ss} 及 N_A 的敏感度下降.

一、引 言

用 Monte Carlo 法进行器件工艺模拟可以由原材料、几何尺寸及工艺参数等输入变量的波动范围, 预测输出器件参数的平均值及分布. 而且在众多的输入变量中, 它还能区分造成输出参数离散的主次因素^[1].

MOSFET 的 L 下降到某一数值后, V_T 不再仅是 N_A 、 t_{ox} 及 Q_{ss} 的函数, 和 L 、沟道宽度 w 及源漏结深 r_j 也有关. 本文用 Monte Carlo 法研究上述特性.

输出参数的敏感度是某一输入变量的波动对其离散的作用. 本工作研究 L 逐渐变短时, V_T 对各变量敏感度的变化.

二、模拟方法

MOSFET 的几何尺寸缩小后, V_T 的表达式为^[2]:

$$V_T = \phi_{ms} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} + 2\phi_F + \frac{Q_B}{C_{ox}} \\ \times \left\{ 1 - \left[\left(1 + \frac{2w_D}{r_j} \right)^{1/2} - 1 \right] \left[\frac{r_j}{L} + \frac{2w_x r_j}{WL} \right] + \frac{2w_x}{W} \right\}. \quad (1)$$

式中 ϕ_{ms} 是金属半导体功函数差. $C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$, 是单位面积氧化膜电容. ϕ_F 是衬底的费米势. $Q_B = (4q\epsilon_s N_A \phi_F)^{1/2}$. w_D 是耗尽层宽度, 当衬底偏置电压为零, $w_D = w_s$. 式(1)中, V_T 是六个变量的函数: t_{ox} 、 Q_{ss} 、 N_A 、 L 、 W 及 r_j .

参照实际情况, 选定六个输入变量的平均值及均方根差. 实际变量在其平均值附近的涨落是正态分布的. 产生六组标准正态分布的随机数, 然后转换成各变量的正态分布. 代入(1)算出 V_T . 本工作每组有 1000 个随机数. 重复计算 1000 次, 得到 1000 个 V_T .

V_T 的敏感度 S 定义为⁽³⁾:

$$S = \left(\frac{\text{单一输入变量变化时输出分布宽度} \times 95\%}{\text{每一输入变量都变化时输出分布宽度} \times 95\%} \right)^2 \times 100\% \quad (2)$$

(2)式中的分子是某一输入变量变化,其它各量固定在平均值上时,输出 V_T 的分布宽度。分母是全部输入变量都变化时输出 V_T 的分布宽度。二者相除代表某变量变化对 V_T 分布的相对贡献。用百分数表示。

选取不同的 L 平均值,重复计算(2)式,就得 V_T 对各变量的敏感度 S 随 L 的变化。

三、结果与分析

六个输入变量,参照实际情况取平均值及标准偏差。 $t_{ox}(\text{\AA}):500, 20$; $N_A(10^{16}\text{cm}^{-3}):6, 1$; $Q_{it}(10^{11}\text{cm}^{-3}):2.5, 0.2$; $r_j(\mu\text{m}):0.5, 0.03$; $W(\mu\text{m}):10, 0.3$; $L(\mu\text{m}):0.7-4, 0.15$ 。

表1 不同 L 时 V_T 对各变量的敏感度 $S(\times 100\%)$

S \ $L(\mu\text{m})$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.25	1.5	2.0	3.0	4.0
$S(N_A)$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$S(t_{ox})$	0.10	0.19	0.27	0.33	0.42	0.46	0.49	0.52	0.53
$S(Q_{it})$	0.13	0.22	0.31	0.36	0.43	0.44	0.44	0.44	0.44
$S(r_j)$	~0	~0	~0	~0	~0	~0	~0	~0	~0
$S(W)$	~0	~0	~0	~0	~0	~0	~0	~0	~0
$S(L)$	0.76	0.57	0.39	0.27	0.11	0.05	0.01	~0	~0

表1是 L 不同时, V_T 对各变量的敏感度 S 。随着 L 的变化,各变量的敏感度是变化

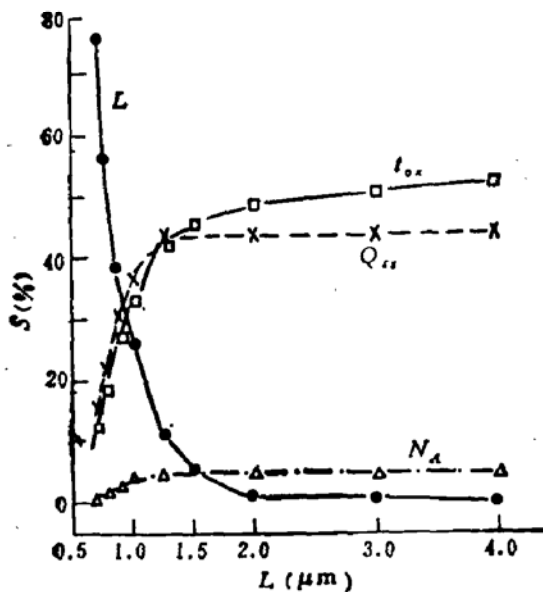


图1 V_T 对各变量的敏感度 S 随 L 的变化

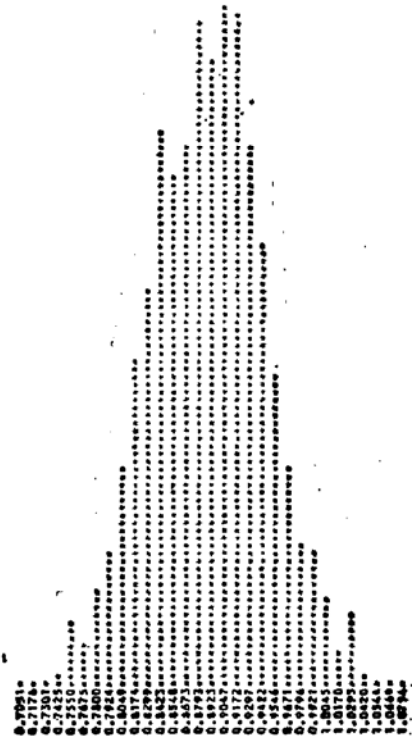


图2 V_T 分布图

的。图 1 是按表 1 的数据绘制的曲线。横坐标是 L , 纵坐标是 S 。每根曲线代表 V_T 对该变量的 S 随 L 的变化。 V_T 对 γ_j 、 W 的 S 近似为零, 图 1 中未画出这二根曲线。

图 2 是 $L = 1.25 \mu\text{m}$, 六个变量同时变化时, 1000 个 V_T 的分布图。图中 $(V_T)_{\min} = 0.7051$ 伏, $(V_T)_{\max} = 1.0794$ 伏。实际平均值为 0.8833 伏。此图表明 V_T 分布接近正态分布。算得标准偏差为 0.0569 伏。

上述结果说明:

(1) 短沟道效应的判据式为^[4]:

$$L_{\min} = 0.4[\gamma_j t_{ox}(W_s + W_d)^2]^{1/3}. \quad (3)$$

式中 W_s 和 W_d 分别为源和漏的势垒宽度。把本文所用数据代入得 $L_{\min} \approx 1.7 \mu\text{m}$ 。

由 V_T 对 L 的敏感度[表 1], $L = 2.0 \mu\text{m}$ 左右开始出现短沟道效应。与判据式 (3) 的结果接近。

(2) 当 $L > 3 \mu\text{m}$, V_T 对 L 的 S 值近似为零。对 t_{ox} 、 Q_{ss} 的值较高。 L 下降到 $1.5 \mu\text{m}$ 后, V_T 对 t_{ox} 、 Q_{ss} 及 N_A 的 S 值显著下降, 对 L 的 S 值急剧上升。说明短沟道效应在敏感度 S 上反映出来。

(3) V_T 的分布是正态分布。所以用 Monte Carlo 法进行器件工艺模拟可以预测器件的成品率。

参 考 文 献

- [1] A. R. Alvarez and L. A. Akers, *Electronics Letters*, 18, 42 (1982).
- [2] L. A. Akers, *Solid-State Electronics*, 24, 621 (1981).
- [3] C. H. Stepper and P. B. Hwang, *Semiconductor silicon*, pp. 955—967 (1977).
- [4] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, pp. 469—473, 2nd, (1981).

Monte Carlo Study of Sensitivity of V_T in Short Channel MOSFET

Zhao Honglin

(Department of Electric Engineering, Tianjin University)

Abstract

Monte Carlo method has been used to study the sensitivity of V_T to SiO_2 thickness t_{ox} , charge density of surface state Q_{ss} , substrate impurity density N_A , channel length L and etc., while transistor's geometry and processes parameters are varying practically. The dispersion of V_T is also studied. Results show that when L enters short channel region, the sensitivity of V_T to L increases rapidly while to t_{ox} , Q_{ss} and N_A it decreases. The distribution of V_T is normal.