

## 短沟 DMOS 阈值电压模型

李泽宏 张波 李肇基

(电子科技大学微电子研究所 成都 610054)

**摘要:** 该文提出了短沟 DMOS 阈值电压模型。基于沟道区耗尽电荷的二维分布, 计算沟道区中耗尽电荷总量, 由此给出短沟 DMOS 阈值电压模型的计算式。该模型的解析解与二维仿真器 MEDICI 的数值解吻合。分析表明, DMOS 沟道长度小于  $0.80\mu\text{m}$ , 就应考虑短沟效应。

**关键词:** DMOS, 阈值电压, 短沟效应

**中图分类号:** TN303, TN386.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)02-0322-04

## A Threshold Voltage Model of the Short Channel DMOS

Li Ze-hong Zhang Bo Li Zhao-ji

(CAD Institute, UEST of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract** A threshold voltage model of the short channel DMOS (Double-Diffusion Metal-Oxide-Semiconductor) is proposed. Based on the 2-D distribution of channel depletion charge, the channel depletion charge is calculated and the mathematical expression of the threshold voltage model of the short channel DMOS is obtained. The results of the model agree well with those of the 2-D simulator MEDICI. The analysis shows that the effect of short channel should be considered when the channel length is less than  $0.80\mu\text{m}$ .

**Key words** DMOS, Threshold voltage, Short channel effect

### 1 引言

高压、功率 MOS 器件大多采用 DMOS 沟道结构。DMOS 基本都为非均匀掺杂沟道。基于 DMOS 沟道杂质的二维非均匀分布, 作者对 DMOS 的阈值电压进行深入分析, 提出了基于二维相互作用势<sup>[1]</sup>的二维阈值电压模型<sup>[2]</sup>。该模型的提出解决了沿用的 DMOS 阈值电压模型<sup>[3,4]</sup>解析值比实验结果大 100%以上的问题。

电源集成电路历经 20 多年巨变, 片上集成水平和功率容量不断提高, 供应厂家 (Motorola, STMicroelectronics, NS 等) 开始采用  $0.35\mu\text{m}$  和更细微的 CMOS 工艺, 着手研制具有片上高压、功率 MOS 的系统级电源集成电路<sup>[5]</sup>。随 MOS 工艺进入亚微米或深亚微米, 高压、功率 MOS 尺寸缩短所导致的短沟效应对器件的参数影响很大<sup>[6,7]</sup>。迄今国内外尚未见 DMOS 短沟效应影响阈值电压的报道。

在文献[1,2]的基础上, 借助电荷共享理论, 首先提出短沟 DMOS 二维阈值电压模型。解泊松方程, 求得短沟 DMOS 的源结耗尽层宽度、准漏结  $D'$  (漂移区和沟道区形成的结)

耗尽层宽度和沟道耗尽层宽度。计算沟道区耗尽电荷总量, 得到短沟 DMOS 阈值电压计算式。通过数值仿真器 MEDICI<sup>[8]</sup> (Two-Dimensional Device Simulation Program) 进行分析。文中最后给出结论。

### 2 模型

DMOS 结构如图 1 所示。沟道区杂质分布由沟道和源区形成时杂质扩散的高斯分布和余误差分布的补偿来决定。若沟道区表面的扩散浓度  $N_g$  为  $2.0 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ , 结深  $X_{jg}$  为  $1.50\mu\text{m}$ ; 源区表面的扩散浓度  $N_s$  为  $1.0 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ , 结深  $X_{js}$  为  $0.20\mu\text{m}$ 。计算得沟道下杂质  $N_a(x, y)$  的二维分布如图 1 所示。其中  $y=0.00\mu\text{m}$  表示 Si/SiO<sub>2</sub> 界面。从图中可知沟道区最高杂质浓度点在体内, 浓度为  $8.0 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ ; 沟道表面最大杂质浓度为  $6.5 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ , 距坐标轴原点  $0.28\mu\text{m}$  左右。

基于文献[1,2]的分析, 借助电荷共享理论, 给出短沟 DMOS 的阈值电压二维模型:

$$V_{th} = V_{FB} + \bar{\Phi}_S + Q_{depl} / C_{eff} \quad (1)$$

2003-09-24 收到, 2004-05-28 改回

国家自然科学基金(60076030、60276040)和重点实验室基金(2000JS09.7)资助的课题

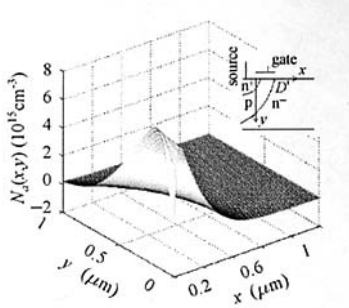


图1 DMOS 沟道杂质的二维分布及 DMOS 结构

式中  $\bar{\phi}_S$  为平均表面势,  $Q_{depl}$  为沟道耗尽电荷总量,  $C_{eff}$  为有效氧化层电容,  $V_{FB}$  为平带电压。

基于沟道区二维杂质分布, 求解源结和准漏结  $D'$  的冶金结位置和耗尽层宽度以及沟道耗尽层宽度。定义  $W_I(x)$  沟道耗尽层宽度,  $J_S(x,y)$ 、 $J_{D'}(x,y)$  为源结、准漏结冶金结位置,  $W_S(x,y)$ 、 $W_{D'}(x,y)$  为沟道边源结、准漏结耗尽区宽度,  $W_{D',V_D'}(x,y)$  为考虑准漏端电压  $V_{D'}$  的沟道边准漏结耗尽区宽度。由此短沟 DMOS 沟道下耗尽电荷总量为

$$Q_{depl} = \sum_0^{W_I(x)} \sum_{[J_S(x,y)+W_S(x,y)]}^{[J_{D'}(x,y)-W_{D',V_D'}(x,y)]} Q(x,y) \quad (2)$$

求解泊松方程得到

$$W_I(x) = \sqrt{2L_b \sqrt{\beta\Phi(x,0) - M_I(x) - 1}} \quad (3)$$

式中  $L_b$  为本征德拜长度;  $\beta = q/(kT)$ ;  $\Phi(x,0) = (2kT/q) \cdot \ln(N_a(x,0)/n_i)$  为表面势,  $n_i$  为本征载流子浓度;  $M_I(x) = [N_{total}(x)X_c(x)/(N_b L_b^2)]$  为非均匀掺杂沟道一阶参量; 且

$$X_c(x) = \int_0^{R_j(x)} y(N_{total}(x)/N_b - 1)dy / \int_0^{R_j(x)} (N_{total}(x)/N_b - 1)dy$$

$R_j(x)$  为纵向非均匀深度;  $N_{total}(x) = \int_0^{R_j(x)} (N_a(x,y) - N_b)dy$  为截面非均匀杂质密度;  $W_S(x,y)$ ,  $W_{D'}(x,y)$  和  $W_{D',V_D'}(x,y)$  可采用缓变沟道近似计算<sup>[2]</sup>, 考虑准漏端电压  $V_{D'}$  得到

$$W_{D',V_D'}(x,y) = \left[ 6\epsilon_{Si}(V_{bi} + V_{D'}) / (qa_D(x,y)) \right]^{1/3} \quad (4)$$

式中  $a$  为杂质浓度梯度, 为  $x$  和  $y$  的函数,  $V_{bi}$  为内建势,  $q$  为电子电荷。

短沟 DMOS 边缘效应对氧化层电容的影响如图2所示。如图中所示电力线  $F_1$  和  $F_2$  之间为背栅电容  $C_1$ , 电力线  $F_2$  和  $F_3$  之间为侧壁栅电容  $C_2$ , 电力线  $F_3$  和  $F_4$  之间为正面栅电容  $C_3$ 。有效氧化层电容为氧化层单位面积电容  $C_{ox}$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  的总和。

借助角变可得到

$$C_{eff} = C_{ox} L [1 + \gamma(1+L)/(L/t_{ox})] \quad (5)$$

式中  $L = [J_{D'}(0) - W_{D',V_D'}(0)] - [J_S(0) + W_S(0)]$  为有效栅长度,

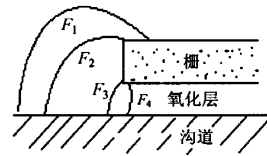


图2 短沟 DMOS 边缘效应影响氧化层电容示意图

边缘修正因子  $\gamma = (2/\pi)[2 - \ln 4 + \ln a + \ln(u/a)]$ 。其中  $a = 2K(K^2 - 1)^{0.5} + 2K^2 - 1$ ,  $K = 1 + t_G/t_{ox}$ ,  $t_G$  为栅的厚度,  $t_{ox}$  为氧化层厚度。  $u$  通过式(6), 式(7)计算获得。

$$R = [(u-1)/(u-a)]^{0.5} \quad (6)$$

$$\frac{\pi L}{2t_{ox}} = \frac{R(a-1)}{a^{0.5}(R^2-1)} + \ln\left(\frac{a^{0.5}R+1}{a^{0.5}R-1}\right) - \frac{a+1}{2a^{0.5}} \ln\left(\frac{R+1}{R-1}\right) \quad (7)$$

由上述, 得到短沟 DMOS 阈值电压计算式:

$$V_{th} = V_{FB} + \bar{\phi}_S + \frac{\int_0^{W_I(x)} \int_{[J_S(x,y)+W_S(x,y)]}^{[J_{D'}(x,y)-W_{D',V_D'}(x,y)]} q[N_a(x,y) - N_b] dx dy}{(1+\gamma \frac{1+L}{L/t_{ox}})[J_{D'}(0) - W_{D',V_D'}(0)] - [J_S(0) + W_S(0)]C_{ox}} \quad (8)$$

### 3 结果与讨论

DMOS 结构参数: p 型衬底, 电阻率为  $90\Omega\text{cm}$ ; n 型外延, 浓度  $N_b$  为  $1.0 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ , 厚度为  $25\mu\text{m}$ ; 栅氧厚度为  $0.1\mu\text{m}$ ; 多晶栅厚度为  $1.0\mu\text{m}$ ; 源区表面扩散浓度  $N_S$  为  $1.0 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ , 结深为  $0.20\mu\text{m}$ 。

$$J_S(x,y), J_{D'}(x,y) \text{ 的解式为: } J_{S,D'}(x,y) \Big|_{[N_a(x,y)-N_b]_x=0} = 0$$

沟道表面扩散浓度为  $2.0 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ , 结深为  $1.50\mu\text{m}$ , 通过模拟和计算得到源结和准漏结的冶金结位置如图3所示。从图中可知, 冶金结位置可用椭圆方程表述:  $x^2/r_1^2 + y^2/r_2^2 = 1$ , 源结和准漏结的  $r_1, r_2$  取值各不同。

沟道结深为  $1.50\mu\text{m}$ , 不同沟道表面扩散浓度下, 沟道耗尽层宽度结构和  $W_I(x)$  解析值如图4所示。从图中可知  $W_I(x)$  在  $0.50 - 0.68\mu\text{m}$  之间变化。沟道表面扩散浓度为  $1.0 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ , 在  $x=0.3\mu\text{m}$  时, 沟道耗尽层宽度为  $0.63\mu\text{m}$ ; 沟道表面扩散浓度为  $4.0 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ , 在  $x=0.3\mu\text{m}$  时, 沟道耗尽层宽度为  $0.66\mu\text{m}$ 。随沟道表面扩散浓度的增加, 沟道

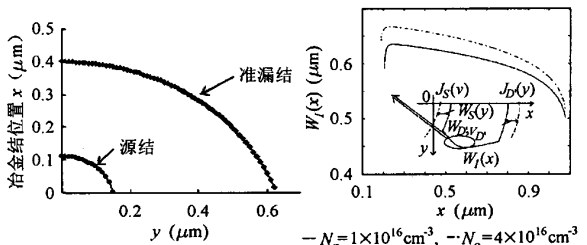


图3 源结和准漏结的冶金结位置 图4 沟道区耗尽层宽度的变化

耗尽层宽度增大。在不同的沟道表面扩散浓度下沟道耗尽层宽度的变化都非单调递增或递减。

固定源区表面扩散浓度和源区结深,影响 DMOS 沟道长度的主要因素是沟道表面扩散浓度和沟道结深。在源区表面扩散浓度为  $1.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ , 结深为  $0.20 \mu\text{m}$  时, 改变沟道结深得到本文模型、文献[2]模型解析解和 MEDICI 数值解与沟道长度的关系如图 5 所示。改变沟道表面扩散浓度得到本文模型、文献[2]模型解析解和数值解与沟道长度的关系如图 6 所示。

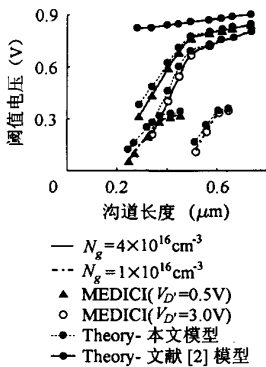


图 5 结深变化, 阈值电压与沟道长度的关系

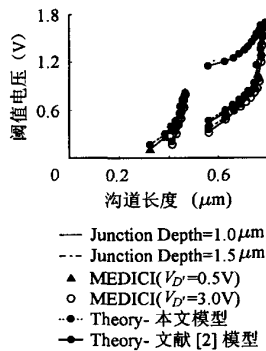


图 6 扩散浓度变化, 阈值电压与沟道长度的关系

图 5 中, 在  $N_g$  为  $4.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , 有效沟道长度为  $0.28 \mu\text{m}$  时, MEDICI 模拟值为  $0.31 \text{V}$  ( $V_{D'} = 0.5 \text{V}$ ), 本文模型解析值为  $0.38 \text{V}$  ( $V_{D'} = 0.5 \text{V}$ ), 文献[2]解析值为  $0.83 \text{V}$ 。图 6 中, 在  $X_{jg}$  为  $1.5 \mu\text{m}$ , 有效沟道长度为  $0.56 \mu\text{m}$  时, MEDICI 模型值为  $0.43 \text{V}$  ( $V_{D'} = 1.0 \text{V}$ ),  $0.32 \text{V}$  ( $V_{D'} = 3.0 \text{V}$ ), 本文模型解析值为  $0.46 \text{V}$  ( $V_{D'} = 1.0 \text{V}$ ),  $0.36 \text{V}$  ( $V_{D'} = 3.0 \text{V}$ ), 文献[2]解析值为  $1.15 \text{V}$ 。本文短沟阈值电压模型解析解和数值解吻合。文献[2]未考虑短沟效应模型解析解和数值解相差大。由于 DMOS 的沟道杂质非均匀分布, 致使场在沟道中分布也是非均匀的<sup>[1]</sup>。在施加栅压的过程中, 反型层内的电荷与电荷之间、耗尽层电荷与电荷之间以及反型层内的电荷与耗尽层电荷之间多级相互作用对阈值电压的影响非常大。短沟情况下, 准漏端电压对沟道边准漏结耗尽层宽度影响很大, 直接影响阈值电压。本文模型的准确在于该模型从系统的角度, 全面考虑了耗尽层电荷的分布及场的相互作用和源结、准漏结耗尽层宽度及准漏端电压等对阈值电压影响。文献[2]中的模型并没有考虑短沟情况下准漏端所加电压对沟道耗尽层电荷的影响。

上述分析中, 在有效沟道长度较小时, 文献[2]模型解析值与模拟值差别大。从图 5, 图 6 中可知, 在  $N_g$  为  $4.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , 有效沟道长度为  $0.74 \mu\text{m}$  时, MEDICI 模拟值为  $0.84 \text{V}$  ( $V_{D'} = 0.5 \text{V}$ ),  $0.80 \text{V}$  ( $V_{D'} = 3.0 \text{V}$ ), 文献[2]解析值为  $0.90 \text{V}$ 。

在  $X_{jg}$  为  $1.5 \mu\text{m}$ , 有效沟道长度为  $0.79 \mu\text{m}$  时, MEDICI 模拟值为  $1.62 \text{V}$  ( $V_{D'} = 1.0 \text{V}$ ),  $1.59 \text{V}$  ( $V_{D'} = 3.0 \text{V}$ ), 文献[2]解析值为  $1.73 \text{V}$ 。可见在有效沟道长度达到  $0.80 \mu\text{m}$  时, MEDICI 模拟值与文献[2]的解析值差值比较小。MOS 短沟效应的最小沟道长度的经验公式为:  $L_{\text{eff}}(0) = 0.4[X_{jg}'\alpha_x(W_S(0) + W_{D'}(0))]$ 。在准漏端电压为  $3.0 \text{V}$ , 计算得到  $L_{\text{eff}}(0)$  约为  $0.80 \mu\text{m}$ 。分析可知, 在 DMOS 的有效沟道长度小于  $0.80 \mu\text{m}$  时, 就应该考虑短沟效应对阈值电压的影响。

图 5 中, 在  $N_g$  为  $4.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , 有效沟道长度为  $0.34 \mu\text{m}$  时,  $V_{D'}$  从  $3.0 \text{V}$  变化到  $0.5 \text{V}$ , 阈值电压变化为  $0.22 \text{V}$ 。图 6 中, 在  $X_{jg}$  为  $1.0 \mu\text{m}$ , 有效沟道长度为  $0.43 \mu\text{m}$  时,  $V_{D'}$  从  $3.0 \text{V}$  变化到  $1.0 \text{V}$ , 阈值电压变化为  $0.15 \text{V}$ 。可知在较小有效沟道长度下, 准漏端电压对阈值电压的影响非常明显。随着有效沟道长度的增加, 如图 5, 图 6 中  $L_{\text{eff}}$  分别为  $0.74 \mu\text{m}$ ,  $0.79 \mu\text{m}$ , 不同准漏端电压对阈值电压影响很小。

从图 5 可知,  $N_g = 4.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ,  $V_{D'} = 0.5 \text{V}$ ,  $L_{\text{eff}}$  从  $0.34 \mu\text{m}$  到  $0.74 \mu\text{m}$ , 阈值电压变化为  $0.41 \text{V}$ ,  $\delta = \Delta V_{\text{th}} / \Delta L_{\text{eff}} = 1.025 (\text{V} / \mu\text{m})$ 。图 6 中,  $X_{jg}$  为  $1.0 \mu\text{m}$ ,  $V_{D'} = 1.0 \text{V}$ ,  $L_{\text{eff}}$  从  $0.46 \mu\text{m}$  到  $0.43 \mu\text{m}$ , 阈值电压变化为  $0.23 \text{V}$ ,  $\delta = \Delta V_{\text{th}} / \Delta L_{\text{eff}} = 7.667 (\text{V} / \mu\text{m})$ ;  $X_{jg}$  为  $1.5 \mu\text{m}$ ,  $V_{D'} = 1.0 \text{V}$ ,  $L_{\text{eff}}$  从  $0.56 \mu\text{m}$  到  $0.79 \mu\text{m}$ , 阈值电压变化为  $1.19 \text{V}$ ,  $\delta = \Delta V_{\text{th}} / \Delta L_{\text{eff}} = 5.174 (\text{V} / \mu\text{m})$ 。可知改变沟道表面扩散浓度与改变注入结深得到相同沟道长度变化, 前者的阈值电压变化比后者大。

从图 5 可知, 随沟道表面扩散浓度增大, 相同沟道长度下, 阈值电压值增大。不同扩散浓度下, 在结深增大到一定值后, 随沟道长度的增加, 阈值电压的增加较小。图 6 中, 在一定的结深情况下, 随沟道长度增加, 阈值电压的增加非常快, 近似为一指数关系。

## 4 结论

本文首先提出了短沟 DMOS 阈值电压模型。在文献[1, 2]的基础上, 基于沟道区耗尽电荷的二维分布, 求解源结和准漏结  $D'$  的冶金结位置和耗尽层宽度以及沟道耗尽层宽度。给出短沟 DMOS 阈值电压模型的数学表示式。该模型的解析解与二维仿真器 MEDICI 的数值解吻合。文献[2]中未考虑短沟效应的阈值电压模型与 MEDICI 模拟值差别大。分析表明, DMOS 的有效沟道长度小于  $0.80 \mu\text{m}$ , 就应该考虑短沟效应; 随着有效沟道长度的增加, 准漏端电压对阈值电压的影响越来越小; 改变沟道表面扩散浓度与改变注入结深得到相同沟道长度变化, 前者的阈值电压变化比后者大。

为便于分析比较, 以上所讨论的数值列于表 1 中。

表 1 不同条件、不同沟道长度下 MEDICI、本文模型和文献[2]所得阈值电压值(V)

$V_D$ (V)	沟道结深变化									沟道表面扩散浓度变化									
	MEDICI				本文模型				文献[2]	MEDICI				本文模型				文献[2]	
	$1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$		$4.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$		$1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$		$4.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$			$1.0 \mu\text{m}$		$1.5 \mu\text{m}$		$1.0 \mu\text{m}$		$1.5 \mu\text{m}$			
	0.5	3.0	0.5	3.0	0.5	3.0	0.5	3.0		1.0	3.0	1.0	3.0	1.0	3.0	1.0	3.0		
0.28			0.31					0.38		0.83									
0.34			0.43	0.21				0.48	0.28	0.83									
0.43											0.46	0.31			0.48	0.34			
0.46											0.79	0.72			0.80	0.74			
0.56													0.43	0.32			0.46	0.36	1.15
0.74			0.84	0.80				0.85	0.81	0.90									
0.79													1.62	1.59			1.64	1.62	1.73

参 考 文 献

[1] 李泽宏, 李肇基, 张波等. 非均匀沟道 MOS 辐照正空间电荷迁移率模型. 物理学报, 2004, 53(2): 561 - 565.

[2] 李泽宏, 张波, 李肇基等. DMOS 阈值电压二维模型. 半导体学报, 2004, 25(6): 715 - 719.

[3] Kasley K L, Oleszek G M, Zigadlo J P. A model for the lateral junction contour of double-diffused Gaussian profiles. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1984, 31(7): 1341 - 1347.

[4] Baliga B J. *Power Semiconductor Devices*. Boston: PWS Publishing Co., 1996: 265 - 278.

[5] 江月明. 超级灵巧电源技术进入纳米领域. 中国集成电路, 2003, 3(6): 56 - 59.

[6] Mancesha, Subhasis Haldar, Manoj K. Khanna. Analytical theory of two-dimensional charge sheet model for short channel MOSFETs under non-linear charge control. *Solid State Electronics*, 1995, 38(11): 197 - 185.

[7] Chang-Hoon Choi, Chidambaram P R, Khamankar R, Machala C F, et al.. Dopant profile and gate geometric effects on polysilicon gate depletion in scaled MOS, *IEEE Trans. on Electron Devices*, 2002, 49(7): 1227 - 1231.

[8] AVANT. *Medici 4.1 Users Manual*, 1994.

李泽宏: 男 1970 年生, 博士生, 研究方向: 半导体器件机理、半导体器件辐照机理及抗辐照技术.