

隐埋层中二维效应对全耗尽 SOI 非对称 HALO 结构 阈值电压的影响

许 剑¹ 丁 磊¹ 韩郑生² 钟传杰^{1,†}

(1 江南大学信息工程学院, 无锡 214000)

(2 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 在非对称 HALO 结构的全耗尽 SOI 二维阈值电压解析模型的基础上, 对阈值电压受隐埋层中二维效应的影响进行了讨论. 通过与一维模型比较, 说明在深亚微米 SOI MOSFET 器件中隐埋层的二维效应会导致器件提前出现短沟道效应. 新模型结果与二维数值模拟软件 MEDICI 吻合较好.

关键词: 阈值电压; 二维效应; 全耗尽 SOI; HALO 结构

EEACC: 2560R; 2560B

中图分类号: TN303

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)03-0559-04

1 引言

随着全耗尽 SOI 技术的发展, 特征尺寸得到进一步的减小^[1], 器件的短沟道效应(SCE)、漏感应势垒降低效应(DIBL)和低驱动电流现象越来越严重^[2]. 非对称 HALO 掺杂工艺即在 SOI 层源端附近引入高掺杂区域, 可以有效抑制 SCE, DIBL 效应, 提高器件特性^[3]. 由于正栅和背栅之间的耦合作用, 非对称 HALO 结构的全耗尽 SOI 阈值电压模型的建立更加复杂. 目前已有报道的模型^[4,5]只考虑了 SOI 层中电势的二维效应, 却忽略了隐埋氧化层中的二维效应, 没能完全反映 SCE 对阈值电压的影响. Joachim 等人^[6]指出短沟道器件隐埋氧化层的二维效应不能被忽略. 鉴于此, 在考虑隐埋层二维效应并对隐埋氧化层纵向电势作抛物线近似的基础上, 提出了 SOI 阈值电压的新模型^[7], 通过联立 SOI 层与隐埋氧化层中的二维泊松方程, 求出表面势分布, 得到 SOI 阈值电压的解析表达式. 本文将所建模型与只考虑 SOI 层二维效应的模型进行对比, 研究隐埋层二维效应对阈值电压的影响, 新模型的解析结果与二维 MEDICI 仿真结果吻合得较好.

2 结构与模型

t_{ox} 为栅氧层厚度

t_{si} 为 SOI 层厚度

t_{oxb} 为隐埋氧化层厚度

q 为电子电荷

ϵ_{si} 为硅的电介质常数

ϵ_{ox} 为二氧化硅的电介质常数

r 为硅与二氧化硅的电介质常数之比 $r = \epsilon_{si} / \epsilon_{ox}$

$\Phi_{1j}(x, y)$ 为沟道中电势分布

$\Phi_{2j}(x, y)$ 为隐埋氧化层中的二维电势

Φ_{ij} 为正界面处电势分布

Φ_{bj} 为背界面处的电势分布

V_b 为源区与沟道的内建势场

Φ_{fi} 为费米势

λ_t 和 λ_b 为正栅与背栅的特征长度

V_{FG} 和 V_{sub} 分别为正栅和背栅压

V_{FBj} 和 V_{subFBj} 分别为正栅和背栅的平带电压

V'_{FGj} 和 V'_{subj} 分别为正栅和背栅有效电压即:

$V'_{FGj} = V_{FG} - V_{FBj}$, $V'_{subj} = V_{sub} - V_{subFBj}$

V_{ds} 为漏至源端施加的电压偏置

图 1 给出了非对称 HALO 结构 SOI MOSFET 器件结构(以 nMOSFET 为例)示意图. SOI 在靠近源端处引入 HALO 区并定义为 I 区, 长度设为 L_{c1} , 掺杂浓度设为 N_{c1} , 沟道总长度设为 L_{c2} , 并定义 $L_{c1} < x < L_{c2}$ 的 SOI 区域为 II 区, 掺杂浓度为 N_{c2} , 因为 SOI 层很薄, 所以认为 I 区, II 区是均匀掺杂.

定义 x 轴平行于沟道, y 轴垂直于沟道. 在硅膜为全耗尽的条件下, $\Phi_{1j}(x, y)$ 满足二维泊松方程为:

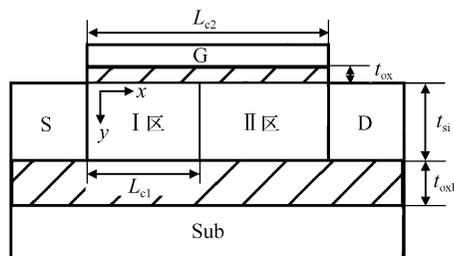


图 1 非均匀 HALO 结构全耗尽 SOI MOSFET 器件结构示意图
Fig.1 Device structure of fully depleted SOI MOSFET with asymmetric HALO

† 通信作者. Email: zhongchuanjie@jiangnan.edu.cn

2007-10-08 收到, 2007-11-01 定稿

$$\frac{\partial^2 \Phi_{1j}(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{1j}(x, y)}{\partial y^2} = \frac{qN_{cj}}{\epsilon_{si}} \quad (1)$$

$0 < x < L_{c1} \quad j = 1, L_{c1} < x < L_{c2} \quad j = 2$
 $\Phi_{2j}(x, y)$ 满足拉普拉斯方程为:

$$\frac{\partial^2 \Phi_{2j}(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{2j}(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

$0 < x < L_{c1} \quad j = 1, L_{c1} < x < L_{c2} \quad j = 2$
 $\Phi_{1j}(x, y)$ 和 $\Phi_{2j}(x, y)$ 的纵向电势分布采用二次方程近似^[8]

$$\Phi_{1j}(x, y) = \Phi_{1j} + C_{11}(x)y + C_{12}(x)y^2 \quad (3)$$

$$0 < y < t_{si}, \quad j = 1, 2$$

$$\Phi_{2j}(x, y) = C_{20}(x) + C_{21}(x)y + C_{22}(x)y^2 \quad (4)$$

$$t_{si} < y < t_{si} + t_{oxb}, \quad j = 1, 2$$

详细推导步骤请参阅文献[7], 最终的阈值电压为:

$$V_{th} = \text{Min}[V_{th}(\Phi_{t1}), V_{th}(\Phi_{b1})] \quad (5)$$

其中 $V_{th}(\Phi_{b1})$ 为背栅阈值电压; $V_{th}(\Phi_{t1})$ 为正栅阈值电压, 背栅阈值电压表示为:

$$V_{th}(\Phi_{b1}) = \frac{-B_b + \sqrt{B_b^2 - 4B_a B_c}}{2B_a} \quad (6)$$

其中参数 B_a, B_b, B_c 分别为:

$$B_a = \left[2\cosh\left(\frac{L_{c2}}{\lambda_b}\right) - 2 - \sinh^2\left(\frac{L_{c2}}{\lambda_b}\right) \right] \left(\frac{rt_{oxb}}{t_{si} + rt_{oxb}} \right)^2 \quad (7)$$

$$B_b = \left[V_A(e^{-\frac{L_{c2}}{\lambda_b}} - 1) + V_B(1 - e^{-\frac{L_{c2}}{\lambda_b}}) + 2\sinh^2\left(\frac{L_{c2}}{\lambda_b}\right)(2\Phi_{t1} + P_1) \right] \frac{rt_{oxb}}{t_{si} + rt_{oxb}} \quad (8)$$

$$B_c = V_A V_B - \sinh^2\left(\frac{L_{c2}}{\lambda_b}\right)(2\Phi_{t1} + P_1)^2 \quad (9)$$

(8), (9) 式中参数 V_A, V_B 分别为:

$$V_A = (V_b + P_1)e^{\frac{L_2}{\lambda_b}} - (V_b + V_{ds} + P_2) - (P_1 - P_2)\cosh\left(\frac{L_{c2} - L_{c1}}{\lambda_b}\right) \quad (10)$$

$$V_B = -(V_b + P_1)e^{-\frac{L_{c2}}{\lambda_b}} + (V_b + V_{ds} + P_2) + (P_1 - P_2)\cosh\left(\frac{L_{c2} - L_{c1}}{\lambda_b}\right) \quad (11)$$

其中参数 P_j 和背栅特征长度 λ_b 分别为:

$$P_j = \frac{rt_{oxb} t_{si}^2}{2(t_{si} + rt_{oxb})} \times \frac{qN_{cj}}{\epsilon_{si}} - \frac{t_{si}}{t_{si} + rt_{oxb}} V'_{subj} + \frac{rt_{oxb}}{t_{si} + rt_{oxb}} V_{FBj} \quad (12)$$

$$0 < x < L_{c1} \quad j = 1, \quad L_{c1} < x < L_{c2} \quad j = 2$$

$$\lambda_b^2 = \frac{t_{oxb}[rt_{si}(t_{si} + 2rt_{ox}) + t_{oxb}(t_{si} + rt_{ox})]}{2(t_{si} + rt_{ox} + rt_{oxb})} \quad (13)$$

正栅阈值电压为:

$$V_{th}(\Phi_{t1}) = \frac{-T_b + \sqrt{T_b^2 - 4T_a T_c}}{2T_a} \quad (14)$$

其中参数 T_a, T_b, T_c 分别为:

$$T_a = 2 \left[\cosh\left(\frac{L_{c2}}{\lambda_t}\right) - 1 \right] - \sinh^2\left(\frac{L_{c2}}{\lambda_t}\right) \quad (15)$$

$$T_b = V_c(e^{-\frac{L_{c2}}{\lambda_t}} - 1) + V_D(1 - e^{-\frac{L_{c2}}{\lambda_t}}) +$$

$$2\sinh^2\left(\frac{L_{c2}}{\lambda_t}\right)(2\Phi_{t1} + W_1) \quad (16)$$

$$T_c = V_c V_D - \sinh^2\left(\frac{L_{c2}}{\lambda_t}\right)(2\Phi_{t1} + W_1)^2 \quad (17)$$

(16), (17) 式中参数 V_c, V_D 分别为:

$$V_c = (V_b + W_1)e^{\frac{L_2}{\lambda_t}} - (V_b + V_{ds} + W_2) - (W_1 - W_2)\cosh\left(\frac{L_{c2} - L_{c1}}{\lambda_t}\right) \quad (18)$$

$$V_D = -(V_b + W_1)e^{-\frac{L_{c2}}{\lambda_t}} + (V_b + V_{ds} + W_2) + (W_1 - W_2)\cosh\left(\frac{L_{c2} - L_{c1}}{\lambda_t}\right) \quad (19)$$

其中参数 W_j 和正栅特征长度 λ_t 分别为:

$$W_j = \frac{rt_{ox} t_{si}(t_{si} + 2rt_{oxb})}{2(t_{si} + rt_{oxb})} \times \frac{qN_{Cj}}{\epsilon_{si}} - \frac{rt_{ox}}{(t_{si} + rt_{oxb})} V'_{subj} + V_{FBj} \quad (20)$$

$$0 < x < L_{c1} \quad j = 1, \quad L_{c1} < x < L_{c2} \quad j = 2$$

$$\lambda_t^2 = \frac{rt_{ox} t_{si}(t_{si} + 2rt_{oxb})}{2(t_{si} + rt_{ox} + rt_{oxb})} +$$

$$\frac{rt_{oxb}^3[r^2 t_{si}(t_{si} + 2rt_{ox}) + rt_{oxb}(t_{si} + rt_{ox})]}{2(t_{si} + rt_{ox} + rt_{oxb})[r^2 t_{si}(t_{si} + 2rt_{oxb}) + (rt_{oxb})^2]} \quad (21)$$

当模型只考虑 SOI 层的二维效应而忽略隐埋层二维效应时, 隐埋层纵向电势 $\Phi_{2j}(x, y)$ 则被设为:

$$\Phi_{2j}(x, y) = C_{20}(x) + C_{21}(x)y \quad (22)$$

$$t_{si} < y < t_{si} + t_{oxb}, \quad j = 1, 2$$

根据边界条件^[5]可以推导出阈值电压的解析式为:

$$V_{th} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (23)$$

其中参数 A, B, C 分别为:

$$A = 2 \left[\cosh\left(\frac{L_{c2}}{\lambda}\right) - 1 \right] - \sinh^2\left(\frac{L_{c2}}{\lambda}\right) \quad (24)$$

$$B = V_{b1}(e^{-\frac{L_{c2}}{\lambda}} - 1) + V_{b2}(1 - e^{-\frac{L_{c2}}{\lambda}}) + 2\sinh^2\left(\frac{L_{c2}}{\lambda}\right)(2\Phi_{t1} + U_1) \quad (25)$$

$$C = V_{b1} V_{b2} - \sinh^2\left(\frac{L_{c2}}{\lambda}\right)(2\Phi_{t1} + U_1)^2 \quad (26)$$

(25), (26) 式中参数 V_{b1}, V_{b2} 分别为:

$$V_{b1} = (V_b + U_1)e^{\frac{L_2}{\lambda}} - (V_b + V_{ds} + U_2) - (U_1 - U_2)\cosh\left(\frac{L_{c2} - L_{c1}}{\lambda}\right) \quad (27)$$

$$V_{b2} = -(V_b + U_1)e^{-\frac{L_{c2}}{\lambda}} + (V_b + V_{ds} + U_2) + (U_1 - U_2)\cosh\left(\frac{L_{c2} - L_{c1}}{\lambda}\right) \quad (28)$$

其中参数 U_j 和特征长度 λ 分别为:

$$U_j = \frac{rt_{si} t_{ox} qN_{Cj}}{\epsilon_{ox}} - \frac{t_{ox}}{t_{oxb}} V'_{subj} + V_{FBj} \quad (29)$$

$$0 < x < L_{c1} \quad j = 1, \quad L_{c1} < x < L_{c2} \quad j = 2$$

$$\lambda^2 = \frac{2(rt_{ox} + rt_{oxb} + t_{si})}{t_{si} t_{ox}(rt_{si} + 2r^2 t_{oxb})} \quad (30)$$

为了便于讨论, 将上述只考虑 SOI 层二维效应的模

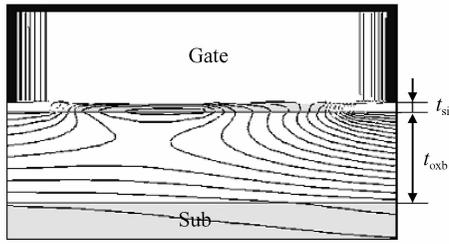


图 2 栅长为 100nm 时 SOI 层与隐埋层中二维电势的 MEDICI 仿真分布图
Fig.2 2D potential distribution in SOI layer and buried oxide layer ($L_{c2} = 100\text{nm}$)

型简称为模型 I，将考虑 SOI 层与隐埋层二维效应的模型简称为模型 II。

3 结果与讨论

模型 I、模型 II 的解析结果由 Matlab 软件完成，仿真结果由二维器件模拟软件 MEDICI 模拟计算得到。非对称 HALO 结构的全耗尽 SOI MOSFET 参数如下： $N_g = 1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ ， $N_{sd} = 1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ ， $N_{cl} = 3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ， $N_{c2} = 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ， $N_{sub} = 6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ， $V_{ds} = 0.5\text{V}$ ， $L_{c1}/L_{c2} = 0.5$ ， $t_{ox} = 1.5\text{nm}$ ， $t_{si} = 10\text{nm}$ ， $t_{oxb} = 100\text{nm}$ 。文中结果如没有特别说明则器件参数均为上述数值。

图 2 给出了栅长为 100nm 时，器件的 SOI 层及隐埋层中的电势分布情况，该图表明，SOI 层及隐埋层中的电势分布呈二维特性。图 3 给出了器件在开启状态时横坐标在 HALO 区中心处隐埋层中的纵向电势分布，表明隐埋层中的纵向电势呈现抛物线特性，因此必须考虑隐埋层中电势分布的二维特性。

图 4 给出了在不同隐埋层厚度时，栅长对阈值电压的影响。为了便于讨论，本文把图 4 中短沟道效应引起的阈值电压漂移 ΔV_{th} 达到长沟道阈值电压 ($L_{c2} = 500\text{nm}$)20% 时所对应的栅长定义为 SCE 临界栅长，表示器件 SCE 强弱的考察点，如图 5 所示。MEDICI 仿真结果表明随着 t_{oxb} 减小，SCE 得到了明显的抑制。隐埋

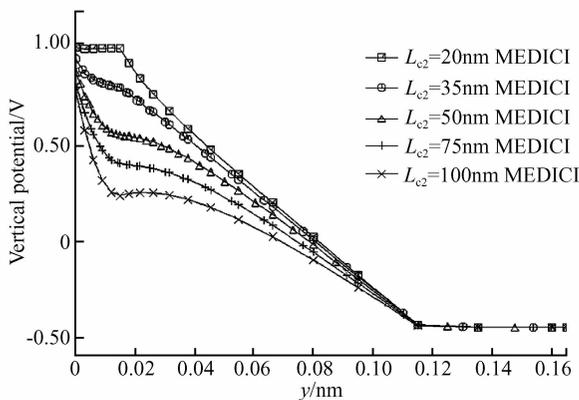


图 3 在不同栅长条件下 HALO 中心位置处纵向电势的 MEDICI 仿真分布图 ($V_g = V_{th}$)
Fig.3 Dependence of vertical potential distribution on various length of gate ($V_g = V_{th}$)

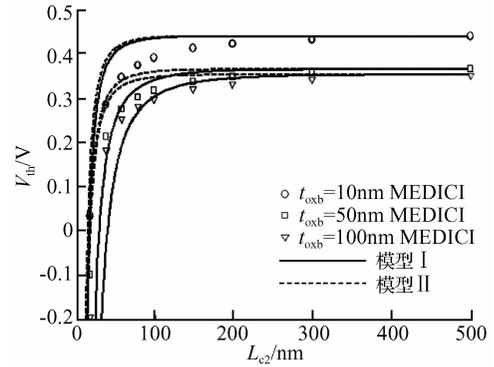


图 4 不同隐埋层厚度时栅长对阈值电压的影响
Fig.4 Dependence of threshold voltage on various thickness of buried oxide layer

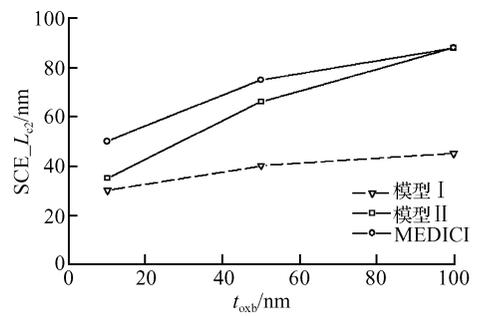


图 5 隐埋层厚度对 SCE 临界栅长的影响
Fig.5 SCE_ L_{c2} as a function of the thickness of buried oxide layer

层厚度的增加，显著加强了隐埋层二维效应的影响，即受隐埋层二维效应影响的共享电荷数量增加，导致栅控能力的减弱，正因为如此，薄隐埋层 SOI 器件成为目前研究的热点。模型 II 的解析结果与 MEDICI 的仿真结果在 t_{oxb} 为 50 至 100nm 范围内较好地吻合，而模型 I 有较大的误差。这表明了在隐埋层厚度大于 50nm 时，模型 II 所用的近似条件是合理的。

图 6 为不同硅膜厚度时，栅长对阈值电压的影响。可以看出硅膜变薄时阈值电压变低，硅膜减薄有利于抑制 SCE。

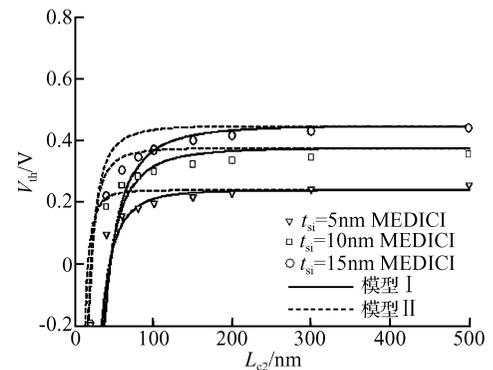


图 6 不同硅膜厚度时栅长对阈值电压的影响
Fig.6 Dependence of threshold voltage on various thickness of SOI layer

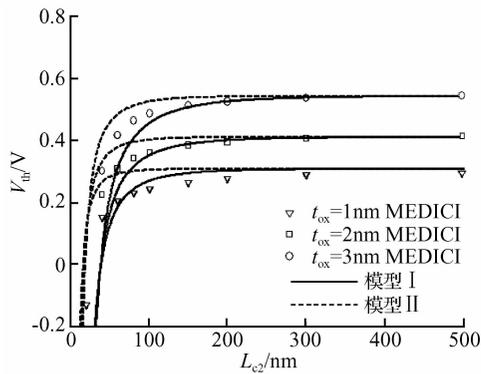


图 7 为不同栅氧厚度时栅长对阈值电压的影响

Fig. 7 Dependence of threshold voltage on various thickness of front oxide layer

图 7 为不同栅氧厚度时,栅长对阈值电压的影响.栅氧越薄阈值电压越低,栅氧减薄到 1.2nm 以内,器件的栅极隧穿电流使关态电流升高,降低了器件亚阈值斜率.

图 4,6 和 7 的结果表明,当沟道长度大于 150nm 时,模型 I 与模型 II 的解析结果均与 MEDICI 的仿真结果吻合;当沟道长度在 150nm 到 50nm 之间时,模型 I 的解析结果与 MEDICI 的仿真结果发生偏离,而模型 II 的解析结果与 MEDICI 的仿真结果吻合较好.当沟道长度小于 50nm 后,模型 II 的解析结果也与 MEDICI 的仿真结果发生了偏离.这说明对隐埋层纵向电势作二次方程的假设有一定适用范围.

4 结论

在非对称 HALO 结构的全耗尽 SOI 二维阈值电压解析模型的基础上,对阈值电压受隐埋层中二维效应的影响进行了讨论,并与 MEDICI 仿真结果进行了比较和分析.对于隐埋层厚度大于 50nm 的器件,当沟

道长度在 50 到 150nm 之间时,模型 I 的解析结果与 MEDICI 的仿真结果发生偏离,而模型 II 的解析结果与 MEDICI 的仿真结果吻合较好.表明在深亚微米 SOI MOSFET 中隐埋层中的二维效应对器件的特性有不可忽略的影响.同时,该模型 II 也为有关的集成电路的设计和模拟提供了一个具有相当精度的阈值电压解析式.但是,当隐埋层厚度小于 50nm 时,或者当沟道长度小于 50nm 时,模型 II 的解析结果也与 MEDICI 的仿真结果发生了偏离,说明对超薄隐埋层的器件或者超深亚微米器件必须对二维效应采用更为合理的近似.

参考文献

- [1] Zhang Xing, Li Yingxue. Advances in fully depleted CMOS/SOI Technology. *Microelectronics*, 1996, 26(3): 160 (in Chinese) [张兴, 李映雪. 全耗尽 CMOS/SOI 技术的研究进展. *微电子学*, 1996, 26(3): 160]
- [2] He Jin, Chan Mansun, Xi Xuemei, et al. Bsim model research and recent progress. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(3): 388
- [3] Codella C F, Ogura S. HALO doping effects in submicron DILDD device design. *IEDM Tech Dig*, 1985: 230
- [4] Li Zunchao, Jiang Yaolin, Wu Jianmin. Dual material gate SOI MOSFET with a single HALO. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(3): 212
- [5] Meer H V, Meyer K D. A 2-D analytical threshold voltage model for fully-depleted SOI MOSFETs with Halos or pockets. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(10): 2292
- [6] Yoachim H O, Yamaguchi Y, Ishikawa K, et al. Simulation and 2D analytical modeling of sub threshold slope in ultra thin-film SOI MOSFETs down to 0.1 μm gate length. *IEEE Trans Electron Devices*, 1993, 40: 1812
- [7] Xu Jian, Ding Lei, Han Zhengsheng, et al. Analytical 2-D threshold voltage model for fully depleted SOI MOSFET with asymmetric Halo. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2007, 30(4): 2166 (in Chinese) [许剑, 丁磊, 韩郑生, 等. 非对称 HALO 结构的全耗尽 SOI 二维阈值电压解析模型. *电子器件*, 2007, 30(4): 2166]
- [8] Suzuki K, Pidun S. Short-channel single-gate SOI MOSFET model. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(5): 1297

Impact of Two-Dimension Effects on Threshold Voltage of Fully Depleted SOI MOSFETs with Asymmetric Halos

Xu Jian¹, Ding Lei¹, Han Zhengsheng², and Zhong Chuanjie^{1,†}

(1 School of Information Technology, Southern Yangtze University, Wuxi 214000, China)

(2 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on an analytical threshold voltage model of fully depleted silicon-on-insulator (SOI) MOSFETs with asymmetric HALO structures, the impact of the two-dimension effects in a buried-oxide layer on threshold voltage is discussed. Compared to the 1D model, two-dimensional effects in the buried-oxide layer of the deep submicron MOSFET device create the short-channel effect more quickly. The predictions of the new model are in good agreement with those of the two-dimension numerical simulator MEDICI.

Key words: threshold voltage; two-dimension effects; fully depleted SOI; HALO structure

EEACC: 2560R; 2560B

Article ID: 0253-4177(2008)03-0559-04

† Corresponding author. Email: hongchuanjie@jiangnan.edu.cn

Received 8 October 2007, revised manuscript received 1 November 2007