

考虑量子效应的短沟道 n-MOSFET 表面电势分布数值模型

李亦清,王子欧,李文石,李有忠,陈 智,毛凌锋

(苏州大学 电子信息学院, 江苏 苏州 215021)

摘 要: 提出了一种考虑量子效应的短沟道沟道表面电势数值模型,并在此基础上分析了源漏偏压对表面势分布的影响. 计算结果和二维量子力学数值模拟结果很好地吻合. 结果表明:源漏偏压会造成线性区的沟道表面势减小,进而导致阈值电压下跌;而在饱和区,源漏偏压的影响更大,会造成表面势明显下降,阈值下跌将会更加严重.

关键词: 量子效应;短沟道效应;表面势

中图分类号: TN386.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)12-0075-04

A Numerical Model of the Distribution of Surface Potential for Short-Channel n-MOSFET with Considering the Quantum Effects

LI Yi-qing, WANG Zi-ou, LI Wen-shi, LI You-zhong, CHEN Zhi, MAO Ling-feng

(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: In this paper, a numerical model for the distribution of channel surface potential has been proposed. The influence of the drain to source bias on the distribution of channel surface potential has been studied. Calculation results agree well with 2-D quantum mechanical numerical simulation. The results demonstrate that the voltage drop between drain and source reduces the channel surface potential in linear region and leads to V_{th} roll-off, whereas the influence will be more serious in saturation region.

Key words: quantum effects; short channel effects; surface potential

1 引言

随着金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)工艺的不断发展和,栅氧化层的厚度越来越薄,衬底的掺杂浓度逐渐提高,量子效应的影响变得越来越重要. 栅氧厚度的下降和沟道掺杂浓度的升高导致了硅-二氧化硅界面电场强度不断变大,这使量子效应导致的能级分裂变得非常严重. 以 NMOS (n-channel MOS) 为例,器件的量子力学描述和经典物理描述有本质区别:一是表面处电子能量的量子化;二是表面电子的空间分布不再由玻尔兹曼等分布函数决定而是由波函数决定^[1].

量子效应一方面导致了载流子能量分裂为一系列的离散子能带,而且最低能级距离导带底上升了一段距离,这段距离随表面电场增大而增大;另一方

面,电子分布的峰值不再位于硅-二氧化硅界面处,而是向硅体内推进了 1~2 nm. 这对器件特性造成了不小的影响. 在纳米时代,量子效应已成为器件建模必须考虑的重要因素之一^[2].

2 模型算法

NMOS 在反型时的能带图如图 1 所示. 本文中研究的器件是(1,0,0)晶向的 NMOS,参考能级为价带顶.

文中所有电压都是以衬底为参考点,如 $V_g = V_{gb}$,衬底和源级相连接地. 坐标轴规定如下: x 坐标垂直于 Si/SiO₂ 表面, y 坐标是沿沟道从源极到漏极的方向.

本文结合 Pregladiny 等^[3]提出的一种解析表面势模型来求取量子修正的沟道表面势. 先给出一个

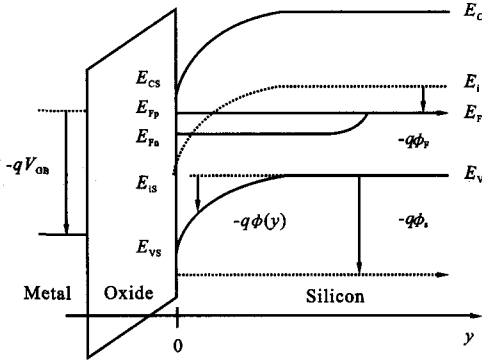


图1 NMOS反型时能带图

解析的波函数表达式^[1-2]:

$$\xi_b(x) = \frac{b^{3/2}}{\sqrt{2}} \cdot x \cdot \exp\left(-\frac{b \cdot x}{2}\right) \quad (1)$$

对参数 b 的量子修正表达式为

$$b(V_g, V_{ch}) = \left[\frac{12m^* q^2}{\epsilon_{Si} \hbar^2} \cdot \frac{n_{all}(V'_g, V_{ch})}{3} \right]^{1/3} \quad (2)$$

式中, ϵ_{Si} 是硅的绝对介电常数, $m^* = 0.98m_0$, m_0 是电子静止质量. 上式中:

$$n_{all}(V'_g, V_{ch}) = \frac{2C_{ox}}{q} (V'_g - V_{T0} - V_{ch}) \quad (3)$$

$$V'_g = \frac{1}{2} [V_g + \sqrt{(V_g - V_{T0} - V_{ch})^2 + 4\epsilon^2} + \sqrt{(V_{T0} + V_{ch})^2 + 4\epsilon^2}] \quad (4)$$

C_{ox} 是栅氧化层电容, V_{T0} 是经典理论下的长沟器件阈值电压, V_{ch} 是沟道电势, 常数 $\epsilon = 0.15$.

由于量子效应造成的等效禁带变宽, 表面势相关函数可以近似表示为

$$\delta\phi_s(V_g, V_{ch}) = \frac{3}{8} \frac{\hbar^2 b}{qm^*} (V_g, V_{ch})^2 \quad (5)$$

在弱反型时的表面势表示为

$$\phi_{swi}(V_g) = (\sqrt{V_g - V_{fb}} + \gamma^2/4 - \gamma/2)^2 \quad (6)$$

$\gamma = \sqrt{2q\epsilon_{Si}N_A/C_{ox}}$ 称为体效应系数.

结合文献[4]的表面势修正表达式可得

$$\phi_s = f + \phi_t \cdot \ln\left\{ \frac{[\phi_{swi} - f - \frac{\phi_{swi} - f}{\sqrt{1 + \left(\frac{\phi_{swi} - f}{4\phi_t}\right)^2}}]}{(\gamma \cdot \sqrt{\phi_t})^2 - \frac{f}{\phi_t} + 1} \right\} \quad (7)$$

$$f(V_g, V_{ch}) = \frac{\phi_B + V_{ch} + \phi_{swi}(V_g)}{2}$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{(\phi_{swi}(V_g) - \phi_B - V_{ch})^2 + 4 \cdot \delta^2} \quad (8)$$

考虑量子效应造成的表面势偏移 $\delta\Phi_s$, 式(8)中的 f 需要修正为 f_{qm} , 其表达式为

$$f_{qm}(V_g, V_{ch}) = \frac{\phi_B + V_{ch} + \delta\phi_s(V_g, V_{ch}) + \phi_{swi}(V_g)}{2}$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{(\phi_{swi}(V_g) - \delta\phi_s(V_g, V_{ch}) - \phi_B - V_{ch})^2 + 4 \cdot \delta^2} \quad (9)$$

综合式(1)~(9), 可解析求得沿 x 方向的表面势. 但是这样求得的表面势只是一个总体平均值, 并不是实际沿沟道方向上的表面势分布, 还必须求出 y 方向上每一点的表面势. 为此采用有限差分法将沟道划分成均匀二维网格. 考虑源漏偏压的影响, 把沟道电势 $V_{ch} = y/L \cdot V_{ds}$ (L 是沟道长度) 代入式(1)~(9) 后计算求得沿沟道每一网格的表面势初始值. 当采用数值求解量子效应带来的影响时, 电子浓度的表达式(式(3)) 应改为如下:

$$n(x) = \sum_{i,j} N_{ij} |\xi_b^2(x)| \quad (10)$$

$$N_{ij} = \frac{g_i m_{di}}{\pi \hbar^2} \kappa_B T \ln(1 + e^{\frac{E_{Fi} - E_{ij}}{\kappa_B T}}) \quad (11)$$

式(10)中的波函数分布由式(1) 可得. 根据式(10)和(11) 可计算得沿垂直沟道 x 方向的电子浓度分布. 由于峰值在表面 1~2 nm 处, 非常接近表面, 在此作准二维近似处理. 根据式(1)~(3), 取电子浓度衰减到 $1/e$ 时的距离作为耗尽宽度, 积分后求取平均电子浓度作为对应网格 y 处的电子浓度. 沿 y 方向的电子分布采用三点有限差分法数值求解泊松方程^[5] 得到. 采用以下新的边界条件:

当 $y = 0$ 时, $\phi_s = \phi_s(y)|_{y=0}$;

当 $y = L$ 时, $\phi_s = V_D + \phi_s(y)|_{y=L}$;

这里的 $\phi_s(y)|_{y=0}$ 由 $\phi^0(y_1)$, $\phi^0(y_{-1})$ 由前面差分公式得到:

$$\phi(y_0) = \frac{1}{2} [\phi(y_{-1}) + \phi(y_1) - 2(\phi(y_1) - \phi(y_0) + \Delta x \cdot F_s)] \quad (12)$$

最后迭代至达到要求精度后结束, 求得在给定误差范围内的表面势分布.

3 结果与分析

图2所示为采用数值求解量子下的沿垂直沟道方向的电子分布. 所加栅压为 3 V, 源漏偏压 0 V, 衬底掺杂浓度 $N_A = 1.25 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 栅氧化层厚度为 1.3 nm. 可见表面处的电子浓度很低, 其峰值向硅体内推进了几个纳米. 这是由于表面电子的空间分布不再遵循经典的玻尔兹曼分布等分布函数, 而是由波函数决定, 这将对器件性能造成明显影响.

图3显示了当衬底掺杂浓度 $N_A = 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 栅氧化层厚度为 3 nm 时不同栅压下的表面势. 经典表面势由 Pao-Sah 方程经牛顿迭代法求解

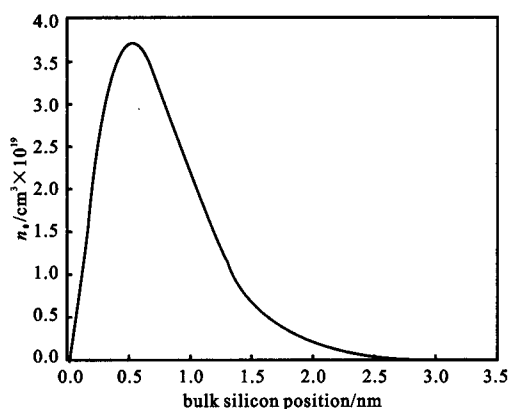


图2 考虑量子效应后垂直沟道方向的电子分布
得到. 结果表明, 未考虑量子修正会低估饱和区的电流. 而本文采用的数值模型求解结果和数值模拟结果很好地吻合.

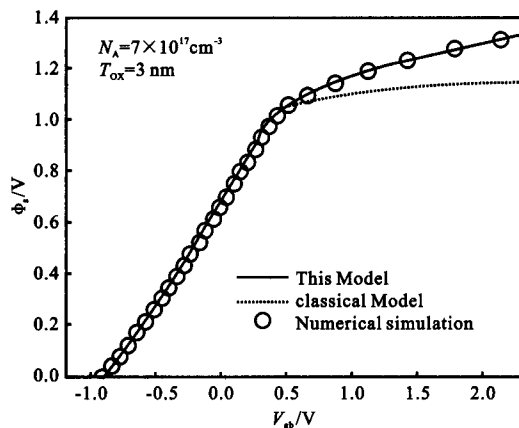


图3 $V_{ds}=0$ 下的量子修正表面势结果

图4所示为沿沟道方向的量子修正表面势分布. 对比数据为 TSMC 提供的 45 nm 沟长 MOSFET, 采用等效厚度 1.3 nm 的多晶硅栅, 氧化层介质为氮氧化硅, 沟道采用 Halo Implant 高度非均匀掺杂^[6]. 由于对比器件采用非均匀掺杂, 故本文取最接近实际结果的掺杂浓度作为平均值. 可见结果与文献中的结果是基本重合的, 虽然在沟道两端处略微有些偏差, 但是在中央处的曲率是基本一致的. 这是由于边界条件取值的影响, 而且本文在垂直沟道方向上载流子浓度取了平均值作为准二维近似, 所以和二维量子修正的结果略有不同, 但模型的总体精度还是让人满意的.

图5显示了 V_{ds} 对沟道电势分布的影响. 曲线自下向上 V_{ds} 取值从 0.25~2 V, 以步进 0.25 V 递增. 沟长 $L=50 \text{ nm}$, 栅氧化层厚度为 2 nm, 衬底掺杂浓度 $N_A=5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 栅压 $V_{gb}=0.756 \text{ V}$ 保持不变. 结果表明, 随着 V_{ds} 的增大, 源漏之间的势垒降

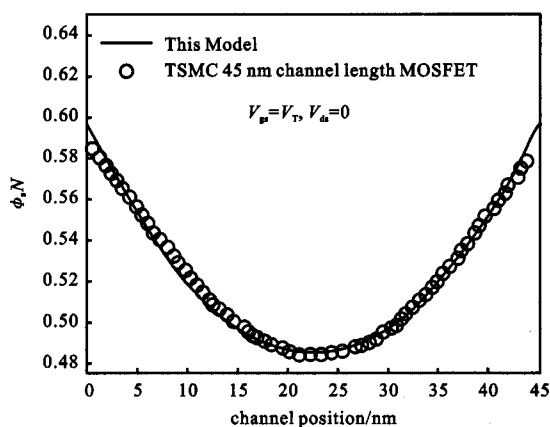


图4 沿沟道的量子修正的表面势分布和
二维量子力学数值计算结果比较^[6]

低越来越大, 即漏场感应势垒下降 (DIBL) 效应^[7]. 源漏偏压会造成线性区的沟道表面势减小, 进而导致阈值电压下跌; 而在饱和区, 源漏偏压的影响更大, 会造成表面势明显下降, 阈值下跌将更加严重. 势垒降低还会导致亚阈值电流和静态功耗变大. V_{ds} 太大或沟道长度太短, 有可能导致源漏的耗尽层连通导致器件无法关断. 因此在设计短沟道 MOSFET 时, 必须考虑短沟效应对器件性能的影响, 尽可能使之减至最小, 从而使器件保持长沟特性.

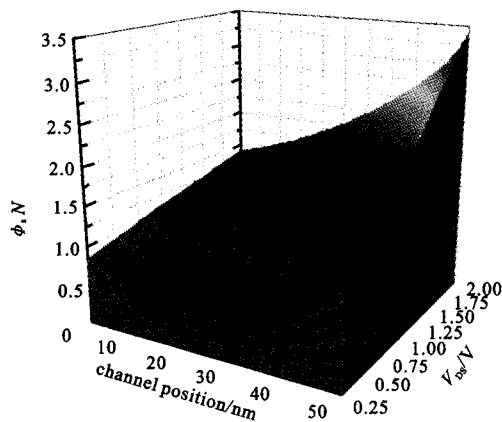


图5 V_{ds} 对沿沟道的表面势分布的影响 3D 图

4 结束语

文中提出了一种量子修正的沟道表面电势分布数值模型. 计算结果表明: 考虑量子效后, 沟道表面处的电子浓度很低, 其峰值向硅体内推进几个纳米, 并且表面势在饱和区依然随栅压的增大而增大. 另外, 源漏偏压的增大会造成线性区的沟道表面势的减小; 而在饱和区, 源漏偏压更会造成表面势的明显下降, 这将导致阈值下跌更加严重. 此模型可用于深亚微米及超深亚微米的 MOSFET 电特性模拟.

参考文献:

- [1] Ando T, Fowler A B, Stern F. Electronic properties of two-dimensional systems [J]. Rev Mod Phys, 1982, 54(2):437-672.
- [2] Sune J, Olivo P, Ricco B. Quantum-mechanical modeling of accumulation layers in MOS structure [J]. IEEE Trans Electron, 1992, 39(7): 1732-1739.
- [3] Pregaldiny F, Lallement C, Van Langevelde R, et al. An advanced explicit surface potential model physically accounting for the quantization effects in deep-submicron MOSFETs[J]. Solid-State Electronics, 2004, 48(3): 427-435.
- [4] Van Langevelde R, Klaassen F M. An explicit surface-potential-based MOSFET model for circuit simulation [J]. Solid-State Electronics, 2000, 44(3):409-418.
- [5] 张衡, 张武. 二维 Poisson 方程边值问题的块三对角可扩展并行算法 [J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(10): 117-120.
- [6] 张大伟, 章浩, 朱广平, 等. 亚 100nm 体硅 MOSFET 集约 I-V 模型 [J]. 半导体学报, 2005, 26(3): 554-561.
- [7] 高珊, 孟坚, 陈军宁, 等. OISD MOSFET 阈值电压建模与结构设计[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(7): 242-249.

作者简介:

李亦清 男, (1986-), 硕士研究生. 研究方向为新一代纳米半导体器件建模、非易失性存储器.

王子欧 男, (1968-), 博士, 副研究员. 研究方向为微电子工艺、电路设计以及表征分析等应用技术.

(上接第 74 页)

- [4] Wu Chijen, Hwang Renhung, Ho Janming. A scalable overlay framework for internet anycasting service[C]// The 22nd Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC'07). Korea; Seoul, 2007.
- [5] 裴胜玉, 周永权, 罗淇方. 求解约束优化问题的混合粒子群算法[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(4): 5-8.
- [6] Stevens T, De Turck F, Dhoedt B, et al. Achieving network efficient stateful anycast communications[C]// Proceedings of the 21st International Conference on Information Networking (ICOIN2007). Estoril, Portugal, 2007.
- [7] Ballani H, Francis P. Towards a global IP anycast service[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2005, 35(4): 301-312.
- [8] 熊琴, 李陶深. 一种基于遗传粒子群算法的选播路由算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(9): 75-77.

作者简介:

张园园 女, (1983-), 博士研究生. 研究方向为网络体系结构、路由协议、选播.

余镇危 男, (1942-), 博士生导师. 研究方向为网络体系结构、覆盖网、下一代互联网.