

亚 100nm 体硅 MOSFET 集约 I-V 模型*

张大伟¹ 章 浩² 朱广平¹ 张雪莲¹ 田立林¹ 余志平¹

(1 清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

(2 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 利用“局域化”的概念和二维泊松方程的解析解,建立了沟道方向上二维量子效应对阈电压的修正模型. 基于密度梯度理论,建立了多晶硅栅内量子效应对阈电压的修正模型. 在此基础上,结合弹道理论,开发了一个适用于亚 100nm MOSFET 的集约 $I-V$ 模型. 通过与 TSMC 提供的沟长为 45nm 实际器件测试结果^[1],以及与三组亚 100nm MOSFET 的数值模拟结果的比较,证明了该模型具有良好的精度(平均误差小于 8%)和可延伸性.

关键词: 量子力学效应; 弹道输运; 体硅 MOSFET; 集约 $I-V$ 模型; 可延伸性

PACC: 7340Q; 6185; 0300

中图分类号: TN304. 02

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)03-0554-08

1 引言

随着 MOSFET 进入到亚 100nm 乃至亚 50nm 尺度,量子效应将严重影响器件特性. 因此,包含该效应的集约 $I-V$ 模型对于下一代的电路设计具有很强的实用价值. 最近报道了大量关于量子效应的研究成果^[2~8],但这些研究都是基于数值方法,无法直接应用于集约模型. 在亚 100nm 尺度下,除了垂直沟道方向的量子效应^[9],沿沟道方向的量子效应也相当明显. 后者不仅是产生隧道电流的机制^[10],而且会使垂直沟道方向上的子带能级降低. 本文利用“局域化”的概念,巧妙地将沿沟道方向的量子效应折算成对于垂直方向上阈电压的修正. 另外,本文基于密度梯度理论^[3],推导了多晶硅栅内量子效应^[11]的解析模型.

目前流行的集约 $I-V$ 模型,如 BSIM4^[12], HISIM^[13], SP2001^[14] 等,都是建立在散射理论基础上的. 而在亚 100nm MOSFET 中,输运更趋于弹道^[15,16]. 目前关于弹道理论运用于 MOSFET 的工

作^[15]仅适用于本征沟道的情形,这对于高度非均匀掺杂的短沟器件是不够的.

本文基于弹道理论,考虑上述量子效应,建立了一个仅有 11 个可调参数、适用于亚 100nm MOSFET 的集约 $I-V$ 模型. 通过与 TSMC 提供的实际测试特性比较,表明该模型具有良好的精度. 进一步与三个亚 100nm MOSFET 器件组的数值模拟结果比较,可知该模型具有良好的可延伸性. 因此,它为以后亚 100nm MOSFET 集约 $I-V$ 模型的开发奠定了基础.

2 解析建模

2.1 沿沟道方向的二维量子力学效应

如图 1 所示, x 表示沿沟道方向, y 表示垂直沟道方向. 给定 y 方向上的势阱,可以得到离散的能级 $E_{n_y}^i$ 和波函数 $\psi_{n_y}^i(y)$. 在沟道的不同位置由于电势分布不同, $E_{n_y}^i$ 也不同. 图 1 给出了最低子带沿 x 方向的分布 $E_{n_y}^1(x)$, 它在 x_{\max} 处取得最大值 E_{\max} .

* 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号:2003AA1Z1370)

张大伟 男,1980 年出生,硕士研究生,主要从事纳米级器件中新型物理效应的集约解析建模.

章 浩 男,1983 年出生,大学本科,主要从事亚 100nm MOSFET 中量子力学效应的解析建模.

2004-03-30 收到,2004-08-05 定稿

于是,可以得到 x 方向上的波函数为 $\left[A/\sqrt{p(x)} \right] \exp\left[\frac{i}{\hbar} \int^x p(\cdot) d \right]$, 其中 $p(x)$ 为沿沟道方向的动量, 等于 $\sqrt{2m_x [E - E_{n_y}^1(x)]}$; m_x 为 x 方向上的有效质量; E 为总能量. 所以, 二维薛定谔方程的近似解 (x, y) 如下所示:

$$(x, y) = \left[A/\sqrt{p(x)} \right] \exp\left[\frac{i}{\hbar} \int^x p(\cdot) d \right] n_y(y) \quad (1)$$

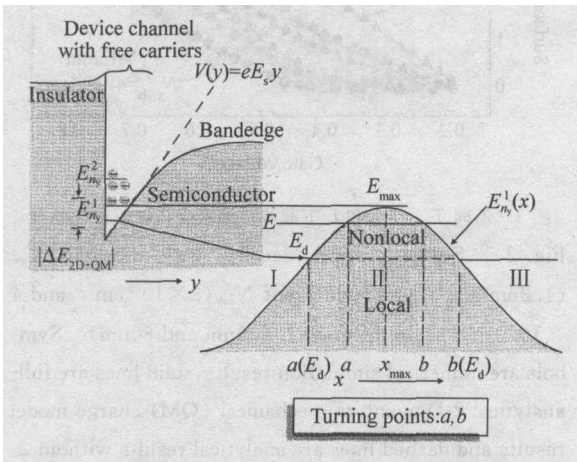


图 1 坐标系 左上图示出垂直沟道方向的量子阱, 右下图示出沿沟道方向的子带分布.

Fig.1 Coordinate set-up and the illustration of the subband edge re-definition ideal The sketch map of the quantum well in the transverse direction of the channel is shown on the left and the subband profile along the channel is shown on the right.

下面考虑 x 方向上的量子效应. 如图 1 所示, 给定能量 E 与 $E_{n_y}^1(x)$ 的交点为 a 和 b . 当 $E < E_{n_y}^1$ 时, (1) 式中的积分 $\frac{i}{\hbar} \int^x p(\cdot) d$ 的值为负实数, 说明波函数在势垒内部不断衰减. 我们定义“局域化”的能量为从 $x = a$ 到 $x = b$ 积分时指数项 $\exp\left[\frac{i}{\hbar} \int^x p(\cdot) d \right]$ 小到足以被忽略时的能量. 若以 E_d 作为划分局域化与非局域化的能量, 那么由于 $E_d < E_{max}$, 子带沿沟道方向的最高点降低了, 从而造成垂直沟道方向上阈电压的下降. E_d 是通过数值求解以下非线性方程得到的 (a 和 b 与 E_d 相关):

$$\frac{i}{\hbar} \int_a^b \sqrt{2m_x [E_d - E_{n_y}^1(x)]} dx = - \quad (2)$$

这里 满足 $e^{-} \ll 1$, 比如 取 4, 则 $e^{-4} = 1.83\%$ 已

经是一个足够小的量了.

子带沿沟道方向最高点的下降造成阈电压下降了 V_{2D-QM} , 命名为二维量子力学修正. 这里 $E_{n_y}^1(x)$ 可由数值模拟提供, 为了得到全解析模型, 需要找出 $E_{n_y}^1(x)$ 的解析表达式. 对 $E_{n_y}^1(x)$ 在 $x = x_{max}$ 附近进行抛物线近似, 数值模拟证明这种近似是合理的. 把这种近似得到的结果代入方程 (2), 得到 $E_{max} - E_d = 8\hbar v \sqrt{2m_x}$, 其中 v 是阈电压时 $E_{n_y}^1(x)$ 在 x_{max} 处的曲率, 即抛物线的二次项系数. 应用有效态密度概念^[17], 可以进一步得到阈电压 V_T 的二维量子力学修正项:

$$V_{2D-QM} = - (E_d - E_{max})/q \left[1 + \frac{1}{2C_{ox}} \frac{\sqrt{\frac{q^2 N_{sub}}{k_B T \ln(N_{sub}/n_i)}}}{\sqrt{2m_x}} \right] = - \frac{8\hbar v}{q} \sqrt{2m_x} \left[1 + \frac{1}{2C_{ox}} \frac{\sqrt{\frac{q^2 N_{sub}}{k_B T \ln(N_{sub}/n_i)}}}{\sqrt{2m_x}} \right] \quad (3)$$

所有的符号都是常规的意义. 可以看出, 的解析形式是至关重要的. 数值结果表明利用表面势的曲率来计算 是合理的. 文献 [18] 给出了解析计算表面势的公式:

$$V_s(x) = V_{sL} + (V_{bi} + V_{DS} - V_{sL}) \frac{\sinh(x/l)}{\sinh(L/l)} + (V_{bi} - V_{sL}) \frac{\sinh[(L-x)/l]}{\sinh(L/l)} \quad (4)$$

其中 $V_s(x)$ 为表面势沿沟道的分布; x 为沟道方向; V_{sL} 为长沟器件的表面势; V_{bi} 为内建电势; V_{DS} 为漏源偏压; L 为沟长; l 为参考长度 (其意义参见文献 [18]). 利用 (4) 式在 $dV_s(x)/dx = 0$ 处求表面势的二阶偏导数, 得到:

$$= l (V_{DS} + V_{bi} - \Phi_s) \sinh(x_{max}/l) + (V_{bi} - \Phi_s) \sinh[(L - x_{max})/l] / [l^2 \sinh(L/l)] \quad (5)$$

其中 Φ_s 为长沟器件中栅压为阈电压时对应的表面势. 有了公式 (3) 和 (5) 以后, 二维量子修正的阈电压解析模型就建立了. 此修正项与器件各参数如沟道长度 L , 氧化层厚度 T_{ox} , 沟道掺杂 N_{sub} 的关系在公式中均明确给出, 同时给出了 V_{2D-QM} 和漏端偏压 V_{DS} 的关系. 图 2 给出了公式 (3) 和 (5) 所表达的 V_{2D-QM} 在不同 T_{ox} 和 N_{sub} 下与 L 的关系曲线, 可以看出数值和解析的结果是大致吻合的. 结果表明, V_{2D-QM} 在亚 50nm MOSFET 中是不可忽略的. 将此修正项加入 y 方向一维的电荷解析模型^[9], 可以得到一个考虑二维量子力学效应的全解析电荷模型:

$$Q_{inv} = C_{ox} \frac{2 \phi_0 \ln \left[1 + \exp \left(\frac{V_{GS} - V_{FB} - \phi_{qm} - Q_{dep} / C_{ox}}{2 \phi_0} \right) \right]}{1 + 2 \phi_0 C_{ox} \frac{\sqrt{2 \phi_{qm0}}}{N_{Si} N_{sub}} \exp \left(\frac{V_{GS} - V_{FB} - \phi_{qm} - Q_{dep} / C_{ox} - 2(V_{GS} - V_T - V_{off})}{2 \phi_0} \right)} \quad (6)$$

$$V_T = V_T + V_{2D-QM} \quad (7)$$

其中 C_{ox} 为栅氧电容; ϕ_0 为亚阈值区斜率因子; ϕ 为热电压; V_{GS} 为栅源电压; V_{FB} 为平带电压; ϕ_{qm} 为考虑量子效应的表面势; Q_{dep} 为耗尽层电荷; ϕ_{qm0} 为阈值点对应的表面势; N_{sub} 为掺杂浓度; V_{off} 为强反型区和亚阈值区阈电压的微小差别; V_T 为考虑二维量子力学效应的阈电压; V_T 为一维阈电压, 详见文献[9]. 图 3 给出了不同器件参数下解析和数值结果的比较, 其中数值结果是用 ISE 软件^[19] 中的密度梯度模型模拟得到. 从图中可以看出, 沟道长度越短, 未考虑二维量子修正而产生的误差越大, 考虑该效应后的解析模型误差低于 3%.

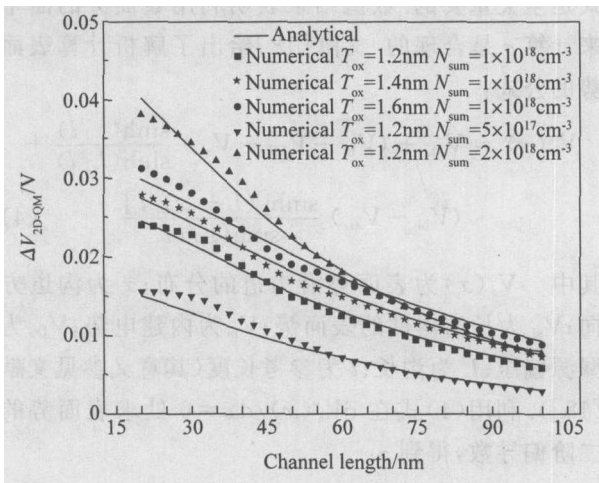


图 2 不同 T_{ox} 和 N_{sub} 下 V_{2D-QM} 随沟道长度变化曲线
Fig. 2 V_{2D-QM} versus L with different T_{ox} and N_{sub} at $V_{DS} = 0$. Solid lines are analytical results while the symbols stand for the results from quantum numerical simulation.

2.2 多晶区内的量子力学效应

多晶硅栅内存在多晶硅耗尽效应的事实已有报道^[12,20], 然而在亚 100nm MOSFET 中, 多晶硅栅中的量子效应同样重要^[11]. 因此, 我们在建立集约 $I-V$ 模型时考虑了该效应. 多晶硅栅内量子力学修正模

$$V_{PGQM} = - \frac{C_{ox}^2 \hbar^2 q}{8 C_1 k_B T^2 m_n^*} \left[V_g - V_{FB} - V_s + \frac{k_B T}{q} - \frac{4 m_n^* (k_B T)^3}{\hbar^2 q^3 N_p} \right]^2 + c_2 \left[- \frac{k_B T}{q} + \frac{4 m_n^* (k_B T)^3}{\hbar^2 q^3 N_p} \right] \quad (11)$$

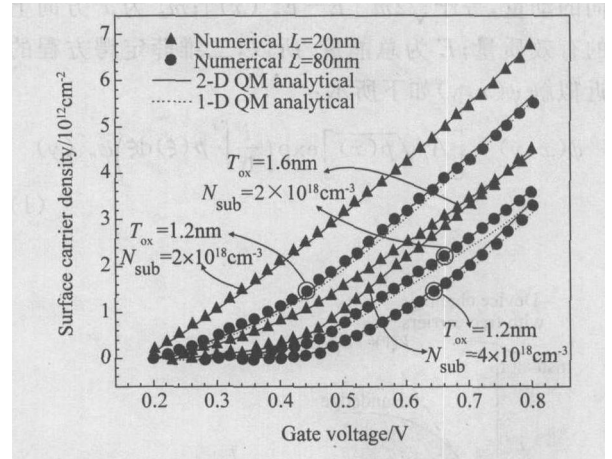


图 3 不同 T_{ox} , N_{sub} 和 L 下载流子面密度随栅压变化曲线
Fig. 3 Surface carrier density, with different T_{ox} (1.2nm and 1.6nm), different N_{sub} ($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) and different L (20nm and 80nm). Symbols are numerical simulation results, solid lines are full-analytical 2-D quantum mechanical (QM) charge model results and dashed lines are analytical results without 2-D QM correction.

型是基于密度梯度理论^[3] 建立的. 密度梯度理论的核心是在 Boltzmann 统计的基础上加入一项量子势修正:

$$n = n_0 \exp \left[q \left(\psi + \psi_{QM} - \phi_b \right) / k_B T \right] \quad (8)$$

$$\psi_{QM} = \frac{\hbar^2}{2 q m_n^*} \nabla \cdot \left(\frac{\hbar^2}{4 q m_n^*} \nabla \sqrt{n} \right) \quad (9)$$

其中 ψ_{QM} 为附加量子势; n 为载流子分布; ψ 为电势分布; ϕ_b 为费米电势; m_n^* 为有效质量, 其他符号都是它们常规的含义. 直接寻找上述表达式代入柏松方程后的解析解十分困难, 因此我们作了以下近似:

$$\psi_{QM} = \frac{\hbar^2}{2 q m_n^*} \frac{\partial^2 \sqrt{n_{cl}}}{\partial x^2} \quad (10)$$

其中 n_{cl} 为经典载流子分布. 在此近似下, 最终得出多晶硅栅量子效应对阈电压 V_T 的修正:

$$c_1 = \left[0.7962 + 1.2307 \times 10^{22} \times \left(\frac{N_p}{n_h} \right)^{-2.3254} \right] (0.00109 + 0.04653e^{-\frac{T_{ox}}{0.54133}}) \quad (12)$$

$$c_2 = (0.3971 + 0.4964 T_{ox}) \left[-87.0793 + 6.777 \log \left(\frac{N_p}{n_h} \right) - 0.12599 \left[\log \left(\frac{N_p}{n_h} \right) \right]^2 \right] \quad (13)$$

其中 N_p 为多晶掺杂浓度; c_1, c_2 是为使模型更加精确而引入的拟合参数; 其他符号都是常规的意义. 图 4 和图 5 给出了在不同的 N_{sub}, T_{ox} 和 N_p 下解析模型结果与数值结果的比较, 同时也给出了不考虑多晶区内量子效应的数值结果. 图 6 给出 V_{PGQM} 随 N_p 的变化. 这 3 张图表明: (1) 此解析模型的平均误差低于 3%; (2) V_{PGQM} 对纳米级高衬底掺杂和极薄氧化层的 MOSFET 特性的影响不能忽略; (3) V_{PGQM} 导致有效栅电容的偏移; (4) V_{PGQM} 导致了有效阈电压的下降, 与多晶硅耗尽效应的作用恰好相反; (5) 多晶掺杂越高, V_{PGQM} 越明显, 与此同时多晶硅耗尽效应减弱.

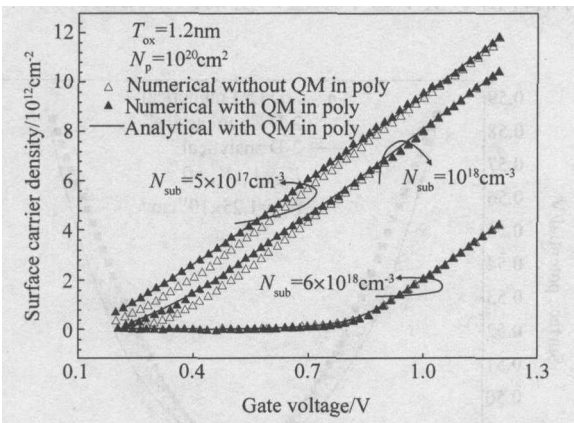


图 4 不同 N_{sub} 下载流子面密度随栅压变化关系 模拟采用 MOS 结构.

Fig. 4 Surface carrier density, with $T_{ox} = 1.2 \times 10^{-7}$ cm, $N_p = 10^{20}$ cm $^{-3}$ and different substrate doping ($N_{sub} = 5 \times 10^{17}$ cm $^{-3}$, $N_{sub} = 10^{18}$ cm $^{-3}$ and $N_{sub} = 6 \times 10^{18}$ cm $^{-3}$) Solid symbols represent numerical results with QM in the poly-gate and hollow symbols represent those without QM in the poly-gate. Solid lines stand for analytical results with QM in the poly-gate.

2.3 弹道理论与全解析 $I-V$ 模型

基于弹道理论的 MOSFET $I-V$ 解析模型^[16] 可以表示为:

$$\frac{I_D}{W} = Q(0) \left(\frac{1-r}{1+r} \right) \left\{ \tau \frac{\sqrt{2}(\cdot)}{0(\cdot)} \right\} \times \left\{ \left[1 - \frac{\sqrt{2}(\cdot - U_D)}{\sqrt{2}} \right] / \left[1 + \frac{1-r}{1+r} \times \frac{0(\cdot - U_D)}{0(\cdot)} \right] \right\} \quad (14)$$

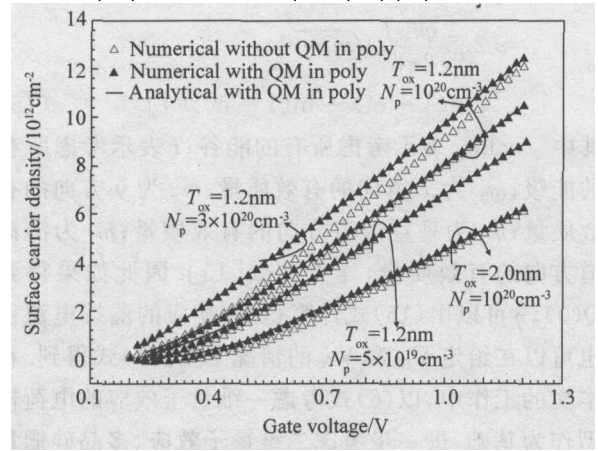


图 5 不同 N_p 和 T_{ox} 下载流子面密度随栅压变化关系 材料参数为 $N_{sub} = 10^{18}$ cm $^{-3}$. 模拟采用 MOS 结构.

Fig. 5 Surface carrier density with different N_p and T_{ox} $N_{sub} = 10^{18}$ cm $^{-3}$ Solid symbols represent numerical results with QM in the poly-gate and hollow symbols represent those without QM in the poly-gate. Solid lines stand for analytical results with QM in the poly-gate.

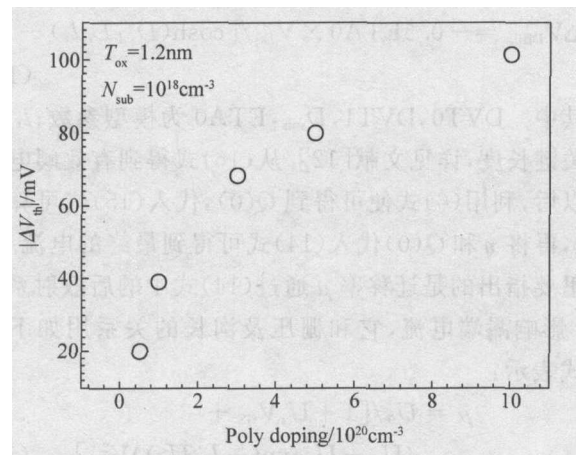


图 6 多晶硅栅内量子效应引起的阈电压偏移与多晶掺杂浓度关系

Fig. 6 Threshold voltage shift versus poly-gate doping

其中 I_D 为漏端电流; W 为器件宽度; $Q(0)$ 为反型层面电荷密度; r 为后散射系数; τ 为热电压; $i(x)$ 为第 i 阶费米积分; \cdot 为用热电压归一化的费米势; U_D 为热电压归一化的漏源电压, 详见文献^[16]. 从该公式可以看出, 为了得到漏端电流 I_D , 需要知道在 x_{max} 处的 $Q(0)$ 和源端费米势, 而在弹道理论中,

它们有着如下关系^[15]：

$$Q(0) = \frac{qk_B T}{2 \hbar^2 \text{valley}_i} \sqrt{m_x m_y} \times [\ln(1 + e) + \ln(1 + e^{-U_D})] \\ 2.5 \frac{qk_B T}{2 \hbar^2} \sqrt{m_t m_l} \times [\ln(1 + e) + \ln(1 + e^{-U_D})] \quad (15)$$

其中 valley 表示考虑所有的能谷； i 表示考虑所有的能级； m_x 为 x 方向的有效质量； m_y 为 y 方向的有效质量； m_t 为垂直沟道方向的有效质量； m_l 为沿沟道方向的有效质量，详见文献[15]。因此如果得到 $Q(0)$ ，可以由(15)式计算得出，相应的漏端电流值也可以在给定 V_{GS} 和 V_{DS} 的情况下由(14)式得到。在本文的工作中，以(6)式考虑一维量子效应的电荷模型作为基础，进一步考虑二维量子效应、多晶硅栅量子效应、短沟效应(SCE)和漏端势垒下降效应(DIBL)，计算出 $Q(0)$ 。阈电压的修正公式如下：

$$V_T = V_{\text{THL1D-QM}} + V_{\text{2D-QM}} + V_{\text{PG-QM}} + V_{\text{SCE}} + V_{\text{DIBL}} \quad (16)$$

其中 $V_{\text{THL1D-QM}}$ 为考虑一维量子效应的阈电压模型^[9]； V_{SCE} 和 V_{DIBL} 可以由下两式得到：

$$V_{\text{SCE}} = -0.5 \text{DVT0} (V_{\text{bi}} - \phi_{\text{qm}}) / [\cosh(\text{DVT1} \times L / l_t) - 1] \quad (17)$$

$$V_{\text{DIBL}} = -0.5 \text{ETA0} \times V_{\text{DS}} / [\cosh(D_{\text{sub}} L / l_t) - 1] \quad (18)$$

其中 DVT0 , DVT1 , D_{sub} , ETA0 为模型参数； l_t 为关键长度，详见文献[12]。从(16)式得到有效阈电压以后，利用(6)式便可得到 $Q(0)$ ，代入(15)式可算出 I_D ，再将 I_D 和 $Q(0)$ 代入(14)式可得到最终的电流。这里要指出的是迁移率 μ 通过(14)式中的后散射系数 r 影响漏端电流，它和栅压及沟长的关系用如下公式表示：

$$\mu = U_0 / [1 + U_1 V_{\text{GS}} + (U_2 + U_3 \exp(-L/U_4)) V_{\text{GS}}^2] \quad (19)$$

其中 U_0 , U_1 , U_2 , U_3 和 U_4 为模型参数。到此，集约 $I-V$ 模型已经建好，其中有 11 个模型参数 U_0 , U_1 , U_2 , U_3 , U_4 , DVT0 , DVT1 , D_{sub} 和 ETA0 ，且 U_0 是弹道理论中的可调参数。

3 结果与分析

为了检测此模型，将解析结果与 TSMC 提供的 90nm 工艺制造的沟长为 45nm^[11] 的实际器件特性

进行了比较分析。其栅介质用氮氧化硅，其等效厚度为 1.3nm。此器件使用了 Halo Implant 和 SSRC 技术，使得沟道掺杂高度非均匀分布，平均掺杂浓度 N_{sub} 为 $1.25 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 。图 7 分别给出了用经典模拟、量子模拟(模拟采用 Taurus^[21])和解析公式(4)得到的 V_T 处的表面势。从图中可以看出，虽然由于非均匀掺杂，解析结果并不完全与数值的结果相重合，但是各曲线在 x_{max} 处的曲率都是几乎相同的，均为 $200 \text{V}/\mu\text{m}^2$ 左右，因此用(5)式去解析的表达是合理的(而且在解析模型中，实际上可以作为可调模型参数)。图 8 是解析模型与实际器件的输出特性比较，同时也给出了不考虑二修正的结果。从图 8 可以看出考虑二维量子修正的模型结果误差为 3% 左右，而不考虑二维量子修正的误差大于 10%。此结果表明仅考虑垂直沟道方向的一维量子修正会过高估计由于量子力学效应产生的阈电压的升高。

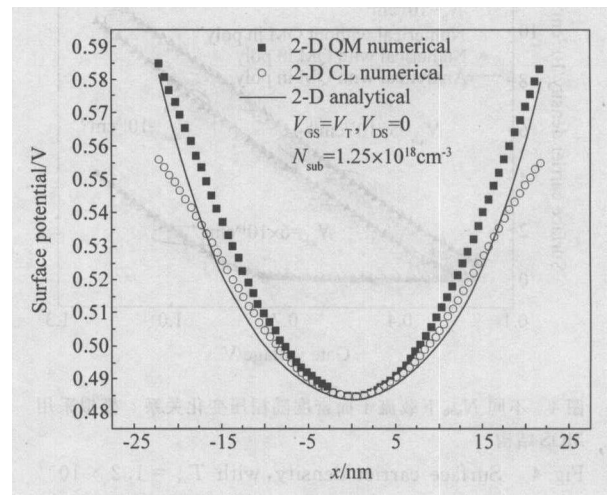


图 7 表面势沿沟道方向的分布 器件是 TSMC 提供的 $L = 45 \text{nm}$ n-MOSFET。沟道是高度非均匀掺杂。 $x = 0$ 处代表沟道中央。

Fig. 7 Surface potential profile along the channel direction at threshold voltage with the 45nm n-MOSFET from TSMC^[11]. Squares represent the 2-D QM numerical results and circles represent the 2-D classical (CL) numerical results with highly non-uniform doping in the channel. The solid line represents the analytical results using Eq. (4)

为了进一步验证该模型，我们取五个不同沟长(14^[22], 30^[23], 39^[24], 50^[25] 和 80nm^[26])的实际器件特性用来与解析结果比较。提参结果所有管子的平均误差都低于 8%，具体情况在表 1 中已列出。平

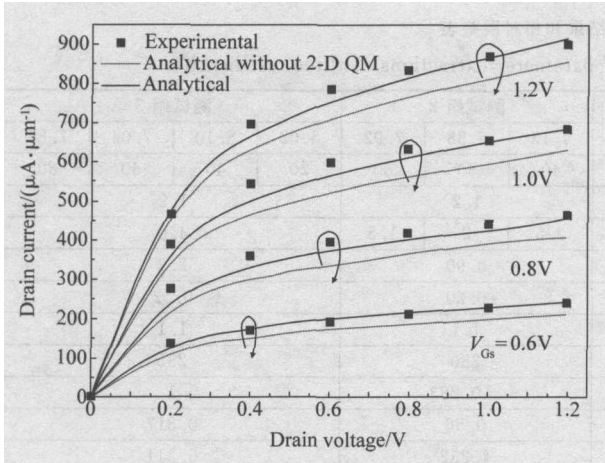


图 8 集约模型与 TSMC 提供的 $L = 45\text{nm}$ n-MOSFET 实际器件的 $I-V$ 特性比较

Fig. 8 Output characteristics of the 45nm n-MOSFET from TSMC^[11] Squares represent experimental data, solid lines represent analytical results with 2-D QM correction, and dashed lines represent analytical results without 2-D QM correction.

均误差定义如下：栅压与漏压在电源电压范围内均匀地取足够多的点，在每点上求模型结果与实验结果的相对误差，这些相对误差的算术平均数称为“平均误差”。结果表明，模型的误差并不随管子长度的减小而增大，证明了此模型对亚 100nm 体硅 MOSFET 有良好的适用性。

表 1 五个亚 100nm 实际器件经过提参后的相对误差表

Table 1 Standard relative errors of the results of parameter extractions of six sub-100nm real devices

| 沟道长度/nm | 14 | 30 | 39 | 50 | 80 |
|---------|------|------|------|------|------|
| 相对误差/% | 5.95 | 5.11 | 4.14 | 5.92 | 7.53 |
| 标准方差/% | 2.74 | 2.82 | 4.13 | 4.26 | 7.54 |

进一步，三组亚 100nm 的 MOSTET 的数值模拟结果被用于测试，其中一组由 MIT 给出^[28]，另外两组是根据等比例的原则设计的。提参结果和相对误差列在表 2 中。图 9 给出了测试组三个管子的输出特性的数值结果和解析结果的比较。可以看出，解析模型与数值结果符合得很好，表明它具有很强的可延伸性。

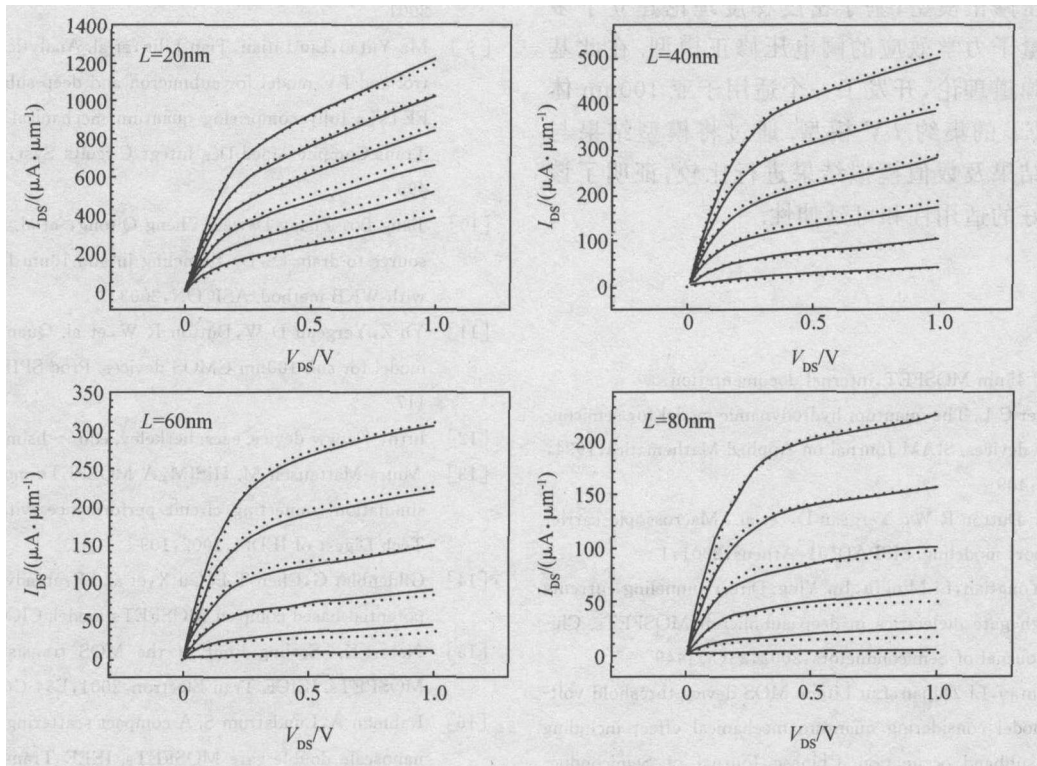


图 9 测试组 3 的数值模拟和解析模型的输出特性比较 实线代表模型结果，点线代表数值结果。横轴为 V_{DS} ，纵轴为 I_{DS} ， $T_{ox} = 1.2\text{nm}$ ， $N_{sub} = 4 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ， V_{GS} 从 0.5V 到 1.0V，间隔 0.1V。

Fig. 9 Output characteristics of the model results and numerical results for Test-bench 3 with channel length of 20, 40, 60, and 80nm The solid and dot lines are for the model data and numerical results, respectively.

表 2 三个测试组的提参结果和相对误差表

Table 2 Standard relative errors of the results of parameter extractions of three test benches

| 相对误差/ % | 参数缺省值 | 测试组 1 ^[27] | | | 测试组 2 | | | 测试组 3 | | | |
|--|--------|-----------------------|------|------|---------|------|------|--------|------|------|------|
| | | 5.04 | 7.07 | 7.86 | 4.13 | 6.58 | 7.92 | 5.02 | 8.10 | 7.04 | 7.85 |
| L/nm | | 25 | 50 | 90 | 40 | 60 | 80 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| T_{ox}/nm | | 1.5 | 2.0 | 2.8 | 1.2 | | | 1.2 | | | |
| $N_{\text{sub}}/10^{18}\text{cm}^{-3}$ | | 7.8 | 2.7 | 0.8 | 3.5 | 2 | 1.5 | 4.0 | | | |
| DV T0 | 1.5 | 0.4 | | | 0.90 | | | 2.2 | | | |
| DV T1 | 0.5 | 0.63 | | | 0.20 | | | 0.52 | | | |
| | 1 | 1.1 | | | 1.1 | | | 1.1 | | | |
| U_0 | 250 | 300 | | | 280 | | | 235 | | | |
| U_1 | 0.25 | - 0.201 | | | - 0.283 | | | 1 | | | |
| U_2 | 0.237 | 0.194 | | | 0.56 | | | 0.317 | | | |
| U_3 | 4.545 | 4.031 | | | 4.232 | | | 5.211 | | | |
| U_4 | 16.235 | 17.887 | | | 37.106 | | | 15.485 | | | |
| | 0.30 | 0.30 | | | 0.26 | | | 0.28 | | | |
| D_{sub} | 0.30 | 0.26 | | | 0.25 | | | 0.27 | | | |
| ETA ₀ | 0.06 | 0.04 | | | 0.07 | | | 0.08 | | | |

4 结论

本文利用“局域化”概念建立了二维量子力学效应的阈值电压修正模型;基于密度梯度理论建立了多晶硅栅内量子力学效应的阈值电压修正模型.在此基础上结合弹道理论,开发了一个适用于亚 100nm 体硅 MOSFET 的集约 $I-V$ 模型.通过将模型结果与诸多实验结果及数值模拟结果进行比较,证明了该模型有良好的适用性和可延伸性.

参考文献

- [1] TSMC 45nm MOSFET ,internal documentation
- [2] Gardner C L. The quantum hydrodynamic model for semiconductor devices. SIAM Journal on Applied Mathematics ,1994 , 54(2) :409
- [3] Yu Z , Dutton R W , Yergeau D , et al. Macroscopic carrier transport modeling. SISPAD '01 ,Athens ,2001 :1
- [4] Hou Yongtian ,Li Mingfu ,Jin Ying. Direct tunneling currents through gate dielectrics in deep submicron MOSFETs. Chinese Journal of Semiconductors ,2002 ,23(5) :449
- [5] Ma Yutao ,Li Zhijian ,Liu Litian. MOS device threshold voltage model considering quantum mechanical effect including multi-subband occupation. Chinese Journal of Semiconductors ,1999 ,20(3) :219 (in Chinese) [马玉涛 ,李志坚 ,刘理天. 包含多子带结构的 MOS 器件开启电压量子力学效应修正模型. 半导体学报 ,1999 ,20(3) :219]
- [6] Laux S E ,Kumar A ,Fischetti M V. Ballistic FET modeling using QDAME:Quantum device analysis by modal evaluation. IEEE Trans Nanotechnol ,2002 ,1(4) :255
- [7] Gusmeroli R ,Spinelli A S. 2D QM simulation and optimization of decanano nonoverlapped MOS devices. IEDM , Washington D C ,2003
- [8] Ren Zhibin. Nanoscale MOSFETs : physics , simulation , and design. PhD Thesis ,Purdue University ,West Lafayette ,IN , 2001
- [9] Ma Yutao ,Liu Litian ,Tian Lilin ,et al. Analytical charge control and $I-V$ model for submicron and deep-submicron MOSFETs 's fully comprising quantum mechanical effects. IEEE Trans Comput-Aided Des Integr Circuits Syst ,2001 ,20(4) : 495
- [10] Jiang Bo , Zhang Dawei , Zheng Qitong , et al. Simulation of source-to-drain (S/D) tunneling in sub-10nm DG MOSFETs with WKB method. ASICON ,2003
- [11] Yu Z , Yergeau D W , Dutton R W , et al. Quantum transport model for sub-100nm CMOS devices. Proc SPIE ,2001 ,4600 : 117
- [12] <http://www-device.eecs.berkeley.edu/~bsim3/BSIM4>
- [13] Miura-Mattausch M. HiSIM : A MOSFETs model for circuit simulation connecting circuit performance with technology. Tech Digest of IEDM ,2002 :109
- [14] Gildenblat G , Chen T L , Gu X , et al. SP : an advanced surface-potential-based compact MOSFETs model. CICC ,2003 :233
- [15] Natori K. Scaling limit of the MOS transistor-A ballistic MOSFETs. IEICE Tran Electron ,2001 ,E84-C(8) :1029
- [16] Rahman A ,Lundstrom S. A compact scattering model for the nanoscale double-gate MOSFETs. IEEE Trans Electron Devices ,2002 ,49 :481
- [17] Ma Yutao ,Liu Litian , Yu Zhiping , et al. Effective density-of-states approach to QM correction in MOS structure. Solid-State Electron ,2000 ,44(3) :401
- [18] Liu Zhihong , Hu Chenming , Huang Jianhui , et al. Threshold voltage model for deep-submicrometer MOSFET 's. IEEE

- Trans Electron Devices, 1993, 40(1):86
- [19] <http://www.ise.ch>
- [20] Taur Y, Wann C H, Frank D J. 25nm CMOS design considerations. IEDM '98 Technical Digest, 1998
- [21] <http://www.synopsys.com> Taurus User manual
- [22] Hokazono A. 14nm gate length CMOSFETs utilizing low thermal budget process with poly-SiGe and Ni silicide. IEDM '02, 2002:639
- [23] Yanagiya N. 65nm CMOS technology (CMOS5) with high density embedded memories for broad and microprocessor application. IEDM '02, 2002:57
- [24] Narasimha S. High performance sub-40nm CMOS devices on SOI for the 70nm technology node. IEDM Technical Digest, 2001:29.2.1
- [25] Ohnishi K. A 50-nm CMOS technology for high-speed, low-power, and RF applications in 100-nm node SoC platform. IEDM Technical Digest, 2001:10.5.1
- [26] Buchanan D A. 80nm polysilicon gated n-FETs with ultra-thin Al_2O_3 gate dielectric for ULSI applications. IEDM Technical Digest, 2000:223
- [27] <http://www-mtl.mit.edu/Well-temperd-MOSFETs>

Compact $I-V$ Model for Sub-100nm Bulk Silicon MOSFETs *

Zhang Dawei¹, Zhang Hao², Zhu Guangping¹, Zhang Xuelian¹, Tian Lilin¹, and Yu Zhiping¹

(1 Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Department of Electronics and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Analytical models for the correction to the threshold voltage, due to the two dimensional (2D) quantum mechanical (QM) effects in the transport direction and the QM effects in the poly-silicon gate (poly-gate) region, are established respectively based on the theory of "locality" and the analytical solution to the 2D Poisson equation and on the density gradient model. These corrections are then combined with the ballistic transport theory to establish a compact $I-V$ model for sub-100nm MOSFETs. This compact model renders satisfactory results (standard relative error less than 8%) compared to the experimental data of a 45nm-channel manufactured device provided by TSMC and the numerical results of three sets of sub-100nm MOSFETs, which prove its accuracy and scalability.

Key words: quantum mechanical effects; ballistic transport; bulk silicon MOSFETs; compact $I-V$ model; scalability

PACC: 7340Q; 6185; 0300

Article ID: 0253-4177(2005)03-0554-08

* Project supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2003AA1Z1370)

Zhang Dawei male, was born in 1980, master candidate. His major interest is compact modeling for novel physical effects in nanoscaled devices.

Zhang Hao male, was born in 1983, undergraduate student. His major interest is analytical modeling for quantum mechanical effects in sub-100nm MOSFETs.

Received 30 March 2004, revised manuscript received 5 August 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics