

深亚微米非均匀掺杂 MOSFET 的 衬偏效应及开启电压模型

张文良 杨之廉

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

摘要 本文根据 MOS 器件沟道区离子注入引起的衬底杂质非均匀分布情况, 提出了一个简单的衬底杂质分布的近似. 并以此导出了非均匀掺杂下开启电压的衬偏效应模型. 模型中采用了一个双曲函数解决了在不同掺杂区域的边界处, 电流(或开启电压)对衬偏 V_{BS} 的导数的不连续问题, 并可通过调整参数 δ 计及实际器件中衬底掺杂的缓变过程. 本文还给出一个与衬偏相关的短沟道效应公式, 准确地反应了深亚微米器件衬偏效应减小的现象. 模型计算的结果与数值模拟的结果十分一致.

EEACC: 2560B, 2560R, 2570D

1 引言

在现代工艺中, MOS 器件衬底的非均匀掺杂主要源于沟道区的两次注入. 浅注入是为了调整开启电压; 深注入是为了防穿通. 随着沟道长度不断减小, 防穿通注入是保证小尺寸器件正常工作所必不可少的. 这两次注入以及热处理后的杂质再分布使得杂质在衬底中的纵向分布变得很复杂. 杂质的非均匀分布使得耗尽区的有效杂质浓度随衬偏 V_{BS} 的变化而动态变化, 即衬偏效应因子也随 V_{BS} 而动态变化. 传统的开启电压模型不能正确地反应这一特性. 另外, 当今 MOS 电路技术已进入深亚微米范畴, 短沟道效应的逐渐加剧使得其衬偏效应表现出同长沟器件不同的特性. 实验表明, 深亚微米器件的衬偏效应随沟道长度的减小而减小. 而在较长沟道时, MOS 器件的衬偏效应与沟长无关. 这一新的现象同样也未能体现在传统的开启电压模型中.

本文从实际工艺出发, 将衬底杂质分布近似为准 δ 分布, 如图 1 所示. 这比某些模型如^[1]中采用的阶跃分布更符合实际情况. 两次注入的峰值浓度和注入深度是不同的, 这样的分布可以兼顾到这两次注入各自的影响. 通过适当地调整注入浓度和深度参数, 该分布可以变化为多种不同的掺杂情况. 如对应于较长沟道时可只有一次调整开启电压的注入, 而极短沟道时可只采用一次防穿通注入(即 δ 掺杂)的情况. 由于衬底杂质浓度在各个掺杂区域内

张文良 男, 1968 年生, 博士生, 从事深亚微米 MOSFET 模型及相关 CAD 技术的研究

杨之廉 男, 1933 年生, 教授, 博士生导师, 从事集成电路 CAD 的教学和研究

1996 年 9 月 8 日收到初稿, 1996 年 12 月 31 日收到修改稿

不相同,使得耗尽区跨越不同区域时开启电压有不同的表达式.这将造成电流(或开启电压)对衬偏 V_{BS} 的导数在各区域边界上的不连续.本文采用了一个双曲函数很好地解决了这个问题,

并可利用双曲函数中的参数 δ 对实际衬底掺杂的缓变过程作出修正.此外,本文采用了一个与衬偏相关的短沟道效应公式,以考虑在深亚微米沟长范围内短沟道效应对衬偏效应的影响.本文的第二部分给出了模型公式及推导过程.第三部分给出了参数提取及与数值模拟结果的比较.

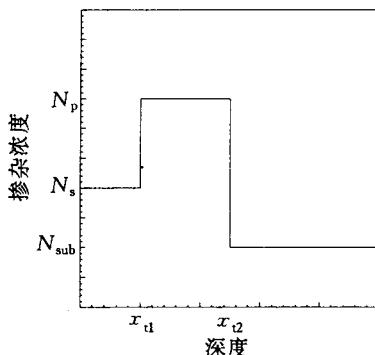


图 1 衬底杂质分布的准 δ 分布近似 为:

$$V_{th} = V_{FB} + 2\varphi_i + \gamma \sqrt{2\varphi_i - V_{BS}} - \Delta V_{th} \quad (1)$$

其中 V_{FB} 为平带电压; φ_i 为费米势; γ 为衬偏系数; ΔV_{th} 表示由于短沟道效应(DIBL 效应)引起的开启电压漂移.如暂不考虑 ΔV_{th} 项,即对于长沟器件,(1)可改写为:

$$V_{th} = V_{th0} + \gamma (\sqrt{2\varphi_i - V_{BS}} - \sqrt{2\varphi_i}) \quad (2)$$

式中 $V_{th0} = V_{FB} + 2\varphi_i + \gamma \sqrt{2\varphi_i}$ 为长沟器件 $V_{BS}=0$ 时的开启电压.

对于图 1 的杂质分布,典型地,假定 $N_s = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,均匀掺杂衬底下, $V_{BS}=0$ 时耗尽区宽度约为 $0.1 \mu\text{m}$,这一般已经大于实际工艺中的 X_{t1} 而小于 X_{t2} ,即 $V_{BS}=0$ 时耗尽区边界位于高掺杂的 N_p 区.假定耗尽区边界展宽至 X_{t2} 处的衬偏电压为 V_{BX} .由一维泊松方程:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_{Si}} = \frac{qN(x)}{\epsilon_{Si}} \quad N(x) = \begin{cases} N_s & 0 \leq x < x_{t1} \\ N_p & x_{t1} \leq x < x_{t2} \\ N_{sub} & x \geq x_{t2} \end{cases}$$

可得 $|V_{BS}| \leq |V_{BX}|$ 时,即耗尽区宽度 $X_{dep} \leq X_{t2}$ 时,有

$$X_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}(\varphi_s - V_{BS})}{qN_p} + \frac{N_p - N_s}{N_p}x_{t1}^2} \quad (3)$$

$$\varphi_s = 2\varphi_i = \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_s}{n_i}$$

代入 $V_{BS} = V_{BX}$ 时, $X_{dep} = X_{t2}$ 可得

$$V_{BX} = \varphi_s - \frac{qN_p x_{t2}^2 - q(N_p - N_s)x_{t1}^2}{2\epsilon_{Si}} \quad (4)$$

$|V_{BS}| \leq |V_{BX}|$ 时,耗尽区电荷

$$Q_B = qX_{dep}N_p - q(N_p - N_s)x_{t1}$$

$$= \sqrt{2\epsilon_{Si}qN_p(\varphi_s - V_{BS}) + q^2(N_p - N_s)N_p x_{t1}^2} - q(N_p - N_s)x_{t1}$$

$$V_{th} = V_{th0} + \left(\frac{Q_B(V_{BS})}{c_{ox}} - \frac{Q_B(V_{BS}=0)}{c_{ox}} \right)$$

$$= V_{th0} + \gamma_p (\sqrt{\varphi_s - V_{BS} + U_x} - \sqrt{\varphi_s + U_x}) \quad (5)$$

$$\text{其中 } \gamma_p = \frac{\sqrt{2\epsilon_{Si}qN_p}}{c_{ox}} \quad U_x = \frac{q(N_p - N_s)x_{t1}^2}{2\epsilon_{Si}}$$

当 $|V_{BS}| > |V_{BX}|$ 时,

$$\begin{aligned} Q_B &= \sqrt{2\epsilon_{Si}qN_p(\varphi_s - V_{BX}) + q^2(N_p - N_s)N_p x_{t1}^2} - q(N_p - N_s)x_{t1} \\ &\quad + \sqrt{2\epsilon_{Si}qN_{sub}(\varphi_s - V_{BS})} - \sqrt{2\epsilon_{Si}qN_{sub}(\varphi_s - V_{BX})} \\ V_{th} &= V_{th0} + \left(\frac{Q_B(V_{BS})}{c_{ox}} - \frac{Q_B(V_{BS} = 0)}{c_{ox}} \right) \\ &= V_{th0} + \gamma_p(\sqrt{\varphi_s - V_{BX} + U_x} - \sqrt{\varphi_s + U_x}) + \gamma_{sub}(\sqrt{\varphi_s - V_{BS}} - \sqrt{\varphi_s - V_{BX}}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\gamma_{sub} = \frac{\sqrt{2\epsilon_{Si}qN_{sub}}}{c_{ox}}$$

如果在 $|V_{BS}| \leq |V_{BX}|$ 和 $|V_{BS}| > |V_{BX}|$ 时开启电压分别采用(5)和(6)式, V_{th} 对 V_{BS} 的导数将在 $V_{BS} = V_{BX}$ 处不连续, 这不仅与事实不符而且在电路模拟中会产生不收敛问题。为了解决这个问题, 将(6)式改写为:

$$\begin{aligned} V_{th} &= V_{th0} + \gamma_p(\sqrt{\varphi_s - V_{BS} + U_x} - \sqrt{\varphi_s + U_x}) \\ &\quad + \gamma_p(\sqrt{\varphi_s - V_{BX} + U_x} - \sqrt{\varphi_s - V_{BS} + U_x}) + \gamma_{sub}(\sqrt{\varphi_s - V_{BS}} - \sqrt{\varphi_s - V_{BX}}) \end{aligned} \quad (6')$$

将(6')式的后两项在 V_{BX} 处展开, 并保留一阶小量, 即

$$\begin{aligned} \sqrt{\varphi_s - V_{BS} + U_x} &= \sqrt{\varphi_s - V_{BX} + U_x} - \frac{V_{BS} - V_{BX}}{2\sqrt{\varphi_s - V_{BX} + U_x}} \\ \sqrt{\varphi_s - V_{BS}} &= \sqrt{\varphi_s - V_{BX}} - \frac{V_{BS} - V_{BX}}{2\sqrt{\varphi_s - V_{BX}}} \end{aligned}$$

代入(6')式

$$V_{th} = V_{th0} + \gamma_p(\sqrt{\varphi_s - V_{BS} + U_x} - \sqrt{\varphi_s + U_x}) + \gamma_t(V_{BS} - V_{BX}) \quad (7)$$

其中

$$\gamma_t = \frac{\gamma_p}{2\sqrt{\varphi_s - V_{BX} + U_x}} - \frac{\gamma_{sub}}{2\sqrt{\varphi_s - V_{BX}}}$$

(7)式与(5)式相比, 仅多了一项, 现引入函数 f , 将(5)与(7)统一为一个公式

$$V_{th} = V_{th0} + \gamma_p(\sqrt{\varphi_s - V_{BS} + U_x} - \sqrt{\varphi_s + U_x}) + \gamma_t f \quad (8)$$

$$f = V_{BS} - (f_t + \sqrt{f_t^2 - V_{BS}V_{BX}}) \quad f_t = 1/2[V_{BS} + (1 + \delta)V_{BX}]$$

式中 δ 为光滑系数。它表征函数 f 在 V_{BX} 处过渡的陡度。若 δ 取为 0, (8)式实际上就退化到(5)和(7)式两个分列的公式。 δ 越小, f 在 V_{BX} 过渡越陡。引入 δ 实际上可更好地表征杂质浓度的缓变过程。典型地, 对于理想的准 δ 分布, δ 应取较小值, 如 0.05。

f 与 V_{BS} 的关系如图 2 所示。对于不同的 δ , f 在 V_{BX} 附近以不同的陡度过渡。 $|V_{BS}| < |V_{BX}|$ 时, $f = 0$ 即退化到(5)式。当 $|V_{BS}| > |V_{BX}|$ 时, $f = V_{BS} - V_{BX}$, 即退化到(7)式。而在 $|V_{BX}|$ 附近, f 处在过渡区。图 2 以 NMOS 为例, V_{BS}, V_{BX} 均为负值。可见, f 的引入较好地统一了公

式(5)和(7).

对于短沟道器件,(8)式应计入短沟道效应及 DIBL 效应的影响. 总的开启电压表达式将为:

$$V_{th} = V_{th0} + \gamma_p (\sqrt{\varphi_s - V_{BS}} + U_x - \sqrt{\varphi_s + U_x}) + \gamma_l f - \Delta V_{th} \quad (9)$$

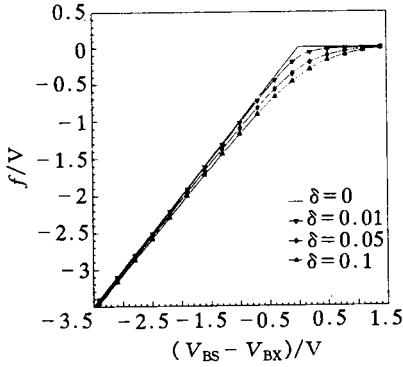


图 2 函数 f 与衬偏电压的关系

$$\begin{aligned} \Delta V_{th} &= D_{vt0} [(2(V_{bi} - \varphi_s) + V_{DS}) \exp(-D_{vt1}L/l) \\ &\quad + \sqrt{(V_{bi} - \varphi_s)(V_{bi} - \varphi_s + V_{DS})} \exp(-D_{vt1}L/2l)] \quad (10) \\ l &= \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} X_{dep} T_{ox}}{\epsilon_{ox}} (1 - D_{vt2} V_{BS})} \end{aligned}$$

式中 V_{bi} 为 pn 结内建电势; D_{vt0} 、 D_{vt1} 、 D_{vt2} 为拟合参数, 含义同文献[4]. 从(6)式可以看出, $|V_{BS}|$ 上升使 l 上升而 ΔV_{th} 也上升, 即 V_{th} 下降, 这与衬偏效应相反, 因而在短沟下削弱了衬偏效应.

3 参数提取与公式验证

为了验证上述公式的准确性, 将模型公式(9)与器件模拟程序 MEDICI^[6]的结果比较. 用 MEDICI 模拟不同沟长, 不同掺杂分布器件在不同 V_{BS} 下的 I_{DS} - V_{GS} 曲线. 此时 V_{DS} 取小电压(0.05V). 从 I_{DS} - V_{GS} 曲线提取不同 V_{BS} 下的开启电压值. 这样得到多组 V_{th} - V_{BS} 关系.

掺杂分布的浓度和深度参数由实际工艺给定. 公式(9)中主要参数有 V_{th0} 、 γ_p 、 γ_{sub} (或 γ_1) 以及 δ . 这些参数只与器件的掺杂分布相关, 因而可以适用很宽的沟长范围. 使用长沟道器件的 V_{th} - V_{BS} 关系提取这些参数, 此时 ΔV_{th} 几乎为零. 从 V_{th} - V_{BS} 关系, 在较小 V_{BS} 时提取 γ_p , 此时 V_{th} 与 γ_{sub} 无关. 再在较大 V_{BS} 时提取 γ_{sub} (或 γ_1). 对于参数 δ , 它是一个和掺杂工艺相关的经验参数, 表征了注入杂质变化的陡度. 它可以从 V_{th} - V_{BS} 关系曲线的弯曲度经验地加以提取. 通过用 MEDICI 模拟多种不同的注入杂质分布, 我们得出了一个实用的经验公式来确定 δ . 即:

$$\delta = \frac{20 h}{(N_p - N_{sub})/N_{sub}} \quad (N_p \geq 2N_{sub})$$

其中 h 为与深注入杂质高斯分布有关的特征参数. 限制条件($N_p \geq 2N_{sub}$)的加入是为了保证上式在 $N_p = N_{sub}$ 时不出错. 在实际工艺中, 该条件一般都是能满足的.

图 3(a)是不同沟长, 同种掺杂工艺的 MOSFET 开启电压与 V_{BS} 关系曲线. 其中点为用器件模拟程序 MEDICI 得到的数据, 线为用公式(9)计算的结果. 图 3(b)为用传统模型, 即

公式(2)计算的结果与器件模拟结果的比较. 本文模型计算的 V_{th} 与沟长 L 的关系的比较见于图 4. 从器件模拟的结果或从公式(5)~(9)都可以看出, 非均匀衬底掺杂的 MOS 器件的开启电压已不再与 $\sqrt{\varphi_s - V_{BS}}$ 成线性关系.

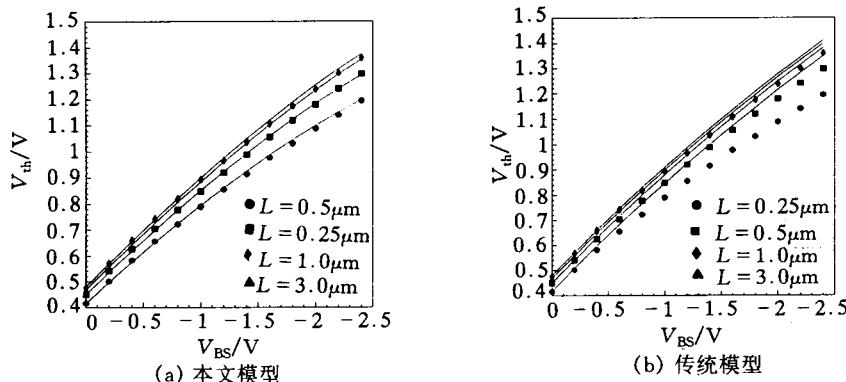


图 3 模型计算与器件模拟结果的比较

图 3 和图 4 中均采用了同一套参数 γ_p, γ_{sub} (或 γ_1), δ 来描述不同沟长, 同种工艺条件的器件. 可以看到本文提出的模型与器件模拟的结果, 无论

是长沟器件还是深亚微米器件都有较好的拟合. 而使用公式(2), 即使在长沟下也有较大误差. 其原因是在较低 V_{BS} 下提取衬偏效应系数时耗尽区平均掺杂浓度较高, 因而应用于较大 V_{BS} 时, 夸大了此时的平均掺杂浓度, 从而夸大了衬偏效应. 本模型采用了不同衬偏效应系数来反应耗尽区平均掺杂浓度的变化, 较为准确地预测了非均匀衬底器件的衬偏效应.

在不同掺杂工艺条件下, 利用 δ 的不同取值, 可以表征注入杂质在深度方向的变化情况. 图 5 是掺杂浓度 N_p, N_{sub}, N_s 取值相同, 但从 N_p 下降到 N_{sub} 时取三种不同缓变过程的器件的计算结果与器件模拟结果的比较.

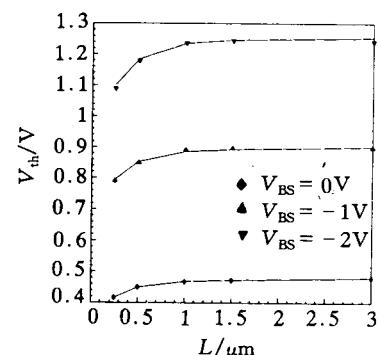


图 4 开启电压与沟长关系的比较

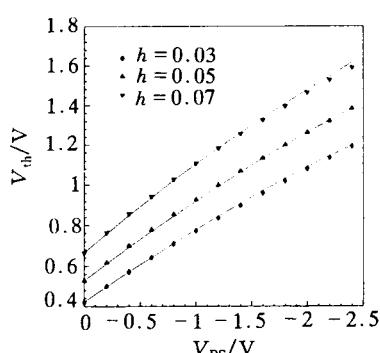


图 5 不同杂质分布器件, 模型计算与器件模拟的比较

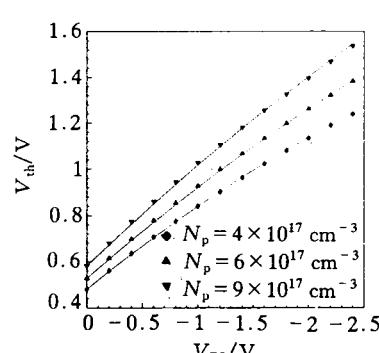


图 6 不同杂质浓度器件, 模型计算与器件模拟的比较

此三种器件离子注入杂质取相同峰值,但有不同的高斯分布特征参数 h ,即不同的 δ . 图 6 为不同峰值浓度的几种器件的计算结果验证. 从图 5 和图 6 可看出,本模型对于不同的掺杂工艺都能取得较好的结果.

4 结论

本文提出了一个新的衬偏效应模型,它考虑了 MOSFET 的非均匀衬底掺杂以及深亚微米下短沟道效应的影响,适用于很宽的沟长范围和多种不同工艺的器件.

参 考 文 献

- [1] J. H. Huang *et al.*, Bsim3 Manual (Version 2.0), U. C. Berkeley, 1994, 14.
- [2] J. A. Power *et al.*, IEEE Trans. Computer-Aided Design, 1992, 11(11): 1418.
- [3] T. A. Fjeldly *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1993, 40(1): 137.
- [4] Z. H. Liu *et al.*, IEEE Trans Electron Devices, 1993, 40(1): 86.
- [5] N. D. Arora *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1994, 41(6): 988.
- [6] MEDICI Version 2.0, Technology Modeling Associates, Inc., 1994.

Substrate-Bias Effect and New Threshold Voltage Model of Deep-Submicron MOSFET's With Nonuniform Doping Substrate

Zhang Wenliang and Yang Zhilian

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Received 8 September 1996, revised manuscript received 31 December 1996

Abstract A simple substrate-bias dependent threshold voltage model of deep-submicron MOSFET with nonuniform doping substrate is presented. In this model, a new simplified substrate doping profile according to the channel implantation is assumed. We apply a hyperbola function to avoid the discontinuous problem at the boundary between different doping regions. By adjusting the parameters δ , the real gradual doping profile in the devices can be obtained. A substrate-bias dependent formula of short channel effect is also introduced which describes the reducing substrate-bias effect in deep-submicron devices. A good fitting has been achieved between the model and numerical simulation.

EEACC: 2560B, 2560R, 2570D