

衬底正偏的 MOSFET 的近似模型

陈 萍 李志坚 刘理天

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

摘要 本文针对衬底正偏的 MOSFET 的解析模型进行了讨论. 在已有 MOSFET 理论上, 仅引入一个参数 ξ , 便得到了全偏压范围的 MOSFET 的解析表达式的通式. 当 $\xi=1$ 时, 该表达式与已知的衬底负偏的 MOSFET 的表达式相同; 当 $\xi=0.8$ 时, 可得到衬底正偏的 MOSFET 的近似解析式. 实验结果验证了该模型的正确性.

EEACC: 2560R

1 引言

我们知道, 衬底负偏与零偏的 MOSFET 的解析模型已基本趋于成熟^[1]. 当衬底正偏但不足以使衬源结导通时, MOSFET 便工作于衬底正偏的情形. 已有研究表明随着 MOSFET 的栅长逐渐缩短, 工作于正向衬偏的 MOSFET 具有许多优点, 如有效沟道长度变宽, 漏致势垒降低效应减小 (DIBL) 等等. 应用正的衬压还可在原有的 Scaling Down 原则基础上进一步缩小栅长^[2]. 而到目前为止, 对衬底正偏的 MOSFET 的近似表达式还未有人进行过研究. 对衬底正偏的 MOSFET 的研究可进一步完善 MOSFET 的理论体系, 推进衬底正偏的 MOSFET 的实际应用步伐. 同时, 这对横向三极管的研究也有重要的意义, 因为 MOS 结构用于横向三极管状态时源衬结导通^[3,4]相当于 MOSFET 的衬底正偏.

本文针对衬底正偏的 MOSFET 的近似模型进行了讨论. 在已有 MOSFET 的解析模型及大量实验的基础上, 给出了全偏压范围的 MOSFET 的解析表达式的通式. 当 ξ 取不同值时, 该模型可正确模拟衬底正偏与负偏的 MOSFET 的输出特性. 下面我们从理论及实验两个方面来说明 MOSFET 在衬底正偏情形下的解析表达式.

2 近似表达式的推导

为近似得到长沟 MOSFET 的输出特性, 已知的经常应用的表达式为

陈 萍 1967 年生, 硕士, 博士研究生, 研究方向为 BiCMOS 电路及工艺、常温与低温微电子器件的数值模拟及模型建立、新型器件的研制、半导体物理等

李志坚 中科院院士, 教授, 博士生导师, 从事微电子学、半导体器件及物理等领域的研究

刘理天 1947 年生, 教授, 从事半导体器件、IC 和固体传感器的研究与开发

1995 年 3 月 30 日收到初稿, 1995 年 8 月 16 日收到修改稿

$$I = \frac{W\mu_{\text{eff}}C_{\text{OX}}}{L} \left[(V_{\text{GS}} - V_{\text{T}})V_{\text{DS}} - \frac{1}{2}V_{\text{DS}}^2 \right] \quad V_{\text{DS}} \leq V_{\text{DSAT}} \quad (1a)$$

$$I = \frac{W\mu_{\text{eff}}C_{\text{OX}}}{L} (V_{\text{GS}} - V_{\text{T}})^2 \quad V_{\text{DS}} \geq V_{\text{DSAT}} \quad (1b)$$

$$V_{\text{T}} = V_{\text{FB}} + 2\Phi_{\text{F}} + \gamma \sqrt{2\Phi_{\text{F}} + V_{\text{SB}}}$$

为得到短沟 MOSFET 的输出特性, 常应用的表达式为

$$I = \frac{W\mu_{\text{eff}}C_{\text{OX}}}{L} \left[(V_{\text{GS}} - V_{\text{T}})V_{\text{DS}} - \frac{1}{2}(1 + \delta)V_{\text{DS}}^2 \right] \quad V_{\text{DS}} \leq V_{\text{DSAT}} \quad (2a)$$

$$I = \frac{W\mu_{\text{eff}}C_{\text{OX}}(V_{\text{GS}} - V_{\text{DSAT}})^2}{2L_{\text{eff}}(1 + \delta)} \quad V_{\text{DS}} \geq V_{\text{DSAT}} \quad (2b)$$

以上两式可正确模拟衬底零偏及负偏的 MOSFET 的输出特性. 但将(2)式直接应用于衬偏为正的短沟 MOSFET 时, 模拟结果误差较大, 见图 4. 为得到与实验相符的模型, 我们进行了如下推导:

由参考文献[1], MOSFET 的近精确表达式为

$$I = \frac{W\mu_{\text{eff}}C_{\text{OX}}}{L} \left[(V_{\text{GS}} - 2\Phi_{\text{F}} - V_{\text{FB}})V_{\text{DS}} - \frac{1}{2}V_{\text{DS}}^2 - f(V_{\text{DS}}) \right] \quad (3)$$

$$f(V_{\text{DS}}) = \frac{2}{3}\gamma \left[(2\Phi_{\text{F}} + V_{\text{DS}} + V_{\text{SB}})^{3/2} - (2\Phi_{\text{F}} + V_{\text{SB}})^{3/2} \right] \quad (4)$$

其中

$$\gamma = \frac{\sqrt{2qN_{\text{SUB}}\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}}{C_{\text{OX}}}$$

下面继续对(4)式进行近似. 在线性区 $f(V_{\text{DS}})$ 可在 $(2\Phi_{\text{F}} + V_{\text{SB}})$ 处展成泰勒级数形式, 取一次项可得:

$$f1(V_{\text{DS}}) = \gamma(2\Phi_{\text{F}} + V_{\text{SB}})^{1/2}V_{\text{DS}} \quad (5)$$

代入(3)式即可得到 MOSFET 的输出特性表达式(1). 取泰勒级数的二次项可得

$$f2(V_{\text{DS}}) = (2\Phi_{\text{F}} + V_{\text{SB}})^{1/2}V_{\text{DS}} + \frac{\gamma}{2\sqrt{2\Phi_{\text{F}} + V_{\text{SB}}}}V_{\text{DS}}^2$$

代入(3)式即可得到 MOSFET 的输出特性表达式(2), 式中

$$\delta = \frac{\gamma}{2\sqrt{2\Phi_{\text{F}} + V_{\text{SB}}}}$$

直接应用此式, 与实验值相比误差较大^[1]. 根据经验 Y. P. Tsividis 对上式进行了修改^[1]. 得到

$$\delta = \frac{\gamma}{2\sqrt{1.0 + 2\Phi_{\text{F}} + V_{\text{SB}}}}$$

实际应用证明, 应用此式可使总误差最小. 为此我们仍沿用此经验式, 给出 $f2(V_{\text{DS}})$ 为:

$$f2(V_{\text{DS}}) = \gamma(2\Phi_{\text{F}} + V_{\text{SB}})^{1/2}V_{\text{DS}} + \frac{\gamma}{2\sqrt{1.0 + 2\Phi_{\text{F}} + V_{\text{SB}}}}V_{\text{DS}}^2 \quad (6)$$

图 1 为 $f(V_{\text{DS}})$ 与 $f1(V_{\text{DS}})$ 及 $f2(V_{\text{DS}})$ 的比较图(实线为(4)式, 虚线为(6)式, 点划线为

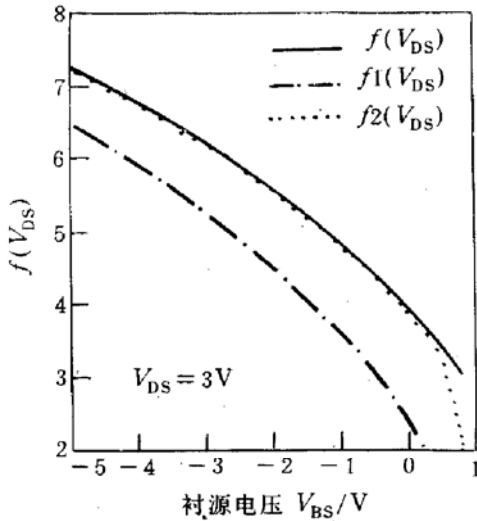


图 1 $f(V_{DS})$ 与近似式的比较图

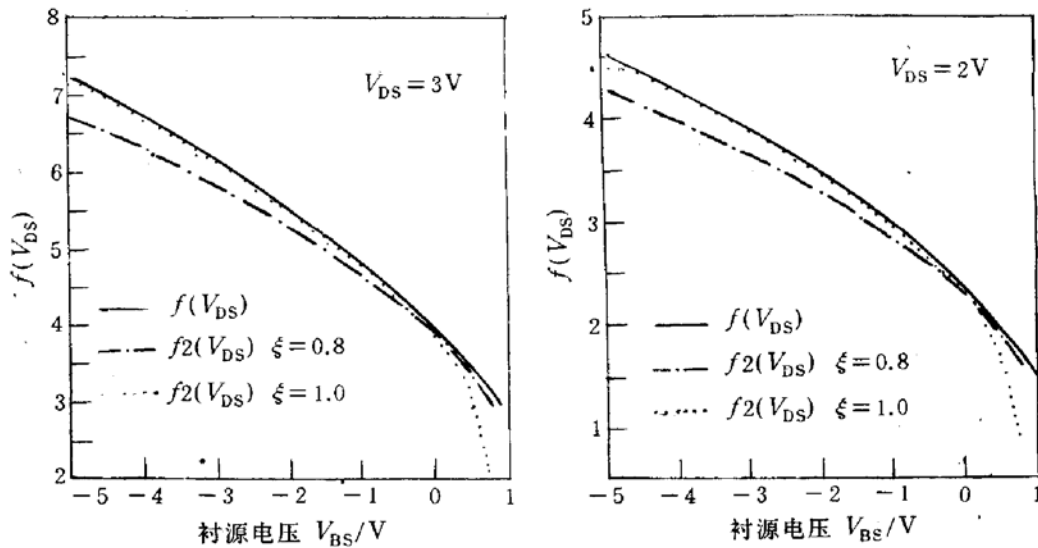
(5)式). 由图可知, $f_2(V_{DS})$ 比 $f_1(V_{DS})$ 更接近实际公式 $f(V_{DS})$. 显然这是因为 $f_1(V_{DS})$ 是一次项的近似结果, 而 $f_2(V_{DS})$ 为二次项的近似结果. 图 1 给我们的另一个结论为当 V_{BS} 为负时, $f_2(V_{DS})$ 几乎与 $f(V_{DS})$ 相等. 但当衬底正偏即 V_{BS} 为正时, 用 $f_2(V_{DS})$ 近似仍有较大的误差.

为使 $f_2(V_{DS})$ 在全偏压范围内近似的 $f(V_{DS})$, 经反复计算引入一因子 ξ , 令:

$$f_1(V_{DS}) = \gamma(2\Phi_F + \xi V_{SB})^{1/2}V_{DS}$$

$$f_2(V_{DS}) = \gamma(2\Phi_F + \xi V_{SB})^{1/2}V_{DS} + \frac{\gamma}{2\sqrt{1.0 + 2\Phi_F + \xi V_{SB}}}V_{DS}^2 \quad (7)$$

当源衬反偏取 $\xi=1.0$ (即(6)式), 当源衬正偏取 $\xi=0.8$. 模拟结果见图 2. 图 2 证明, 无论 V_{DS} 取何值, 当 V_{BS} 小于



(a)漏源电压 $V_{DS}=3V$

(b)漏源电压 $V_{DS}=2V$

图 2 $f(V_{DS})$ 与 $f_2(V_{DS})$ 的比较图

零, 取 $\xi=1.0$ 时(虚线)更趋近 $f(V_{DS})$; 当 V_{BS} 大于零, 取 $\xi=0.8$ (点划线)时更趋近 $f(V_{DS})$.

由以上分析可见, 要得到 MOSFET 全偏压范围的近似式, 只要引入因子 ξ , 对通常的 MOSFET 的近似表达式进行简单的修正, 即可得到.

3 实验验证

实验样品为无阱 NMOSFET, 由清华大学微电子所制造. 几何宽长比为 20/2. 测试仪器为 HP4061A 及其它辅助设备. 测试温度为室温.

测得的实验结果见图 3. 为得到该样品有效工艺参数, 我们对该样品进行了参数提取, 提取时考虑了短沟效应. 所用公式如下:

$$I_{drif} = \frac{W\mu_{eff}C_{OX}}{L_{eff}}[(V_{GS} - \hat{V}_T)V_{DS} - \frac{1}{2}(1 + \delta)V_{DS}^2] \quad V_{DS} \leq V_{DSAT}$$

$$I_{\text{drif}} = \frac{W\mu_{\text{eff}}C_{\text{OX}}}{L_{\text{eff}}}V_{\text{DSAT}}^2 \quad V_{\text{DS}} \geq V_{\text{DSAT}}$$

其中

$$\begin{aligned} \mu_{\text{eff}} &= \frac{\mu_0}{1 + \theta(V_{\text{DS}} - V_{\text{T}}) + \theta_{\text{B}}V_{\text{SB}}} \\ V_{\text{DSAT}} &= \frac{V_{\text{GS}} - \hat{V}_{\text{T}}}{1 + \delta} \\ \delta &= \frac{\gamma}{2\sqrt{1.0 + 2\Phi_{\text{F}} + \xi V_{\text{SB}}}} \\ V_{\text{T}} &= V_{\text{TO}} + \gamma(\sqrt{2\Phi_{\text{F}} + \xi V_{\text{SB}}} - \sqrt{2\Phi_{\text{F}}}) \\ V_{\text{TO}} &= V_{\text{FB}} + 2\Phi_{\text{F}} + \gamma\sqrt{2\Phi_{\text{F}}} \\ \Phi_{\text{F}} &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{\text{SUB}}}{N_{\text{i}}} \\ \hat{V}_{\text{T}} &= V_{\text{T}} - \Delta V_{\text{TL}} + \Delta V_{\text{TW}} \\ \Delta V_{\text{TL}} &= \alpha_1 \frac{\epsilon_{\text{Si}}}{\epsilon_{\text{OX}}} \frac{d_{\text{OX}}}{L} \frac{l_{\text{s}} + l_{\text{d}}}{2} \gamma \sqrt{2\Phi_{\text{F}} + \xi V_{\text{SB}}} \\ l_{\text{s}} &= \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{qN_{\text{SUB}}} (\Phi_{\text{SB}} + V_{\text{SB}}) \right]^{1/2} \quad l_{\text{d}} = \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{qN_{\text{SUB}}} (\Phi_{\text{B}} + V_{\text{DB}}) \right]^{1/2} \\ \Phi_{\text{B}} &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{\text{SD}}N_{\text{SUB}}}{N_{\text{i}}^2} \\ \Delta V_{\text{TW}} &= \alpha_2 \pi \frac{\epsilon_{\text{Si}}}{\epsilon_{\text{OX}}} \frac{d_{\text{OX}}}{W} (2\Phi_{\text{F}} + \xi V_{\text{SB}}) \\ L_{\text{eff}} &= L - \left(\frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{qN_{\text{SUB}}} (V_{\text{DS}} - V_{\text{DSAT}}) \right)^{1/2} \\ \gamma &= \frac{\sqrt{qN_{\text{SUB}}\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}}{C_{\text{OX}}} \end{aligned}$$

W 为几何栅宽； V_{T} 为阈值电压； L 为几何栅长； V_{FB} 为平带电压； L_{eff} 为有效栅长； V_{DS} 为源漏电压； C_{OX} 为栅电容； V_{SB} 为衬源电涯； d_{OX} 为栅氧厚度； V_{DB} 为衬漏电压； V_{ms} 为金属-Si 接触电势； ΔV_{TW} 为沟道变窄引起 V_{T} 变化； μ_0 为表面迁移率常数； ΔV_{TL} 为沟道变短引起 V_{T} 变化； μ_{eff} 为表面有效迁移率； I_{drif} 为 MOS 漏端电流； Q_{SS} 为单位面积界面电荷； V_{DSAT} 为 MOS 饱和电压； γ 为体效应因子； l_{s} 为源衬势垒宽度； Φ_{F} 为强反型时表面势； l_{D} 为漏衬的势垒宽度； Φ_{B} 为源漏-衬内建势； N_{SUB} 为衬底掺杂浓度； ϵ_0 为真空介电常数； N_{SD} 为源漏掺杂浓度； ϵ_{Si} 为硅相对介电常数； N_{i} 为硅本征掺杂浓度； q 为热电动势 (0.0259V)； α_1 、 α_2 、 δ 、 θ 、 θ_{B} 、 ξ 为常系数。所应用的常系数的值见表 1, 2。

表 1 模型提取所用常系数

μ	θ	θ_{B}	α_1	α_2	W	kT/q	N_{SD}	d_{OX}	ξ	V_{ms}	Q_{SS}
650	0.026	0.026	1	1	20	0.026	10^{20}	2.0	1	-0.56	10^{10}

经提取得到如下参量：

表 2 提取得到参数

N_{SUB}	L_{eff}	V_{FB}	V_T	γ	Φ_F	δ	C_{OX}	Φ_B	μ_{eff}
5.8×10^{16}	0.79	-0.9	0.44	0.83	0.4	0.8	10^{-7}	0.98	479

图 3 中实线模拟所得到的衬底零偏的 MOSFET 输出特性曲线, 栅压从 0 到 3V 以 0.2V 为步长增加(以下各图同). 模拟结果基本与实验相符. 在以上得到的参数的基础上, 改变衬压, 使源衬结正偏. 在衬压为 0.5V、 ξ 为 1 时得到的模拟曲线及实验点如图 4, 误差较大. 改变参数 ξ 为 0.8, 得到的模拟结果如图 5 所示, 误差比图 4 要小得多. 图 6 为衬压等于 0.6V、 ξ 等于 0.8 时(此时源衬结尚未开启)模拟结果(实线)与实验值(点)的示意图. 两者相符甚好. 负衬压时的 MOSFET 的在此不在赘述, 见文献[1].

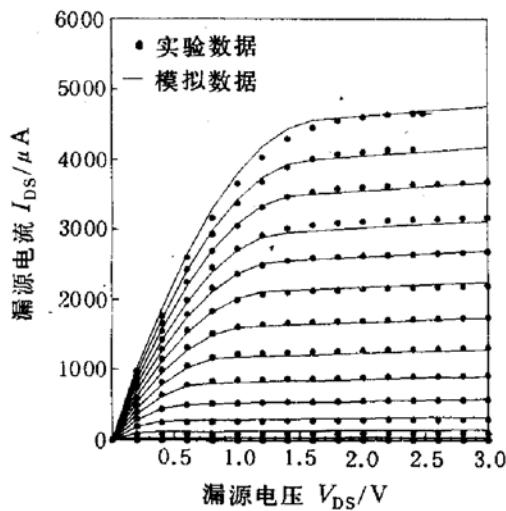


图 3 衬源电压 $V_{BS}=0V$
MOSFET 输出特性

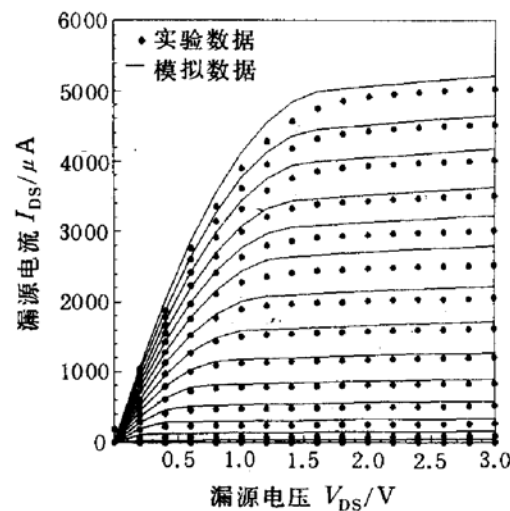


图 4 衬源电压 $V_{BS}=0.5V$
 $\xi=1.0$ MOSFET 输出特性

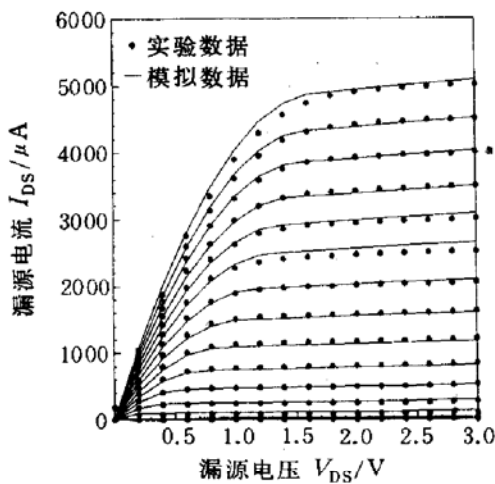


图 5 衬源电压 $V_{BS}=0.5V$
 $\xi=0.8$ MOSFET 输出特性

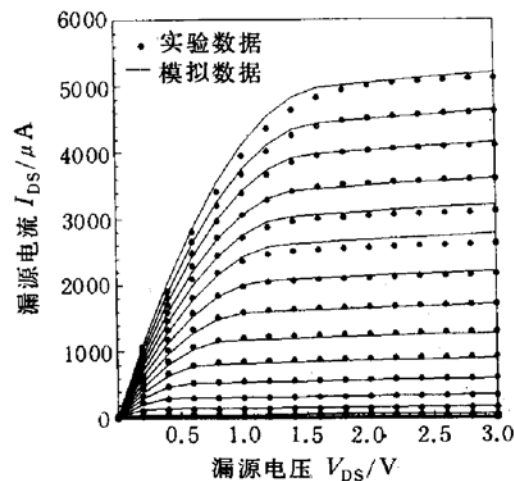


图 6 衬源电压 $V_{BS}=0.6V$
 $\xi=0.8$ MOSFET 输出特性

4 结论

本文以文献[1]为基础,引入参数 ξ ,得到了全偏压范围的 MOSFET 的解析表达式的通式. 当 $\xi=1$ 时,该表达式与已知的衬偏为负的 MOSFET 的表达式相同,当 $\xi=0.8$ 时,可得到衬底正偏的 MOSFET 的近似解析式. 实验结果验证了该模型的正确性.

衬底为反偏压	衬底为零偏压	衬底为正偏压
$\xi=1$	ξ 为任意值	$\xi=0.8$

参 考 文 献

- [1] Y. P. 希维迪斯, MOS 晶体管的工作原理及建模, 西安: 西字交通大学出版社, 1989, 第四章.
- [2] Kazuya Masu *et al.*, "Temperature Scaling MOSFET: Design and Operation", International Conference on Advanced Microelectronic Devices and Processing, Japan, 1994, P2487~2496.
- [3] S. Verdonckt-Vandebroek *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1994, **38**(11):285~292.
- [4] 陈萍, 等, 电子学报, 1995, **23**(11):11.

Analytic Model of MOSFET Under Positive Substrate Bias

Chen Ping, Li Zhijian and Liu Litian

(Microelectronics of Institute, Tsinghua University, Beijing 100084)

Received 30 March 1995, revised manuscript received 16 August 1995

Abstract In this paper, We emphasize the analytic model of MOSFET under positive substrate-source bias. Based on conventional theory of MOSFET, we have introduced a parameter ξ in the general expression for MOSFET characteristics. It can be used in both negative bias and positive substrate bias: $\xi=1$ for negative bias and $\xi=0.8$ for positive bias. The validity of the model is proven by experimental results.

EEACC: 2560R