

MOSFET 衬底电流模型在深亚微米尺寸下的修正

孙自敏 刘理天 李志坚

(清华大学微电子所 北京 100084)

摘要 建立精确的衬底电流模型是分析 MOSFET 器件及电路可靠性和进行 MOSFET 电路设计所必需的。在分析载流子输运的基础上建立了一个常规结构深亚微米 MOSFET 衬底电流的解析模型，模型公式简单。对模型进行了验证，研究了衬底掺杂浓度与栅氧化层厚度对拟合因子的影响，并分析了模型中拟合因子的物理意义。

关键词：MOSFET，衬底电流，深亚微米

EEACC: 2560B, 2560R

文章编号：0253-4177(2000)02-0151-05

Modification of MOSFET's Substrate Current Model in Deep Submicrometer Regime

SUN Zi-min, LIU Li-tian and LI Zhi-jian

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Received 12 October 1998, revised manuscript received 12 April 1999

Abstract For the reliability analysis and the design of MOSFET's circuits, it is necessary to model the substrate current accurately. This paper establishes a substrate current model of conventional deep-submicrometer MOSFET's on the base of carrier transport. Non-local transport is considered in the model. The model is simple and proved to fit the experiments very well. The influences of substrate doping concentration and gate oxide thickness to fitting factors are also presented. The physical meanings of the fitting factors are analyzed.

Key Words: MOSFET, Substrate Current, Deep Submicrometer

EEACC: 2560B, 2560R

Article ID: 0253-4177(2000)02-0151-05

孙自敏 男, 1967 年出生, 博士研究生, 主要从事深亚微米器件的结构、特性及器件物理的研究。

刘理天 男, 1947 年出生, 教授, 博士生导师, 一直从事半导体器件、集成电路和传感器的研究。

李志坚 男, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 从事半导体器件物理和微电子技术研究。

1998-10-12 收到, 1999-04-12 定稿

1 引言

随着 MOSFET 器件尺寸的缩小,沟道中横向电场增大,碰撞电离加剧,从而引起衬底电流的增加。碰撞电离所产生的载流子还可能注入至栅氧化层中而影响 MOSFET 器件和电路的可靠性,所以衬底电流的大小成为 MOSFET 器件寿命长短的重要尺度^[1]。另外,衬底电流又会带来额外的功耗。因此,建立精确的衬底电流模型不仅能帮助评估 MOSFET 器件及电路的可靠性,同时又能精确计算 MOSFET 电路功耗,指导 MOSFET 电路的设计。长沟及亚微米 MOSFET 的衬底电流模型已有不少报道^[2,3],由于深亚微米 MOSFET 中所存在的非稳态及非本地输运性质,这些模型并不适用于深亚微米 MOSFET。本文通过分析常规结构深亚微米 MOSFET 中的非稳态和非本地输运性质,建立了一个简单的常规结构深亚微米 MOSFET 衬底电流的解析模型,对模型进行了验证,并分析了其中拟合因子的物理意义。

2 模型及推导

我们知道,碰撞电离率 α 的表达式为

$$\alpha = A_i \exp(-B_i/E) \quad (1)$$

式中 E 为横向电场; A_i 和 B_i 是与碰撞电离率相关的参数。对常规 MOSFET, 在饱和区, 沿沟道的饱和区间对碰撞电离率进行积分可得^[4]

$$I_{\text{sub}} = I_{\text{ch}} A_i \int_0^{l_{\text{sat}}} \exp(-B_i/E) dy \quad (2)$$

式中 I_{ch} 是沟道电流; l_{sat} 是沟道饱和区间的长度。对沟道饱和区间进行二维分析, 得到这段区间中电势 $V(y)$ 及横向电场 $E(y)$ 分布^[4]:

$$V(y) = V_{\text{sat}} + l_d E_c \sinh(y/l_d) \quad (3)$$

$$E(y) = E_c \cosh(y/l_d) = \sqrt{\left(\frac{V(y) - V_{\text{sat}}}{l_d}\right)^2 + E_c^2} \quad (4)$$

式中 E_c 是载流子速度饱和的临界电场; V_{sat} 是饱和电压。当器件处于开启时 V_{sat} 的物理表达式为^[5]

$$V_{\text{sat}} = \frac{(V_{\text{gs}} - V_t) E_c L_{\text{eff}}}{(V_{\text{gs}} - V_t) + E_c L_{\text{eff}}} \quad (5)$$

其中 V_{gs} 是器件的栅源电压; V_t 是用外推法得到的 MOSFET 的开启电压, l_d 是一个特征长度^[6]

$$l_d = 0.22 T_{\text{ox}}^{0.33} X_j^{0.5} \quad (6)$$

式中 T_{ox} 为栅氧化层厚度; X_j 是源漏结深。

将式(4)代入(2)并进行积分可得

$$I_{\text{sub}} = I_{\text{ch}} \frac{A_i l_d E_m^2}{B_i} \times \frac{\exp(-B_i/E_m)}{\sqrt{E_m^2 - E_c^2}} \quad (7)$$

式(7)中 E_m 是漏端附近沟道中的最大电场^[6]

$$E_m = \sqrt{\left(\frac{V_{\text{ds}} - V_{\text{sat}}}{l_d}\right)^2 + E_c^2} \approx \frac{V_{\text{ds}} - V_{\text{sat}}}{l_d} \quad (8)$$

V_{ds} 是源漏电压。这样式(7)可简化为

$$I_{\text{sub}} = I_{\text{ch}} \frac{A_i}{B_i} (V_{\text{ds}} - V_{\text{sat}}) \exp\left[-\frac{l_d B_i}{V_{\text{ds}} - V_{\text{sat}}}\right] \quad (9)$$

短沟道 MOSFET 中载流子的输运性质与长沟道 MOSFET 很不相同, 短沟道 MOSFET 中存在着较严重的非本地输运性质。非本地输运性质对 MOSFET 器件的衬底电流有很大的影响。因此必须将深亚微米 MOSFET 中的非本地输运性质考虑到它的衬底电流模型中去。然而, 深亚微米 MOSFET 中的非本地输

运比较复杂,它不但与沟道中的电场强度有关,而且与沟道中电场的分布密切相关,很难对其进行细致的表征。为此采用拟合项的方法来表示深亚微米 MOSFET 中的非本地输运,用修正项

$$F = [1 - \exp(-L_{\text{eff}}/L_e)]^\lambda \quad (10)$$

来反映非本地输运对 MOSFET 衬底电流的影响。其中 L_e 是与非本地输运性质相关的一个特征长度, λ 是一个特定参数。 L_e 和 λ 可以用拟合方法得到。图 1 给出了 λ 取不同值时 F 随 L_{eff}/L_e 的变化曲线。当 L_{eff} 比 L_e 大得多, F 的值近似为 1, 相当于对于长沟 MOSFET 来说不再需要考虑非本地输运的影响。当 L_{eff} 小于 L_e 时, 非本地输运的影响变得显著, 此时随 L_{eff} 的减小非本地输运更为突出, F 的值按指数关系下降。

用式(10)对衬底电流模型公式(9)进行修正, 得到深亚微米 MOSFET 的衬底电流模型

$$I_{\text{sub}} = I_{\text{ch}} \frac{A_i}{B_i} (V_{\text{ds}} - V_{\text{sat}}) \exp \left[\frac{-l_d B_i}{V_{\text{ds}} - V_{\text{sat}}} \right] [1 - \exp(-L_{\text{eff}}/L_e)]^\lambda \quad (11)$$

3 结果与讨论

我们通过实测结果和模拟结果与模型值的比较, 对所建立的深亚微米 MOSFET 衬底电流模型公式(11)进行了验证。模型中 A_i 和 B_i 的值与长沟道 MOSFET 碰撞电离率公式中的常数 A_i 和 B_i 取值相同, 对常规 NMOSFET 有^[6]: $A_i = 2 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$, $B_i = 1.7 \times 10^6 \text{ V/cm}$ 。载流子速度饱和临界电场 $E_c = 4 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 。

图 2 给出了 $L_{\text{eff}} = 0.35 \mu\text{m}$ 的常规 NMOSFET 衬底电流的实测结果与模型值的比较。NMOSFET 的栅氧化层厚度 T_{ox} 为 5.3 nm , 源漏结深 $X_j = 0.18 \mu\text{m}$, 其阈值电压 $V_t = 0.25 \text{ V}$ 。图中的点是实测结果, 实线是根据本模型计算所得到的曲线, 计算时通过拟合得到 L_e 的值取为 $0.825 \mu\text{m}$, λ 的值取 3。为了说明非本地输运性质对器件衬底电流的影响, 图中虚线给出了长沟道 MOSFET 衬底电流模型(未考虑非本地输运的影响)所给出的结果, 可以看出长沟道 NMOSFET 衬底电流模型给出的结果比实测结果大得多。本模型给出的曲线与实测结果能较好地吻合。图 3 是沟道长度为 $0.5 \mu\text{m}$ 的常规 NMOSFET 衬底电流的模拟结果与本模型计算结果的比较, 图中的点为衬底电流的 MEDICI 模拟结果, 实线是本模型的计算结果, 其中拟合因子 L_e 和 λ 分别为 $0.99 \mu\text{m}$ 和 2.4。本模型与模拟结果较好地吻合。

衬底掺杂浓度和栅氧化层厚度对 MOSFET 的衬底电流有着较大的影响, 因此它们对拟合因子 L_e 和 λ 也会产生影响。为此研究和分析了拟合因子 L_e 及 λ 随衬底掺杂浓度和栅氧化层厚度的变化。采用器件模拟的手段, 用 MEDICI 器件模拟软件对不同衬底掺杂浓度以及不同栅氧厚度的短沟道 MOSFET 进行模拟, 得到它们的衬底电流和沟道电流, 然后利用模型公式(11)进行模型参数提取, 从而得到不同衬底掺杂浓度下以及不同栅氧化层厚度下拟合因子 L_e 和 λ 的值。

表 1 给出了不同掺杂浓度下的拟合因子 L_e 和 λ 的拟合结果, 其中栅氧厚度为 5 nm , 取三种衬底掺杂浓度: 8×10^{16} 、 3×10^{17} 、 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。从表 1 可以看到, L_e 随衬底掺杂浓度的变化较小, 而 λ 却随着衬底掺杂浓度的增大而减小。通过分析可知, 随着衬底掺杂浓度的增大, 载流子在沟道中运动时受到的碰撞和散射增强, 载流子与晶格及杂质原子间的能量交换比较充分, 因此非本地输运现象较弱。

表 2 给出了不同栅氧厚度下拟合因子 L_e 和 λ 的提取结果, 其中衬底掺杂浓度为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 取三种栅氧厚度: 5 、 7 、 10 nm 。从表 2 可以看到, L_e 随栅氧厚度的变化较小, 随栅氧厚度的增大只有很微弱的下降。而 λ 随栅氧厚度的变化较大, λ 随着栅氧厚度的增大而减小。栅氧厚度为 5 nm 时 λ 的值为 2, 栅氧厚度增大

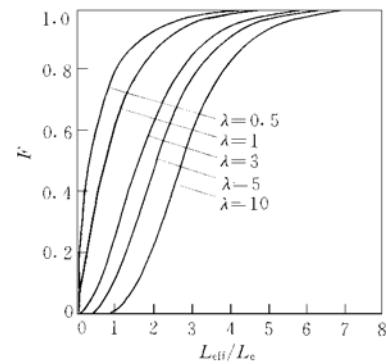


图 1 λ 取不同值时 F 随 L_{eff}/L_e 的变化曲线

FIG. 1 F versus L_{eff}/L_e at different λ values

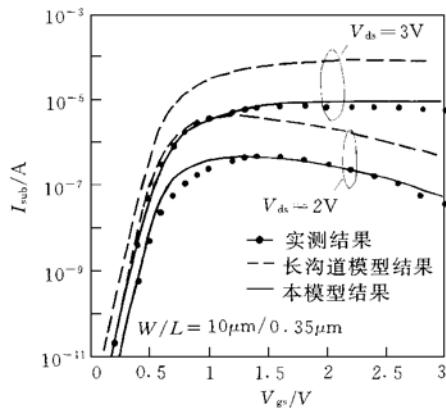


图 2 $L_{\text{eff}} = 0.35\mu\text{m}$ 的 NMOSFET 衬底电流的实测结果与模型值的比较

FIG. 2 Comparison between Experimental Results and Result from Eq. (11) for Substrate Current of NMOSFET at $L_{\text{eff}} = 0.35\mu\text{m}$

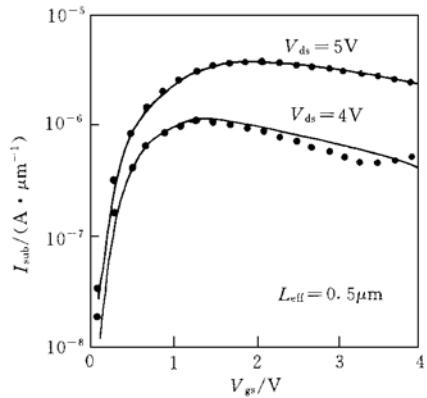


图 3 沟道长度为 $0.5\mu\text{m}$ 的常规 MOSFET 衬底电流的模拟结果与本模型计算结果的比较

FIG. 3 Comparison between Simulated Results from Eq. (9) and Result from Eq. (11)

为 10nm 时 λ 的值减小为 1.1. 分析可知, 随着栅氧厚度的增大, 沟道中的纵向电场降低, 沟道中的总电场下降, 相应地非本地输运现象较弱.

表 1 不同衬底掺杂浓度下的拟合因子 L_e 和 λ ($T_{\text{ox}} = 5\text{nm}$)

Table 1 Fitting Factors L_e and λ for Different Substrate Doping ($T_{\text{ox}} = 5\text{nm}$)

衬底掺杂浓度/ cm^{-3}	8×10^{16}	3×10^{17}	8×10^{17}
$L_e/\mu\text{m}$	0.99	0.94	0.97
λ	2.42	2	1.87

表 2 不同栅氧厚度下的拟合因子 L_e 和 λ ($N_{\text{sub}} = 3 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$)

Table 2 Fitting Factors L_e and λ for Different Thickness of Gate Oxide ($N_{\text{sub}} = 3 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$)

栅氧厚度/nm	5.0	7.0	10.0
$L_e/\mu\text{m}$	0.94	0.93	0.9
λ	2	1.56	1.1

通过以上分析可以看到, 当 MOSFET 中的非本地输运现象较强时, 相应的拟合因子 λ 的值较大; 而当 MOSFET 中的非本地输运现象较弱时, 相应的拟合因子 λ 的值就比较小. 拟合因子 L_e 随 MOSFET 中非本地输运现象的强弱变化很小. 结合 F 的表达式(10), 因子 L_e 在物理上可以看作是 MOSFET 中发生非本地输运的临界沟道长度, 当 MOSFET 器件的沟道长度小于 L_e 时, 沟道中将会出现非本地输运现象. 而因子 λ 却反映了 MOSFET 沟道中非本地输运现象的强弱, 它与 MOSFET 的衬底掺杂浓度和栅氧化层厚度有关. 当 MOSFET 沟道中的非本地输运现象较强时, 因子 λ 的值就越大.

4 结论

本文在碰撞电离的基础上建立了常规结构深亚微米 MOSFET 衬底电流的一个解析模型, 模型考虑了短沟道 MOSFET 中的非本地输运性质. 模型公式简单, 计算容易. 通过实测结果和模拟结果与模型值的对比, 我们看到模型与实测结果一致性较好, 具有较高的精度. 衬底掺杂浓度和栅氧化层厚度对拟合因子 L_e

和 λ 均有影响, 因子 L_e 在物理上可以看作是 MOSFET 中发生非本地输运的临界沟道长度, 而因子 λ 却反映了 MOSFET 沟道中非本地输运现象的强弱.

参 考 文 献

- [1] C. Hu, S. C. Tam, F. Hsu *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1985, **32**(2): 375~ 385.
- [2] J. -G. Ahn, C. -S. Yao, Y. -J. Park *et al.*, IEEE Electron Device Lett., 1994, **15**(9): 348~ 350.
- [3] B. Iniguez and T. A. Fjeldly, Solid-State Electronics, 1997, **41**(1): 87~ 94.
- [4] N. Arora and M. S. Sharma, IEEE Trans. Electron Devices, 1991, **38**(6): 1392~ 1398.
- [5] C. Hu, IEEE IEDM Tech. Dig., 1983: 176~ 181.
- [6] T. -C. Ong, P. K. Ko and C. Hu, IEEE Electron Device Lett., 1987, **8**(9): 413~ 416.