

深亚微米 MOS 器件模型 BSIM2 及其参数提取*

陈 勇**

钟 玲

(电子科技大学微电子科学与工程系 成都 610054) (北京信息工程学院 北京 100101)

【摘要】 详细分析了适用于 VLSI/ULSI 设计的深亚微米 BSIM2 MOS 器件模型,并在深入讨论短沟道 MOS 器件物理效应的基础上,对沟道长 $1\mu\text{m}$ 栅氧化层厚度 25nm 的 nMOSFET 进行了测试和 BSIM2 模型参数的提取,且对结果进行了分析和讨论。结果表明,BSIM2 具有精确、参数易提取、计算速度快的特点,是 VLSI/ULSI 模拟设计的重要工具之一。

关键词 深亚微米; 器件模型; 参数提取; 集成电路计算机辅助设计

中图分类号 TN386

随着 VLSI/ULSI 的飞速发展,集成电路规模越来越大,器件尺寸越来越小,计算机辅助分析与设计已成为必不可少的工具。一种好的集成电路分析设计软件,必须拥有好的器件模型,即具有精确性、参数易提取、物理意义明确和计算速度的可行性。

BSIM2 模型是在 BSIM1 模型的基础上发展起来的,适用于沟道长度 $0.20\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$ 之间的 MOS 器件。同时 BSIM2 模型参数可以从实际测量中直接提取,且计算速度快,更重要的是 BSIM2 模型已嵌入高版本的 SPICE 如 SPICE3F5 电路分析软件中 (MOS5 模型),是分析设计 VLSI/ULSI 的重要工具之一。

1 BSIM2 原理与模型

深亚微米 MOS 器件模型 BSIM2 是在 BSIM1 (SPICE 中 MOS4 模型) 基础上发展起来的,由于它考虑了更多的二级效应,适用于 $0.20\mu\text{m}$ 沟道, 3.6nm 栅氧化层以上的 MOS 器件。它包括漏电流模型和输出电阻模型,漏电流和输出电阻及其一阶微分在偏置区连续,保证了电路模拟的收敛性。BSIM2 模型的另一个特点是它没有采用繁杂的数学解析式,而是着重物理效应,参数随偏置变化的一、二级效应系数都作为经验参数从测量中直接提取,这使得 BSIM2 模型的计算速度很快,但因此也使得器件参数过多,参数提取困难^[1]。

BSIM2 之所以能精确地模拟深亚微米 MOS 器件,是由于它考虑了因垂直场导致迁移率降低、载流子速度饱和、漏感应势垒降低、源漏电荷分享、非均匀沟道掺杂、沟道长度调制、亚阈值传导、源漏寄生电阻、热电子发射、反型层电容等诸多重要效应的结果。

1.1 强反型漏电流模型

1) 阈值电压

BSIM2 阈值电压模型考虑了诸如源漏电荷分享、非均匀沟道掺杂、漏感应势垒降低等短沟道效应^[2]

1996 年 12 月 31 日收稿, 1997 年 3 月 20 日修改定稿

* 电子部预研基金资助项目

** 男 31 岁 硕士 讲师

$$V_{th} = V_{FB} + Q_s + K_1 \sqrt{Q_s - V_{BS}} - K_2(Q_s - V_{BS}) - ZV_{DS} \quad (1)$$

式中 V_{FB} 为平带电压; Q_s 为反型层表面势; K_1 为体效应系数; K_2 为源/漏电荷分享系数; Z 为漏感应势垒降低系数; V_{BS} 为衬底偏置

2) 载流子速度饱和

BSIM2 中载流子速度采用

$$V = \mu E / (1 + E/E_c) \quad (2)$$

式中 μ 为载流子迁移率, 但为提高精度和使漏电流在 V_{DSAT} 处一阶导数连续, E_c 为

$$E_c = \begin{cases} E_{CO} [1 + E_{CD}(V_{DS} - V_{DSAT})^2 / V_{DSAT}^2] & V_{DS} \leq V_{DSAT} \\ E_{CO} & V_{DS} > V_{DSAT} \end{cases} \quad (3)$$

式中 V_{DSAT} 为速度饱和和漏电压; E_{CD} 是速度饱和系数随漏电压变化的关系; $E_{CO} = v_{SAT} L$; v_{SAT} 系载流子饱和速度。

3) 垂直场引起的迁移率降低

对于薄栅氧化层的短沟道 MOSFET, 垂直电场太强, BSIM2 中通过增加高次项的办法, 使迁移率与垂直场的关系得以精确表述

$$\mu = \mu_0 / [1 + U_a(V_{GS} - V_{th}) + U_b(V_{GS} - V_{th})^2] \quad (4)$$

式中 U_a 、 U_b 分别代表垂直场的一、二级效应系数。

4) 源/漏寄生电阻

考虑到源/漏寄生电阻一是使参数提取困难, 二是使电路模拟速度下降很多, 固 BSIM2 中寄生电阻的影响归属到迁移率中, 提取的迁移率参数已包含了源/漏寄生电阻的影响

5) 漏电流

在考虑短沟道 MOSFET 的一些重要效应基础上, 得到其漏电流为

$$\text{线性区} \quad I_{DS} = \frac{U_0(V_{GS} - V_{th} - aV_{DS}/2)V_{DS}}{1 + U_a(V_{GS} - V_{th}) + U_b(V_{GS} - V_{th})^2 + V_{DS}/E_c L_{eff}} \quad (5)$$

$$\text{饱和区} \quad I_{DS} = [U(V_{GS} - V_{th})^2 / 2aK] FR \quad (6)$$

式中 FR 表示热电子效应对饱和漏电流的增加

$$FR = 1 + A_i \exp(-B_i / (V_{DS} - V_{DSAT})) \quad (7)$$

且

$$U = U_0 / U_{vert} = \frac{U_0}{1 + U_a(V_{GS} - V_{th}) + U_b(V_{GS} - V_{th})^2}$$

$$K = \frac{1 + V_c + \frac{1 + 2V_c}{2}}$$

$$a = 1 + (gK_1 / 2) \sqrt{Q_s - V_{BS}}$$

$$g = 1 - \frac{1}{1.744 + 0.8364(Q_s - V_{BS})}$$

$$V_x = \frac{U_{1s}(V_{GS} - V_{th})}{aU_{vert}}$$

传导系数 $U_0 = \mu_{COX} W_{eff} / L_{eff}$; U_{1s} 是速度饱和系数; L_{eff} 、 W_{eff} 分别为沟道有效长度及宽度。

1.2 输出电阻模型

短沟道 MOSFET 输出电阻变化来源于三个方面: 1) 漏感应势垒降低, 2) 沟道长度调制效应;

3) 热电子效应。在 BSIM2 中, 漏感应势垒降低效应已在阈值电压中考虑, 由漏感应势垒降低系数 Z

模拟,因此只考虑另外两个因素。沟道长度随 V_{DS} 增大而缩短的现象即是沟道长度调制效应,当 V_{DS} 接近 V_{DSAT} 时,沟道长度调制效应为输出电阻变化的主要因素。该效应通过参数 U_b 补偿

$$U_b = U_0 + U_1 \tanh(U_2 V_{DS} / V_{DSAT}) + U_3 V_{DS} - U_4 V_{DS}^2 \quad (8)$$

式中 $U_1 \sim U_4$ 代表传导系数随漏电压变化的经验参数。而当漏电压超过 V_{DSAT} 后,速度饱和区的电场峰值迅速增大,热电子效应显著,因碰撞电离产生的电子空穴对在漏极附近出现。电子可越过势垒进入 SiO_2 中,空穴则流向衬底产生衬底电流,该电流产生的压降将使实际的 V_{BS} 增大,阈值电压下降,漏电流增大,输出电阻减小,这不难从式(6)看出。

2 BSIM 2的参数提取

BSIM2参数提取由 HP4145在计算机控制下按参数提取软件的工作流程自动进行,参数分亚阈值区、过渡区、线性区和饱和区进行局部优化提取^[3]。因此根据模型描述,以 V_{DS} 、 V_{BS} 、 V_{GS} 为变量测量各区的转移特性和输出特性。

实际测量装置由手动探针台、HP4145B半导体参数测试仪、HP工作站和 486微机组成,其中 HP工作站通过编程起取代 IEEE488接口卡的作用,由探针台选取器件,486微机控制 HP4145B 进行测量和存储数据,并进行参数提取。

BSIM2参数提取软件结构化很强,各模块相互独立,使得测量和参数提取可以分别独立进行。其次,可以对提取的参数作为人为修改,软件给出测量曲线和参数模拟曲线的比较,便于用户根据物理模型为减小误差而修改参数。图 1 为 BSIM2 参数提取软件的工作流程框图。

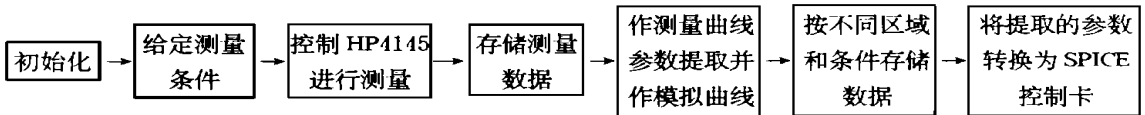


图 1 BSIM2 参数提取软件流程

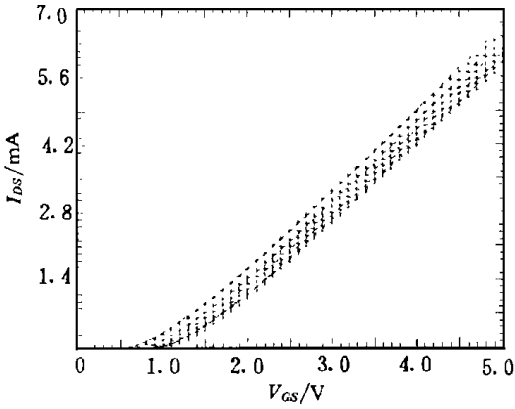
3 结果与讨论

测试样品由华晶中央研究所提供,有效沟道长度为 $1\mu\text{m}$,宽度 $10\mu\text{m}$,栅氧化层厚度 25nm ,由 HP工作站作数据传递,486微机作控制和提取参数。分别测量了 nMOSFET 的线性区和饱和区的转移特性曲线,输出特性曲线和输出电阻特性曲线,如图 2~ 5 所示。图中“ \circ ”表示测试点,而实线是由提取的 BSIM 2 参数进行模拟的结果。由图可见,BSIM 2 模型与实测数据符合得较好,又由于 BSIM 2 模型参数独立性强,存在的误差可以通过修改模型参数来减小或消除(提取的 BSIM 2 参数略)。

在图 2 图 3 的转移特性曲线中,从左到右分别是衬底电压从 $0 \sim 5\text{V}$ 的特性。可见模拟的阈值电压比测量值略低,且在不同偏压下均如此,故由式(1)可知提取的平带电压 V_{FB} 比实际值略低,在把 V_{FB} 从 -0.72V 增至 -0.67V 后,则理论与实际结果符合得更好。对于图 4 的输出特性曲线,当 V_{GS} 为 4.03V 时结果最好, V_{GS} 为 5V 时饱和漏电流模拟值大于测量值, V_{GS} 为 3.06V , 2.09V , 1.12V 时饱和漏电流模拟值小于测量值;而线性区则符合得很好。故误差是由描述速度饱和的热电子效应系数 A_i 和 B_i 提取差异所引起,由式(7)可知,增大 A_i 和减小 B_i 即可消除 V_{GS} 为 5V 时的误差;而减小 A_i 和增大 B_i 可消除 V_{GS} 为 3.06V , 2.09V , 1.12V 时的误差,由此可见,系数 A_i 和 B_i 是随 V_{GS} 而改变的,BSIM 2 未考虑这一关系因而引入了一定的误差。

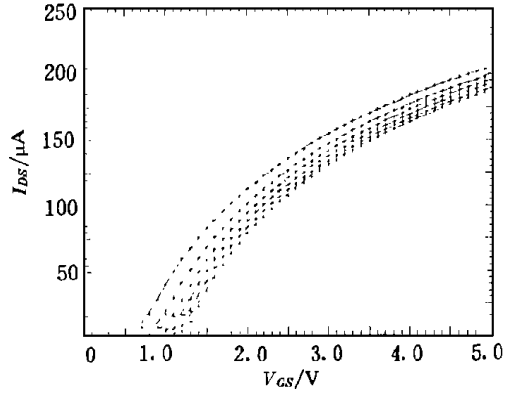
对于图 5 的输出电阻特性曲线,当 V_{DS} 较小时输出电阻主要取决于 U_b ,当 V_{DS} 稍大时输出电阻

主要取决于 U_b, U_d , 与式 (8) 相符; 而当 $V_{DS} \gg V_{DSAT}$ 时, 热电子效应对输出电阻的减小起决定作用, 随着 V_{GS} 增大, V_{DSAT} 相应增大, 由式 (7) 可知热电子效应减小, 输出电阻的减小不明显, 与图中相符合。



测试条件 $V_{DS} = 5.0\text{ V}$, V_{BS} 分别为 0 V , -1 V , -2 V , -3 V , -4 V 和 -5 V

图 2 饱和区转移特性



测试条件 $V_{DS} = 0.05\text{ V}$, V_{BS} 分别为 0 V , 0 V , -1 V , -2 V , -3 V , -4 V 和 -5 V

图 3 线性区转移特性

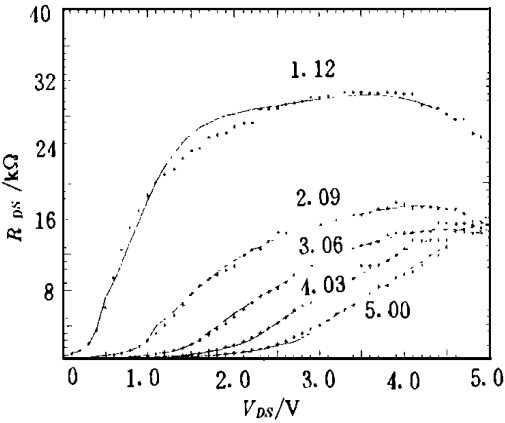


图 4 衬底偏置 $V_{BS} = 0$ 时输出电阻特性曲线

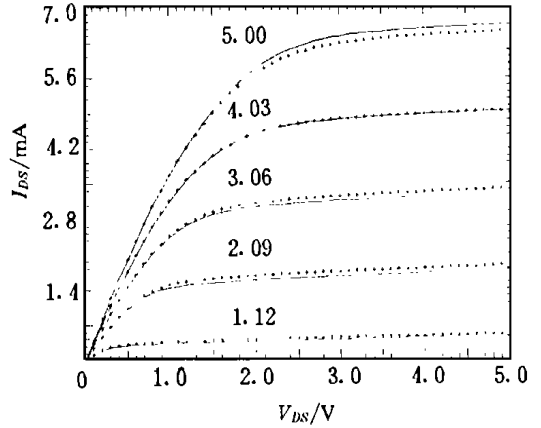


图 5 衬底偏置 $V_{BS} = 0$ 时输出特性曲线

4 结 论

本文详细分析了适用于 VLSI/ULSI 设计的深亚微米 BSIM2 MOS 器件模型, 避免了繁杂的数学推导, 着重考虑了短沟道 MOS 器件的物理效应, 且在此基础上对沟道长 $1\mu\text{m}$ 栅氧化层厚度 25 nm 的 nMOSFET 进行了测试和 BSIM2 模型参数的提取。分析结果表明, BSIM2 具有精确、参数易提取和计算速度快的特点, 是 VLSI/ULSI 模拟设计的重要工具之一。

感谢华晶中央研究所及电子工业部二十四所提供的大力支持, 帮助和肖兵、于奇、刘永强等同志的协助。

参 考 文 献

- 1 Jeng M C, Shen B J, Ko P K. BSIM parameter extraction algorithms and user's guide. BRL Memo UCB/ERL M85/79, Berkley: University of California Press, October 7, 1985
- 2 Sheu Bing J, Scharfetter Donald L, Ko Ping-Keung et al. BSIM: Berkley short channel IGFET model for MOS transistors. IEEE Journal of SSC, 1987, 22(4): 558~ 565
- 3 Yang P Chatterjee P K. An optimal parameter extraction program for MOSFET models. IEEE Trans ED, 1983, 30(9): 1 214~ 1 219

Analysis and Parameters Extraction of Deep Submicrometre MOS Device Model BSIM2

Chen Yong

(Dept. of Microelectronic Science & Technology, UEST of China Chengdu 100101)

Zhong Ling

(Beijing Institute of Information Engineering Beijing 6100540)

Abstract A deep submicrometre MOS device model BSIM2 is analyzed in this paper. Based on the discussion of physical effects of short channel devices, a nMOSFET with channel length 1 μ m and gate oxides thickness 25 nm is measured and its BSIM2 parameters are extracted. The results are analyzed, which show that BSIM2 is one of the important tools for VLSI/ULSI design.

Key words deep submicrometre; device model; parameter extraction; integrated circuits computer-aided design

编辑 黄 辛

.....

.....

.....

。 科研成果介绍。

隐身目标的缩比测量及反演技术

主研人员: 时振栋 刘宏伟 唐 璞

隐身目标的缩比测量及反演技术依据相似性原理和电磁场理论,分析了有耗散射体的物理相似性,采用方程分析法和量纲分析法,利用缩比测量的数据,得到了当任意形状散射体均匀涂覆或任意位置上局部涂复吸波材料时有耗介质影响 RCS 的定量表达式及相应的计算软件,还可对有耗目标缩比测量提供反演计算技术。该项成果为国内首例,具有重要的理论意义和实用价值。

光纤宽带区域网原理模型

主研人员: 李乐民 胡 钢 谭真平 唐绍淑 胡 波 刘 朴 胡家骏 龚焕星

该成果完成了具有三个节点传输速率为 155.520 Mbps 的试验网络原理模型。该项目跟踪了国际通信领域的先进技术,参照了相关的新的国际标准,网络拓扑和媒质访问控制协议采用分布式排队双总线,多路业务复接采用步转移模式,物理层采用基于同步数字系列(SDH)的帧结构和光纤传输,解决了物理层电端机和光端机,纯异步转移模式(ATM)的分布式排队双总线协议(DQDB) ATM 层、计算机直接入网的适配、以太网适配、连续流业务适配等关键技术。该试验网可以接入以太网网桥,连续数据流以及计算机图像、数据等各种业务,具有传输综合业务的网络功能。

。 科 卜。