

对表面势为基础的 MOSFET 片电荷模型的基本检验

何 进, 牛旭东, 张钢刚, 张 兴

(1. 北京大学信息科学技术学院微电子学系纳太器件和电路研究室, 北京 100871;

2. 北京大学深圳研究生院信息工程学院, 广东深圳 518055)

摘 要: 本文完成了对多种表面势为基础的 MOSFET 片电荷 (charge sheet) 模型反型层电荷和沟道电流计算的基本检验. 相对于以基本的 MOSFET 器件物理为基础的 $\text{Pa}\sigma\text{Sah}$ 模型结果, 大多数片电荷模型在不同的工作区域内都会出现不同程度的反型层电荷计算误差. 为了模拟沟道电流, MOSFET 片电荷模型必须使用一个半经验的沟道电流方程. 这个近似会导致沟道电流方程和反型层电荷方程之间物理上的不自恰, 从而使计算的沟道电流结果与 $\text{Pa}\sigma\text{Sah}$ 模型相比有近 10% 的误差. 这些基本的检验结果表明: 为了保持基本的 MOSFET 器件物理内容和 $\text{Pa}\sigma\text{Sah}$ 模型的高精度, 以表面势为基础的片电荷模型还需要一些根本的器件物理改进和进一步的模型精度提高.

关键词: MOSFETs; 器件物理; 集约模型; 片电荷近似; 基本检验

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 11-1986-04

Benchmark Tests on Surface Potential Based Charge-Sheet Models

HE Jin, NIU Xudong, ZHANG Ganggang, ZHANG Xing

(1. Group of the Nano & Terahertz Devices and Circuits and MPW Center, Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 1000871, China;

2. Institute of Electronic Engineering and Computer Sciences, Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract: This paper presents the benchmark test results on various surface potential based charge sheet models. Compared with the $\text{Pa}\sigma\text{Sah}$ model, most charge sheet models predict the inversion charge with different degree errors in different operation regions. In order to model the MOSFET channel current, a semi-empirical channel current equation has to be used in the present surface potential based charge sheet models, that lead to device physics inconsistency between the channel current expression and channel charge equation, thus result in some channel current errors. These benchmark test results demonstrated that the charge sheet models require some fundamental improvements to maintain the inherent device physics and high accuracy of the $\text{Pa}\sigma\text{Sah}$ model.

Key words: MOSFETs; device physics; compact modeling; surface potential; charge sheet model

1 引言

简洁的 MOSFET 集约模型将电路设计和工艺制造过程紧密地联系起来, 在以 CMOS 为基础的 IC 产业发展中扮演着重要角色. 研究器件集约模型的目标在于发展一组自恰、连续和精确的基于器件物理的数学方程去描述器件和电路的端特性, 如电荷、电流、电容和功率输出. 从 MOSFET 模型的发展历史来看, $\text{Pa}\sigma\text{Sah}$ 模型^[1]是唯一保留基本器件物理内容的经典模型, 它使用单一方程来连续地描述 MOSFET 器件的所有工作区特性. 尽管 $\text{Pa}\sigma\text{Sah}$ 模型为 MOSFET 模型的基本检验提供了一个很好的参照基础, 但由于计算 $\text{Pa}\sigma\text{Sah}$ 模型二重积分的困难, 用它作为电路 CAD 模拟的集约模型目前还是不切实际的.

在最近的电路模拟 CAD 的集约模型发展中, 人们把更多的注意力集中在各种基于表面势的片电荷 (charge sheet) 模型

上^[2~5]. 这是因为目前的国际工业标准仿真模型 BSIM3/BSIM4 是基于半经验的阈值电压方法发展而来, 模型模拟具有不对称、不连续性的缺点, 对一些 RF/模拟电路不能给出正确的结果^[6]. 目前的很多表面势模型^[7~10]基本上是在 J. R. Brews 的片电荷模型的基础上发展而来, 据称这些模型均保留了 J. R. Brews 片电荷模型的精确性和连续性特点, 因而是下一代国际工业标准仿真模型的热门竞争者.

从模型的结构和物理内容来看, 这些基于表面势的模型均使用了片电荷近似: 片电荷反型层电荷近似和片电荷沟道电流方程. 鉴于目前片电荷模型研究的重要性和广泛性, 本文在一维理想的 MOSFET 基础上研究了对多种表面势片电荷模型的反型层电荷和沟道电流计算的基本检验. 与作为参照基础的 $\text{Pa}\sigma\text{Sah}$ 模型相比, 目前的大多数片电荷模型都会在计算反型层电荷时出现不同程度的误差, 一些近似在亚阈值甚至给出错误的反型层电荷变化趋势. 在沟道电流的计算中, 片电

荷模型的电流误差与 Pao-Sah 模型相比更为突出. 片电荷模型的电流误差主要来源于其电流方程的半经验特性, 该特性是与反型层电荷方程相矛盾的. 所有这些分析表明: 以表面势为基础的片电荷模型要想发展成为可以实用的下一代国际工业标准仿真模型, 除了要用解析或数值叠代的方法得到一个精确的表面势以外, 还需要更多的改进以保持基本的器件物理特性和 Pao-Sah 模型的准确性.

2 对片电荷模型反型层电荷计算的基本检验

对均匀掺杂的 MOSFET 器件, 在忽略量子效应和二维效应的情形下, 表面势的精确物理解可由解泊松方程得到^[1], 如方程(1)所示.

$$C_{ox}(V_{GB} - V_{FB} - \phi_s) = \pm (2\epsilon_s q N_A)^{1/2} \left[\phi_t \exp\left(-\frac{\phi_s}{\phi_t}\right) + \phi_s - \phi_t + \exp\left(-\frac{2\phi_F + V_{ch}}{\phi_t}\right) \left[\phi_t \exp\left(\frac{\phi_s}{\phi_t}\right) - \phi_s - \phi_t \right] \right]^{1/2} \quad (1)$$

这里, 所有的物理量均代表它们通常的意义.

在进行基本的检验分析之前, 我们首先使用牛顿-拉夫逊叠代解法来得到基本检验所需的表面势精确数值解. 由于使用 Pao-Sah 模型作为基准, 所以 Pao-Sah 模型的反型层电荷可以用下面的积分来计算.

$$Q_{in} = \int_0^{\phi_s} \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_s} \exp\left(\frac{\phi - 2\phi_F - V_{ch}}{\phi_t}\right) d\phi}{\left[\phi_t \exp\left(-\frac{\phi}{\phi_t}\right) + \phi - \phi_t + \exp\left(-\frac{2\phi_F + V_{ch}}{\phi_t}\right) \left[\phi_t \exp\left(\frac{\phi}{\phi_t}\right) - \phi - \phi_t \right] \right]^{1/2}} \quad (2)$$

我们首先检验反型层电荷计算时经常使用的耗尽近似. 该耗尽近似是另外一个版本的片电荷近似^[3], 在一些标准教科书^[4, 5]以及最近的一些解析模型^[6-8]中广泛使用. 从耗尽近似得到的反型层电荷表达式为

$$Q_{in} = C_{ox}(V_{GB} - V_{FB} - \phi_s) - \gamma C_{ox} \sqrt{\phi_s} \quad (3)$$

根据叠代解法得到的表面势数值解, 对不同准费米势由耗尽近似方程(3)和 Pao-Sah 模型(2)得到的反型层电荷比较如图 1 所示.

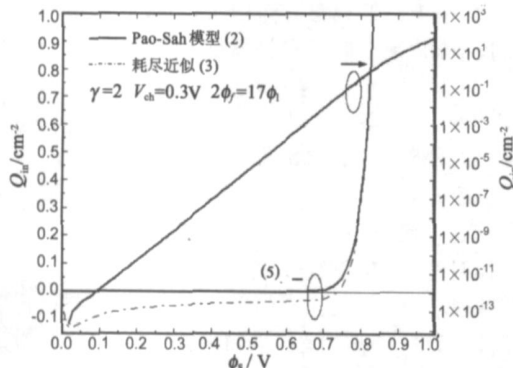


图 1 耗尽近似(3)和 Pao-Sah 模型(2)得到的反型层电荷比较

图 1 的右边表明: 由耗尽近似和 Pao-Sah 模型得到的反型层电荷在强反型区是基本一致的. 但是, Pao-Sah 模型得到的

反型层电荷在亚阈值区是正的而耗尽近似得到的反型层电荷在亚阈值区是负的, 因此该耗尽近似得到的亚阈值反型层电荷不能由对数曲线来表示. 从器件物理的观点来分析, 耗尽近似的亚阈值反型层电荷为负是错误的. 虽然很多流行的教科书都使用这种近似, 但由这种近似明显不能得到准确的器件模型. 为了消除亚阈值的负反型层电荷, 通用的做法是使用一个简化的表面势方程, 该方程在计算表面势时没有考虑积累电荷和施化离子的作用. 这种方法已经在最初的 MOS 11 和 SP 中使用. 但是, 这种简化可能引起 MOSFET 微分电容在不同工作区域转变的不连续性^[8]. 因此, 不得不使用光滑函数来连接不同区域的表面势解^[7, 12]. 这种集约模型由于对光滑函数的需要和在不同工作偏压下使用不同的方程, 因此具有区域模型的特性.

第二个检验的对象是经典片电荷近似的反型层电荷计算^[2]:

$$Q_{in} = C_{ox}(V_{GB} - V_{FB} - \phi_s) - \gamma C_{ox} \sqrt{\phi_s - \phi_t} \quad (4)$$

请注意最近出现的一些集约模型例如 SP^[13]和 HISIM^[14]曾经利用方程(4)来计算反型层电荷. 由该方程得出的反型层电荷与 Pao-Sah 模型的对比显示在图 2 中. 同样的, 这个近似和 Pao-Sah 模型得到的反型层电荷在强反型区基本一致, 但是方程(4)导致在亚阈值的反型层电荷伴随着表面势的降低反而增加. 从器件物理的观点来看, 该结果也是错误的. 正象上面提到的, SP 模型使用表面势的区域解来解决这一问题. 由于缺少现成的程序代码, 我们现在还不清楚最初 HISIM 是如何处理这一困难的.

目前最新版本的 MOS 11 系列 MOS 1102^[7], PSP 和 HISIM 使用一种改进的片电荷方程(5)来计算反型层电荷:

$$Q_{in} = C_{ox}(V_{GB} - V_{FB} - \phi_s) - \gamma C_{ox} \sqrt{\phi_s - \phi_t [1 - \exp(-\phi_s/\phi_t)]} \quad (5)$$

方程(5)和 Pao-Sah 模型的反型层电荷对比显示在图 3 中. 相对于(3)和(4)的结果, 方程(5)对于反型层电荷的预测在大多数表面势区域内与 Pao-Sah 模型匹配的很好. 尽管如此, 它在远弱反型区所显示出的误差可能导致截止电流预测的不准确性. 图 3 的小插图很清楚的说明了: 在远弱反型区, 由(5)式和 Pao-Sah 模型得出的反型电荷计算值有很大的差别.

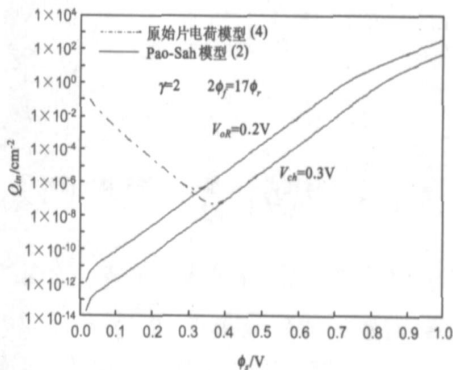


图 2 经典片电荷近似的反型电荷计算和 Pao-Sah 模型的比较

使用方程(5)的集约模型有一个重要的问题是 IV 建模没

有收敛的电流表达式和 CV 建模不能得到器件端特性的积分电荷,这是因为式(5)的不可解析积分特性。例如,片电荷模型的电流方程中的漂移电流分量为

$$I_{ds}(drift) = q\mu Q_{in} \frac{d\phi_s}{dx} = q\mu C_{ox} [(V_{GB} - V_{FB} - \phi_s) - \gamma \sqrt{\phi_s - \phi_t [1 - \exp(-\phi_s/\phi_t)]}] \frac{d\phi_s}{dx} \quad (6)$$

它不能给出一个收敛的电流表达式。同样, CV 模型的体电荷分量

$$Q_B = \int Q_{it} d\phi_s = \int C_{ox} \gamma \sqrt{\phi_s - \phi_t [1 - \exp(-\phi_s/\phi_t)]} d\phi_s \quad (7)$$

也不能得到一个收敛的解析结果。

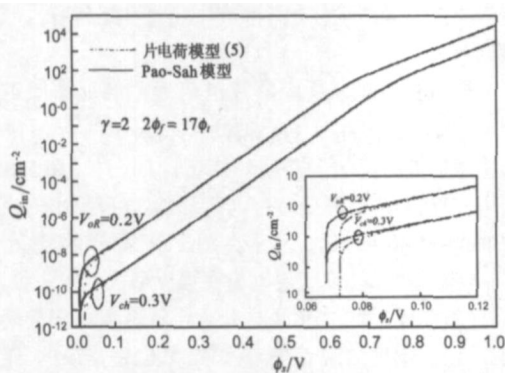


图3 最新的片电荷近似得到的反型电荷计算和 Pao-Sah 模型比较 (5)

在这种情况下,一些集约模型如 MOS 11 和 SP 只得使用“对称线性化方法”^[12]或“反型层电荷线性化”^[7]来计算电流从而摆脱该困境。这些方法是在片电荷近似的基础上使用了新的近似,与 Pao-Sah 模型相比,必然导致新的误差,如图 4 所示。另外一些简洁模型^[6,14]不得不回到由(3)或(4)为基础得到的传统片电荷模型的电流方程进行计算。由这个观点来看,这些模型仍然是半经验性的而不是基于器件物理的模型,总是有一些问题和不自恰存在。

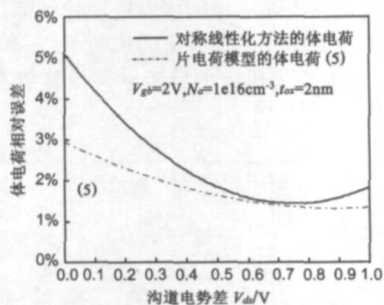


图4 对称线性化方法和(5)得到的体电荷和 Pao-Sah 模型比较

3 对片电荷模型电流计算的基本检验

发展器件集约模型的目的是预言和计算器件和电路的电流特性。包括扩散和漂移电流的经典片电荷电流方程可写成如下形式:

$$I_{ds} = qW\mu \left[Q_{in} \frac{d\phi_s}{dx} - \phi_t \frac{dQ_{in}}{dx} \right] \quad (8)$$

正象文献[16]所指出的,这个片电荷模型的电流方程引入了一个扩散电流的经验项。J R Brews 在片电荷模型的经典论文[2]中也承认,这个模型的“正确性”,在于与 Pao-Sah 模型的结果相比它可以得出“正确的” $I-V$ 曲线而不是根据任何器件物理基础。因此,尽管 J R Brews 在随后的片电荷模型版本中添加新的假设对方程进行了形式上的推导,从以下对该电流方程的检验结果来看这个方程仍然是近似的。

由 Pao-Sah 模型得到的基于器件物理的电流方程可以写成如下形式:

$$I_{ds} = qW\mu Q_{in} \frac{dV_{ch}}{dx} \quad (9)$$

表面上,如果我们假设(8)和(9)是自恰一致的,那么我们会使两个方程相等,就会有如下的结果

$$Q_{in} \frac{d\phi_s}{dx} - \phi_t \frac{dQ_{in}}{dx} = Q_{in} \frac{dV_{ch}}{dx} \Leftrightarrow Q_{in} = Q_0 \exp \left[\frac{\phi_s - V_{ch}}{\phi_t} \right] \quad (10)$$

式(10)表明:反型层电荷是表面势的指数函数,而且指数因子总是一个常数斜率 1。但是, MOSFET 的器件物理^[4,5]表明:虽然在 MOSFET 的整个工作区反型层电荷是表面势的指数函数,但不同的是:反型层电荷和表面势的曲线在亚阈区的指数因子总是常数斜率 1,而在强反型区的指数因子总是常数斜率 1/2,如图 1~3 中所示。因此,式(8)只能工作在亚阈值区,在强反型区是不正确的。

我们可以从 MOSFET 器件物理的分析来表明:由经典片电荷电流方程(8)得到的电流并不是与 Pao-Sah 模型的电流方程(9)完全一致的。根据(1)和方程(5),反型层电荷可表示为

$$Q_m = \frac{\gamma \exp \left(-\frac{2\phi_F + V_{ch}}{\phi_t} \right) \left[\phi_t \exp \left(\frac{\phi_s}{\phi_t} \right) - \phi_s - \phi_t \right]}{Q_{in} + 2Q_b} \quad (11)$$

假设 MOSFET 的工作条件是高于平带区的,方程(11)中的“ $-\phi_s - \phi_t$ ”可以忽视,因而有:

$$Q_{in} = \frac{\gamma \exp \left(-\frac{2\phi_F + V_{ch}}{\phi_t} \right) \exp \left[\frac{\phi_s}{\phi_t} \right]}{Q_{in} + 2Q_b} \quad (12)$$

如果我们定义

$$T = Q_m + Q_b, \quad \eta_{\phi_s} = \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial \phi_s}, \quad \eta_{V_{ch}} = \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial V_{ch}} \quad (13)$$

通过数学上的链式微分法则,我们很容易从(12)得到 Pao-Sah 模型的电流方程(9)的详细表达方式

$$Q_m \frac{dV_{ch}}{dx} = Q_{in} \frac{d\phi_s}{dx} - \phi_t \frac{dQ_{in}}{dx} - Q_{in} \left[\eta_{\phi_s} \frac{d\phi_s}{dx} + \eta_{V_{ch}} \frac{dV_{ch}}{dx} \right] \quad (14)$$

很明显:经典片电荷电流方程(8)仅仅包含详细 Pao-Sah 模型的电流方程(9)的前两项,而丢失了最后两项。如果用式(8)计算沟道电流,计算出的沟道电流永远比基于式(9)的 Pao-Sah 模型预测的精确值小,这个对比在图 5 中显示出来。该图说明:式(8)和式(9)之间的误差是随偏压和掺杂情况变化的。例如,式(8)和式(9)之间的归一化沟道电流对于沟道掺杂浓度为 $1E16cm^{-3}$ 和 $1E17cm^{-3}$ 的理想 MOSFET,最大误差分别为 5% 和 10%。这些误差在比较不同的集约模型和讨论模型的物理基础时应该是很重要的一个判据。

最近, Sah 研究小组提出了一个基于器件物理的精确漏

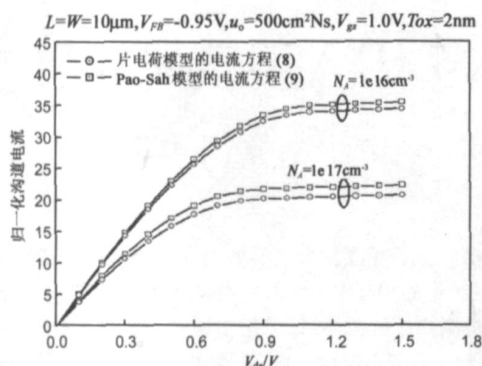


图 5 片电荷模型电流方程 (8) 和 Pao-Sah 模型方程 (8) 计算的电流比较

电流解析方程^[16], 该方程来自对电流密度方程的严格推导, 并且得出的结果与最初的 Pao-Sah 模型中的精确解一致. 这个沟道电流方程是基于电荷和端电压变量, 而不是在计算表面势的基础上得出的. 因此, 基于电荷的模型有可能是集约模型发展的一个更好选择.

4 结论

虽然目前大多数人坚定地相信基于表面势的片电荷模型可以发展成为新一代的 MOSFETs 物理模型, 但人们还是必须注意到: 基于表面势的这种 MOSFET 模型还是有一定的近似和限制, 由这些模型得出的结果并不严格等同于精确的理论解. 本文对片电荷模型的反型层电荷和沟道电流的基本检验表明: 一些基于表面势的片电荷模型无论在反型层电荷的计算还是在沟道电流的预言方面, 还存在器件物理上不自洽一致和计算不准确的弱点, 而且还必须使用一些半经验的近似. 虽然目前已经做了许多工作和取得了很大进展, 但要想建立一个真正的基于器件物理的集约模型, 我们仍然还有很长的路要走^[17].

参考文献:

- [1] H C Pao, et al. Effects of diffusion current on characteristics of metal oxide (insulator)- semiconductor transistors [J]. Solid State Electronics, 1966, 9(6): 927- 937.
- [2] J R Brews. A charge sheet model of the MOSFET [J]. Solid State Electronics, 1978, 21(2): 345- 352.
- [3] J R Bews. Physics of the MOS transistor, Applied Solid State Science [M]. Supplement 2A, New York, Academic Press Inc, 1981: 1- 119.
- [4] N Aroa. MOSFET Models for VLSI Circuit Simulation: Theory and Aimulation [M]. New York: Springer Verlag, 1993.
- [5] Y P Tsividis. Operation and Modeling of the MOS Transistor [M]. New York: McGraw- Hill, 1999.
- [6] He Jin, et al. BSIM model research and recent progress [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(2): 96- 104.
- [7] MOS11, [http://www.semiconductors.philips.com/Philips-Models/mos_models/model101\[DB\]](http://www.semiconductors.philips.com/Philips-Models/mos_models/model101[DB]).

- [8] C C McAndrew, et al. Accuracy of approximations in MOSFET charge models [J]. IEEE Transaction on Electron Devices, T-ED, 2002, 49(1): 72- 81.
- [9] T L Chen, et al. Analytical approximation for the MOSFET surface potential [J]. Solid State Electronics, 2001, 45(2): 335- 339.
- [10] Jin He, et al. PUNSIM: An advanced surface potential based MOSFET model [A]. Proceedings of IEEE MIXDES' 2006 [C]. Gdynia, Poland, 2006, June 22- 24, 117- 122.
- [11] Jin He, et al. Comments on modeling MOSFET surface capacitance behavior under non equilibrium [J]. Solid State Electronics, 2006, 50(2): 259- 262.
- [12] G Gildenblat, et al. An advanced surface potential based compact MOSFET model [A]. Proceedings of the IEEE Custom Integrated Circuits Conference [C]. San Jose: CICC' 2003, Sept. 2003. 233- 240.
- [13] H Wang, et al. Quasi static and nonquasi static compact MOSFET models based on symmetric linearization of the bulk and inversion charge [J]. IEEE Transaction on Electron Devices, T-ED, 2003, 50(12): 2262.
- [14] M M Matusch, et al. Unified complete MOSFET model for analysis of digital and analog circuits [J]. IEEE Transaction on Computer Aided Design, T-CAD, 1996, 15(1): 1- 7.
- [15] R Rios, et al. An efficient surface potential solution algorithm for compact MOSFET models [A]. Proceedings of IEEE International Electron Device Meeting [C]. San Francisco: IEDM' 2004, Dec. 13- 15, 2004. 755- 758.
- [16] B B Jie, et al. Physics based exact analytical drain current equation and optimized compact model for long channel MOS Transistor [A]. Proceeding of IEEE International Conference on Solid State and Integrated - Circuit Technology [C]. Beijing: ICISCT' 2004, D1.3, Oct. 18- 21, 2004. 235- 241.
- [17] C T Sah, et al. A history of MOS transistor compact modeling [A]. Proceedings of 2005 Workshop on Compact Modeling [C]. Los Angeles: WCM 2005, May 8- 20, 2005. 347- 390.

作者简介:



何 进 男, 博士, 教授, 博士生导师, 1988 年本科毕业于天津大学电子工程系, 1993 年硕士毕业于电子科技大学信息工程学院, 1999 年在电子科技大学微电子所获得博士学位, 2001 年到 2005 年在美国 BERKELEY 加州大学研究深亚微米器件芯片仿真物理模型等, 现在北京大学微电子学系工作. 作为第一作者, 已在国际权威期刊, 如 IEEE, T-ED, IEEE, EDL, Semiconductor Science and Technology, Solid State Electronics 等上发表研究论文近 40 篇, 在国内重要期刊上发表研究论文近 50 篇, 国际学术会议特邀报告近 10 次. 是国际标准 CAD 模型 BSIM4.3 和 BSIM5 的主要创建者. E-mail: jinhe@ime.pku.edu.cn