

基于遗传算法的 BSIM SOI 模型参数提取

李瑞贞 韩郑生

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 提出了一种提取 BSIM SOI 模型参数的新方法,该方法基于遗传算法和局部优化法的结合,同时具有全局优化和局部优化的优点,提取的参数物理意义明确,并且容易得到全局最优解.该方法计算简单,不需要对模型进行深入了解和丰富的参数提取经验,易于推广使用.用该方法得到的 SOI 模型进行了模拟,并将模拟结果与 1.2 μm CMOS/SOI 测试结果进行对比,二者吻合很好,SOI 器件特有的 kink 效应也得到了很好的拟合.

关键词: 遗传算法; SOI; 参数提取

EEACC: 0260; 2520M; 2530F **PACC:** 7340Q

中图分类号: TN386.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)08-1676-05

1 引言

器件模型是集成电路设计的基础,模型参数的提取直接影响到集成电路设计的精确度,因而是集成电路设计中一个非常重要的环节.目前对 SOI 器件模型的研究很多^[1~5],BSIM SOI^[6]模型经 CMC (简洁模型委员会)验证,已成为工业界使用的标准模型.但由于 BSIM SOI 模型极其复杂,给模型参数的提取增加了很大困难.SOI 技术被称为 21 世纪的硅集成电路技术^[7],与体硅相比 SOI MOSFET 物理机制更加复杂,其特有的现象如 kink 效应^[8]等,使得 SOI MOSFET 参数提取更加困难.

一般商业提参软件通常使用局部优化策略,传统的参数提取使用数值优化方法,常用的算法有牛顿-拉夫森迭代法(LS-NR)、麦跨特法等^[9].在不同的器件工作区域提取不同的参数,在这个区域内这些参数起主要作用,因此提取的参数有明确的物理意义.但使用数值优化需要对模型方程进行简化,这要求提参者对模型方程非常了解,并且有非常丰富的参数提取经验.这种方法还需要对模型方程求导数,这种依赖于数学解析方程导数的优化方法效率很高,但对于复杂的 BSIM 模型来说求导是不易实现的,转置 Hessian 矩阵同样难以实现,这也是商业

提参软件价格极其昂贵的原因.

遗传算法是一种非数值优化方法,也是一种全局优化算法.1999 年 Watts 等人^[10]用遗传算法提取了 BSIM3 模型,但其方法使用了全局优化策略同时提取 51 个参数,对于一个 51 维空间变量来说,全局最优解的搜索过程无疑非常漫长,最终得到的解可能偏离真实值很远.由于要拟合大量的测试数据,其采用的目标函数也非常复杂.

本文提出了遗传算法和局部优化法结合提取模型参数的方法,本方法在不同的器件工作区域分别使用遗传算法提取相应参数,因此得到的参数物理意义明确,不会偏离真实值太远,而且本方法易于得到全局最优解.

2 遗传算法简介

遗传算法于 20 世纪 60 年代由 Michigan 大学 Holland 教授提出^[11],它是一种通过模拟自然界“适者生存,优胜劣汰”的进化法则来进行最优值的搜索方法.问题的一个可能解称为一个个体,每个个体对应一个适应度,个体通过从表现型到基因型的映射即编码技术得到,通常使用的编码为二进制编码.一定数目的个体组成一个初始种群,这个初始种群通过模拟自然界进化法则,不断经过复制、杂交、变异

李瑞贞 男,1979 年出生,博士研究生,从事集成电路工艺、器件模型及参数提取的研究.

韩郑生 男,1962 年出生,博士生导师,从事 SOI/CMOS 集成电路技术和设计的研究.

2004-12-04 收到,2005-03-22 定稿

进行繁殖,适应度高的个体被选中进行交叉或基因重组的概率高,适应度低的个体很可能被淘汰。种群不断进行进化,最终得到种群的最优个体就是问题的最优解。

遗传算法并不直接对参数本身进行操作,而是对参数编码进行计算。它依据每个个体的适应度在解的空间进行搜索,而不需要进行求导等其他的复杂计算。遗传算法具有强大的全局搜索能力,不易陷入局部最优解。另外它还具有隐含的并行性,适用于大规模并行计算机计算。由于遗传算法众多的优点,现已被广泛应用于各个学科。

3 参数的提取

参数提取中要注意 SOI 器件与体硅器件结构的差异,SOI 器件为 5 端器件,除源极、漏极、栅极、衬底以外还有体电极,此处的衬底不同于体硅器件的衬底,SOI 器件的测试和参数提取都不同于体硅 MOSFET。

3.1 样品制备和测量

实验采用了 SIMOX 材料制作 SOI 器件,工艺中采用了体接触技术,这有助于提取与浮体效应、碰撞电离和漏电流有关的参数。器件尺寸分为 3 组:大尺寸器件、窄沟道器件和短沟道器件。大尺寸器件 ($W=10\mu\text{m}, L=10\mu\text{m}$) 用于提取和短沟道效应、窄沟道效应以及寄生电阻无关的一些参数,比如迁移率、大尺寸器件阈值电压 V_{th0} 和取决于垂直杂质浓度分布的体效应系数 K_1, K_2 等。因为这些参数受长度和宽度影响很小,可以提取得很精确。有固定的大沟道长度和不同宽度的器件用于提取和窄沟道效应有关的参数;同样,有固定的大沟道宽度和不同长度的器件用于提取和短沟道效应有关的参数。栅氧厚度为 19nm,顶层硅膜厚度为 340nm,埋氧层厚度为 400nm。测试数据由 HP4155 直流参数测试仪测量得到,每个 MOSFET 的测试数据分为 4 组:输出特性曲线(包括低衬偏和高衬偏两种),转移特性曲线(包括线性区和饱和区两种)。

3.2 编码和目标函数

Holland 提出的遗传算法采用的是二进制编码,每个个体由一个二进制符号串组成。二进制编码的优点在于操作简单,交叉、变异等遗传操作容易实

现,但计算复杂,运算效率低。从二进制编码转换为实数变量计算如下:

$$X = a + \frac{b-a}{2^n - 1} \left(\sum_{j=1}^n y_j \times 2^{j-1} \right) \quad (1)$$

其中 a, b 分别为变量取值范围的下限和上限; n 为二进制编码长度; y_j 为二进制编码的第 j 位编码。从(1)式可见采用二进制编码,变量取值是不连续的,其最小变化量取决于编码长度,编码长度太短达不到所需要的精度,太长会引起计算性能的下降。

本文采取了浮点数编码,每个个体的浮点数编码直接对应变量值,计算简单,不需要进行转换,运算效率高。每个个体由 n 个浮点数组组成, n 为小于 5 的整数,根据不同的提参步骤而变。参数提取前需要确定的工艺参数如表 1 所示。这些工艺参数在提参过程中固定不变。

表 1 参数提取前需要确定的工艺参数

Table 1 Prerequisite process parameter prior to parameter extraction

参数	参数含义
T_{ox}	栅氧厚度
T_{si}	硅膜厚度
T_{box}	埋氧层厚度
N_{ch}	沟道掺杂浓度
N_{sub}	衬底掺杂浓度
T_{nom}	测试温度
L_{drawn}	沟道长度
W_{drawn}	沟道宽度
X_j	源漏结深

目标函数是遗传算法能否取得成功的一个关键因素。文献[12]作者提出的目标函数为

$$Q(P) = [(I_k - f_k(V_k, P))]^2 \quad (2)$$

但该目标函数仅适用于拟合一条测试曲线。比如对于某一尺寸器件的输出特性曲线,栅压为 1V 的饱和电流可能比栅压为 5V 的饱和电流低一个数量级,用该目标函数就能很好地拟合栅压为 5V 的输出特性曲线,而不能拟合其他栅压条件的输出特性曲线。一个好的模型应该在模拟不同尺寸器件、不同工作条件时都能取得很好的精确度,因此参数提取中会使用到多种尺寸的器件,上面的目标函数不能适用于多尺寸器件参数提取。

本论文提出的目标函数如下:

$$F = (f_{\text{mea}, n} - f_{\text{sim}, n})^2 \quad (3)$$

$$F = \sum_{\text{devices} \text{ curves } n=0}^N \left(\frac{f_{\text{mea},n} - f_{\text{sim},n}}{f_{\text{mea},n}} \right)^2 \quad (4)$$

公式(3),(4)中的下标 mea 表示测试数据, sim 表示模拟数据. 公式(4)中的 devices 表示用于优化的不同尺寸器件, curves 表示对于每个器件用来优化的一组特性曲线, N 为每条曲线的扫描点数. 只需要拟合一条测试数据时采用第一个目标函数, 如 V_{th0} , U_0, U_a, U_b 等参数的提取, 当拟合多条测试曲线时采用第二个目标函数. 目标函数值越小的个体, 适应度越大, 个体被选中进行交叉、重组等遗传操作的概率越大.

3.3 局部优化

本论文的参数提取工作从整体看采用的是局部优化策略, 整个提参过程分为 20 步, 每一步利用不同的测试数据提取特定的模型参数, 参数提取流程如图 1 所示.

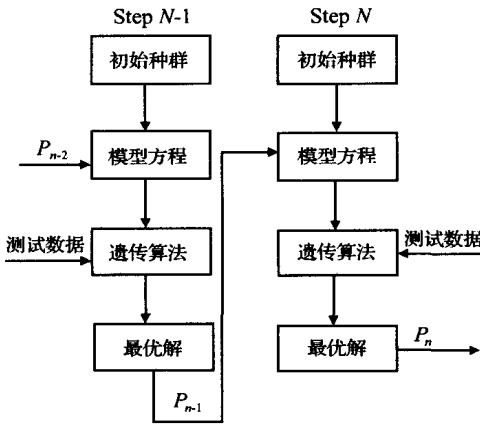


图 1 遗传算法参数提取流程

Fig. 1 Flow chart of parameter extraction using genetic algorithm

Step N 表示第 N 步局部优化, 待优化的参数解表示为 P_n . 首先对待优化的参数随机产生一个初始种群, 这个初始种群和 $N - 1$ 步得到的参数集 P_{n-1} 代入模型方程, 并通过遗传算法和测试数据拟合. 经过种群的不断进化最终得到一个最优解即参数集 P_n . 将参数集 P_n 代入下一步局部优化使用的模型方程, 这些参数值将固定不变.

第一步参数提取如表 2 所示, 用来提取阈值电压、迁移率和迁移率衰减系数, 使用了大尺寸器件的转移特性曲线, 因为这些参数的提取与窄沟道效应和短沟道效应的关系不大. 由于阈值电压和迁移率等与体效应无关, 所以体电位接 0V. 还要注意设置

合理的电流范围, 比如 5% ~ 100%, 以排除亚阈值区域的数据, 一方面是排除栅压很小时测试中的不规则数据, 另一方面是参数提取策略的需要. 图 2 为参数提取的性能跟踪图, 从图中可见采用局部优化策略并设置合理的约束条件后, 遗传算法寻优过程很快, 50 个繁殖代后参数值就基本保持不变了. 因此遗传算法可以很快地找到最优解的范围, 但从图中也可以看出此后的寻优将是一个漫长的过程, 85 个繁殖代才得到最终的最优解, 这时可以考虑修改遗传算子或者结合其他的快速算法.

表 2 遗传算法参数提取示例(第 1 步)

Table 2 First step of parameters extraction using genetic algorithm

步	提取的参数	器件和实验数据
1	$V_{\text{th0}}, U_0, U_a, U_b$	大尺寸器件; $I_D - V_g$ 曲线; $V_d = 0.05V$, $V_b = 0V, V_g = 0 \sim 5V$

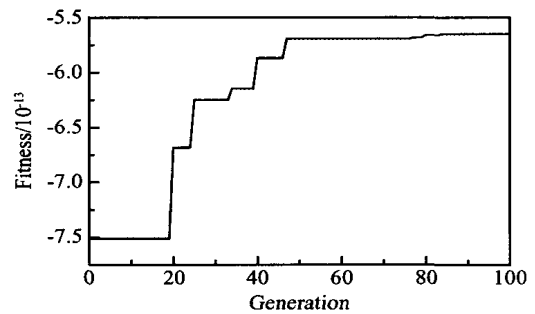


图 2 遗传算法优化过程

Fig. 2 Process of optimization using genetic algorithm

4 结果

为提高遗传算法的速度, 可以优化各个参数的约束条件, 进行初步优化, 然后挑选几个适应度大的个体做为初始种群的个体. 我们用提取的参数进行了模拟, 并与测试数据进行了比较, 比较结果如图 3, 4 所示, 器件尺寸为: $W/L = 20\mu\text{m}/1.2\mu\text{m}$. 定义误差公式如下:

$$\text{Error} = \left[\sum_{n=1}^N \left(\frac{D_{\text{mea}} - D_{\text{sim}}}{D_{\text{mea}} + D_{\text{sim}}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

其中 mea 表示测试数据; sim 表示模拟数据; N 为每条曲线扫描点数. 转移特性曲线的最小误差为 0.62%, 最大误差为 2.72%, 输出特性曲线的最小误差为 0.94%, 最大误差为 6.07%. 从图 3, 4 也可以看到模拟结果很好地拟合了测试数据, SOI

MOSFET 特有的 kink 效应也得到了很好的拟合. 本文对大量器件进行了验证, 模型验证的器件尺寸范围是: $20\mu\text{m}$ W $1.2\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ L $1.2\mu\text{m}$, 共 64 种组合, 都取得了很好的结果.

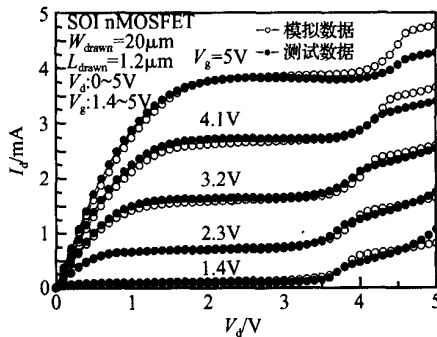


图 3 SOI nMOSFET 输出特性模拟结果与测试结果比较
Fig. 3 Comparison between simulated output curve of SOI nMOSFET transistor using the extracted parameters and measurement data

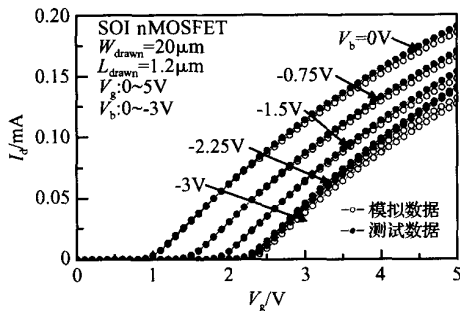


图 4 SOI nMOSFET 转移特性模拟结果与测试结果比较
Fig. 4 Comparison between simulated transfer curve of a SOI nMOSFET transistor using the extracted parameters and measurement data

5 结论

本文提出了遗传算法和局部优化结合提取器件模型参数的新方法, 并通过模拟结果和实验数据的对比验证了本方法的可行性. 本方法每一步参数提取都是在特定的器件工作条件下利用特定的测试数据进行, 在此工作条件下这些参数起主要作用, 保证了提取的参数在合理的取值范围内, 得到的参数物理意义明确. 本方法利用遗传算法强大的全局搜索能力, 不依赖于初始值的选择, 不易陷入局部最优值. 本方法不需要对模型有深入的了解, 不用进行模

型方程的化简, 提取过程中也不需要进行求导等复杂的计算, 具有很强的通用性, 可以很容易地移植到其他领域的参数提取、优化及数据拟合等方面.

参考文献

[1] Banna S R, Chan P C H, Chan M, et al. A physically based compact device model for fully depleted and nearly fully depleted SOI MOSFET. IEEE Trans Electron Devices, 1996, 43 (11): 1914

[2] Suh D, Fossum J G. A physically charge-based model for non fully depleted SOI MOSFET 's and its use in assessing floating-boby effects in SOI CMOS circuits. IEEE Trans Electron Devices, 1995, 42 (4): 728

[3] Wang Hongmei, Xi Xuemei, Zhang Xing, et al. Analytical current model for deep-submicrometer FD SOI MOSFETS applicable to circuit simulation. Chinese Journal of Semiconductors, 1998, 19(10): 756 (in Chinese) [汪红梅, 奚雪梅, 张兴, 等. 深亚微米薄膜全耗尽 SOI MOSFET 的强反型电流模型. 半导体学报, 1998, 19(10): 756]

[4] Youssef Hammad M, Schroder D K. Analytical modeling of the partially-depleted SOI MOSFET. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(2): 252

[5] Liao Huailin, Zhang Xing, Huang Ru, et al. An SOI MOSFET model for analog circuit design. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(3): 329 (in Chinese) [廖怀林, 张兴, 黄如, 等. 一个适用于模拟电路的深亚微米 SOI MOSFET 器件模型. 半导体学报, 2001, 22(3): 329]

[6] BSIM Group. BSIMSOI v2. 0 MOSFET Model User 's manual for BSIMDD2. 0. University of California, Berkeley, 1999

[7] Colinge J P. Silicon-on-insulator technology: materials to VLSI in 21st century. Beijing: Science Press, 1993 (in Chinese) [考林基 J P. SOI 技术 —21 世纪的硅集成电路技术. 北京: 科学出版社, 1993]

[8] Zhang Haipeng, Wei Tongli, Feng Yaolan, et al. An analytical temperature-dependent kink effect model of PD SOI nMOSFET. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(10): 1320 (in Chinese) [张海鹏, 魏同立, 冯耀兰, 等. PD SOI nMOSFET 翘曲效应的温度模型. 半导体学报, 2001, 22(10): 1320]

[9] Yang Zhilian, Shen Ming. Introduction to VLSI design methodology. Beijing: Tsinghua University Publicers, 1999: 221 (in Chinese) [杨之廉, 申明. 超大规模集成电路设计方法学导论. 北京: 清华大学出版社, 1999: 221]

[10] Watts J, Bittner C, Heaberlin D, et al. Extraction of compact model parameter for ULSI MOSFETs using a genetic algorithm. MSM99, 1999

[11] Wang Xiaoping, Cao Liming. Genetic algorithm: theory, application and realization with software. Xi 'an: Xi 'an Jiao Tong University Press, 2002 (in Chinese) [王小平, 曹立明. 遗传算法 —理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社,

2002]
[12] Jiang Min, Yang Bin, Zhang Liang, et al. MOSFET param-

eters extraction in VDSM ULSI CAD with a parallel-program-
ming strategy. ASICON, 2001:673

Model Parameters Extraction of a BSIM SOI Model Based on the Genetic Algorithm

Li Ruizhen and Han Zhengsheng

(*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract : A new method to extract model parameters of a BSIM SOI, which is based on the combination of the genetic algorithm and local optimization and has the advantages of both global optimization and local optimization, is presented. The extracted parameters have definite physical meaning, and it is easy to get the global optimization using this method. Computation is very simple using this method and it does not require an in-depth understanding of the model equation or a lot of experience with parameter extraction. Therefore, it can be conveniently used. Simulation work is done with parameters found by this method, and simulation results are compared with the measurement data of a 1.2 μm CMOS/SOI. The simulation results fit the measurement data very well. The unique kink effect of SOI devices fits very well with the measurement data.

Key words : genetic algorithm; SOI; parameter extraction

EEACC: 0260; 2520M; 2530F **PACC:** 7340Q

Article ID : 0253-4177(2005)08-1676-05

Li Ruizhen male, was born in 1979, PhD candidate. His research interest includes IC process, device model, and parameters extraction.
Email: liruizhen@ime.ac.cn

Han Zhengsheng male, was born in 1962, advisor of PhD candidates. His primary research interest includes SOI/CMOS VLSI technology and design.

Received 4 December 2004, revised manuscript received 22 March 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics