

半导体器件建模与优化系统

谢晓锋 鲁勇 李钊 阮骏 姚依 张文俊 杨之廉

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 随着器件尺寸的缩小, 器件特性空间变得越来越复杂. 如果仍采用手工参数调整的方法, 不仅需要有良好的器件物理知识, 而且也不一定能得到合适的结果. 为节约设计时间, 对半导体器件建模与优化系统(MOSSED)进行了研究与实现. 该系统可以对半导体器件进行有效地建模、优化和综合, 以得到所需要的器件. 通过一些实例对部分功能进行了说明, 并和一些已有的系统进行了比较.

关键词: 响应表面方法; 实验设计; 遗传算法; 微粒群优化

EEACC: 2570 A; 1180

中图分类号: TN405 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2003)03-0327-05

1 引言

半导体器件设计极大地受益于模拟和模型的使用, 从中节省开发新的或扩展现有技术的时间与费用. 但技术发展需要的远不止是一种基本的模拟能力, 相反, 用于帮助实现和优化设计的建模与优化工具和方法变得越来越重要了^[1~3].

MIT 和 TI 公司合作完成的 DoE/Opt 系统^[1]、维也纳理工大学的 VISTA 系统^[2]等, 均提供了友好的图形用户界面, 并结合优化算法和实验设计 (design of experience, DoE)/ 响应表面法 (response surface methodology, RSM) 进行优化. 近年来研究较多的深亚微米器件的反向建模, 如 SIESTA^[3], 也是基于将器件模拟器和优化算法结合进行器件优化. 然而这些系统, 有的只是一个原型系统, 并不具备集成式 TCAD 开发环境的功能; 有的系统采用的优化算法和模拟器比较单一, 且对具体细节还缺少深入地考虑.

鉴于此, 从 1998 年开始, 清华大学微电子所与 Motorola 公司合作, 以期实现半导体工艺/器件的整体综合流程. 而半导体器件建模与优化系统^[4~9]

(modeling & optimization system for semiconductor devices, MOSSED) 是其中的一个部分. 本文首先描述 MOSSED 的体系结构与具体构造, 然后讨论它的一些应用, 并和已有的系统进行比较.

2 MOSSED 介绍

通过这些年的研究, 我们认识到一个成功的 TCAD 框架结构必须具备如下一些要素:

- (1) 稳定性: 因为一次优化通常要运行很长时间;
- (2) 局域网的并行模拟^[4]: 须考虑软硬件的错误;
- (3) 可扩展性^[1~4]: 必须处理不同的程序、数据格式和它们的组合;
- (4) 器件参数化与参数链接^[5]: 设计空间通过器件参数化得到, 这个需要已经在一些较新的 TCAD 软件, 如 GENESIS^[10]中实现;
- (5) 全局优化能力^[6,7]: 尤其是器件响应空间随着器件缩小变得非线性化时;
- (6) 嵌入已有知识^[8]: 嵌入目标和参数之间的已知关系可以大大地减少搜索时间.

图1给出了 MOSSSED的体系结构.基于图形界面,用户可以控制各种计算组件,包括模拟、优化以及实验设计和响应表面模型等的组合执行.而并行调度器被用来进行局域网的并行计算.

计算组件是 MOSSSED 计算的核心部分,主要组件如图2所示.每个组件可视为一个黑盒,它有输入和输出信号.通过运行管理器,不同类型的计算组件可以交流信号,从而实现不同的功能.

Model 类通过设计参数组(designable) 得到响应(response),即器件特性.主要包括需要调用如 PISCES^[11]、GENESIS^e 等外部 TCAD 模拟器的模型接口, RSM 模型以及其它一些嵌入的解析模型.

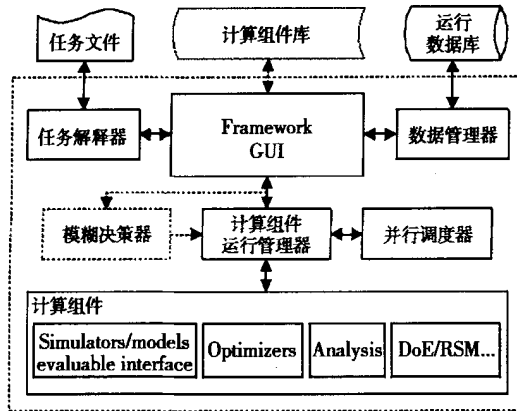


图1 MOSSSED体系结构

Fig.1 Architecture of MOSSSED

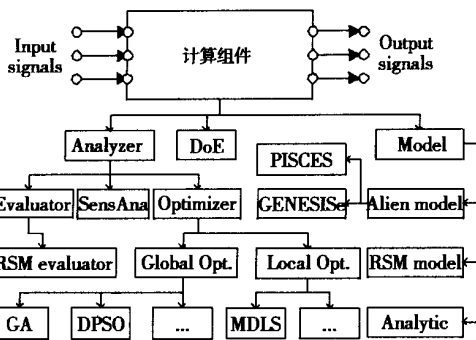


图2 计算组件一览

Fig.2 Overview for computational components

Analyzer 类通过设计参数和设计空间进行数据的分析和处理.主要包括:(1)优化器,其中有基于群体的全局优化器如遗传算法(genetic algorithm, GA^[6])、基于耗散结构的微粒群优化(dissipative particle swarm optimization, DPSO^[7])、以及局部优化器如修正阻尼最小二乘法(MDLS)等;(2)灵敏度

分析;(3)评价器,对一组设计点进行评价以建模,目前嵌入了 RSM 评价器.

DoE 类在设计空间中产生设计参数组,主要有全因子设计、拉丁方取样(LHS)设计等.

运行数据库用来有选择的保存计算结果.而参数和目标之间一些已知的单调关系也会被嵌入^[8],这可以更好地了解设计空间.引导优化算法能够被引导在有希望的区域进行.

典型的计算组件的组合方式如图3所示.一种是较为简单的情形,可利用 RSM 评价器根据 DoE 结果产生 RSM 模型,并替换较为耗时的 TCAD 模拟器,如过程①;但对于搜索空间高度非线性而且参数维数较高的情形, RSM 模型不够准确,从而需要由全局优化器直接调用 TCAD 模拟器进行优化设计,如过程②.采用组合方式可以使得加入新的功能更为灵活.

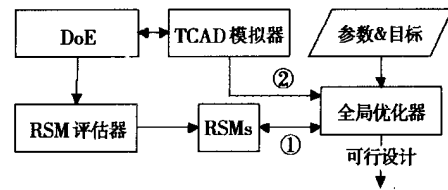


图3 实现器件优化的计算组件组合方式

Fig.3 Combination methods of computational components for realizing device optimization

3 应用实例与分析

我们利用一种新型聚焦离子束(focused ion beam, FIB) MOS 进行综合^[4],器件的参数化如图4所示.如果注入为一次,则称为 SFIBMOS;如果注入为两次,即包括 Peak 2,则称为 DFIBMOS.

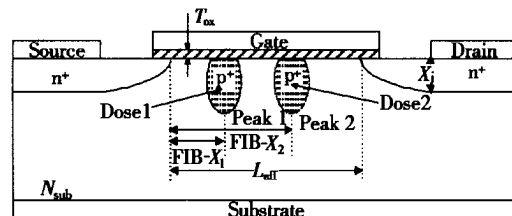


图4 FIBMOS 器件参数化

Fig.4 Parameterization of FIBMOS device

3.1 “可接受区”搜索

在 Hosack 的工艺综合流程^[12],需得到符合对器件响应约束的“可接受区”.为此设计边界和区域

两种综合方式,对 $L_{\text{eff}} = 0.58 \mu\text{m}$ 的 SFIBMOS 采用 GA 调用 PICSES 进行了综合^[5]. 划分三个子任务: (1) $I_{\text{on}} = 1.2 \times 10^{-4} \pm 1\% \text{ A}/\mu\text{m}$, 满足 $I_{\text{off}} \leq 10^{-12} \text{ A}/\mu\text{m}$, $R_{\text{out}} \geq 8 \times 10^4 \Omega$; (2) $I_{\text{on}} = 1.5 \times 10^{-4} \pm 1\% \text{ A}/\mu\text{m}$, 满足 $I_{\text{off}} \leq 1 \times 10^{-12} \text{ A}/\mu\text{m}$, $R_{\text{out}} \geq 8 \times 10^4 \Omega$; (3) $I_{\text{off}} = 1 \times 10^{-12} \pm 1\% \text{ A}/\mu\text{m}$, 满足 $I_{\text{on}} \in [1.2 \times 10^{-4}, 1.5 \times 10^{-4}] \text{ A}/\mu\text{m}$, $R_{\text{out}} \geq 8 \times 10^4 \Omega$. 每个子任务负责优化搜索“可接受区”的一条可能边界. 每个子任务约需要 520 次 PICSES 模拟. 图 5 给出了边界综合的结果; 图 6 给出了区域综合的结果, 利用得到的可行设计点组成“准可行设计空间”.

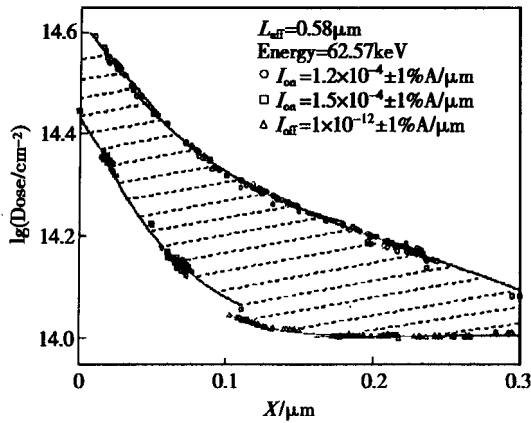


图 5 边界综合的“可接受区”结果

Fig. 5 “Acceptability region” by boundary synthesis

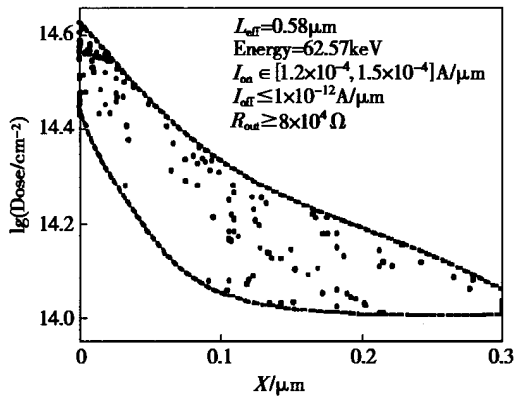


图 6 区域综合的“可接受区”结果

Fig. 6 “Acceptability region” by regional synthesis

我们还研究了将实数设计空间根据参数的工艺精度影响转换为整型空间, 并加入适应性复合算子, 对于器件设计中常见的“约束满足”问题, 能有效的提高对可行设计空间的覆盖率^[9], 获得较大的设计余量.

3.2 器件建模

响应表面方法可以建立数学模型来“廉价”的模拟非常耗时的器件模拟器. 可以用来了解参数变化趋势、特性预测, 在响应空间非线性程度较低时, 甚至可以利用它来寻找可行区间.

图 7 给出了对一个 $L_{\text{eff}} = 0.35 \mu\text{m}$ 的 SFIBMOS 的 I_{on} 和 G_{out} 的响应表面与模拟结果的对比. 其中设计空间 $\text{Dose} \in [1 \times 10^{12}, 2 \times 10^{13}] / \text{cm}^{-2}$, $N_{\text{sub}} \in [5 \times 10^{16}, 1 \times 10^{18}] / \text{cm}^{-3}$. 首先采用全因子 DoE 进行了 5^2 次 PICSES 模拟, 然后调用 RSM evaluator 建立 RSM 模型. 图 8 给出了 RSM 模型对数结果的等值线, 其中实线为 I_{on} , 虚线为 G_{out} . 两条线并不平行, 说明器件是可以优化的. 图 9 给出了利用图 8 结果在 $\lg I_{\text{on}} = -3.7$ (即 $I_{\text{on}} = 2 \times 10^{-4} \text{ A}/\mu\text{m}$) 时优化 G_{out} 得到的结果, 其中实线为优化后的结果, 虚线为优化前的结果.

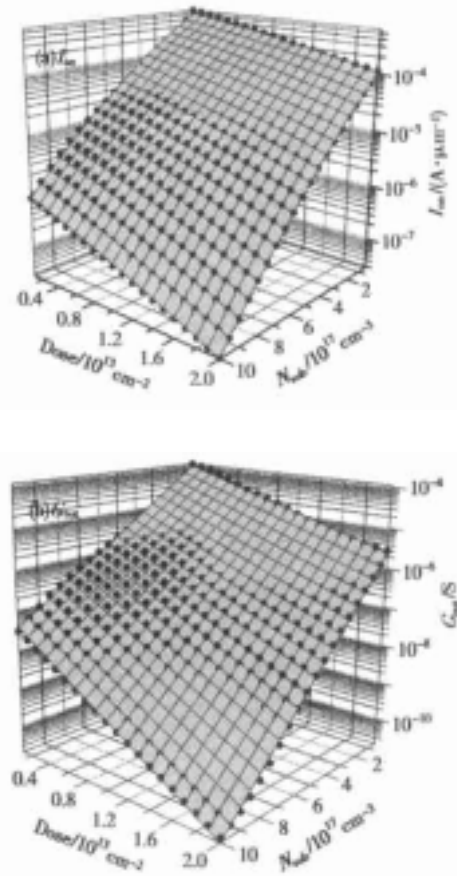


图 7 RSM 和模拟结果的比较 $L_{\text{eff}} = 0.35 \mu\text{m}$

Fig. 7 Comparison for RSM and simulation results $L_{\text{eff}} = 0.35 \mu\text{m}$

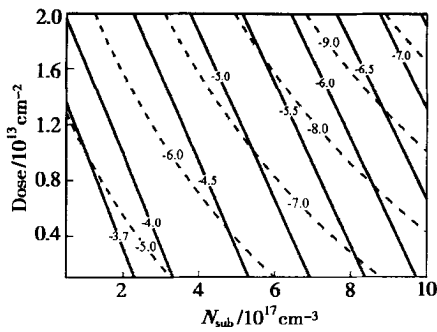


图 8 RSM 模型对数等值线 实线: I_{on} , 虚线: G_{out}

Fig.8 Logarithmic isolines by RSM model Solid: I_{on} , dashed: G_{out}

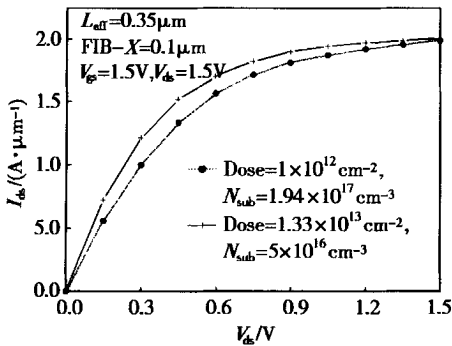


图 9 利用 RSM 模型得到的优化结果(小的 G_{out})

Fig.9 Optimized result by using RSM model for small G_{out}

3.3 器件优化

在大部分情况下,需要得到对一些器件响应进行约束下的某些响应的优化.在设计空间较为简单(如维数低,非线性程度低)时,可以利用 RSM 建模直接处理,或者在 RSM 模型的基础上进行优化.当然,在很多时候,尤其是器件进入深亚微米后,响应空间相当复杂,而设计维数也很难降低,加上数值模拟器本身由于网格设置等因素带来的波动,全局优化能力变得至关重要.

为此 MOSSED 中嵌入了 GA(GENOCOP)^[13], 差异演化(differential evolution, DE)^[14], 并开发了 DPSO^[7]等全局优化算法.其中 DPSO 模拟自组织的耗散结构^[15],对多峰函数的数值优化效果很好^[7].图 10 给出了几种全局优化算法对一个 0.25 μm 沟长的 DFIBMOS 的 I_{on} 在一定约束条件下最大化的优化结果比较.纵坐标表示当前优化解 F_c 接近最优解 F_{opt} 的程度,横坐标为优化代数.表 1 为器件的设计参数空间,而表 2 为优化目标.

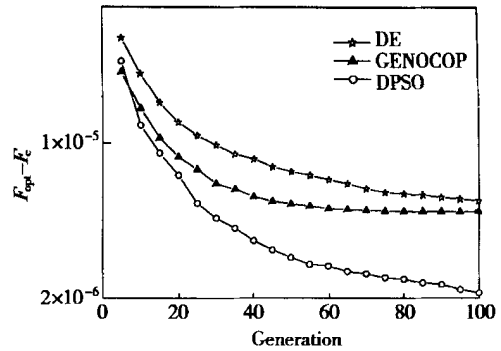


图 10 几种全局优化算法的结果比较

Fig.10 Performance comparison for different global optimization algorithms

表 1 DFIBMOS 设计空间

Table 1 Design space of DFIBMOS

Parameter	Min	Max	σ
FIB $X_1 / \mu\text{m}$	0.00	0.25	2.5×10^{-4}
Dose1 / cm^{-2}	1×10^{10}	1×10^{13}	1×10^{10}
FIB $X_2 / \mu\text{m}$	0.00	0.25	2.5×10^{-4}
Dose2 / cm^{-2}	1×10^{10}	1×10^{13}	1×10^{10}
N_{sub} / cm^{-3}	1×10^{15}	1×10^{18}	1×10^{15}

表 2 DFIBMOS 优化目标

Table 2 Optimization objectives of DFIBMOS

Parameter	Objective
$I_{on} / (\text{A} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	最大化
$I_{off} / (\text{A} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	$\leq 1 \times 10^{-14}$
G_{out} / S	$\leq 1 \times 10^{-5}$

4 结论

本文讨论了半导体器件建模与优化系统 MOSSED 的原理和构成,及一部分应用方式.表 3 给出了 MOSSED 和已有的 TCAD 系统的比较.

表 3 MOSSED 和已有 TCAD 系统的比较

Table 3 Comparison with existing TCAD systems

名称	VISTA	DoE/ Opt	SIESTA	MOSSED
GUI	有	有	有	有
DoE/ RSM	有	有	无	有
局部优化	有	有	有	有
全局优化	无	无	无	有
并行计算	有	无	有	有
器件知识	无	无	无	嵌入

本系统在全局优化方面的优势可以提高处理复杂设计空间的能力.而同时具有的 RSM 技术和局部优化能力可以使得系统能适用于从简单到复杂的

各种情形. 器件知识的嵌入可以加快搜索速度, 而并行处理能力可以减轻全局优化算法在计算速度方面的劣势.

当然, 要达到更为有效的建模与优化, 合理的选择技术非常重要, 否则也会导致计算效率低下, 甚至无法得到结果. 在今后的研究中, 需要进一步利用专家的一些模糊经验, 构建一个更高层次的模糊决策器以根据问题和资源合理地选择所需要的技术, 使得本系统的处理能力更优.

参考文献

- [1] Boning D S, Mozumder P K. DoE/ Opt : a system for design of experiments, response surface modeling, and optimization using process and device simulation. IEEE Trans Semicond Manuf, 1994, 7:233
- [2] Plasun R, Stockinger M, Selberherr S. Integrated optimization capabilities in the VISTA technology CAD framework. IEEE CAD, 1998, 17(12):1244
- [3] Strasser R, Plasun R, Selberherr S. Practical inverse modeling with SIESTA. SISPAD, 1999:91
- [4] Li Z, Xie X F, Zhang W J, et al. Realization of semiconductor device synthesis with the parallel genetic algorithm. Asia and South Pacific Design Automation Conference, 2001:45
- [5] Xie X F, Li Z, Ruan J, et al. Realization of device synthesis with the genetic algorithms. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(1):95(in Chinese)[谢晓锋, 李钊, 阮骏, 等. 应用遗传算法实现 MOS 器件综合. 半导体学报, 2002, 23(1):95]
- [6] Xie X F, Zhang W J, Yang Z L. A parents selection strategy fighting premature convergence in floating genetic algorithm. Control and Decision, 2002, 17(5):625(in Chinese)[谢晓锋, 张文俊, 杨之廉. 一种防止浮点遗传算法早熟收敛的父代选择策略. 控制与决策, 2002:17(5):625]
- [7] Xie X F, Zhang W J, Yang Z L. A dissipative particle swarm optimization. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2002:1456
- [8] Xie X F, Zhang W J, Yang Z L. Incorporating knowledge in genetic algorithms for device synthesis. Int Conf on Solid-State and Integrated Circuit Technology, 2001:1143
- [9] Xie X F, Zhang W J, Yang Z L. Improved genetic algorithm for semiconductor device synthesis system. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(2):173[谢晓锋, 张文俊, 杨之廉. 改进的用于半导体器件综合系统的遗传算法. 电子学报, 2002, 30(2):173]
- [10] ISE TCAD Software, Release 6.1. ISE AG, Zurich, 2000
- [11] Yu Z, Chen D, So L, Dutton R W. PISCES-2ET manual. Integrated Circuits Laboratory, Stanford University, 1994
- [12] Hosack H H, Mozumder P K, Pollack G P. Recent advances in process synthesis for semiconductor devices. IEEE Trans Electron Devices, 1998, 45(3):626
- [13] Michalewicz Z. Genetic algorithm + data structures = evolution programs. Springer Verlag, 1994
- [14] Storn R, Price K. Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by differential evolution. IEEE Int Conf on Evolutionary Computation, 1996:842
- [15] Nicolis G, Prigogine I. Self-organization in nonequilibrium systems: from dissipative systems to order through fluctuations. New York: John Wiley, 1977

Modeling and Optimization System for Semiconductor Devices

Xie Xiaofeng, Lu Yong, Li Zhao, Ruan Jun, Yao Yi, Zhang Wenjun and Yang Zhilian

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As device dimensions continue to be decreased, device characteristics become more complicated. The method of adjusting parameter manually needs preferable knowledge on device physics, and can not always get suitable results. In order to reduce design time, the modeling and optimization system for semiconductor devices (MOSSSED) is studied and implemented. The system can perform modeling, optimization and synthesis for semiconductor devices to achieve desired devices. Some functions are demonstrated by some examples. At last, the comparison to other systems is also performed.

Key words: response surface methodology; design of experience; genetic algorithm; particle swarm optimization

EEACC: 2570A; 1180

Article ID: 0253-4177(2003)03-0327-05