

[奥地利] N.艾罗拉 著

用于VLSI模拟的小尺寸

MOS器件模型

理论与实践

微电子学系列

科学出版社

73.7552
194

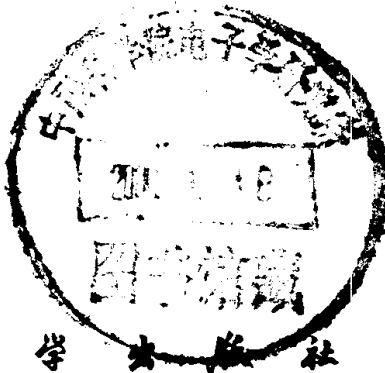
用于 VLSI 模拟的小尺寸 MOS 器件模型

理论与实践

[奥地利] N. 艾罗拉 著

张兴 李映雪 等译

韩汝琦 校



科学出版社

1999

2001008

图字 01-97-1999 号

0040/17
内 容 简 介

本书介绍了超大规模集成电路模拟中的小尺寸 MOS 器件模型及模型参数的提取. 书中从基本半导体器件物理和 pn 结理论入手, 顺序介绍了 MOS 电容理论, 不同的 MOSFET 模型(直流模型、动态模型、热载流子效应模型等), 以及工业上通用的标准电路模拟软件——伯克利 SPICE 中采用的二极管模型和 MOSFET 模型, 同时还讨论了数据测量、模型参数提取, 以及由工艺引起的模型参数的统计变化.

本书可供从事 MOSFET 器件模型、模拟和 ICCAD 研究的科技工作者, 以及大学微电子专业的教师及高年级学生阅读参考.

图书在版编目(CIP)数据

用于 VLSI 模拟的小尺寸 MOS 器件模型: 理论与实践/(奥地利)艾罗拉(N. Arora)著; 张兴等译. -北京: 科学出版社, 1999

书名原文: MOSFET Models for VLSI Circuit Simulation Theory and Practice, Springer-Verlag

ISBN 7-03-007518-8

I. 用… I. ①艾… ②张… III. MOS 集成电路 IV. TN432

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 13242 号

N. Arora

MOSFET MODELS FOR VLSI CIRCUIT SIMULATION

Theory and Practice

Copyright © 1993 Springer-Verlag/Wien

本书由 Springer-Verlag 授权, 根据英文版翻译

版权所有, 翻印必究

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

科地亚印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 9 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1999 年 9 月第一次印刷 印张: 21 1/8

印数: 1—2 000 字数: 549 000

定价: 42.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

中译本序

这本书的主要译、校者是我在北京大学微电子学研究所异质结构器件和电路(SOI)研究室的同事们,除了资深的韩汝琦教授和李映雪教授外,其他基本上都是我的学生.他们是一群精力充沛、富于开拓与创新精神的年轻学者.我十分赞赏他们不计个人待遇而愿立足于祖国,献身科学事业的人生选择.翻译这本在国际上有一定声誉的著作也是他们业余生活的一个组成部分.我虽然由于杂事缠身无暇仔细阅读他们译著的每一章节,但却十分乐意在这本译著即将出版之际为他们写上一段话.

可以说,信息时代的帷幕是由晶体管发明而拉开的,而知识经济这一形态也是由集成电路的发展和微电子产业的发展而孕育的.不少历史学家往往喜欢用器具给时代命名,如石器时代、青铜器时代、铁器时代等.从而把当今时代也对应地称为硅石时代.它是以1968年开始计算的,在1968年,有关硅材料器件和电路论著的发表数已经超过了钢铁方面的论著.

当前,世界GNP增值的65%与微电子技术有关.微电子产业已成为促进国民经济持续发展和保证国家安全的战略性基础产业.21世纪将是微电子技术产业持续发展的新世纪.“System On Chip”的时代已经到来,在约 100mm^2 大小的芯片上的一个集成系统,其集成度可达 10^9 — 10^{10} ,甚至高达 10^{12} 元件/芯片,最小特征线宽为 $0.35\mu\text{m}$ 的产品已大批量生产,2000年将向 0.18 — $0.15\mu\text{m}$ 发展,微电子设计技术面临新的挑战.

随着集成度的不断提高和器件尺寸的不断减小,IC CAD需要发展新的设计模式.作为设计的重要环节,电路行为仿真和性能评估是以器件模型和器件模拟为基础的.在半导体进入亚微米和深亚微米发展阶段,出现了一系列新的物理效应,因此得到既简洁

又能精确描述器件特性的器件模型就成了集成电路模拟的一个重要科学问题.正是基于这个原因,为了适应我国集成电路发展的需要,我推荐他们翻译了 N. Arora 教授编写的“MOSFET Models for VLSI Circuit Simulation——Theory and Practice”一书.

艾罗拉博士在美国数字设备公司(DEC)工作,他在半导体器件模型、模拟领域辛勤耕耘,获得了许多重要成果.他以深厚的理论基础和实践经验构成这本书的精华.使之成为当前国际上较为全面、系统地阐述 MOSFET 器件模型、模拟与实际应用的参考书.它给出了 MOS 器件的各种模型,综合分析了器件模型中的许多重要物理问题.此外,书中还特别论述了读者十分关心的如何根据器件数据提取模型参数的有关问题以及一些通用的集成电路模拟软件等.无疑,这本书将成为我国从事 MOSFET 器件模型、模拟和 ICCAD 研究的科技工作者、大学教师,及博士、硕士研究生和大学生的重要参考书.

本书是在张兴教授的组织下完成的,他翻译了第四、五章并对全部译稿进行了初审和最后的校订.前言和第一章由赵清太博士翻译,第二、三章由倪卫华小姐翻译,第六章由李映雪教授翻译,第七、八、十章由汪红梅博士翻译,第九章由奚雪梅博士翻译,第十一、十二章由杨兵博士翻译.黄如博士初校了前言及第一、六、七、八章的译稿,李映雪教授初校了第二、四、五、十、十二章的译稿,其余章节由张兴教授初校.

尽管这本书由理论功底深厚的韩汝琦教授把关终审,质量有了较好的保证,然而多数担任校、译工作的终究还是年轻学者,不妥之处在所难免,还望读者帮助指正.

我仅以此短序祝贺他们所取得的成果.

王阳元

1998 年夏于北京大学

前 言

金属-氧化物-半导体(MOS)晶体管是MOS集成电路的基本组成单元.利用MOS技术制备超大规模集成电路已成为半导体工业中的主导技术.在过去的十多年中,MOS集成电路的集成度以惊人的速度增长,这主要体现在MOS晶体管的尺寸越来越小以及工艺技术的逐步提高.目前,有效沟道长度(或电学沟道长度)为0.5微米、集成度达三百万个晶体管的超大规模集成电路已经大批量生产.在制造集成电路之前,如果没有能够正确预测电路特性的模拟工具帮助,设计如此复杂的芯片几乎是不可能的.作为电路设计和分析工具的模拟器,它的可信度取决于其中器件模型的正确性.由于器件尺寸越来越小,器件模型越来越复杂,如何能得到既简洁又能精确描述器件特性的模型就成了电路模拟中一个重要的问题.

迄今为止,已发表了大量关于短沟道器件模型的文章.但是应该利用什么样的模型、用哪些模型参数值以及怎样提取这些参数值等许多问题仍常常令人困惑.作为在半导体器件模型领域耕耘了15年之久的工作者,我感到有必要写这样一本书,来弥补理论与MOS器件模型实际应用之间的鸿沟.本书正是基于这个方针而作的一次尝试.

本书讨论的MOS场效应晶体管(MOSFET)模型是从基本半导体理论出发推导出的.这些模型由简入繁,在一些复杂的模型中考虑了当今MOS超大规模集成电路亚微米器件中发现的一些新的物理效应.本书对推导模型时的一些假定进行了重点强调,以便使人们清楚地理解模型的准确性.由于可靠性在电路设计中的重要性,书中也讨论了器件的可靠性模型.在设计MOS集成电路时,正确理解这些模型是非常必要的.

从实验数据中提取器件模型参数是器件模型工作中很重要的一部分,但却常常被人们忽视.本书首次给出了关于 MOS 器件模型参数提取的详尽描述.由于器件参数随制造工艺的变化而变化,因此得到最坏情况下的设计参数是保证最大成品率的关键,对此本书也作了一些介绍.

本书内容通俗易懂,即使对半导体器件物理不熟悉的研究生也能理解错综复杂的 MOSFET 模型.本书第一章概述了电路模拟所采用的器件模型的情况;第二章简要而又完整地综述了半导体器件物理和 pn 结理论,目的是为了更好地理解 MOSFET 模型;第三章讨论了当前 MOS 技术中 MOS 晶体管的特性;第四章讨论了 MOS 电容理论,这对理解 MOS 模型是必要的;第五至第八章分别讨论了不同的 MOSFET 模型,如阈值电压、DC(稳态)、AC 及可靠性模型等;第九和第十章阐述了数据测量和模型参数提取;第十一章主要讨论了工业上通用的标准电路模拟软件——伯克利 SPICE 中采用的二极管和 MOSFET 模型;最后,在第十二章中讨论了由工艺引起的模型参数的统计变化.

我衷心希望这本书能成为现代 MOS 技术中 MOSFET 模型领域的重要技术资料,并成为对此领域感兴趣的从事器件和电路工作的工程技术人员和工科学生有用的参考书.

在本书的写作过程中,直接或间接地得到了我的同行们给予的大量鼓励和帮助.首先我要感谢 DEC 公司的组织工作,对 Rich Hollingsworth 博士(公司顾问)和 Llanda Richardson 博士(顾问)在本书写作过程中给予的鼓励和支持表示感谢,另外我衷心感谢 F. Fox 博士、D. Ramey 博士及 K. Mistry 先生对本书初稿许多章节的审阅和建议.我还要感谢 R. Rios、J. Huang 博士及 K. Roal 先生对完成本书给予的非常宝贵的帮助.我还要感谢本部门内外许多同事以各种方式对本书稿件准备工作给予的帮助,他们是 A. Bose, D. Bell, B. Doyle, J. Faricelli, A. Enver, K. L. Kodanpani, L. Richardson, A. E. Shanker, Messers L. Bair, N. Khalil, L. Gruber 博士, S. C. Jain 教授(前任 SPL 主任), D. Antoniadis 教

授(MIT), G. Gildenblat 教授(宾州大学), D. J. Roulston 教授(UW), R. Chadha 博士(AT&T)以及 M. Sharma 博士(Motorola)等. 我还要特别感谢我的老同事和好朋友 Risal Singh 博士, 他在百忙之余, 花了大量时间帮助我使本书能以现在的形式面世.

最后, 我要衷心感谢我的全家, 没有我全家的支持, 完成这本书也是不可能的. 正是由于我妻子 Suprabha 的理解及我的儿子 Surendra 和女儿 Shilpa 的合作才使这本书成为现实.

1992年4月11日

于什鲁斯伯里

符号表

下面是本书中用到的符号,但本表不包括在一些特殊章节中偶尔使用的符号.

符号	物 理 意 义	单 位
A_i	离化常数	cm^{-1}
B_i	离化常数	V/cm
C_d	单位面积耗尽层电容	F/cm^2
C_{fb}	单位面积平带电容	F/cm^2
C_g	MOS 电容器的单位面积电容	F/cm^2
C_{gc}	单位面积的栅-沟道电容	F/cm^2
C_{gb}	单位面积的栅-体电容	F/cm^2
C_{gs0}	单位长度的栅-源覆盖电容	F/cm
C_{gd0}	单位长度的栅-漏覆盖电容	F/cm
C_{gbo}	单位长度的栅-体覆盖电容	F/cm
C_{GS}	本征栅-源电容	F
C_{GD}	本征栅-漏电容	F
C_{GB}	本征栅-体电容	F
C_j	pn 结耗尽电容	F/cm^2
C_{ox}	单位面积的栅氧化层电容	F/cm^2
C_{oxt}	总的栅氧化层电容	F
C_{sc}	单位面积的空间电荷电容	F/cm^2
D_{it}	界面态密度	电荷/ cm^2
D_n	电子扩散系数或扩散常数	cm^2/s
D_p	空穴扩散系数或扩散常数	cm^2/s
E_a	离化受主能级	eV
E_d	离化施主能级	eV

符号	物 理 意 义	单 位
E_c	导带底能级	eV
E_v	价带顶能级	eV
E_g	半导体禁带宽度	eV
E_i	本征能级	eV
E_f	费米能级或硅体(n 或 p 型)中的费米能级	eV
E_{fn}	n 型硅中的费米能级	eV
E_{fp}	p 型硅型硅中的费米能级	eV
\mathcal{E}	空间电荷区电场	V/cm
\mathcal{E}_x	垂直于沟道方向的电场	V/cm
\mathcal{E}_y	平行于沟道方向的电场	V/cm
\mathcal{E}_c	载流子速度饱和时的临界电场	V/cm
\mathcal{E}_{eff}	有效纵向电场	V/cm
\mathcal{E}_{ox}	氧化层中的电场	V/cm
\mathcal{F}_n	电子准费米能级	eV
\mathcal{F}_p	空穴准费米能级	eV
G	载流子产生率	s^{-1}
g_d	二极管的小信号电导	A/V
g_{ds}	MOSFET 小信号输出电导	A/V
g_m	MOSFET 小信号跨导	A/V
g_{mbs}	MOSFET 小信号衬底跨导	A/V
I_d	二极管电流或 MOSFET 的漏电流	A
I_g	MOSFET 的栅电流	A
I_b	MOSFET 的衬底电流	A
I_s	二极管泄漏电流或 MOSFET 的源电流	A
I_{ds}	漏源电流	A
J_n	电子电流密度	A/cm ²
J_p	空穴电流密度	A/cm ²
J_1	结泄漏电流	A

符号	物理意义	单位
k	玻尔兹曼常数	J/K
L	有效或电学沟道长度	μm
L_m	掩模版上的沟道长度	μm
L_d	德拜长度	cm
l_d	漏端附近由于沟长调制效应引起的沟道长度变化	cm
m_n^*	电子有效质量	g
m_p^*	空穴有效质量	g
m_0	电子静止质量	g
N_a	p 型硅中杂质(受主)浓度	cm^{-3}
N_d	n 型硅中杂质(施主)浓度	cm^{-3}
N_b	硅体区中的杂质(n 或 p 型)浓度	cm^{-3}
N_a^-	离化受主杂质浓度	cm^{-3}
N_d^+	离化施主杂质浓度	cm^{-3}
n	自由电子浓度	cm^{-3}
n_i	本征载流子浓度	cm^{-3}
n_p	p 型硅中的电子浓度	cm^{-3}
p	自由空穴浓度	cm^{-3}
p_n	n 型硅中的空穴浓度	cm^{-3}
q	电子电量	C
Q_o	界面处的氧化层电荷密度	电荷/ cm^2
Q_b	单位面积体(耗尽)电荷	C/cm^2
Q_i	单位面积可动(反型)电荷	C/cm^2
Q_g	单位面积栅电荷	C/cm^2
Q_s	硅中单位面积感生电荷	C/cm^2
Q_t	总的反型电荷	C
Q_G	总的栅电荷	C
Q_S	总的源电荷	C
Q_D	总的漏电荷	C
R_{ch}	本征沟道电阻	Ω
R_d	漏电阻	Ω

符号	物 理 意 义	单 位
R_s	源电阻	Ω
R_t	源、漏电阻之和	Ω
S	亚阈值斜率	V/dec
T	绝对温度	K
t_{ox}	栅氧化层厚度	nm
V_R	栅电压	V
V_{cb}	沟道与体之间的电压	V
V_{bs}	体源电压	V
V_{ds}	漏源电压	V
V_{gs}	栅源电压	V
V_{gb}	栅体电压($V_{gs} - V_{bs}$)	V
V_{gd}	栅漏电压($V_{gs} - V_{ds}$)	V
V_{d-sat}	漏饱和电压	V
V_{fb}	平带电压	V
V_{th}	阈值电压	V
V_t	热电压(kT/q)	V
V_{sb}	衬底偏压	V
v	载流子速度	cm/s
v_{sat}	载流子饱和速度	cm/s
W	有效或电学沟道宽度	μm
W_m	掩模版上的沟道宽度	μm
x	从 Si-SiO ₂ 界面到硅中的距离	cm
t_{ch}	反型层厚度	cm
X_j	结深	cm
X_n	pn 结 n 区一侧的耗尽层宽度	cm
X_p	pn 结 p 区一侧的耗尽层宽度	cm
X_d	MOS 电容或 MOSFET 的体区耗尽层宽度	cm
X_{dm}	MOS 电容或 MOSFET 的最大耗尽层宽度	cm
α	体因子项($1 + \delta\gamma$)	--
β_0	器件增益 = $\mu_0(C_{ox}W/L)$	V ⁻¹
γ	体因子 $\sqrt{2q\epsilon_{si}N_L/C_{ox}}$	V ^{1/2}
δ	体电荷 Q_b 项中的平方根近似因子	V ⁻¹

符号	物理意义	单位
ΔL	掩模版上的沟道长度和有效沟道长度之差 ($L_m - L$)	μm
ΔW	掩模版上的沟道宽度和有效沟道宽度之差 ($W_m - W$)	μm
τ	载流子寿命	s
ϵ_{ox}	SiO_2 的介电常数	F/cm
ϵ_{Si}	硅的介电常数	F/cm
θ	纵向电场引起的迁移率退化因子	V^{-1}
μ_0	低场沟道迁移率	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
μ_{eff}	有效沟道迁移率	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
μ_n	电子迁移率	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
μ_p	空穴迁移率	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
μ_s	MOSFET 的表面迁移率	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
μ_{eff}	栅和漏电场引起的有效迁移率	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
χ_s	硅的电子亲和能	eV
Φ_m	金属(栅)的功函数	eV
Φ_{ms}	栅-衬底功函数差	eV
Φ_b	Si-SiO ₂ 界面的势垒高度	eV
μ_{sr}	表面散射迁移率	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
ρ	空间电荷密度	C/cm^3
ρ_s	方块电阻	Ω/\square
λ	沟道长度调制因子	V^{-1}
ϕ	对应于本征能级 E_i 的静电势	V
ϕ_s	对应于本征能级 E_i 的表面势	V
ϕ_{bi}	pn 结自建势	V
ϕ_i	(n 或 p 型)硅体中的费米势	eV
φ_n	电子准费米势(imref)	V
φ_p	空穴准费米势(imref)	V

缩略词

缩写	物 理 意 义
CHE	沟道热电子
CLM	沟道长度调制
CMOS	互补金属氧化物半导体
C-V	电容-电压特性
DIBL	漏致势垒降低
GCA	渐变沟道近似
IGFET	绝缘栅场效应晶体管
LDD	轻掺杂漏
LOCOS	硅的区域氧化
MOSFET	金属氧化物半导体场效应晶体管
nMOST	n 沟 MOSFET
pMOST	p 沟 MOSFET
S/D	MOSFET 的源/漏
ZTC	零温度系数

目 录

中译本序

前言

符号表

缩略词

第一章 概述	1
1.1 MOS 电路设计	3
1.2 MOSFET 模型	5
1.3 模型参数提取	9
1.4 互联模型	10
1.5 各章内容简介	11
参考文献	12
第二章 半导体和 pn 结基础理论回顾	16
2.1 能带模型	16
2.2 本征半导体	18
2.2.1 费米能级	20
2.3 非本征或掺杂半导体	22
2.3.1 产生-复合	26
2.3.2 准费米能级	28
2.4 电导	29
2.4.1 载流子迁移率	29
2.4.2 电阻率和薄层电阻	35
2.4.3 输运方程	37
2.4.4 连续性方程	39
2.4.5 泊松方程	39
2.5 平衡态时的 pn 结	40
2.5.1 内建电势	44
2.5.2 耗尽区宽度	45
2.6 二极管的电流-电压特性	47

2.6.1	二极管电流模型的局限性	49
2.6.2	体电阻	52
2.6.3	pn 结击穿电压	53
2.7	二极管的动态特性	54
2.7.1	结电容	55
2.7.2	扩散电容	58
2.7.3	小信号电导	59
2.8	实际的 pn 结	59
2.9	二极管电流模型	63
2.10	二极管模型参数的温度关系	66
2.10.1	I_s 的温度关系	66
2.10.2	ϕ_{bi} 的温度关系	68
2.10.3	C_{j0} 的温度关系	68
	参考文献	70
第三章	MOS 晶体管的结构和工作原理	72
3.1	MOSFET 结构	72
3.2	MOSFET 的特性	76
3.2.1	穿通	83
3.2.2	MOSFET 电容	86
3.2.3	小信号特性	87
3.2.4	器件速度	90
3.3	MOSFET 的等比例缩小	91
3.4	热载流子效应	94
3.5	VLSI 器件结构	98
3.5.1	栅材料	98
3.5.2	非均匀掺杂沟道	99
3.5.3	源-漏结构	100
3.5.4	器件隔离	103
3.5.5	CMOS 工艺	104
3.6	MOSFET 中的寄生元件	107
3.6.1	源-漏电阻	108
3.6.2	源-漏结电容	114
3.6.3	栅覆盖电容	115

3.7	MOSFET 沟道长度和宽度的定义	119
3.7.1	有效或电学沟道长度	119
3.7.2	有效或电学沟道宽度	120
3.8	MOSFET 的等效电路模型	122
	参考文献	124
第四章 MOS 电容		129
4.1	没有外加电压时的 MOS 电容	129
4.1.1	功函数	131
4.1.2	氧化层电荷	135
4.1.3	平带电压	139
4.2	施加偏压时的 MOS 电容	141
4.2.1	积累	143
4.2.2	耗尽	143
4.2.3	反型	146
4.3	MOS 结构的电容	156
4.3.1	低频 $C-V$ 曲线	162
4.3.2	高频 $C-V$ 曲线	163
4.3.3	深耗尽 $C-V$ 曲线	164
4.4	实际 $C-V$ 曲线的偏差	165
4.5	异常 $C-V$ 曲线(多晶硅耗尽效应)	168
4.6	MOS 电容的应用	170
4.7	非均匀掺杂衬底的平带电压	171
4.7.1	V_b 的温度依赖关系	173
	参考文献	174
第五章 阈值电压		177
5.1	衬底均匀掺杂的 MOSFET	177
5.2	非均匀掺杂 MOSFET	187
5.2.1	增强型器件	189
5.2.2	耗尽型器件	201
5.3	阈值电压与沟道长度和沟道宽度的关系	205
5.3.1	短沟效应	206
5.3.2	窄沟效应	217
5.3.3	漏致势垒降低(DIBL)效应	222