



全国高技术重点图书·微电子技术领域

吉利久 编著

微电子学丛书

# 计算微电子学

科学出版社

微电子学丛书

# 计算微电子学

吉利久 编著

科学出版社

1996

(京)新登字 092 号

## 内 容 简 介

本书主要介绍用数值方法求解微电子技术所涉及的基本方程，目的是为读者在计算数学与微电子技术之间建立联系，向读者提供一些实现集成电路最大成品率的有效设计方法。

本书共五章，分为工艺模拟、器件模拟、电学性能模拟和中心化设计四个专题，具体内容包括：集成电路基本加工过程的工艺模型和方程，氧气氛下扩散方程的数值求解算法；泊松方程、电流连续性方程的一维、二维边界条件以及对它们的联立求解和松弛求解的算法，用蒙特卡罗算法作器件模拟的计算过程；基于松弛算法的电路方程时序计算，MOS 器件 BSIM 模型及参数提取算法；集成电路工艺的统计设计，简化模型的建立及评价，以及实现最大成品率设计的过程。

本书既可作为理工科高等学校微电子、半导体、应用物理专业本科生和研究生的教学参考书，也可供相关领域科技人员参考。

微电子学丛书

### 计算微电子学

吉利久 编著

责任编辑 魏玲

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

新世纪印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1996年 1月第 一 版 开本：850×1168 1/32

1996年 1月第一次印刷 印张：16 1/4

印数：1—1000 字数：427 000

ISBN 7-03-004616-1/TN·170

定价：29.00元

## 《微电子学丛书》编委会

顾问：黄 昆 林兰英 谢希德 王守武 王守觉  
童志鹏 李志坚 姜均露 王寿云

主 编：王阳元

编 委（以姓氏笔画为序）：

马俊如	万 群	王芹生	王永文	王阳元
王忠烈	仇玉林	白 丁	李佑斌	许居衍
许振嘉	陈星弼	陈 贤	汤小川	严晓浪
张义门	张利春	张 敏	郑敏政	宗祥福
洪先龙	俞忠钰	钱佩信	唐璞山	徐元森
徐雅文	徐筱棣	黄 敞	梁春广	梁骏吾
韩汝琦	熊和生	魏 玲	魏道政	

秘 书：赵宝瑛

## 《微电子学丛书》序

微电子学是源于并脱胎于固体物理和无线电电子学的一门新兴的边缘性技术学科。历史地说，1948年晶体管的发明、1958年采用硅平面工艺的集成电路的诞生和1971年微处理器的出现是微电子学发展史上的几个重要里程碑。经过46年的发展，微电子产业已成为战略性的基础产业，微电子科学技术已成为现代科学技术的关键技术基础。据统计，现在世界上65%的行业与微电子技术有关。二次大战后，美国正是抓住了以微电子技术为基础的电子信息技术，使其经济起飞的。日本和亚洲一些国家和地区也都是抓住了这一点而使其经济振兴。按预测，一直到2020年，世界集成电路产业的产值仍将以年增长率13%的速度增长；技术上也仍保持着集成度年增长率为46%的速度继续发展。到2000年以微电子为基础的电子信息产业将成为世界第一大产业。因此，微电子科学技术乃是20世纪下半叶直到21世纪上半叶科学技术竞争的焦点。谁掌握了微电子技术，谁就掌握了主动权。当前，微电子产业规模和技术水平已成为衡量一个国家综合实力的主要标志。日本有人提出，把半导体工业总产值占工农业总产值的0.5%作为进入信息社会的标志是不无道理的。

当前，我国微电子产业和科学技术的发展水平远不能适应国民经济和国防建设发展的需要。我国集成电路的市场份额只占世界集成电路市场的0.33%，与我国社会主义大国地位极不相称。国内市场的占有率，无论是品种还是数量，也只占20%左右。我国微电子产业和科学技术的落后面貌已成为我国四个现代化建设的制约因素。党和国家的领导已把发展微电子作为一项战略措施放到了突出的地位。在这样的形势下，编写出一套高质量的、反映世界微电子学发展前沿和我国微电子科学技术成果的丛书，必

将促进我国微电子产业建设和科学技术的发展。

这套丛书不同于一般的通俗读物和科普读物，也不同于大学教材，它是一套反映微电子学主要研究领域里学科发展前沿问题的著作，以满足微电子学领域里的研究部门、教育部门和产业部门的需要，成为工作在第一线科技人员的参考书。当然它也可成为大学生和研究生的教学参考书。我们要求每本著作都要具有科学性、先进性和实践性，而整套丛书又要有系统性。我们计划在“八五”期间开始出版，到2000年前出版10本左右。2000年后还要继续搞下去，使其成为跨世纪的出版物。这个工作的意义不亚于建一个工厂，建一个研究所。

倡议编写这套丛书的是国防科工委微电子专业组、全国集成电路计算机辅助设计(ICCAD)专家委员会和ICCAT专家委员会的部分专家们，他们的倡议得到了全国各有关单位微电子专家的支持和赞同，从而形成了一个报告。这个报告得到当时任机械电子工业部电子科学研究所所长童志鹏教授的批准。因此，当我们庆贺微电子丛书开始出版的时候，要特别感谢童志鹏教授的睿智。编写丛书的倡议还得到了国家计委科技司，国防科工委科技委、预研局、四局，国家科委基础研究高技术司，原机械电子工业部微电子与基础产品司和科学出版社等有关领导的支持，使出版这套丛书的愿望得以实现。在此，我们谨向上述领导部门表示由衷的谢意。

我们要感谢老一辈的科学家、我们的老师和有关领导部门的负责人，他们应聘担任丛书编委会的顾问，这对于保证丛书的学术质量将是十分重要的。我们相信，在他们的关心、支持和指导下，丛书的出版必将能达到预期的目的。

担任本丛书编委的都是一批活跃在微电子领域科研、生产和教育单位的中青年科技专家，他们团结在一起，互相切磋、共同探索，必能攀登一个又一个科学高峰。

1991年8月2日至8月3日在北戴河召开了第一次丛书编委会，讨论并制订了出版计划，经过近三年的努力，丛书终于与

读者见面了。我们以喜悦的心情，迎接它的诞生。

“书山有路勤为径，学海无涯苦作舟”。愿为丛书的出版而耕耘不息。

我们期望得到同行们的更多指正，更多支持。

王阳元  
于北京大学  
1994年5月

## 序 言

虽然为自己的拙作写几句前言说明一些情况已有过几次，但受托为朋友著作写序却是第一次。吉利久教授是我近 30 年的老朋友、老同事了，他的令我是不能不执行的。

微电子科学技术对现代社会的发展是如此重要，以致于它的发展水平已成为衡量一个国家综合实力的重要标志。到 2000 年，以微电子技术为基础的电子信息产业将成为世界第一产业。它的应用已广泛地扩展到各个领域，像“细胞”组成人体一样，当之无愧地成为现代科学的技术基础。无怪乎日本有的社会经济学专家提出，把半导体生产总值占工农业总产值的 0.5% 作为进入信息社会的表示。《微电子学丛书》的出版正是为了适应这样的历史需要。

集成电路计算机辅助设计是微电子技术极为重要的一个组成部分，也是发展最活跃的一个领域，当然也是我国近十年来最为关注并大力支持和发展的一个领域。正如吉利久教授所指出，就其基于的数学背景而言，包括工艺模拟、器件模拟、电学性能模拟以及 IC 统计设计在内的“计算微电子学”是 ICCAD 的两大分支学科之一，它为集成电路采用新器件、新工艺以及提高集成电路的成品率提供了深层次的物理依据。因此，把吉利久教授的《计算微电子学》作为《微电子学丛书》的第一本书出版是顺理成章的。

吉利久教授 1963 年毕业于北京大学物理系，此后一直在北京大学物理系任教。作为访问学者，他曾于 1981—1983 年间去加拿大布列颠哥伦比亚大学钻研 ICCAD。回国后一直是北京大学微电子学研究所这一领域的学术带头人。这些年来，他一方面从事科学研究，在 ICCAD 方面取得了一批成果，同时还为大学生、研究



生开设了 ICCAD 方面的课程，他的讲课生动活泼，深入浅出，很受学生欢迎。可以说，这本著作是他多年来从事教学、科学研究辛勤劳动的结晶。

在与他多年的共事中，我觉得吉利久教授不仅有扎实的物理基础，而且对数学计算有特别的爱好。1980年，由我们合作的、后来被收集在美国出版的《The Physics of MOS Insulator》一书中的“The Kinetic Behaviour of Mobile Ions in SiO<sub>2</sub> Studied with TSIC & TVS”一文，其中的数学难点就是他用了几个不眠之夜攻克的。因此，我认为由他来撰写这本书是非常合适的。我相信，众多的读者，特别是青年学生，必将得益于《计算微电子学》的出版。它的出版也会对我国微电子科学技术，特别是 ICCAD 学科的发展起到积极的推动作用。

王阳元

1994年5月1日

## 前 言

我工作所在的北京大学微电子学研究所，是以集成电路(IC)新工艺、新器件、新电路等分支学科作为科研和教学的主要内容。从传统意义上讲，这是一个设在理工大学的工科专业。近年来，几乎所有设置无线电电子学专业和半导体专业的大学都开设了微电子学专业。要在这么多同类专业中办出自己的特色，绝非易事。我们所在的领导比较早地注意到仿真计算在集成电路工艺、器件和电路研究中的作用，也希望把加强这方面的教学和研究作为我所的特色之一。

1984年我承担了教学任务，为本科生开设以讨论电路模拟软件SPICE的算法为主要内容的电路模拟课。从1985年起又陆续为研究生班开设了工艺模拟、器件模拟等课程。回想一下开设初期，这些课程的系统性很差，所用教材只能说是文献汇编。到1988年算是有了一个教材的雏形，取名为《集成电路计算机模拟》，后来受维也纳大学Selberherr教授主编的《计算微电子学(Computational Microelectronics)丛书》的启发，改名为《计算微电子学》。课程中虽然包含有对已有模拟软件使用方法的介绍，但不作为讨论的重点。课程主要介绍如何把微电子学中的物理问题用数值技术近似求解，包括对扩散方程、泊松方程、Kirchhoff电流方程以及相应非线性方程的求解，并把用于计算小尺寸器件中载流子输运过程的蒙特卡罗算法和与最大成品率有关的集成电路统计设计作为课程的内容。

在几年的教学中，使我最感欣慰的是这几届硕士生都对这门课有兴趣，而且在他们后来的研究工作中，无论是工艺、器件方面，还是电路设计方面，都用到了课程所讲授的基础知识。

1991年我产生了写书的念头，其原因有二：一是这方面的内

容确实有用，二是尚未见到同类著作出版。然而，我深知这本书不好写，它所涉及的学科跨度太大，我自己的知识背景覆盖不了这么大的范围，再加上我自知文笔欠佳，惟恐写起来有头无尾，难于收场。在清华大学南德恒教授和我所王阳元教授、韩汝琦教授等老师、同事的勉励下，我还是鼓了一下勇气，于1991年5月动笔，1992年4月完成初稿。在编写过程中，从国内外的有关著作和文献中受到很大启发，这些资料是构成本书框架的重要依据。以国内已有著作为基础，本书在整体结构上力求有更好的系统性，在表述方法上注重物理概念与算法实现的结合，在取材编辑方面力求新颖，尽量少重复，例如在工艺模拟中离散化栅格划分的算法，电学模拟中对悬浮电容的处理以及中心化设计的算法过程等都是国内现有著作尚未写入的内容。

初稿完成后，送王阳元教授审阅，承蒙慨允，他在百忙中为本书写序，并推荐列入《微电子学丛书》的出版计划。初稿修改、誊清后，又请清华大学南德恒教授再作审阅。审阅工作花去了南先生的大量时间。在与南先生的讨论中，他学识之渊博，治学之严谨，使我受益匪浅。我在数学、物理、半导体工艺等方面遇到困难时，常向杨芙清教授、许卓群教授、王阳元教授、韩汝琦教授、叶良修教授、武国英教授等请教。李狄纳同志曾经听过这门课，现在是我的同事，在编写过程中，他给我很大帮助，书中蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 模拟中的载流子散射关系图和速度统计公式都是他设计和推导的。硕士研究生何美华同学和许敏同学为本书的资料收集和整理做了大量工作。在书稿完成后撰写前言之际，我想起了所有帮助过我的老师、同事、朋友，在此一并致谢。如果这本书尚有参考价值，也算对他们热心帮助的回报，当然更是我的最大欣慰。

吉利久

1993年7月于北京大学

# 目 录

《微电子学丛书》序

序言

前言

第一章	绪论	( 1 )
	参考文献	( 6 )
第二章	集成电路工艺模拟	( 7 )
2.1	工艺模拟简介	( 7 )
2.1.1	工艺模拟软件举例	( 8 )
2.1.2	工艺模拟的基本方程	( 16 )
2.2	集成电路工艺模型(一维)	( 19 )
2.2.1	离子注入的工艺模型	( 19 )
2.2.2	热氧化模型	( 44 )
2.2.3	杂质扩散工艺模型	( 56 )
2.2.4	界面杂质流模型	( 75 )
2.2.5	外延工艺模型	( 80 )
2.2.6	多晶硅工艺模型	( 83 )
2.3	集成电路工艺模拟的数值计算	( 91 )
2.3.1	数值过程概述	( 91 )
2.3.2	空间离散化——栅格划分	( 100 )
2.3.3	界面移动热加工过程的数值计算	( 105 )
2.4	二维工艺模拟	( 127 )
2.4.1	二维工艺模拟举例	( 128 )
2.4.2	二维工艺模型	( 133 )
2.4.3	二维氧化模拟软件 SOAP	( 138 )
	参考文献	( 148 )
第三章	器件模拟	( 150 )
3.1	器件模拟简介	( 150 )

3.1.1	器件模拟举例 .....	( 150 )
3.1.2	器件模拟的基本方程 .....	( 158 )
3.2	一维器件模拟 .....	( 162 )
3.2.1	一维模拟的方程和边界条件 .....	( 162 )
3.2.2	数值求解 .....	( 172 )
3.2.3	器件参数的计算 .....	( 179 )
3.2.4	有限元法求解泊松方程 .....	( 183 )
3.3	器件参数的物理模型 .....	( 190 )
3.3.1	迁移率的物理模型 .....	( 190 )
3.3.2	载流子产生-复合模型 .....	( 192 )
3.3.3	重掺杂的影响 .....	( 195 )
3.4	MOSFET 的二维器件模拟 .....	( 198 )
3.4.1	基本方程 .....	( 198 )
3.4.2	二维器件模拟的边值和松弛求解过程 .....	( 204 )
3.4.3	MOSFET 二维器件模拟的数值方法 .....	( 210 )
3.4.4	MOSFET 的端特性 .....	( 216 )
3.5	半导体器件的蒙特卡罗模拟 .....	( 220 )
3.5.1	蒙特卡罗算法简介 .....	( 221 )
3.5.2	载流子输运的粒子模型 .....	( 226 )
3.5.3	蒙特卡罗模拟中随机量的确定 .....	( 233 )
3.5.4	半导体材料性质的蒙特卡罗模拟 .....	( 241 )
3.5.5	半导体器件的蒙特卡罗模拟 .....	( 247 )
	参考文献 .....	( 252 )
<b>第四章</b>	<b>集成电路的电学性能模拟 .....</b>	<b>( 254 )</b>
4.1	电路模拟 .....	( 255 )
4.1.1	电路模拟的算法流程 .....	( 255 )
4.1.2	自动建立电路方程 .....	( 259 )
4.1.3	电路分析 .....	( 281 )
4.1.4	MOSFET 的伴随模型 .....	( 286 )
4.2	电学性能的时序模拟 .....	( 294 )
4.2.1	松弛算法的应用 .....	( 295 )
4.2.2	电路时序模拟算法 .....	( 304 )
4.2.3	时序算法对悬浮电容的处理 .....	( 320 )

4.2.4	时序模拟中 MOSFET 的模型 .....	( 332 )
4.3	电学模拟中的波形松弛算法 .....	( 339 )
4.3.1	波形松弛的策略与算法 .....	( 339 )
4.3.2	波形松弛算法的收敛性 .....	( 348 )
4.3.3	波形松弛算法的应用 .....	( 352 )
4.4	MOSFET 模型参数提取 .....	( 362 )
4.4.1	MOSFET 的数学模型 .....	( 363 )
4.4.2	MOSFET 特性的实验测量 .....	( 368 )
4.4.3	MOSFET 模型参数提取 .....	( 373 )
	参考文献 .....	( 385 )
<b>第五章 集成电路的中心化设计 .....</b>		<b>( 387 )</b>
5.1	集成电路中心化设计简介 .....	( 388 )
5.1.1	最大成品率的抽象描述 .....	( 388 )
5.1.2	集成电路基于工艺的宏模型的建立 .....	( 395 )
5.2	集成电路工艺和器件的解析模拟 .....	( 412 )
5.2.1	Fabrics 简介 .....	( 413 )
5.2.2	工艺解析模拟 .....	( 416 )
5.2.3	MOS 器件模拟 .....	( 436 )
5.3	中心化设计的实现——成品率极大化 .....	( 442 )
5.3.1	集成电路的宏模型 .....	( 443 )
5.3.2	设计中心化 .....	( 473 )
5.3.3	中心化设计实例 .....	( 486 )
5.4	附录：双阱 CMOS 工艺参数表 .....	( 497 )
	参考文献 .....	( 500 )

# 第一章 绪 论

在集成电路工艺模拟和器件模拟方面作出过重要贡献的 Selberherr 教授, 于 1989 年主持编辑了一套丛书, 取名为《计算微电子学 (Computational Microelectronics)》, 这是“计算微电子学”名词的首见报道. 这套丛书覆盖了集成电路工艺模拟、器件模拟涉及的所有领域. 从学科内容上看, 和计算物理学成为计算数学与物理学之间的桥梁一样, 计算微电子学把微电子学与计算数学联系在一起, 使微电子学中原来难于甚至不能解析求解的问题成为可解.

集成电路计算机辅助设计 (ICCAD) 已有 30 年的历史, 目前已经发展成为跨度很大的学科. 就其基于的数学背景而言, ICCAD 可以分成两大部分. 第一部分包括逻辑综合、逻辑模拟、故障分析、IC 版图生成、自动布局布线, 以及 LVS, DRC, ERC 等, 这些都是以离散的方法处理离散数学的问题. 第二部分, 包括工艺模拟、器件模拟、电学性能模拟以及 IC 统计设计等, 它们是以离散的方法处理连续数学的问题.

ICCAD 的这两个部分都已发展成为内容丰富的学科分支. 近年来已有这样的趋势: ICCAD 专指其中的第一部分, 或者再加上第二部分的电学性能模拟. 这种趋势的形成与商业 ICCAD 系统通常只包括上述功能模块有关. 近年来也还有另一种趋势, 就是将工艺模拟、器件模拟、电学性能模拟和统计模拟等功能模块集成为统一的系统, 为集成电路采用新器件、新工艺以及提高成品率提供深层次的物理依据. 因此, 把 ICCAD 中的这一重要分支 (即前述的 ICCAD 的第二部分) 称为“计算微电子学”将对学科的发展更为有利.

与上述专指的 ICCAD 系统对基础知识的要求不同, 计算微

电子学更多地涉及物理学概念和数值分析技术。

在集成电路的工艺模拟中，工艺模型就是根据物理、化学基本定律和大量的实验数据建立的。除工艺模型之外，描述氧化、扩散过程的杂质流连续性方程以及界面移动感生界面杂质流等，都有深刻的物理含义。在对方程做数值求解时，特别是氧化气氛中杂质再分布的计算，需要处理界面非匀速移动和单元体积膨胀等难度较大的问题。数值分析也由此发展了一些有关网格划分的新算法、新技术。

对集成电路的器件模拟包含了对更多物理现象的处理，例如重掺杂对带隙的影响，迁移率与电场、掺杂浓度的依赖关系等。在泊松方程和电流连续性方程中加入这些效应之后，方程的非线性度更强。因此，在做数值求解时，也发展了一些新技术，以保证算法有较好的收敛性。半导体材料和器件的蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 模拟，涉及到更深层次的物理机制，包括各种晶体格波和电离杂质对载流子散射几率的影响、能带结构对载流子能量与波数矢关系的影响等。从算法上说，为提高蒙特卡罗模拟的计算速度，也发展了一些新算法，这些都与物理过程和数值计算有密切关系。

对电路作电学性能模拟涉及的物理内容少一些，只包含基本的基尔霍夫 (Kirchhoff) 电流和电压定律，以及半导体器件的物理模型、等效电路模型等。但这一部分比较多地涉及电路描述和求解算法，例如各种基于矩阵的和基于松弛的算法在电路计算中的应用，以及它们的数值性质等。模拟的最终结果是标志电学性能的物理量——电压、电流随时间的变化。

中心化设计是 80 年代中期提出的新课题。它的研究内容包括：利用工艺模拟、器件模拟和电学性能模拟建立起集成电路性能与工艺参数之间的关系，或称为基于工艺的集成电路模型；利用这个模型确定出集成电路性能的合格范围所对应的工艺参数取值范围。中心化设计的策略就是把工艺参数的设计值放在取值范围的中心，用以保证在有工艺“干扰”的情况下实现最大成品率。



在 1991 年召开的超大规模集成 (VLSI) 电路工艺和器件模拟研讨会 (VPAD) 上, Selberherr 教授报告了维也纳大学的 TCAD (Technology CAD) 系统<sup>1)</sup>, TCAD 利用 PIF 格式把维也纳大学已有的工艺模拟软件 PROMIS、器件模拟软件 MINIMOS 和互连电容模拟软件 VLSI CAP 集成为统一的系统. 图 1.1 示出了 TCAD 的系统框图. 1988 年, 美国 Carnegie Mellon 大学提出了 PEW (Process Engineer's Workbench) 系统<sup>[1]</sup>, 图 1.2 是 PEW 的工作流程图. PEW 系统与 TCAD 系统有类似的功能, 只是 PEW 采用了解析模拟的算法, 节省了计算时间, 但损失了模拟精度. 不过, 在通常的半定量分析中, PEW 的结果还是很有参考价值的. 图 1.3 是用 PEW 系统计算得到的杂质剖面图.

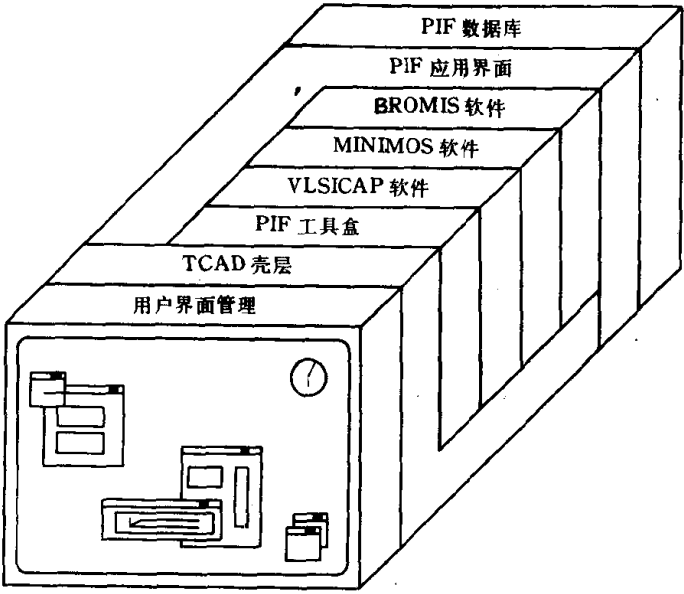


图 1.1 TCAD 系统框图

1) 见 1991 International Workshop on VLSI Process and Device Modeling, 1991 VPAD, p. 32.