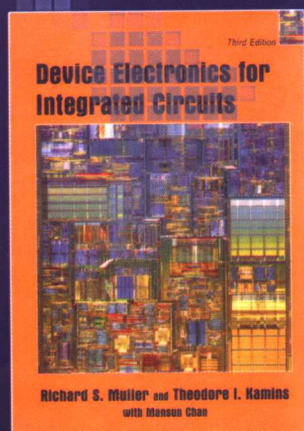


国外电子与通信教材系列

集成电路器件电子学

(第三版)

Device Electronics for Integrated Circuit
Third Edition



Richard S. Muller
[美] Theodore I. Kamins 著
Mansun Chan

王燕 张莉 译
许军 审校



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

集成电路器件电子学

(第三版)

Device Electronics for Integrated Circuit

Third Edition

Richard S. Muller

【美】 Theodore I. Kamins 著

Mansun Chan

王 燕 张 莉 译

许 军 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍集成电路器件电子学,其内容可分为两部分:第一部分是学习半导体器件必需的知识,包括半导体物理和工艺的基本知识,以及金属-半导体接触和pn结理论;第二部分系统深入地阐述了双极晶体管和MOS场效应晶体管的工作原理和特性。书中每章有大量的习题,供读者加深理解所学的知识。

本书可作为高等学校微电子专业本科生和研究生相应课程的教科书或参考书,也可供在相关领域工作的专业技术人员参考。

Copyright © 2003 John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

本书简体中文专有翻译出版权由 John Wiley & Sons Inc. 授予电子工业出版社未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2003-3677

图书在版编目(CIP)数据

集成电路器件电子学:第三版/(美)米勒(Muller, R. S.)等著;王燕等译.—北京:电子工业出版社,2004.11
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Device Electronics for Integrated Circuits, Third Edition

ISBN 7-121-00526-3

I. 集… II. ①米…②王… III. 集成电路—电子器件—教材 IV. TN4

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第110460号

责任编辑:杨丽娟 特约编辑:王银彪

印 刷:北京天宇星印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:31.5 字数:806千字

印 次:2004年11月第1次印刷

印 数:4000册 定价:46.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

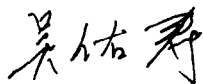
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

- | | | |
|-----|------------|--|
| 主任 | 吴佑寿 | 中国工程院院士、清华大学教授 |
| 副主任 | 林金桐
杨千里 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师
总参通信部副部长、中国电子学会会士、副理事长
中国通信学会常务理事 |
| 委员 | 林孝康 | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 樊昌信 | 西安电子科技大学教授、博士生导师
中国通信学会理事、IEEE 会士 |
| | 程时昕 | 东南大学教授、博士生导师
移动通信国家重点实验室主任 |
| | 郁道银 | 天津大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北方交通大学教授、博士生导师
计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 |
| | 张晓林 | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子工程系主任
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员 |
| | 郑宝玉 | 南京邮电学院副院长、教授、博士生导师
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 朱世华 | 西安交通大学教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
| | 彭启琮 | 电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员 |
| | 徐重阳 | 华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
| | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息学院副院长
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 赵尔沅 | 北京邮电大学教授、教材建设委员会主任 |
| | 钟允若 | 原邮电科学研究院副院长、总工程师 |
| | 刘彩 | 中国通信学会副理事长、秘书长 |
| | 杜振民 | 电子工业出版社副社长 |

译 者 序

微电子技术是现代电子信息技术的基础,它深刻影响其他相关学科和工程技术的发展。作为集成电路核心的半导体器件自1947年问世以来,经过半个多世纪的快速发展,已经进入深亚微米量级。了解和掌握集成电路器件的基本理论和物理模型对于微电子及相关专业人员是非常必要的。Richard S. Muller教授等人所著的《集成电路器件电子学》(Device Electronics for Integrated Circuits)为我们提供了一本深入阐述集成电路器件的物理机制和工作原理并和实践相结合的优秀教材。

作者 Richard S. Muller 教授一直在美国加州大学伯克利分校从事集成电路领域前瞻性的研究与教学工作,在集成电路领域具有相当的知名度和实践经验。合著者 Theodore I. Kamins 教授是加州 Palo Alto 惠普实验室量子科学研究小组的首席科学家,一直从事外延和多晶硅的研究工作。合著者 Mansun Chan 教授任教于香港科技大学,研究领域涵盖了硅器件从深亚微米工艺开发到器件设计、表征和建模。本书内容从半导体物理的基本知识开始,深入介绍现代半导体器件的基本理论和最新进展,并在每一章的最后列出了许多习题和很有价值的参考资料。因此本书可作为高等学校微电子专业本科生和研究生相应课程的教科书或参考书,也可供在相关领域工作的专业技术人员参考。

本书共10章。第1章回顾半导体物理及半导体电学特性,第2章简要介绍现代平面硅工艺技术,第3章介绍金属-半导体接触的电学特性,第4章和第5章介绍同质pn结和异质pn结的电学特性,第6章和第7章介绍双极晶体管的基本原理和电学特性,第8章介绍MOS系统的基本物理知识,第9章和第10章介绍MOS场效应晶体管的基本原理和电学特性。

本书在翻译过程中得到了电子工业出版社的热心指导和大力支持,得到了清华大学微电子学研究所多位老师的帮助与指正,包括杨之廉教授、顾祖毅教授、沈延钊教授、陈天鑫教授、周润德教授以及岳瑞峰、潘立阳和邹建平老师,在此深表谢意。虽经仔细校对,但由于译者水平有限,文中定有不当或欠妥之处,望读者批评指正。

译 者

2004年10月于清华园

作者介绍

Richard S. Muller

自 20 世纪 60 年代早期硅集成电路发明以来, Richard S. Muller 一直从事这一领域的研究工作。他于 1962 年在加州理工学院获得博士学位。此后加入加州大学伯克利分校, 进行前瞻性的研究与教学工作。通过与校内的电路设计人员, 器件专家和工艺人员的合作, 以及在硅谷几家公司的咨询活动, 他在集成电路领域获得了相当的知名度和实践经验。这样的经历为他的新课程的建立提供了坚实的基础。该课程的名称后来被用作本书的书名, 并且他已经给伯克利分校的多届学生教授这门课程。70 年代后期, 他开始从事现在称为“微机电系统”领域的研究, 并在 1986 年与一位同事一起建立了伯克利传感器与执行器中心。他现为美国国家工程院院士, 并且是 IEEE 的会员。其他的一些荣誉包括: IEEE 学会 Brunetti 奖, Stevens 工学院复兴奖, Alexander von Humboldt 研究奖, 伯克利嘉奖, 北大西洋公约组织研究员和富尔布赖特研究奖。Muller 教授目前还是 Stevens 工学院董事会成员。

Theodore I. Kamins

加州 Palo Alto 惠普实验室量子科学研究小组首席科学家。他领导着先进纳米结构的电子材料和器件的研究。他同时也是斯坦福大学电气工程系的顾问教授。他在加州大学伯克利分校获得学位, 然后加入了仙童半导体公司的研究与开发实验室。在去惠普之前, 他一直从事外延和多晶硅的工作。他是本书的合著者, 除此之外, 他还是《Polycrystalline Silicon for Integrated Circuits and Display》的作者。他是 IEEE 和电化学学会的会员, 并且获得 1989 年电化学学会的电子学分会奖。他同时任教于斯坦福大学和加州大学伯克利分校。他还是 IEEE Transaction on Electron Devices 的副主编, 并且为加州大学、牛津大学、IEEE 学会、美国真空学会和 SEMI 教授短期课程。

Mansun Chan

1995 年于加州大学伯克利分校获得博士学位, 此后任教于香港科技大学。他的研究兴趣涵盖了硅器件领域很广的范围, 从深亚微米工艺开发到器件设计、表征和建模。他是 SPICE 中 BSIM3 模型的主要贡献者之一, 这一模型已经被大多数的美国公司和 Compact Model Council 作为一个工业标准模型。在 2002 年 1 月, 他返回加州大学伯克利分校共同指导 BSIM 计划以及亚 70nm 器件的下一代器件模型的开发。Mansun 在香港科技大学给高年级本科生和研究生教授了六年多的器件和工艺课程, 最近也在加州大学伯克利分校授课。在教学工作方面, 他已经获得了一些奖项。此外, 他还为半导体行业提供公开演讲, 为国际会议提供指南。

前 言

随着时间的推移,集成电路(IC)对工程领域以及更广阔的社会生活产生的巨大影响在不断地增加。作为对这种影响的认可,以及对创造集成电路的天才的致谢,Jack Kilby 因其 40 多年前在得克萨斯仪器公司所做的工作被授予 2000 年度*诺贝尔物理学奖。Kilby 创造性地提出了电路集成化制造的概念,并在锗衬底上得到了验证。除此之外,Jean Hoerni 与加州仙童半导体公司的一个研究小组进行了开创性的工作,建立了硅平面工艺,从而开辟出通往现代集成电路的道路。在 20 世纪 60 年代早期,Robert Noyce 与仙童公司的同事们合作制造了第一个硅平面工艺集成电路(见本书卷首插图中的二进制或门电路),在此基础上发展起来的价值几千亿美元的集成电路产品正主宰着我们现在的数字化世界。

从 Kilby 的创造性概念开始,Hoerni、Noyce 以及他们的合作者创造了总值 1770 亿美元的集成电路全球性市场(2000 年),支持带动了 1.15 万亿美元的产品市场(2000 年)。集成电路给现代社会打下了明显的印记。最近,Intel 前任首席执行官(CEO) Andrew Grove 先生被时代杂志(TIME)授予 1997 年“年度人物”。Grove 博士是发展集成电路的先驱者,同时他也是 1967 年出版的《Physics and Technology of Semiconductor Devices》一书的作者。这本书第一次描述了平面工艺集成电路的物理、设计及工艺问题。在新千年中,集成电路的影响将超越传统的电子学,延伸到力学、光学、化学和生物学的集成系统中。在这些不同的领域中,集成电路的技术、设计范例、材料以及工艺将得到扩展和丰富,其中形成了所谓的微机电系统(MEMS)。

现代集成电路中,一块芯片上包含千万个有源器件,但是大多数的芯片和 1961 年 Noyce 制造的集成电路一样,都是由硅制造的。20 世纪 80 年代,金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)取代了先前占主导地位的双极晶体管,并逐渐成为现代半导体器件的主流。过去 20 年中,集成电路领域的工艺发展主要集中在优化 MOSFET 的性能和尽可能地减小它的尺寸。为了突出 MOSFET 的重要性,器件电子学原书的两位作者 Richard Muller 和 Ted Kamins 邀请了在这一领域具有丰富经验的专家 Mansun Chan 教授,对最后两章的内容做了增补和修改。

本书对前一版第 2 章关于集成电路制造工艺的相关内容做了相当大的修改,以适应工艺的发展水平。集成电路复杂性的不断提高以及计算机能力的不断增强,使得计算机辅助工艺和器件模拟成为可能,本书第 2 章和第 5 章对此做了相关的介绍。对高速晶体管的需求,直接导致了异质结双极晶体管(HBT),尤其是可与常规硅器件集成的硅基 HBT 的广泛应用。有关异质结、HBT 的概念以及更常见的同质结的发展等内容贯穿于本书的第 4 至 7 章。

我们的目标与前一版的“器件电子学”一样,重点在介绍构成集成电路的固态器件中电子的运动规律。在每一章中,我们提出和器件相关的物理问题,详细讨论并说明其基本的物理原理。本书包含的内容较多,不能在一学期课程中全部讲授,教师可以集中于需要着重强调的内容。在导论类的课程中,第 2、7、10 章中的许多内容可以略去不讲。固体物理背景较强的学生

* 他与 Z. Alferov 和 H. Kroemer (由于在相关的固态电子学领域,而不是专门在 IC 领域的杰出工作)共同获得诺贝尔物理学奖。

可以略去第 1 章。例题被融入到许多讨论中,各章节末部分习题(标有星号*)的答案在书尾给出。对于一些较为超前的内容以及一些更具挑战性的习题,我们用“+”符号做标记,表明这部分内容可以略过而不会影响本书其他内容的阅读。下面对本书每一章的内容做一个概要性的描述。

第 1 章 半导体电学特性 本章回顾了半导体物理及半导体电学特性。其中包括:能带理论,掺杂原理,自由载流子统计分布,漂移和扩散。这里只提供了后续章节讨论器件时需要的内容;强调了物理图像而不是数学公式。作为总结,最后介绍了用于专用集成电路的集成霍尔效应磁传感器。附录介绍了求解静电学问题的 Gauss 定理,这是器件分析的重要手段。

第 2 章 硅工艺 本章简要介绍了现代平面工艺技术,包括硅的晶体生长,晶圆片预处理,氧化,薄膜淀积,晶圆片的扩散掺杂和离子注入掺杂,光刻和图形转移,电极连接和封装。某些章节相当详细,可以用来作为参考。如略去这些章节,整章内容可以在很短的时间内阅读完,但仍能提供给读者关于硅工艺的一个概貌。本章还简单介绍了计算机辅助工艺模拟的概念以及化合物半导体工艺。器件方面介绍了集成电路中的扩散电阻器。

第 3 章 金属-半导体接触 本章介绍了不同固体材料之间的热平衡。详细描述了 Schottky 势垒接触的电学特性。供选择阅读的小节给出了电流电压关系、Schottky 欧姆接触特性以及金属-半导体接触的表面效应的严格推导。器件应用介绍了实际的 Schottky 二极管。

第 4 章 pn 结 本章介绍了与不同掺杂类型的半导体有关的电学特性。详细描述了反偏情况下同质 pn 结和异质 pn 结的电学特性。本章还包括有关 pn 结击穿的内容供选择阅读,可以略过这个内容而不影响阅读的连续性。小结讨论了结型场效应晶体管。

第 5 章 pn 结电流 本章推导了自由载流子的连续性方程。介绍了产生和复合的概念,并用来描述 pn 结在正向偏置下的电学特性。二极管的少子存储和数学模拟为以后晶体管等效电路的发展提供了基础。供选择阅读的小节包括对 Shockley-Hall-Read 复合理论和空间电荷区产生与复合的完整描述。器件方面集中介绍了二极管在集成电路中的应用,并简单介绍了由化合物半导体制备的发光二极管。第 5 章之后,对 MOS 器件感兴趣的读者可以先阅读第 8 至 10 章,然后再回来阅读关于双极晶体管的第 6 章和第 7 章,这样并不影响阅读的连贯性。

第 6 章 双极晶体管 I:基本特性 本章对双极晶体管的讨论是在电荷控制模型的框架下进行的。以熟悉的同质掺杂晶体管为例来介绍基本的物理原理。这样的处理问题的方法自然地过渡到偏压范围、电流增益以及 Ebers-Moll 模型等主题。双极晶体管的概念被扩展到异质结双极晶体管。器件讨论集中在用于放大电路和开关电路中的平面 IC 晶体管的特性。

第 7 章 双极晶体管 II:局限性与模型化 本章的主题面向晶体管的计算机模拟。例如,用 Early 电压介绍了 Early 效应,用电荷控制模型考虑了低发射结偏压和高发射结偏压效应。用相同的方法描述了基区渡越时间。从这一问题自然地引出了晶体管的电荷控制模型以及应用的实例。由电荷控制模型还推导出小信号晶体管(混合 II)模型,并且考虑了晶体管各种等效电路模型的关系。双极晶体管的频率响应表现出了同质和异质双极晶体管之间的差异。器件讨论集中于 pnp 型晶体管。

第 8 章 金属-氧化物-硅系统特性 本章提供了讨论 MOS 器件所需要的物理背景知识。描述了栅压控制的半导体表面积累、耗尽和反型状态,提出了 MOS 系统的平带电压和阈值电压的概念。选学内容为 pn 结的表面效应。本章最后讨论了用于存储电路中的 MOS 电容器和电荷耦合器件。

第9章 MOS 场效应晶体管 I:物理效应和模型 首先利用近似的电荷控制模型推导了 MOSFET 的经典理论,然后计入了短沟道效应,迁移率降低,以及速度饱和效应。MOSFET 尺寸的进一步缩小为先进的 CMOS 结构的快速发展提供了远景。本章还给出一个简化的电路设计模型和基于工业标准的 BSIM 模型的参数提取技术,为工艺发展和实用设计架起了桥梁。

第10章 MOS 场效应晶体管 II:强场效应 本章介绍了 MOSFET 的基本描述中没有考虑的,但在现代 CMOS 工艺中非常重要的几个强场效应:沟道长度调制、输出电阻、衬底电流、栅极电流、MOSFET 击穿、器件退化,以及 MOS 不挥发存储器结构。器件方面描述了利用强场效应的浮栅、不挥发存储单元的设计及存储单元与门阵列结构的集成。

目 录

第 1 章 半导体电学特性	(1)
1.1 半导体材料物理	(1)
1.1.1 固体的能带模型	(2)
1.1.2 空穴	(6)
1.1.3 成键模型	(8)
1.1.4 施主和受主	(9)
1.1.5 热平衡统计	(12)
1.2 半导体中的自由载流子	(21)
1.2.1 漂移速度	(23)
1.2.2 迁移率和散射	(24)
1.2.3 扩散电流	(30)
1.3 器件:霍尔效应磁传感器	(33)
1.3.1 霍尔效应的物理机制	(33)
1.3.2 集成霍尔效应磁传感器	(35)
小结	(37)
参考文献	(38)
参考书	(39)
习题	(39)
第 2 章 硅工艺	(48)
2.1 硅平面工艺	(48)
2.2 晶体生长	(54)
2.3 热氧化	(57)
氧化动力学	(58)
2.4 光刻和图形转移	(64)
2.5 掺杂和扩散	(69)
2.5.1 离子注入	(69)
2.5.2 扩散	(72)
2.6 化学气相淀积	(82)
2.6.1 外延	(82)
2.6.2 非外延薄膜	(83)
2.7 互连和封装	(90)
2.7.1 互连	(90)
2.7.2 测试和封装	(97)
2.7.3 污染	(98)
2.8 化合物半导体工艺	(98)
2.9 数值模拟	(101)
2.9.1 模拟的基本概念	(101)
2.9.2 网格	(102)
2.9.3 工艺模型	(103)

2.9.4	器件模拟	(109)
2.9.5	模拟面临的挑战	(110)
2.10	器件:集成电路中的电阻	(111)
	小结	(115)
	参考文献	(116)
	参考书	(117)
	习题	(117)
第3章	金属-半导体接触	(121)
3.1	电子系统中的平衡	(121)
3.2	理想的金属-半导体结	(123)
3.2.1	能带图	(123)
3.2.2	电荷、耗尽区和电容	(126)
3.3	电流-电压特性	(132)
3.3.1	Schottky 势垒 [†]	(133)
3.3.2	Mott 势垒 [†]	(136)
3.4	非整流(欧姆)接触	(137)
3.4.1	隧道接触	(137)
3.4.2	Schottky 欧姆接触 [†]	(138)
3.5	表面效应	(141)
3.5.1	表面态	(141)
3.5.2	金属-半导体接触的表面效应 [†]	(142)
3.6	金属-半导体器件:Schottky 二极管	(144)
	小结	(147)
	参考文献	(149)
	参考书	(149)
	习题	(149)
第4章	pn 结	(152)
4.1	缓变杂质分布	(152)
4.2	pn 结	(158)
4.2.1	突变结	(160)
4.2.2	线性缓变结	(166)
4.2.3	异质结	(168)
4.3	反偏 pn 结	(172)
4.4	结的击穿	(176)
4.4.1	雪崩击穿 [†]	(177)
4.4.2	Zener 击穿 [†]	(182)
4.5	器件:结型场效应晶体管	(184)
4.5.1	pn 结场效应晶体管(JFET)	(184)
4.5.2	金属-半导体场效应晶体管(MESFET)	(190)
	小结	(192)
	参考文献	(192)
	参考书	(193)
	习题	(193)

第 5 章 pn 结中的电流	(197)
5.1 连续性方程	(197)
5.2 产生与复合	(199)
5.2.1 局域态:俘获和发射	(199)
5.2.2 Shockley-Hall-Read 复合 [†]	(201)
5.2.3 过剩载流子寿命	(202)
5.3 pn 结电流电压特性	(206)
5.3.1 边界少数载流子浓度	(207)
5.3.2 理想二极管分析	(208)
5.3.3 空间电荷区电流 [†]	(214)
5.3.4 异质结 [†]	(217)
5.4 电荷存储与二极管瞬变特性	(222)
5.5 器件建模和模拟	(227)
5.5.1 集总元件模型	(227)
5.5.2 分布式模拟 [†]	(229)
5.6 器件	(232)
5.6.1 集成电路二极管	(232)
5.6.2 发光二极管	(235)
小结	(235)
参考文献	(236)
参考书	(236)
习题	(237)
第 6 章 双极晶体管 I:基本特性	(241)
6.1 晶体管工作原理	(241)
6.1.1 原型晶体管	(244)
6.1.2 集成电路晶体管	(246)
6.2 放大偏置	(247)
6.3 晶体管开关工作	(256)
6.4 EBERS - MOLL 模型	(260)
6.5 器件:平面双极放大和开关晶体管	(264)
6.6 器件:异质结双极晶体管	(271)
6.6.1 双异质结双极晶体管	(274)
6.6.2 准中性基区的带隙缓变	(275)
小结	(277)
参考文献	(278)
参考书	(278)
习题	(279)
第 7 章 双极晶体管 II:局限性与模型化	(282)
7.1 基区宽度调变效应(Early 效应)	(282)
7.2 发射结低偏置效应和高偏置效应	(285)
7.2.1 发射结低偏置电流	(285)
7.2.2 大注入	(286)

7.2.3 基区电阻	(291)
7.3 基区渡越时间	(295)
7.4 电荷控制模型	(298)
7.5 晶体管小信号模型	(308)
7.6 双极晶体管的频率限制	(313)
7.7 计算机模拟中的双极晶体管模型 [†]	(317)
7.8 器件: pnp 双极晶体管	(321)
7.8.1 衬底 pnp 晶体管	(321)
7.8.2 横向 pnp 晶体管	(321)
小结	(326)
参考文献	(326)
习题	(327)
第 8 章 金属-氧化物-半导体的性质	(332)
8.1 理想 MOS 结构	(332)
8.1.1 热平衡能带图	(333)
8.1.2 多晶硅栅和金属栅	(335)
8.1.3 平带电压	(336)
8.2 理想 MOS 结构的分析	(337)
8.3 MOS 电学特性	(340)
8.3.1 硅衬底中的电荷模型	(340)
8.3.2 热平衡状态	(340)
8.3.3 非平衡状态	(343)
8.4 MOS 系统的电容	(345)
8.4.1 理想 MOS 系统的 $C-V$ 特性	(345)
8.4.2 $C-V$ 测量中的实际因素	(348)
8.4.3 准静态(低频) $C-V$ 测量	(349)
8.5 非理想 MOS 系统	(350)
8.5.1 氧化层及界面态电荷	(350)
8.5.2 氧化层电荷的起源	(353)
8.5.3 氧化层电荷的实验测定	(355)
8.6 pn 结的表面效应 [†]	(356)
8.7 MOS 电容器及电荷耦合器件	(359)
8.7.1 MOS 存储器	(360)
8.7.2 电荷耦合器件	(362)
小结	(365)
参考文献	(366)
习题	(366)
第 9 章 MOS 场效应晶体管 I: 物理效应和模型	(371)
9.1 MOSFET 的基本工作原理	(373)
9.1.1 强反型区	(374)
9.1.2 沟道长度调制	(377)
9.1.3 衬偏效应	(378)
9.1.4 体电荷效应	(381)

9.1.5	离子注入调整阈值电压	(382)
9.1.6	耗尽型 MOSFET	(384)
9.1.7	亚阈值区	(385)
9.1.8	小信号等效电路模型	(389)
9.2	短沟 MOSFET 的改进模型	(390)
9.2.1	长沟分析的局限性	(390)
9.2.2	短沟效应	(390)
9.2.3	迁移率下降	(395)
9.2.4	速度饱和	(397)
9.2.5	短沟 MOSFET 的漏极电流	(398)
9.2.6	MOSFET 的按比例缩小和短沟模型	(400)
9.3	器件:互补 MOSFET-CMOS	(403)
9.3.1	CMOS 的设计考虑	(404)
9.3.2	MOSFET 参数和参数提取	(406)
9.3.3	CMOS 的闩锁效应 [†]	(409)
9.4	展望未来	(413)
9.4.1	按比例缩小的目标	(413)
9.4.2	栅耦合	(413)
9.4.3	速度过冲	(415)
	小结	(415)
	参考文献	(417)
	习题	(417)
第 10 章	MOS 场效应晶体管 II: 强场效应	(423)
10.1	速度饱和区的电场	(423)
10.1.1	准二维模型	(424)
10.2	衬底电流	(429)
10.2.1	热载流子效应	(429)
10.2.2	衬底电流模型	(430)
10.2.3	衬底电流对漏极电流的影响	(434)
10.3	栅极电流	(435)
10.3.1	幸运电子模型	(435)
10.3.2	低栅压载流子注入	(439)
10.3.3	p 沟道 MOSFET 的栅极电流	(440)
10.4	器件退化	(440)
10.4.1	n 沟道 MOSFET 的退化机制	(440)
10.4.2	n 沟道 MOSFET 退化的表征	(441)
10.4.3	器件寿命的加速测量	(442)
10.4.4	减小漏场的结构	(443)
10.4.5	p 沟道 MOSFET 的退化	(445)
10.5	器件: MOS 不挥发存储器结构	(445)
10.5.1	浮栅存储单元的编程	(447)
10.5.2	浮栅存储单元的擦除	(449)
10.5.3	浮栅存储阵列	(450)

小结	(451)
参考文献	(452)
习题	(453)
部分参考答案	(455)
附录	(457)
索引	(465)