

现代电子信息技术丛书

# 微电子技术

(第2版)

—— 信息化武器装备的精灵

主编 毕克允 副主编 胡先发 王长河 莫火石



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

内容简介

# 现代电子信息技术丛书

## 微电子技术(第2版)

——信息化武器装备的精灵

主编 毕克允

副主编 胡先发 王长河 莫火石

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书在概述微电子技术(含三代半导体及大规模集成电路)的全貌和发展趋势之后,首先阐述了各类微电子基本器件技术,然后按半导体制造工程顺序分别叙述大规模集成电路从设计、工艺、生产到封装、测试、可靠性等较全面的系列知识和先进技术,并重点突出新型的 SoC 技术和 MEMS 技术,最后介绍了通用微电子器件重点门类及应用。本书反映了微电子学主要研究领域里学科发展的前沿技术。

读者对象:从事军、民电子信息技术及与半导体有关联业务的广大读者,微电子技术领域的研究部门、教育部门、产业部门、国防工业部门的大专以上科技人员,以及大专及以上院校相关专业师生。

### 图书在版编目(CIP)数据

微电子技术 / 毕克允主编. —2 版. —北京:国防工业出版社,2008.7

(现代电子信息技术丛书)

ISBN 978-7-118-05729-4

I. 微... II. 毕... III. 微电子技术 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 068866 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 27½ 字数 688 千字  
2008 年 7 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 50.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 《现代电子信息技术丛书》

## 编审委员会

|       |     |     |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 名誉主任  | 陈炳德 |     |     |     |     |
| 主任    | 李安东 |     |     |     |     |
| 常务副主任 | 童志鹏 | 张弛  | 王志刚 |     |     |
| 副主任   | 刘成海 | 王小谟 | 熊群力 | 王峰  | 许建峰 |
|       | 程洪彬 |     |     |     |     |
| 委员    | 蔡镭  | 彭华良 | 王政  | 毕克允 | 夏乃伟 |
|       | 张光义 | 刘兴  | 雷厉  | 张冬辰 | 黄月江 |
|       | 李跃  | 胡爱民 | 范茂军 | 瞿兆荣 | 张学孝 |
|       | 李立功 | 梅遂生 | 廖复疆 | 程辉明 | 骆光明 |
|       | 汪继强 | 许西安 | 陈洁  |     |     |

## 总编委

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 总编  | 童志鹏 |     |
| 副总编 | 王晓光 |     |
| 委员  | 张雅丽 | 线珊珊 |

# 《《微电子技术》(第2版)》

会员委审编

高级顾问 许居衍

顾 问 (按姓氏笔画排序)

王相森 孔学东 杨乃彬 杨克武 张 兴

张宋岳 张树丹 徐世六

主 编 毕克允

副 主 编 胡先发 王长河 莫火石

编著人员 (按姓氏笔画排序)

于宗光 王 红 王国璋 吕 苗 朱颂春

李 丽 李栓庆 杨拥军 何书专 陈效建

邵 凯 武乾文 罗宏伟 罗春龙 金海岩

周兴隆 赵 勃 赵 彤 赵小宁 赵丽华

恩云飞 袁明文 郭树田 薛忠杰

# Preface

## 序

《现代电子信息技术丛书》(以下简称《丛书》)自1999年首次出版,至今已8年了。《丛书》综合地反映了20世纪90年代电子信息技术的发展,受到广大科技工作者、大专院校师生和部队官兵的欢迎。进入新世纪以来,鉴于国内外电子信息的飞速发展,世界与局部形势发生了许多新的变化,电子信息技术循着摩尔定律预计的发展速度得到了持续的增长与进步。我国电子信息技术不论在基础层次还是在系统层次也取得了许多世界先进的成果,例如突破了纳米级的金属氧化物场效应器件(MOSFET)的设计与制造技术,研制成功了数十万亿次运算速度的巨型计算机,实现了计算栅格的研制与试验,成功地开发出世界级的第三代数字蜂窝移动通信系统,研制出空中预警与控制机系统和区域级一体化综合电子信息系统等。国际上,美国等发达国家在电子信息技术发展上处于领先地位,成功地研制出45nm的微处理器并进行批量生产,正向20nm及以下迈进。美国启动了从工业时代到信息时代的军事转型,提出从平台中心战(PCW)向网络中心战(NCW)的转型,并以全球信息栅格(GIG)为基础。GIG是美国所构想的、正在研发的国防信息基础设施,预计在2015年可形成初始作战能力。它以面向服务的结构(SOA)为体系构架,向联网的实体提供成套的、安全的信息服务与电信服务,以加强信息共享、决策优势与异构协同。GIG包括多模态数据的传递媒介,如陆上电路、空间单元和无线电台等,其所组成的互联网络可动态地、透明地将信息从发源处路由至目的地。以GIG为依托,美国军队加速向网络中心化演进,如陆军的未来战斗系统(FCS),海军的兵力网(Forcenet),空军的指挥控制星座( $C^2$  constellation)等。这里涉及十分巨大(Herculean)的技术挑战,必须通过从基础到系统的多层次创新和突破,才能在未来有限的时间内实现超越前15年Web网发明以来的发展。凡此种种,都是我们在编著《丛书》第1版时只能预测而无法探知的。然而今日,这些高新技术的面貌已逐渐清晰并迅速渗入人们的生活和竞争。这使《丛书》的作者们意识到进行再一次创作的必要性;同时,热心的读者们也期盼我们能及时对第1版进行

修改以便与时俱进。

基于以上原因,在各级领导机关的大力支持下,《丛书》各分册的原作者与新分册的新作者们在从事繁重业务工作的同时,废寝忘食、辛勤耕耘,对《丛书》各分册进行了精心修订、编撰,为第2版的问世做出了卓越的贡献。我谨代表《丛书》编审委员会向他们致以衷心的感谢与感谢。

第2版承袭了第1版的编写宗旨、编写特色及服务对象。在维持原结构不变的基础上,对内容进行了大幅度更新,并明显加大了军事科技的比重,增、删了7个分册,总册数由17分册变为18分册,总字数由800万字增加到1400万字。新版《丛书》仍以先进的综合电子信息系统为龙头,分层次、全方位地介绍各项先进信息技术,具体包括以下分册:

#### 系统性技术分册

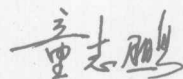
- 综合电子信息系统(第2版)
- 综合电子战(第2版)
- 侦察与监视
- 军事通信(第2版)
- 雷达与探测(第2版)
- 数据链
- 导航与定位(第2版)
- 计算机技术(第2版)
- 计算机软件技术(第2版)
- 信息安全与保密(第2版)

#### 基础性技术分册

- 微电子技术(第2版)
- 光电子技术(第2版)
- 真空电子技术(第2版)
- 传感器技术
- 微声电子器件
- 化学与物理电源(第2版)
- 现代电子测试技术(第2版)
- 先进电子制造技术(第2版)

这两个系统分别从横向、纵向对众多先进的信息技术形成了有机的集成。

《丛书》的编写出版得到总装备部、中国电子科技集团公司及其有关研究所的领导的大力支持,得到国防工业出版社领导及编辑们的积极推动与努力,谨对他们表示由衷的感谢。



2007年8月26日

# Preface

## 第1版序

信息技术是一个复杂的多层次多专业的技术体系,粗略地可以分为系统和基础两个层次。属于系统层的一般按功能分,如信息获取、通信、处理、控制、对抗(简称为5C技术,即Collection, Communication, Computing, Control, Countermeasure五个词的第一个字母)等;基础层技术一般按专业分,如微电子、光电子、微波真空电子等。

信息技术革命的火炬是由微电子技术革命点燃的,它促进了计算机技术、通信技术及其他电子信息技术的更新换代,迄今,尚未有尽期。信息技术革命推动产业革命,使人类社会经历了农业、工业社会后进入了信息社会。

大规模集成电路的集成度是微电子技术革命的重要标志,它遵循摩尔(Moore)定律,每18个月翻一番,预计可延伸到2010年。届时,每个芯片可包含100亿( $10^{10}$ )个元件,面积可达到 $10\text{cm}^2$ ,作为动态存储器的存储量可达64Gb(吉比特),接近理论极限 $10^{11}$ 个元件和256Gb存储量。微处理器芯片的运算速度每5年提高一个数量级,到本世纪末,每个芯片运算速度可达10~100亿次每秒,有人认为,实现2000亿次的单片微处理器在技术上是可能的。与此相适应,每芯片比特存储量与每MIPS(兆指令每秒)运算量的成本将呈指数式下降,现在一个100兆指令/s专用数字信号处理芯片只售5美元。如果飞机的价格也像微电子那样呈指数式下降的话,70年代初买1块比萨饼的费用在90年代就可以买1架波音747客机。3年内1部电话机将只用1块芯片,5年内1台PC机的全部功能可在1个芯片上实现,6年内1部ATM交换机的核心功能也可用1个单片完成。由于微处理器芯片价格持续不断地下降,构成了它广泛应用的基础。现在,在一般家庭、汽车和办公室中,就有100多个微处理器在工作,不仅是PC机,而且在电话机、移动电话机、电视机、洗衣机、烘干机、立体声音响、家庭影院中也有。1辆高档汽车中包含20多种可编程微处理器,1架波音777客机含有100多万行的计算机程序代码。

通信技术的进步还得力于光子技术的进步。光通信速率(比

特每秒)每两年翻一番,现在实验室中已可做到  $10^{12}$  b/s,即可将全世界可能传输的全部通信量于同一时刻内在1根光纤中传送,或相当于1s内传输1000份30卷的百科全书。通信速率的提高和通信容量的增大,使光通信成本也不断降低,与80年代相比,降低了两个数量级。

因特网是全球信息基础设施的雏形,其发展速度惊人。现在每0.4s增加一个用户,每4min增加一个网络。1996年联网数大于10万,联网主机数大于1000万,用户数大于7000万(预计到本世纪末,将大于2亿),PC机总量将达5亿,联网主机达3000万,信息量每5年翻一番。越来越多的公司、团体、机关、个人通过信息网络相互联接,其应用范围从单纯的电子函件通信扩大到远程合作(包括教育、诊断、办公、会议、协作等)、按需点播、多媒体文娱、电子商务、银行、支付等,人类社会生存与发展的另一维空间,即信息空间或称为赛博空间(Cyberspace)正在形成。如果说工业社会是建筑在汽车与高速公路上的话,信息社会则是建筑在信息与信息高速公路上的。政府、军队、经济、金融、电力、交通、电信等关键部门都要依赖于信息基础设施的正常运行。信息技术和信息产业的水平已成为综合国力的重要标志,也是国际竞争力的焦点与热点。

信息技术的飞跃发展及其渗透到各行各业的广泛应用,不仅推动了产业革命,而且也深刻地改变了人们的工作、学习和生活的方式。信息技术不仅扩展了人的视觉、听觉等感知能力,而且还渗透到思维领域,减轻或部分地替代人的脑力劳动,提高思维的效率和质量,实现人的思维能力的延伸,增强人的认知能力。信息作为事物的属性与相互关系的状态的表达是客观存在的,但不是显在的,很多是潜在的,有的是深埋的,有待挖掘与提炼。信息技术大大地丰富了信息采集的内容,提高了信息处理的能力,为人们对客观事物及其规律的认识提供了创新的工具,也为人们正确认识与有效改造主观世界和客观世界提供了源泉,将使社会的物质文明与精神文明建设得到极大的发展。

信息、能源与物质是人类社会赖以生存与发展的三大支柱。在信息社会中,信息是最重要的支柱和最重要的产业,它影响着其他两个支柱的健康发展,包括生产、传输、分配、运行、减少损耗、改善管理、提高效率、降低成本等等;同时,它还能不断地培育与发展新物质和新能源的发明与生产,不断地改善生态环境,从而使人类社会进入可持续发展的健康轨道。

信息革命在带动产业革命的同时也带动军事革命,使得军事技术、武器装备、作战思想、作战方式、战争形态、军事原则、军事条令与部队编成等都将发生深刻的变化。如果农业社会是冷兵器时代,工业社会是热兵器时代,那么信息社会则是信息兵器时代。信息、信息系统与信息化平台、武器与弹药成为战场上的主战兵器。信息优势成为传统的陆地、海洋、空中、空间优势以外的新的争夺领域,并深刻地制约着传统领域的战斗胜负,从而构成信息化战争的新形态。在这种战争中,战争胜负决定于敌对双方掌握信息与信息技术的广度与深度。信息不仅是兵力倍增器,它本身就是武器和目标,是双方必争的制高点。1991年初的海湾战争,被称为硅片战胜钢铁的战争,即源于这样的认识。它开启了赛博空间战、网络战、信息战等簇新的作战方式。

以信息优势为核心的军事革命是建筑在先进的指挥、控制、通信、计算机、情报、监视、侦察及其一体化的信息战能力的基础上的,这个众系之系(系统的系统)我国称为综合电子信息系统,与美军后来提出的  $C^4$ ISR/IW 相当,它由以下6部分组成。

1. 鲁棒的多探测器信息栅格网络。为作战部队提供作战空间感知优势。
2. 先进的指挥控制与作战管理栅格网络。为部队提供作战的先期规划、胜敌一筹的作战部署,执行作战指挥控制与一体化兵力管理能力。
3. 从探测器到射击器的栅格网络。为部队提供精确制导武器的动态目标管理、分配与

引导,协同作战,一体化防空,快速战损评估和再打击能力。

4. 联合的通信、导航与定位栅格网络。提供可靠、安全、大容量与高精度的信息,以支持部队的机动行动,确保全面优势。

5. 信息进攻能力。采取侵入、操纵与扰乱等手段,阻碍敌人作战空间感知、认知与有效用兵能力。

6. 信息防护能力。保证我方信息系统的安全,防护敌方对我信息网络的利用、干扰和破坏。

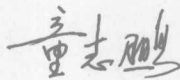
这个系统的系统涉及众多先进的信息技术的横向与纵向的有机集成,它包括雷达和光电的有源与无源探测技术、有线和无线及固定和移动通信技术、计算机硬件和软件技术、精确导航定位技术、航天航空测控技术、信息安全保密技术、电子战技术等横向专业技术的集成;也涉及微电子技术、光子与光电子技术、真空电子技术、压电与传感器技术等先进元器件技术,电子材料技术、电源技术、测试技术、先进制造技术等纵向基础技术的集成。当代军事革命要求在创新的军事思想指引下,发展有层次多专业的纵横集成的信息技术;同时,又要求在先进的信息技术驱动下,培育与发展新的军事思想,并在此基础上推动作战原则、军事条令与部队编成的变革,形成军事革命与信息革命的有机结合。

我们正处于世纪之交,党的第十五次代表大会的胜利召开,启动了有中国特色的社会主义事业在邓小平理论的指引下全面进入 21 世纪。我国的国防与军队现代化建设的跨世纪历史进程已经开始。为了适应军事革命环境下的高新技术军事斗争的需要,我军必须拥有信息优势,必须拥有以先进的综合电子信息系统为基础结构的性能优良的武器装备,必须提高部队素质,把人才培养推上新的台阶。

江泽民总书记非常重视人才的培养,他多次指示,要用高新技术知识武装全军头脑。在未来的信息化战场上,知识将成为战斗力的主导因素,敌对双方的较量将更突出地表现为高素质人才的较量。本丛书的编写出版就是为贯彻这个伟大号召提供系统基础知识。全书以先进的综合电子信息系统为龙头,多层次、全方位地介绍相关的各项先进信息技术,既包括系统技术,也包括基础技术,共 17 个方面,荟萃成 17 个分册。丛书的编写以普及先进信息技术知识为目标,以中专以上文化程度,从事军、民用电子信息技术有关业务的技术人员和管理干部为主要对象,努力做到深入浅出,雅俗共赏,图文并茂,引人入胜,文字简练,语言流畅,学术严谨,论述准确,使其具有可读性、可用性、先进性、系统性与权威性。参加丛书各分册撰写的作者都是长期从事现代信息技术研究与发展的专家,他们在繁重的业务工作的同时,废寝忘食,长期放弃节假日的休息,辛勤耕耘,鞠躬尽瘁,为本丛书做出了卓越的贡献。他们以自己的模范行动,“努力成为先进思想的传播者、科学技术的开拓者、‘四有’公民的培育者和优秀精神产品的生产者”。我谨代表总编委向他们致以衷心的感谢!

本丛书的编写出版得到原国防科工委与原电子工业部领导的大力支持,得到国防工业出版社领导及责任编辑们的积极推动与努力,借此之机,向他们表示由衷的感谢!

中国工程院院士  
原电子工业部科技委常务副主任



# Preface

## 前言

1947年晶体管的发明、1958年集成电路的诞生是微电子技术发展史上的重要里程碑,现在,微电子技术正向着集成系统技术和光电子技术方向迈进。经过60年的发展,微电子技术已成为信息时代的关键技术,而微电子技术的核心就是集成电路技术。集成电路产业以其发展迅速、渗透力强、附加值高而成为国民经济中具有战略重要性的产业。

我国半导体行业中从事集成电路设计、芯片制造、封装测试、半导体材料及专用设备等的企事业单位近900家,从业人员20多万。半导体技术总体水平已进入国际半导体产业发展的主流领域。在集成电路设计、芯片制造方面已掌握 $0.35\mu\text{m}$ 、 $0.25\mu\text{m}$ 、 $0.18\mu\text{m}$ 、 $0.13\mu\text{m}$ 、 $0.11\mu\text{m}$ 的大生产技术,90nm生产工艺技术也开发成功;封装技术由当前主流为中低档封装技术向着中高档封装技术迈进,并开始涉足更高档的封装技术领域;半导体材料先后掌握第一代Si材料(主流),第二代GaAs、InP材料等技术,第三代SiC、GaN半导体材料(宽带隙)处在研发阶段,并初显成果。随着微电子技术的发展需要,低维半导体材料正在攻克之中。MEMS技术目前尚处在起步阶段,包括RF MEMS技术,它的应用将会推动信息技术成为新技术革命中的标志性技术,使微电子技术向各行各业渗透并推向更高的水平。

当前,我国微电子产业和科学技术发展水平远不能适应国民经济和国防建设发展需要。我国集成电路市场份额只占世界集成电路市场的百分之几,远远满足不了国内市场需求,与我国社会主义大国地位极不相称,所以国家已把发展微电子作为一项战略决策放到了突出的地位。基于这样的形势,我们在已有第1版的从半导体理论、材料到设计、制造等起步技术基础上,及时组织编写了突出反映目前高速发展微电子最新技术的第2版。该版的特点是结构新颖、技术面宽、知识跨度大。它概括了微电子技术的全貌和发展趋势,重点阐述了各类半导体基本器件技术、大规模集成电路制造系列技术、微电子器件重点门类及应用等。该书的出版将有力地促进我国微电子产业建设和科学技术的发展。

本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技术的作品,具有科学性、先进性、实践性、系统性。本书涉及的知识面非常广泛,参与编写的都是一批活跃在微电子领域科研、生产、教育部门中的老、中、青科技专家,他们熟悉设计理论、制造技术,积累了丰富的专业知识和经验。编写过程中力求用比较通俗的语言,深入浅出地把微电子技术的主要知识介绍给读者,但由于水平和篇幅所限,时间又较紧迫,恐有违初衷。本书初稿完成后,虽进行了多次修改,但不当和错误之处在所难免,敬请读者不吝批评指正。本书编写时参考了大量专著和文献,但限于篇幅未能一一列出,在此表示歉意。

为了保证书稿质量,胡先发副主编做了大量的统校稿工作。另外,还有很多专家提供了相关资料,其中有:张慕义、张绵、李秀清、李和委、马振昌、徐爱东、徐水清、苏秀娣、张有涛、许晓丽、何小琦、费庆宁、来萍、黄云、章晓文等。对他们的付出表示由衷的感谢!

参加本书编写的单位有中国电子科学院、中国电子科技集团公司第十三研究所、第二十四研究所、第四十三研究所、第四十七研究所、第五十五研究所、第五十八研究所、信息产业部第五研究所、北京大学、南京大学等。对支持编写本书的上述单位领导和有关专家深表谢意!

毕克允

# Preface

## 第1版前言

---

本书是《现代电子信息技术丛书》的一个分册,是为那些渴望了解微电子技术的读者而编写的。

半个世纪以来,以微电子技术为核心的信息化技术革命正以迅雷不及掩耳之势推动着世界经济和社会向前发展,我们赖以生存的地球正在发生无比深刻的变化。从目前发展态势来看,21世纪将是信息化的世纪。微电子技术以其神秘莫测的力量推动着科学技术和生产力的发展,创造了空前的信息文明。与此同时,人们意识到战争模式将发生变化,信息兵器时代将不同于冷兵器和热兵器时代,信息时代的战争将是兵器信息化和信息兵器化的高科技战争,其核心将是高强度地使用微电子技术。处于信息化变革之中的社会,到处充满着信息硬件和软件,因此人们从各个角度希望学习和了解有关微电子技术的知识。为了满足这种要求,我们组织了从事微电子研制的资深专家和工程技术人员编写这本科技读物——《微电子技术》,以飨读者。

参加本书编写的单位有电子科学研究院,南京电子器件研究所(原电子工业部五十五所)林金庭、薛舫时、徐世晖、李涵秋、陈克金和邵凯(负责编写一、二、三、八、十二章),河北半导体研究所(原电子工业部十三所)钱小工、苏世民、袁明文(负责编写九、十、十一章),四川固体电路研究所(原电子工业部二十四所)杨功铭、邹永达(负责编写四、五、六、七章)。全书共分十二章,第一、二、三章分别讲述了微电子的战略地位,发展微电子的物理基础,晶体管和集成电路的发明;第四、五、六、七章主要讲述微电子的逻辑推理、运算和记忆,以及集成电路是如何处理各种各样信息的;第八章介绍射频微波集成电路的功能和应用;第九、十章介绍节能半导体及微电子大家族;第十一章展示集成电路是怎样制造出来的;第十二章展望21世纪初微电子的发展趋势。

本书涉及的知识面非常广泛,编写过程中力求用比较通俗的语言,深入浅出地把微电子的主要知识介绍给读者,但由于水平和篇幅所限,时间又较紧迫,恐有违初衷。本书初稿完成后,虽进行了多次



# Contents

## 目 录

|                                                                                                                                                                                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>第 1 章 绪论</b>                                                                                                                                                                                       | <b>1</b>  |
|  <b>1.1 从 0.5<math>\mu\text{m}</math>、0.25<math>\mu\text{m}</math>、0.13<math>\mu\text{m}</math> 到 90nm、65nm、10nm</b> | <b>5</b>  |
| ——看集成电路工艺技术的突飞                                                                                                                                                                                        |           |
| 1.1.1 不断缩小特征尺寸——提高芯片集成度和性价比的有效手段                                                                                                                                                                      | 5         |
| 1.1.2 逐步增大圆片面积——提高芯片成品率和降低成本的最佳捷径                                                                                                                                                                     | 6         |
| 1.1.3 探索新的发展空间                                                                                                                                                                                        | 6         |
|  <b>1.2 从 LSI、VLSI 到 GLSI/SoC</b>                                                                                  | <b>7</b>  |
| ——看集成电路设计技术的猛进                                                                                                                                                                                        |           |
| 1.2.1 集成电路产业“龙头”——LSI 设计                                                                                                                                                                              | 8         |
| 1.2.2 设计成功的保证——先进设计工具                                                                                                                                                                                 | 8         |
| 1.2.3 设计技术的新革命——片上系统 (SoC)                                                                                                                                                                            | 9         |
| 1.2.4 面临超深亚微米、纳米电路的设计挑战                                                                                                                                                                               | 10        |
|  <b>1.3 从 Ge、Si、GaAs、InP 到 SiC、GaN</b>                                                                             | <b>10</b> |
| ——看第三代半导体的发展                                                                                                                                                                                          |           |
| 1.3.1 半导体材料的电子能带及特性参数                                                                                                                                                                                 | 10        |
| 1.3.2 元素半导体——Ge、Si                                                                                                                                                                                    | 12        |
| 1.3.3 化合物半导体——GaAs、InP                                                                                                                                                                                | 12        |
| 1.3.4 宽带隙半导体——SiC、GaN                                                                                                                                                                                 | 12        |
| 1.3.5 半导体材料新探索                                                                                                                                                                                        | 13        |
|  <b>1.4 从 MEMS、NEMS 到生物芯片、有机半导体</b>                                                                                | <b>13</b> |
| ——看微电子技术向其他学科拓展                                                                                                                                                                                       |           |
| 1.4.1 MEMS                                                                                                                                                                                            | 13        |
| 1.4.2 NEMS                                                                                                                                                                                            | 14        |
| 1.4.3 生物芯片                                                                                                                                                                                            | 15        |
| 1.4.4 有机半导体                                                                                                                                                                                           | 15        |

|            |                       |           |
|------------|-----------------------|-----------|
| 1.5        | 推进微电子技术的高速发展          | 15        |
| <b>第2章</b> | <b>基本器件技术</b>         | <b>18</b> |
| 2.1        | 硅器件技术                 | 19        |
| 2.1.1      | MOS 器件技术              | 19        |
| 2.1.2      | 双极晶体管技术               | 23        |
| 2.1.3      | 功率电子器件技术              | 29        |
| 2.2        | 化合物器件技术               | 49        |
| 2.2.1      | GaAs 器件技术             | 49        |
| 2.2.2      | InP 基 HEMT 技术         | 56        |
| 2.2.3      | SiGe 器件技术             | 56        |
| 2.3        | 新型半导体器件技术             | 62        |
| 2.3.1      | 宽带隙半导体技术              | 62        |
| 2.3.2      | 量子器件技术                | 68        |
| 2.3.3      | 纳米电子器件技术              | 73        |
| 2.3.4      | 有机半导体器件技术             | 77        |
|            | 参考文献                  | 80        |
| <b>第3章</b> | <b>设计技术</b>           | <b>81</b> |
| 3.1        | 集成电路发展与设计历程           | 81        |
| 3.1.1      | 集成电路的发展历程             | 81        |
| 3.1.2      | 集成电路的分类               | 82        |
| 3.1.3      | 集成电路设计的要求             | 84        |
| 3.1.4      | 集成电路设计和制造的关系          | 84        |
| 3.1.5      | 集成电路设计和 EDA 软件的关系     | 85        |
| 3.2        | 硅集成电路设计技术             | 87        |
| 3.2.1      | 等比例缩小定律               | 87        |
| 3.2.2      | 集成电路设计方法学             | 88        |
| 3.2.3      | 集成电路设计流程              | 94        |
| 3.2.4      | 集成电路设计验证技术            | 101       |
| 3.2.5      | 可测性设计技术               | 111       |
| 3.2.6      | 硅集成电路设计技术的挑战          | 112       |
| 3.3        | GaAs 电路设计技术           | 116       |
| 3.3.1      | GaAs 微波单片电路 (MMIC) 设计 | 116       |
| 3.3.2      | GaAs 超高速电路 (VHSIC) 设计 | 121       |
|            | 参考文献                  | 125       |

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| <b>第4章 工艺技术</b>                                | 126 |
| <b>4.1 基本工艺技术</b>                              | 127 |
| 4.1.1 外延                                       | 127 |
| 4.1.2 离子注入                                     | 128 |
| 4.1.3 扩散、氧化                                    | 130 |
| 4.1.4 介质薄膜生长                                   | 132 |
| 4.1.5 金属化                                      | 135 |
| 4.1.6 光刻                                       | 137 |
| 4.1.7 刻蚀                                       | 139 |
| 4.1.8 化学机械抛光                                   | 141 |
| 4.1.9 背面工艺                                     | 143 |
| <b>4.2 工艺集成技术</b>                              | 143 |
| 4.2.1 硅工艺集成技术                                  | 144 |
| 4.2.2 砷化镓工艺集成技术                                | 154 |
| <b>参考文献</b>                                    | 160 |
| <b>第5章 大生产技术</b>                               | 161 |
| <b>5.1 典型电路芯片制造主要工艺流程</b>                      | 162 |
| 5.1.1 200mm 圆片 0.25 $\mu$ m 典型 CMOS 电路制造主要工艺流程 | 162 |
| 5.1.2 300mm 圆片 0.13 $\mu$ m 典型 CMOS 电路制造主要工艺流程 | 168 |
| <b>5.2 标准工艺线——Foundry 的大生产管理技术</b>             | 169 |
| 5.2.1 半导体加工自动化                                 | 170 |
| 5.2.2 计算机集成制造                                  | 170 |
| 5.2.3 效率管理                                     | 172 |
| <b>5.3 标准工艺线——Foundry 的代工模式</b>                | 173 |
| 5.3.1 什么是 Foundry 代工模式                         | 173 |
| 5.3.2 Foundry 代工的发展历程                          | 174 |
| 5.3.3 国内外 Foundry 代工形势及发展前景                    | 174 |
| <b>第6章 封装测试技术</b>                              | 176 |
| <b>6.1 芯片封装技术</b>                              | 177 |
| 6.1.1 封装的作用和地位                                 | 177 |
| 6.1.2 封装类型                                     | 178 |
| 6.1.3 几种典型封装技术                                 | 182 |
| 6.1.4 未来封装技术展望                                 | 193 |
| <b>6.2 集成电路测试技术</b>                            | 198 |
| 6.2.1 成品测试                                     | 198 |