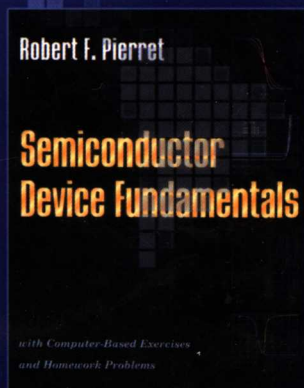


国外电子与通信教材系列

# 半导体器件基础

Semiconductor Device Fundamentals



[美] Robert F. Pierret 著

黄如 王漪 等译

王金延 金海岩

韩汝琦 审校

PEARSON  
Addison  
Wesley



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

# 半导体器件基础

Semiconductor Device Fundamentals

[美] Robert F. Pierret 著

黄如 王漪 等译  
王金延 金海岩  
韩汝琦 审校

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是一本微电子技术方面的入门书籍,全面介绍了半导体器件的基础知识。全书分为三个部分共19章,首先介绍了半导体基础,讲解了半导体物理方面的相关知识以及半导体制备工艺方面的基本概念。书中阐述了 $pn$ 结、双极结型晶体管(BJT)和其他结型器件的基本物理特性,并给出了相关特性的定性与定量分析。最后,作者讨论了场效应器件,除了讲解基础知识之外,还分析了小尺寸器件相关的物理问题,并介绍了一些新型场效应器件。全书内容丰富、层次分明,兼顾了相关知识的深度与广度,系统讲解了解决实际器件问题所必需的分析工具,并且提供了大量利用计算机实现的练习与习题。

本书可作为微电子专业的本科生及研究生的教材或参考书,也是该领域工程技术人员的宝贵参考资料。

Simplified Chinese edition Copyright © 2004 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Semiconductor Device Fundamentals, ISBN: 0201543931 by Robert F. Pierret. Copyright © 1996.

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Addison-Wesley.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版亚洲有限公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有Pearson Education培生教育出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2002-5701

### 图书在版编目(CIP)数据

半导体器件基础/(美)皮埃罗(Pierret, R. F.)著;黄如等译.-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:Semiconductor Device Fundamentals

ISBN 7-5053-9915-2

I.半... II.①皮... ②黄... III.半导体器件-教材 IV.TN303

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第106992号

责任编辑:冯小贝

印刷:北京智力达印刷有限公司

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:36.5 字数:934千字

印次:2004年11月第1次印刷

定价:53.00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 and 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<br>杨千里 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师<br>总参通信部副部长、中国电子学会会士、副理事长<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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   |
|     | <b>徐重阳</b> | 华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任<br>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<br>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   |

# 序

50多年前，世界上第一个晶体管在贝尔实验室诞生，从此拉开了人类社会步入电子时代的序幕。在发明晶体管之后，随着硅平面工艺的进步和集成电路的发明，从小规模、中规模集成电路到大规模、超大规模、甚大规模集成电路不断发展，出现了今天这样的以微电子技术为基础的电子信息技术与产业。

作为电子信息产业的强大基础，微电子技术是一个国家综合实力的重要标志。在全球信息产业飞速发展、网络经济迅速兴起、知识经济初见端倪、现代国防和未来战争中尖端技术不断涌现的今天，微电子技术比以往任何时候都更显示出其重要的战略地位。随着国内一批投资在百亿元量级的集成电路大规模生产线的相继投产，我国微电子产业进入了高速发展时期。根据信息产业部的统计，仅1999~2002年期间，在我国微电子领域的投资额超过了前50年在该领域的总投资额的2倍。最近，国内第一条12"、100 nm技术的生产线已正式投产，标志着我国集成电路生产技术已进入世界先进水平之列。中国的集成电路设计业每年正以70%的增长率而迅速发展。可以期望，再过10年或者略长的一些时间，我国不仅将成为世界微电子产业中心之一，而且将是微电子强国之一。

在高科技时代，科学技术与经济的竞争归根到底是人才竞争。人才是社会经济发展最主要的制约因素，得人才者得天下。目前，集成电路方面的专业人才变得越来越紧缺。半导体器件的相关知识作为微电子技术的基础，对于了解和掌握微电子技术有着重要的作用。为此，我所在的北京大学微电子学研究院的黄如、王漪、王金延、金海岩几位教授，共同翻译了Robert F. Pierret教授的*Semiconductor Device Fundamentals*一书。这是一本微电子技术方面的入门书籍，不仅可以作为微电子专业大学本科生的理想教材，也可以作为电子技术相关学科的学生和研究人员的重要参考书。

Robert F. Pierret教授在美国普度大学电子与计算机工程学院执教多年，由他撰写的这本关于半导体器件的著作受到了广泛的欢迎，被列为美国加州大学伯克利分校、南加州大学等多所大学相关课程的教材和主要教学参考书。全书分为三个部分共19章，兼顾了相关知识的深度与广度。其中第一部分介绍了半导体基础，讲解了半导体物理方面的相关知识以及半导体制备工艺方面的基本概念；第二部分阐述了pn结、双极结型晶体管和其他结型器件的基本物理特性，并给出了相关特性的定性分析与定量分析；第三部分讨论了场效应器件，除了讲解基础知识之外，还分析了小尺寸器件相关的物理问题，并介绍了一些新型场效应器件。书中每一章的最后都对本章的内容进行了总结，便于读者掌握有关的重点和思路。此外，在每一部分的最后提供了一定量的补充读物，有兴趣的读者可以根据具体情况选择阅读。

本书的翻译工作是在黄如教授的组织下完成的,她翻译了书中的第16章~第19章以及第三部分补充读物和复习,并对全书的内容进行了初步统稿;王漪副教授翻译了第1章~第4章、附录A以及第一部分补充读物和复习;王金延副教授翻译了第5章~第7章、第15章以及附录B~附录D;金海岩副教授翻译了第8章~第14章以及第二部分补充读物和复习。倪学文教授、关旭东教授、赵宝瑛教授、甘学温教授、刘晓彦教授等审阅了部分译稿,参加本书翻译工作的还有卜伟海、张慧邃、王文平、王懿、王成刚。最后,全书译稿又由理论功底深厚的韩汝琦教授把关终审,因此质量有了较好的保证。由于担任翻译工作的成员毕竟都还是年轻学者,因此不妥之处在所难免,还望读者不吝赐教。

我仅以此短序祝贺他们取得的成果。

王阳元  
2004年秋于北京大学



# 前 言

关于固态器件的大学教材在过去的十年里至少已经出版了 14 本，为什么还要再写一本呢？尽管原因很多，但最重要的是，我们希望写出一本能结合计算机辅助学习的、适用于 21 世纪的教材。在最近的一次调查中，普度大学电子与计算机工程学院的大学课程委员会的成员们提出，应该把计算机实践融入学习过程中。目前在美国范围内，已经建立了强调计算机辅助学习的大学联盟。1992 年 1 月，*Student Edition of MATLAB* 一书开始发行，这本书实际上就是一个原始的 MATLAB 用户手册，并且配备了廉价版本的数学工具软件。第一年，这本书及相应的软件就售出了 37 000 多套。相继又有几个出版社出版了一系列关于 MATLAB 的参考书和教材，其中主要讲解了有关 MATLAB 软件的使用。进入 21 世纪以后，计算机辅助学习将会变得越来越普遍，这一发展方向已非常明确。在分析固态器件时，利用计算机能够处理更为实际的问题，可以通过“假设分析”更容易地完成实验，而且可以方便地获得图形化的输出结果。利用计算机，可以在比手工计算单个点的值少很多的时间之内轻松获得完整的器件特性。

需要说明的是，本书有一部分的内容取材自 Addison-Wesley 出版的固态器件系列丛书 (*Modular Series on Solid State Devices*) 的卷 I ~ 卷 IV。但是，本书并不是将各卷的内容简单地组合在一起，而是修改并重写了其中的大部分内容，并且在这些内容的基础上又新增了两章及一些补充小节。本书还包含了基于计算机的一部分练习以及大量的习题，同时新增了一些在“序言”中详细介绍的特点。

如同所有的工程开发一样，器件设计中处处包含了各种折中情况。本书在内容的设计上也进行了权衡考虑。例如，可以对几个主题进行详细的描述（深度），也可以对较多主题进行概述性的介绍（广度）。同样，可以强调对概念的理解，也可以介绍一些实际应用的有关知识。Addison-Wesley 出版的固态器件系列丛书的卷 I ~ 卷 IV 就因其强调概念的深度而得到了广泛关注。本书既保留了原内容的深度，又增加了以扩展广度和扩充实际应用知识为目标的四章“只读”内容。在这些章节里，主要介绍了正在蓬勃发展的现代器件和化合物半导体器件，另外也考虑了学生的定性分析和定量分析能力的折中培养。由于使用了计算机，大大提高了定量分析能力，因此特别要注意不能忽视“直观分析”能力的培养。当然，我们并没有刻意兼顾内容的深度和广度，而是将许多内容留待以后阐述（利用另一门课程或其他的教材）。我们希望，本书在内容上已经达到了合理的折中，读者可以通过本书对固态器件的相关内容获得较为深入的理解，并且适当熟悉固态器件的分析过程。

本书适合至少学过一门电场理论相关课程的大学三、四年级的学生使用。全书共分为三个主要部分，第二部分又分为 A 和 B 两部分。在普度大学电子与计算机工程学院三、四年级的一学期课程（3 学分时）中，本书这三部分的内容经过少许删节后，每个部分可用五周的时间进行授课。如果课时有限，作为阅读材料的只读部分——第 4 章、第 9 章、第 13 章和第 19 章可以不作为课程讲解的内容。（教师可以指定这些章节为自主阅读内容，并且采用出题考试的形

式，学习过相关内容的学生可以获得附加分，以示奖励。)除了15.1节有关场效应的概述性介绍之外，第12章、第14章和第15章可以不纳入授课的内容，这并不会影响课程的连续性。

虽然在“序言”中完整地列出了本书的特点，但是教师还应特别注意每章习题前面的习题信息表。这些表格对给学生布置练习及进行作业评分很有帮助。本书每个部分最后一章中的复习题可作为教师制定测验题时的参考，这些复习题都出自本门课程的“开卷”和“闭卷”考试题。对于书中提供的计算机练习与习题，推荐读者使用MATLAB学生版或专业版来完成，但不做规定。本书提供给教师的练习和习题答案是用MATLAB完成的。尽管MATLAB软件对学习很有帮助，但在开始学习本书时，并不要求读者熟练掌握MATLAB。随着课程内容的不断深入，有关MATLAB方面的习题会越来越复杂，读者对MATLAB的掌握程度也会越来越深入。也就是说，一开始的练习和习题只是让读者通过使用MATLAB来学习MATLAB，但是完成前三章中的大部分计算机练习和习题是十分重要的。这样，读者不仅可以自如地使用MATLAB来完成后面章节中的练习和习题，而且可以利用前几章得到的结果。

# 序 言

与本书的写作目的一致，大量媒体都在讨论有关“信息高速公路”的问题。目前可以预想的高速公路，即维持信息流点到点之间传输的物理链路是光纤电缆。与本书内容相关的是，在高速公路中嵌入和提取信息的导通与关断过程是通过半导体（固态）器件实现的；信息流的控制，或者说信息处理以及与人类接口的转换是由计算机完成的，而中央处理单元（CPU）、存储器和计算机中的其他主要部件又都是半导体器件。在当今世界里，半导体器件已经进入从汽车到洗衣机等几乎每一个主要系统中。

尽管有关半导体器件的研究已经开展了大约半个世纪，但是这一领域一直充满着生机与活力；而且令人欣喜的是，新器件和改进型器件正在快速地发展。当在复杂的集成电路中的器件数增加到百万量级、芯片边长以厘米为单位进行计算时，从概念上来说独立的器件已被缩小到原子尺度。对于给定的但实际无法得到的器件结构，正在人工生成其所希望的半导体性质。实际上，人们正在利用工程方法获得半导体特性，从而达到所需的器件指标。

本书应该看成是读者进入半导体器件这一诱人领域的入门教材，可供至少已学习过电场理论的大学三、四年级的学生使用。本书涵盖了大量具有代表性的器件的相关内容，但是主要强调对基础器件结构内部工作机制的基本认识。下面将详细描述本书的一些特点，以帮助读者掌握相关知识。尤其在学习起步阶段，读者可以根据下面列出的特点进行学习。

- **基于计算机的练习和每章后面的习题（课后作业）。**大多数章节包含一个或多个需要利用计算机的、基于MATLAB的练习。MATLAB是一种数学工具软件程序，可以在大多数计算机平台上运行。一个廉价的MATLAB学生版本，可用于运行所有与本书相关的文件，同样也可以在IBM兼容机及Macintosh计算机上实现。在书中给出了作为练习答案的MATLAB程序，也可以获得相应的电子版本，如下所述。在习题号前用符号“●”标识的计算机习题大约占习题总量的25%，在解答计算机习题时虽然也可以使用其他的数学工具程序来完成，但推荐使用MATLAB。由于在开始几章特别设计了一些基于计算机的练习和习题来逐渐提高用户对使用MATLAB的熟练程度，因此用户在开始本书学习时并不需要十分熟悉MATLAB。但是完成前三章中的大部分计算机练习和习题是十分重要的，这样读者不仅可以自如地使用MATLAB来完成后面章节中的练习和习题，而且可以利用前几章得到的结果。
- **计算机程序文件。**与基于计算机的练习相关的MATLAB程序文件可以通过Internet（ftp.mathworks.com中的pub/books/pierret目录下）或通过MathWorks公司提供的软盘来获得。该软盘已经被格式化，以用于IBM兼容机或Macintosh计算机。每个软盘包含两组“m文件”，分别用于4.0前版本（第一个学生版本）和4.0后版本（第二个学生版本）的MATLAB。书中列出的相关内容主要由Macintosh计算机的4.0后版本导出，除了有时会出现希腊字母之外，其他与相应的IBM兼容机得到的结果一致。

- **补充读物和复习章节。**本书可分为三个部分，每一部分的最后是补充和复习章节，其中包含可选择的/补充的阅读资料列表、前面几章引用的参考文献、术语复习一览表以及复习题和答案，复习题来自我们的闭卷和开卷考试题。
- **只读章节。**第4章、第9章、第13章和第19章被分类为“只读”章节，这些只读章节主要包含一些补充的定性分析内容，其中的两章讨论了一些最新的器件结构。为了让读者能够对这些内容产生兴趣，我们将只读章节有目的地安排在不同位置，主要是为了在内容讲解的节奏上有所变化。这几章仅包含少量的公式，没有练习，仅在所在章节的末尾安排了一些习题。从考试的角度来看，这几章可以跳过，基本上不会影响整本书内容的连续性，也可以安排为自主阅读章节。
- **习题信息表。**在每章习题前面插入了一个简洁的习题信息表，提供的信息包括：(i)习题应该在哪一节或小节后完成；(ii)估计的习题难度，用1~5表示，其中1表示很容易，5表示很难或很花时间；(iii)建议的分值或分值分配；(iv)简短的习题描述。在习题号前的“●”表明是基于计算机的习题，星号表明习题的一部分解题过程要使用计算机。
- **公式总结。**第2章最基本的载流子模型公式、第3章的载流子运动方程以及书中涉及的公式分别在表2.4和表3.3中再次给出。这些表涵盖了第一部分的主要内容，对于闭卷考试，可以将其看成本书第一部分内容的复习总结。
- **测试及数据。**在介绍性的内容中有时会给出草图和理想图，但是器件特性曲线一般是在测试实验室实际测量得到的，很少是完全符合理想情况的。书中包括了来自于作者管理的本科EE实验室的详细测试结果，可以从中总结出实际情况的一些特有性质。对于测试中的一些细节信息以及其他相关的一些测试，读者可以参考 Addison-Wesley 出版的 *Semiconductor Measurement Laboratory Operations Manual* 一书。
- **可选择的内容。**2.1节给出了对于原子系统中能量量子化知识所需掌握的最少内容。附录A包含了更深入的有关量子化概念和其他内容的介绍，可以提供给那些希望在这方面了解更多补充内容的读者。2.1节可以由附录A代替，这不会影响整个内容的连续性。

# 目 录

## 第一部分 半导体基础

第1章 半导体概要 .....	2
1.1 半导体材料的特性 .....	2
1.1.1 材料的原子构成 .....	2
1.1.2 纯度 .....	3
1.1.3 结构 .....	4
1.2 晶体结构 .....	4
1.2.1 单胞的概念 .....	5
1.2.2 三维立方单胞 .....	5
1.2.3 半导体晶格 .....	6
1.2.4 密勒指数 .....	8
1.3 晶体的生长 .....	11
1.3.1 超纯硅的获取 .....	11
1.3.2 单晶硅的形成 .....	11
1.4 小结 .....	13
习题 .....	13
第2章 载流子模型 .....	16
2.1 量子化概念 .....	16
2.2 半导体模型 .....	17
2.2.1 价键模型 .....	18
2.2.2 能带模型 .....	18
2.2.3 载流子 .....	20
2.2.4 带隙和材料分类 .....	21
2.3 载流子的特性 .....	22
2.3.1 电荷 .....	22
2.3.2 有效质量 .....	22
2.3.3 本征材料内的载流子数 .....	23
2.3.4 载流子数的控制——掺杂 .....	24
2.3.5 与载流子有关的术语 .....	27
2.4 状态和载流子分布 .....	28
2.4.1 态密度 .....	28
2.4.2 费米分布函数 .....	29
2.4.3 平衡载流子分布 .....	32

2.5	平衡载流子浓度 .....	33
2.5.1	$n$ 型和 $p$ 型的公式 .....	34
2.5.2	$n$ 型和 $p$ 型表达式的变换 .....	35
2.5.3	$n_i$ 和载流子浓度乘积 $np$ .....	36
2.5.4	电中性关系 .....	39
2.5.5	载流子浓度的计算 .....	40
2.5.6	费米能级 $E_F$ 的确定 .....	42
2.5.7	载流子浓度与温度的关系 .....	44
2.6	小结 .....	46
	习题 .....	47
<b>第3章</b>	<b>载流子输运</b> .....	<b>51</b>
3.1	漂移 .....	51
3.1.1	漂移的定义与图像 .....	51
3.1.2	漂移电流 .....	52
3.1.3	迁移率 .....	54
3.1.4	电阻率 .....	58
3.1.5	能带弯曲 .....	61
3.2	扩散 .....	64
3.2.1	扩散的定义与图像 .....	64
3.2.2	热探针测量法 .....	67
3.2.3	扩散和总电流 .....	68
3.2.4	扩散系数与迁移率的关系 .....	69
3.3	复合-产生 .....	72
3.3.1	复合-产生的定义与图像 .....	72
3.3.2	动量分析 .....	74
3.3.3	R-G统计 .....	76
3.3.4	少子寿命 .....	80
3.4	状态方程 .....	83
3.4.1	连续性方程 .....	83
3.4.2	少子的扩散方程 .....	84
3.4.3	问题的简化和解答 .....	85
3.4.4	解答问题 .....	86
3.5	补充的概念 .....	90
3.5.1	扩散长度 .....	90
3.5.2	准费米能级 .....	91
3.6	小结 .....	94
	习题 .....	96
<b>第4章</b>	<b>器件制备基础</b> .....	<b>104</b>
4.1	制备过程 .....	104

4.1.1	氧化 .....	104
4.1.2	扩散 .....	107
4.1.3	离子注入 .....	109
4.1.4	光刻 .....	111
4.1.5	薄膜淀积 .....	113
4.1.6	外延 .....	116
4.2	器件制备实例 .....	116
4.2.1	$pn$ 结二极管的制备 .....	116
4.2.2	计算机 CPU 的工艺流程 .....	117
4.3	小结 .....	121
<b>第一部分补充读物和复习 .....</b>		<b>122</b>
可选择的 / 补充的阅读资料列表 .....		122
图的出处 / 引用的参考文献 .....		123
术语复习一览表 .....		124
第一部分——复习题和答案 .....		125

## 第二部分 A $pn$ 结二极管

<b>第 5 章</b>	<b><math>pn</math> 结的静电特性 .....</b>	<b>136</b>
5.1	前言 .....	136
5.1.1	结的相关术语 / 理想杂质分布 .....	136
5.1.2	泊松方程 .....	138
5.1.3	定性解 .....	138
5.1.4	内建电势 ( $V_{bi}$ ) .....	142
5.1.5	耗尽近似 .....	144
5.2	定量的静电关系式 .....	146
5.2.1	假设和定义 .....	146
5.2.2	$V_A = 0$ 条件下的突变结 .....	147
5.2.3	$V_A \neq 0$ 条件下的突变结 .....	150
5.2.4	结果分析 .....	153
5.2.5	线性缓变结 .....	157
5.3	小结 .....	159
习题 .....		160
<b>第 6 章</b>	<b><math>pn</math> 结二极管: <math>I</math>-<math>V</math> 特性 .....</b>	<b>166</b>
6.1	理想二极管方程 .....	166
6.1.1	定性推导 .....	166
6.1.2	定量求解方案 .....	170
6.1.3	严格推导 .....	174
6.1.4	结果分析 .....	175

6.2	与理想情况的偏差 .....	183
6.2.1	理想理论与实验的比较 .....	183
6.2.2	反向偏置的击穿 .....	185
6.2.3	复合 - 产生电流 .....	191
6.2.4	$V_A \rightarrow V_{bi}$ 时的大电流现象 .....	197
6.3	一些需要特别考虑的因素 .....	200
6.3.1	电荷控制方法 .....	200
6.3.2	窄基区二极管 .....	201
6.4	小结 .....	204
	习题 .....	205
<b>第 7 章</b>	<b><i>pn</i> 结二极管: 小信号导纳 .....</b>	<b>213</b>
7.1	引言 .....	213
7.2	反向偏置结电容 .....	214
7.2.1	基本信息 .....	214
7.2.2	<i>C-V</i> 关系 .....	216
7.2.3	参数提取和杂质分布 .....	219
7.2.4	反向偏置电导 .....	222
7.3	正向偏置扩散导纳 .....	223
7.3.1	基本信息 .....	223
7.3.2	导纳关系式 .....	225
7.4	小结 .....	229
	习题 .....	230
<b>第 8 章</b>	<b><i>pn</i> 结二极管: 瞬态响应 .....</b>	<b>232</b>
8.1	瞬态关断特性 .....	232
8.1.1	引言 .....	232
8.1.2	定性分析 .....	233
8.1.3	存贮延迟时间 .....	236
8.1.4	总结 .....	240
8.2	瞬态开启特性 .....	240
8.3	小结 .....	244
	习题 .....	244
<b>第 9 章</b>	<b>光电二极管 .....</b>	<b>247</b>
9.1	引言 .....	247
9.2	光电探测器 .....	248
9.2.1	<i>pn</i> 结光电二极管 .....	248
9.2.2	<i>p-i-n</i> 和雪崩光电二极管 .....	250
9.3	太阳能电池 .....	253
9.3.1	太阳能电池基础 .....	253
9.3.2	效率研究 .....	254



9.3.3 太阳能电池工艺 .....	256
9.4 LED .....	257
9.4.1 概述 .....	257
9.4.2 商用 LED .....	258
9.4.3 LED 封装和光输出 .....	262

## 第二部分 B BJT 和其他结型器件

<b>第 10 章 BJT 基础知识</b> .....	266
10.1 基本概念 .....	266
10.2 制备工艺 .....	269
10.3 静电特性 .....	270
10.4 工作原理简介 .....	272
10.5 特性参数 .....	274
10.6 小结 .....	275
习题 .....	276
<b>第 11 章 BJT 静态特性</b> .....	279
11.1 理想晶体管模型 .....	279
11.1.1 求解方法 .....	279
11.1.2 通用解 ( $W$ 为任意值) .....	282
11.1.3 简化关系式 ( $W \ll L_b$ ) .....	285
11.1.4 埃伯斯-莫尔方程和模型 .....	289
11.2 理论和实验的偏差 .....	292
11.2.1 理想特性与实验的比较 .....	292
11.2.2 基区宽度调制 .....	294
11.2.3 穿通 .....	295
11.2.4 雪崩倍增和击穿 .....	297
11.2.5 几何效应 .....	301
11.2.6 复合-产生电流 .....	303
11.2.7 缓变基区 .....	303
11.2.8 品质因素 .....	304
11.3 现代 BJT 结构 .....	306
11.3.1 多晶硅发射极 BJT .....	306
11.3.2 异质结双极晶体管 (HBT) .....	308
11.4 小结 .....	310
习题 .....	311
<b>第 12 章 BJT 动态响应模型</b> .....	319
12.1 小信号等效电路 .....	319
12.1.1 普遍的四端模型 .....	319
12.1.2 混合 $\pi$ 模型 .....	321