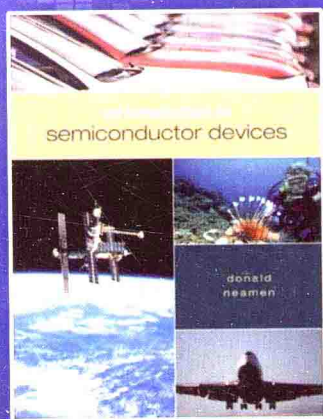


国外电子与通信教材系列

Mc
Graw
Hill
Education

半导体器件导论

An Introduction to
Semiconductor Devices



[美] Donald A. Neamen 著

谢生译



中国工信出版集团



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

半导体器件导论

An Introduction to Semiconductor Devices

[美] Donald A. Neamen 著

谢生译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是微电子学和集成电路设计专业的基础教程,内容涵盖了量子力学、固体物理、半导体物理和半导体器件的全部内容。本书在介绍学习器件物理所必需的基础理论之后,重点讨论了pn结、金属-半导体接触、MOS场效应晶体管和双极型晶体管的工作原理和基本特性。最后论述了结型场效应晶体管、晶闸管、MEMS和半导体光电器件的相关内容。全书内容丰富,脉络清晰,说理透彻,浅显易懂。书中各章给出了大量的分析或设计实例,增强读者对基本理论和概念的理解。每章末均安排有小结和复习提纲,并提供大量的自测题和习题。

本书是电子科学与技术、微电子学和集成电路设计专业本科生学习半导体器件物理的理想教材,对于从事集成电路设计和生产领域的工程技术人员也是一本非常有益的参考书。

Donald A. Neamen: An Introduction to Semiconductor Devices
9780072987560

Copyright © 2006 by McGraw-Hill Education. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2015 by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权© 2015 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与电子工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2014-5138



图书在版编目(CIP)数据

半导体器件导论/(美)尼曼(Neamen, D.A.)著,谢华译—北京:电子工业出版社,2015.6

书名原文:An Introduction to Semiconductor Devices

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-25060-6

I. ①半… II. ①尼… ②谢… III. ①半导体器件-高等学校-教材 IV. ①TN303

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第286332号

策划编辑:马 岚

责任编辑:李秦华

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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

开 本:787×1092 1/16 印张:31.5 字数:889千字

版 次:2015年6月第1版

印 次:2015年6月第1次印刷

定 价:79.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltis@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

译者序

从贝尔实验室发明第一只双极型晶体管和仙童公司开发出基于照相技术的平面半导体工艺开始,我们将数量众多的电子元器件集成到同一片半导体衬底上,从而实现了电子电路的集成化和微型化,同时大大提高了电路的可靠性。经过60多年的飞速发展,半导体产业发生了翻天覆地的变化,并且还在不断地改变着我们的生活和思维方式。目前,半导体产业已成为全球第一大产业,它密切关系着一个国家的经济发展、社会进步和国家安全。

微电子技术作为半导体产业的基础,是衡量一个国家高技术水平的重要标志,也是我国当前重点发展的学科之一。近年来,随着我国采取了一系列推动微电子技术发展的重大举措,一大批世界级的集成电路设计公司和半导体制造中心已落户中国大陆,并以飞快的速度发展。可以预见的是,不久的将来,我国不仅将成为世界微电子产业中心之一,而且必将成为微电子强国。目前,微电子方面的专业人才变得越来越紧缺,因此,培养具有国际视野和竞争力的微电子高级专业技术人才不仅是振兴国家信息产业所必需的,而且也是提升国家综合实力的关键。作为微电子技术的基础,半导体器件物理是开发新型半导体器件和设计集成电路的必备知识。为此,在电子工业出版社的大力组织下,我们翻译了 Donald Neamen 教授的 *An Introduction to Semiconductor Devices* 一书。这是一本半导体器件的入门书籍,不仅可作为高等院校电子科学与技术、微电子学、集成电路与集成系统以及应用物理学等相关专业大学本科生的理想教材,也可作为相关专业领域工程技术人员的参考资料。

本书是 Donald Neamen 教授在 *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles (Third Edition)* 基础上撰写的又一部力作。与传统半导体器件物理教材相比,本书具有三大特色:首先,打破了传统半导体器件物理讲授的章节和内容,对相关知识结构重新编排,力求做到“即学即用”,加强读者对半导体器件物理的理解深度和学习效果。其次,本书将 MOSFET 器件的相关内容放在双极型晶体管之前,以突出 MOSFET 器件在当今集成电路设计和制备中的主导地位,增强读者学习本课程的积极性和主动性。本书的另一重要特色是理论结合实际,在详述器件工作原理和基本特性的基础上,增加了一些当今实用器件的新结构以及相应的制备工艺。这一方面加深了读者对器件物理和工艺的理解,另一方面也扩展了读者的视野。

总之,本书实现了量子力学、固体物理、半导体物理、半导体器件及半导体工艺的完美结合,利用本书,读者可系统学习半导体器件物理的基本理论,为学习微电子相关专业的其他课程打下良好的基础。

本书由天津大学电子信息工程学院的谢生翻译,该学院的部分教师给予了大力帮助,研究生吴思聪和高谦等帮忙校对了部分译稿,在此一并表示感谢。

由于译者水平有限,加之时间紧迫,书中难免存在不妥或错误之处,敬请读者批评指正。

作者简介

Donald A. Neamen (唐纳德·A·尼曼), 美国新墨西哥大学电气与计算机工程系荣誉教授, 在该系执教长达25年。他从新墨西哥大学取得博士学位后, 成为 Hanscom 空军基地固态科学实验室的电子工程师。1976年, 他加入新墨西哥大学电气与计算机工程系, 专门从事半导体物理与器件课程和电路课程的教学工作。此外, 他还是该系的一名兼职导师。

1980年, 尼曼教授荣获新墨西哥大学的杰出教师奖; 1983年和1985年, 它被美国工程学荣誉学会授予工程学院杰出教师。1990年以及1994年至2001年, 他被电气与计算机工程系的毕业生评为优秀教师。1994年, 他获得工程学院的优秀教学奖。

除教学外, 尼曼教授还曾担任过电气与计算机工程系的副主任, 并与工业界的马丁公司、桑迪亚国家实验室和雷神公司开展合作。目前, 尼曼教授已发表多篇学术论文, 同时也是 *Circuit Analysis and Design, Second Edition* 和 *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles, Fourth Edition* [《半导体物理与器件(第四版)》已由电子工业出版社(中文版 ISBN 978-7-121-21165-2, 英文版 ISBN 978-7-121-14698-5)] 的作者。

前 言

宗旨和目标

本书目的是为读者提供有关半导体器件特性、工作原理及限制因素等基本知识。为了更好地理解这些知识,对半导体材料物理进行全面了解是十分必要的,所以本书将半导体材料物理和半导体器件物理有机地结合在一起。

既然本书的目的是为读者提供一本关于半导体器件物理的入门教材,所以许多深奥的理论并未涉及,这些理论可在更高层次的书籍中找到。此外,书中的一些方程和关系式也只是简单叙述,未做过多推导。关于这些方程的详细推导,读者也可参考其他高等教材。然而,作者认为作为半导体器件物理的入门教材,本书所提供的数学知识已经足够了。

预备知识

本书主要针对电子工程专业的大学三年级和四年级本科生。理解本书的前提是读者已经掌握了高等数学(包括微分方程),以及现代物理导论和电磁学等大学物理知识。预先修完电子线路等基础课程对阅读本书会有帮助,但这不是必需的。

教学顺序

对于课程内容的教学顺序,每位教师都有自己的选择。本书所列主题的顺序与其他半导体器件物理教科书略有不同。本书第1章至第4章涵盖了半导体材料的基本物理特性,以及半导体器件物理课程开头部分通常涉及的问题。第5章讨论了pn结和肖特基结的电学特性,这些知识对于理解第6章和第7章讨论的MOS晶体管是十分必要的。将MOS晶体管的内容安排在双极型晶体管之前,主要基于以下两点考虑:首先,MOS晶体管作为集成电路的基本单元,将其安排在课程的前半段,就不会出现安排在课程后半段经常遇到的课时压缩问题;其次,若课程能较早期地讨论“真正”的半导体器件,会使读者更有动力去继续深入学习本教材。

在MOS晶体管之后,第8章阐述了半导体材料的非平衡特性,而第9章则讨论了正向偏置的pn结二极管和肖特基二极管。第10章分析了双极型晶体管,第11章涵盖了结型场效应晶体管和晶闸管等其他半导体器件。最后,第12章讨论了一些常见的光子器件。

本书内容叙述的一个可能缺点是关于pn结的讨论被打乱。然而,作者认为这恰好体现了“即学即用”的教学思想。在讲述MOS晶体管之前,对pn结进行一些讨论是非常必要的。如果在MOS晶体管之前全面讨论pn结(包括非平衡过剩载流子),那么在讨论双极型晶体管时,读者可能已经遗忘在正偏pn结时所学的知识。

下表列出本书所涉及主题的编排顺序。遗憾的是,由于时间限制,一学期的课程不可能涵盖每章的全部内容。

本书教学方案

- 第1章 固体的晶体结构
- 第2章 固体理论
- 第3章 平衡半导体
- 第4章 载流子输运和过剩载流子现象
- 第5章 pn 结和金属-半导体接触
- 第6章 MOS 场效应晶体管基础
- 第7章 MOS 场效应晶体管的其他概念
- 第8章 半导体中的非平衡过剩载流子
- 第9章 pn 结二极管与肖特基二极管
- 第10章 双极型晶体管
- 第11章 其他半导体器件及器件概念
- 第12章 光子器件

对于那些喜欢传统教学方案，且希望在 MOS 晶体管之前讲授双极型晶体管的教师，下表列出传统方案的教学顺序。也许这样的章节顺序他们认为更合理。

传统教学方案

- 第1章 固体的晶体结构
- 第2章 固体理论
- 第3章 平衡半导体
- 第4章 载流子输运和过剩载流子现象
- 第8章 半导体中的非平衡过剩载流子
- 第5章 pn 结和金属-半导体接触
- 第9章 pn 结二极管与肖特基二极管
- 第10章 双极型晶体管
- 第6章 MOS 场效应晶体管基础
- 第7章 MOS 场效应晶体管的其他概念
- 第11章 其他半导体器件及器件概念
- 第12章 光子器件

本书的使用

本书可作为大学三年级或四年级本科生一个学期的教材。与大多数教材一样，书中涵盖的内容不可能在一个学期内全部讲完。这就给授课教师提供了一定的自由空间，授课教师可以根据教学目的对教学内容进行取舍。

在一些章节的结尾处，本书专门讨论了器件制备技术的相关知识。第1章简述了半导体材料的生长技术和氧化过程，而第3章则介绍如何通过扩散或离子注入方法向半导体掺入特定杂质。在后面的章节中，我们论述了特定器件的制备流程。在每种器件的工艺流程中，对

制备技术的讨论都比较简短,旨在让读者对半导体制作工艺有一个最基本的了解。这些章节,以及书中部分章节的标题前都标记有 Σ 号。符号 Σ 表示阅读这些章节有助于半导体器件总体概况的理解。然而,作为一门导论性课程,未深入学习这些章节并不会影响读者对半导体器件物理的理解。

本书特色

概述部分:概述部分简介本章主要内容,起到承上启下的作用。它也阐明了本章的学习目标,即读者可从本章获得哪些知识。

历史与发展:历史回顾部分将一些历史事件与本书内容联系起来,而发展现状则展现了当前的研究动态及制备水平。

符号 Σ :表示这部分内容有助于增加对半导体器件总体概况的理解。然而,作为一门导论性课程,并不要求深入研究相关内容。

关键词:正文的页边列出了一些关键词^①,在所讨论内容附近快速查找关键词有助于读者复习所学内容。

例题:书中列举了大量例题来强化所涉及的理论概念。这些例子覆盖了分析或设计的所有细节,因此读者不必自行补充其忽略的步骤。

自测题:每个例题之后都有对应的自测题。自测题在知识点考察方面与前面的例题非常相似,读者可以通过这些练习来检查自己是否已经掌握所学内容(答案已在题后给出)。

练习题:在每个难点之后都增加了练习题。练习题比例题后的自测题更具综合性,而且答案也已给出。

小结:每章末尾都提供小结,总结本章得出的所有结论,并复习建立的基本概念。

知识点:小结之后是知识点归纳。这部分指出学习本章应该达到的目标,以及读者应该获得的能力。在进入下一章学习之前,这些知识点可用来帮助评估学习的进展。

复习题:每章末尾都给出一些复习题,读者可用它们来做自我测试,以便了解自己对本章概念的掌握程度。

习题:按照主题出现顺序,每章最后都给出了大量的习题。问题前的星号(*)表示这是一道相对较难的问题。部分习题答案在附录F中给出。

参考文献:每章后都附有参考文献,其中那些难度高于本书的参考书用星号(*)表示。

部分习题答案:附录F给出了部分习题的答案。了解答案将有助于解题。

致谢

Peter John Burke, 加州大学欧文分校

Chris S. Ferekides, 南佛罗里达大学

Ashok K. Goel, 密歇根理工大学

Lili He, 圣何塞州立大学

Erin Jones, 俄勒冈州立大学

^① 在本中文版中,“关键词”在正文中用黑体字突出显示——编者注。

Yaroslav Koshka, 密西西比州立大学

Shrinivas G. Joshi, 马凯特大学

Gregory B. Lush, 得州大学埃尔帕索分校

James Mallmann, 密尔沃基工程学院

Donald C. Malocha, 中佛罗里达大学

Shmuel Mardix, 罗德岛大学

目 录

第 1 章 固体的晶体结构	1
1.1 半导体材料	1
1.2 固体类型	2
1.3 空间点阵	3
1.3.1 原胞与晶胞	3
1.3.2 基本晶体结构	4
1.3.3 晶面和米勒指数	5
1.3.4 金刚石结构	9
1.4 原子价键	10
1.5 固体中的缺陷和杂质	12
1.5.1 固体缺陷	12
1.5.2 固体中的杂质	13
Σ 1.6 半导体材料生长	13
1.6.1 熔体生长	14
1.6.2 外延生长	15
Σ 1.7 器件制备技术: 氧化	15
1.8 小结	17
知识点	18
复习题	18
习题	19
参考文献	21
第 2 章 固体理论	22
2.1 量子力学的基本原理	22
2.1.1 能量子	22
2.1.2 波粒二象性	23
2.2 能量量子化和概率	25
2.2.1 波函数的物理意义	25
2.2.2 单电子原子	26
2.2.3 元素周期表	27
2.3 能带理论	28
2.3.1 能带的形成	29
2.3.2 能带与价键模型	31
2.3.3 载流子——电子和空穴	32
2.3.4 有效质量	34
2.3.5 金属、绝缘体和半导体	35
2.3.6 k 空间能带图	36

2.4	态密度函数	38
2.5	统计力学	39
2.5.1	统计规律	39
2.5.2	费米-狄拉克分布和费米能级	40
2.5.3	麦克斯韦-玻尔兹曼近似	42
2.6	小结	44
	知识点	44
	复习题	45
	习题	45
	参考文献	48
第3章	平衡半导体	49
3.1	半导体中的载流子	49
3.1.1	电子和空穴的平衡分布	50
3.1.2	平衡电子和空穴浓度方程	50
3.1.3	本征载流子浓度	55
3.1.4	本征费米能级的位置	57
3.2	掺杂原子与能级	58
3.2.1	定性描述	58
3.2.2	电离能	60
3.2.3	III-V族半导体	62
3.3	非本征半导体的载流子分布	62
3.3.1	电子和空穴的平衡分布	62
3.3.2	$n_0 p_0$ 积	65
Σ3.3.3	费米-狄拉克积分	66
3.3.4	简并与非简并半导体	68
3.4	施主和受主的统计分布	69
3.4.1	概率分布函数	69
Σ3.4.2	完全电离与冻析	69
3.5	载流子浓度——掺杂的影响	72
3.5.1	补偿半导体	72
3.5.2	平衡电子和空穴浓度	72
3.6	费米能级的位置——掺杂和温度的影响	77
3.6.1	数学推导	77
3.6.2	E_F 随掺杂浓度和温度的变化	79
3.6.3	费米能级的关联性	81
Σ3.7	器件制备技术: 扩散和离子注入	82
3.7.1	杂质原子扩散	82
3.7.2	离子注入	84
3.8	小结	84
	知识点	85
	复习题	85

习题	86
参考文献	90
第4章 载流子输运和过剩载流子现象	92
4.1 载流子的漂移运动	92
4.1.1 漂移电流密度	92
4.1.2 迁移率	94
4.1.3 半导体的电导率和电阻率	98
4.1.4 速度饱和	102
4.2 载流子的扩散运动	104
4.2.1 扩散电流密度	104
4.2.2 总电流密度	106
4.3 渐变杂质分布	107
4.3.1 感应电场	107
4.3.2 爱因斯坦关系	109
4.4 载流子的产生与复合	110
4.4.1 平衡半导体	110
4.4.2 过剩载流子的产生与复合	111
4.4.3 产生-复合过程	113
4.5 霍尔效应	115
4.6 小结	118
知识点	118
复习题	119
习题	119
参考文献	125
第5章 pn结和金属-半导体接触	126
5.1 pn结的基本结构	126
5.2 零偏pn结	127
5.2.1 内建电势	128
5.2.2 电场强度	129
5.2.3 空间电荷区宽度	132
5.3 反偏pn结	134
5.3.1 空间电荷区宽度与电场	134
5.3.2 势垒电容	137
5.3.3 单边突变结	138
5.4 金属-半导体接触——整流结	140
5.4.1 肖特基势垒结	140
5.4.2 反偏肖特基结	142
5.5 正偏结简介	142
5.5.1 pn结	143
5.5.2 肖特基势垒结	144
5.5.3 肖特基二极管和pn结二极管的比较	146

Σ5.6 金属-半导体的欧姆接触	147
Σ5.7 非均匀掺杂 pn 结	149
5.7.1 线性缓变结	149
5.7.2 超突变结	151
Σ5.8 器件制备技术: 光刻、刻蚀和键合	152
5.8.1 光学掩膜版和光刻	152
5.8.2 刻蚀	153
5.8.3 杂质扩散或离子注入	153
5.8.4 金属化、键合和封装	154
5.9 小结	154
知识点	155
复习题	155
习题	156
参考文献	161
第 6 章 MOS 场效应晶体管基础	162
6.1 MOS 场效应晶体管作用	162
6.1.1 基本工作原理	163
6.1.2 工作模式	164
6.1.3 MOSFET 放大	164
6.2 双端 MOS 电容	165
6.2.1 能带结构和电荷分布	165
6.2.2 耗尽层厚度	170
6.3 MOS 电容的电势差	173
6.3.1 功函数差	174
6.3.2 氧化层电荷	177
6.3.3 平带电压	178
6.3.4 阈值电压	179
Σ6.3.5 电场分布	184
6.4 电容-电压特性	187
6.4.1 理想 C-V 特性	187
Σ6.4.2 频率影响	191
Σ6.4.3 氧化层固定电荷和界面电荷的影响	191
6.5 MOSFET 基本工作原理	193
6.5.1 MOSFET 结构	194
6.5.2 电流-电压关系——基本概念	195
Σ6.5.3 电流-电压关系——数学推导	203
6.5.4 衬底偏置效应	206
6.6 小信号等效电路及频率限制因素	208
6.6.1 跨导	209
6.6.2 小信号等效电路	209

6.6.3 频率限制因素与截止频率	211
Σ6.7 器件制备技术	212
6.7.1 NMOS 晶体管的制备	213
6.7.2 CMOS 技术	214
6.8 小结	214
知识点	215
复习题	216
习题	217
参考文献	223
第 7 章 MOS 场效应晶体管的其他概念	225
7.1 MOSFET 按比例缩小法则	225
7.1.1 恒电场按比例缩小法则	226
7.1.2 阈值电压——一级近似	227
7.1.3 一般按比例缩小法则	227
7.2 非理想效应	228
7.2.1 亚阈值电导	228
7.2.2 沟道长度调制效应	230
7.2.3 沟道迁移率变化	232
7.2.4 速度饱和	234
7.3 阈值电压修正	236
7.3.1 短沟道效应	236
7.3.2 窄沟道效应	239
7.3.3 衬底偏置效应	240
7.4 其他电学特性	241
7.4.1 氧化层击穿	241
7.4.2 临界穿通或漏致势垒降低(DIBL)	242
7.4.3 热电子效应	243
7.4.4 离子注入调整阈值电压	244
7.5 器件制备技术: 特种器件	246
7.5.1 轻掺杂漏晶体管	246
7.5.2 绝缘体上 MOSFET	247
7.5.3 功率 MOSFET	249
7.5.4 MOS 存储器	251
7.6 小结	252
知识点	252
复习题	253
习题	253
参考文献	257

第 8 章 半导体中的非平衡过剩载流子	259
8.1 载流子的产生与复合.....	259
8.2 过剩载流子的分析.....	260
8.2.1 连续性方程.....	261
8.2.2 时间相关的扩散方程.....	262
8.3 双极输运.....	263
8.3.1 双极输运方程的推导.....	263
8.3.2 非本征掺杂和小注入限制.....	265
8.3.3 双极输运方程的应用.....	266
8.3.4 介电弛豫时间常数.....	272
8.3.5 海恩斯-肖克利实验.....	273
8.4 准费米能级.....	276
8.5 过剩载流子的寿命.....	278
8.5.1 肖克利-里德-霍尔(SRH)复合理论.....	278
8.5.2 非本征掺杂和小注入限制.....	279
8.6 表面效应.....	280
8.6.1 表面态.....	280
8.6.2 表面复合速度.....	281
8.7 小结.....	281
知识点.....	282
复习题.....	282
习题.....	283
参考文献.....	286
第 9 章 pn 结二极管与肖特基二极管	287
9.1 pn 结和肖特基势垒结的回顾.....	287
9.1.1 pn 结.....	287
9.1.2 肖特基势垒结.....	289
9.2 pn 结——理想电流-电压特性.....	290
9.2.1 边界条件.....	291
9.2.2 少子分布.....	294
9.2.3 理想 pn 结电流.....	295
9.2.4 物理小结.....	299
9.2.5 温度效应.....	300
9.2.6 短二极管.....	301
9.2.7 本节小结.....	302
9.3 肖特基二极管——理想电流-电压关系.....	303
9.3.1 肖特基二极管.....	304
9.3.2 肖特基二极管与 pn 结二极管的比较.....	306
9.4 pn 结二极管的小信号模型.....	307

9.4.1	扩散电阻	307
9.4.2	小信号导纳	308
9.4.3	等效电路	310
9.5	产生-复合电流	311
9.5.1	反偏产生电流	311
9.5.2	正偏复合电流	313
9.5.3	总正偏电流	315
9.6	结击穿	316
9.7	电荷存储与二极管瞬态	319
9.7.1	关瞬态	319
9.7.2	开瞬态	321
9.8	小结	322
	知识点	322
	复习题	323
	习题	323
	参考文献	329
第 10 章	双极型晶体管	330
10.1	双极型晶体管的工作原理	330
10.1.1	基本工作原理	332
10.1.2	简化的晶体管电流关系	334
10.1.3	工作模式	336
10.1.4	双极型晶体管放大电路	337
10.2	少子分布	338
10.2.1	正向有源模式	338
10.2.2	其他工作模式	344
10.3	低频共基极电流增益	345
10.3.1	贡献因子	345
10.3.2	电流增益系数的数学推导	347
10.3.3	本节小结	350
10.3.4	增益系数的计算实例	351
10.4	非理想效应	355
10.4.1	基区宽度调制	355
10.4.2	大注入效应	357
10.4.3	发射区带隙变窄	358
10.4.4	电流集边效应	360
Σ10.4.5	非均匀基区掺杂	362
10.4.6	击穿电压	363
10.5	混合 π 型等效电路模型	367
10.6	频率限制	369

10.6.1 时延因子	370
10.6.2 晶体管的截止频率	371
Σ10.7 大信号开关特性	373
Σ10.8 器件制备技术	375
10.8.1 多晶硅发射极双极型晶体管	375
10.8.2 双多晶硅 npn 晶体管的制备	376
10.8.3 SiGe 基区晶体管	377
10.8.4 功率双极型晶体管	378
10.9 小结	381
知识点	382
复习题	382
习题	383
参考文献	389
第 11 章 其他半导体器件及器件概念	391
11.1 结型场效应晶体管	391
11.1.1 pn JFET	392
11.1.2 MESFET	394
11.1.3 电学特性	395
11.2 异质结	400
11.2.1 异质结简介	400
11.2.2 异质结双极型晶体管	402
11.2.3 高电子迁移率晶体管 (HEMT)	404
11.3 晶闸管	405
11.3.1 基本特性	405
11.3.2 SCR 的触发机理	407
11.3.3 器件结构	410
11.4 MOSFET 的其他概念	412
11.4.1 闩锁效应	412
11.4.2 击穿效应	413
11.5 微机电系统	416
11.5.1 加速度计	416
11.5.2 喷墨打印机	416
11.5.3 生物医学传感器	417
11.6 小结	417
知识点	418
复习题	418
习题	419
参考文献	420