

国外电子与通信教材系列

Pearson

Solid State Electronic Devices, Seventh Edition

固态电子器件 (第七版)

[美] Ben G. Streetman 著
Sanjay K. Banerjee

杨建红 李海蓉 田永辉 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>

国外电子与电信教材系列

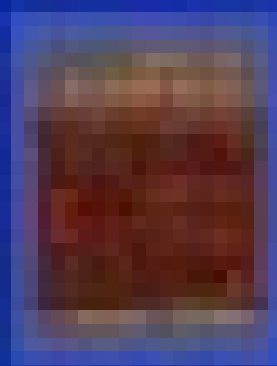
Millman, H. Electronic Devices, Circuits, and Applications

固态电子器件

(第七版)

作者: Millman, H. 著
译者: 蔡英华 译

ISBN: 7-302-05830-3



清华大学出版社



电子工业出版社

国外电子与通信教材系列

固态电子器件

(第七版)

Solid State Electronic Devices
Seventh Edition

[美] Ben G. Streetman 著
Sanjay K. Banerjee

杨建红 李海蓉 田永辉 译

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

内 容 简 介

本书是固态电子器件的教材，全书分为固体物理基础和半导体器件物理两大部分，共 10 章。第 1 章至第 4 章介绍半导体材料及其生长技术、量子力学基础、半导体能带以及过剩载流子。第 5 章至第 10 章介绍各种电子器件和集成电路的结构、工作原理以及制造工艺等，包括：p-n 结、金属-半导体结、异质结；场效应晶体管；双极结型晶体管；光电子器件；高频、大功率及纳电子器件。第 9 章使用较大篇幅介绍 CMOS 制造工艺，从器件物理角度介绍 SRAM、DRAM、CCD、闪存等集成器件的结构和工作原理。本书的器件种类基本涵盖了所有的器件大类，反映了现代电子器件的基础理论、工作原理、二级效应以及发展趋势。各章均给出小结，并附有习题、参考读物和自测题。

本书可作为高等院校微电子、固态器件与电路、半导体材料、电子科学与技术等专业的基础课程的教材，也可供器件与集成电路等相关领域的研究人员和技术人员参考。

Authorized translation from the English language edition, entitled Solid State Electronic Devices, Seventh Edition, 9780133356038 by Ben G. Streetman, Sanjay K. Banerjee, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2015 Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2018.

本书中文简体字版专有出版权由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授予电子工业出版社，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：01-2014-7980

图书在版编目(CIP)数据

固态电子器件：第七版 / (美) 本·G. 斯特里特曼 (Ben G. Streetman), (美) 桑贾伊·K. 班纳吉 (Sanjay K. Banerjee) 著；杨建红，李海蓉，田永辉译。—北京：电子工业出版社，2018.3

书名原文：Solid State Electronic Devices, Seventh Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-31565-7

I. ①固… II. ①本… ②桑… ③杨… ④李… ⑤田… III. ①半导体器件—固态器件—电子器件—高等学校—教材 IV. ①TN301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 108273 号

策划编辑：杨 博

责任编辑：李秦华

印 刷：北京京师印务有限公司

装 订：北京京师印务有限公司

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：27 字数：691 千字

版 次：2018 年 3 月第 1 版 (原著第 7 版)

印 次：2018 年 3 月第 1 次印刷

定 价：109.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，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, 88258888。

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

本书咨询联系方式：yangbo2@phei.com.cn。

译者序

电子器件是信息技术的基础，也是信息技术的核心。固态电子器件是实现信息产生、获取、传输、变换、存储的硬件基础，在微电子系统、光电子系统以及集成电路中具有不可替代的作用。一部好的固态电子器件教材，首先应阐明各类器件赖以实现其特性的材料、结构、工艺等相关基础知识，其次应阐明不同器件特性的物理学、电学、光学等本质属性，第三应阐明影响或制约器件性能的各种器件物理效应，这样才能帮助读者将所涉及各项基础知识融会贯通，在透彻理解的基础上受到启发而进一步受益。译者根据自己的专业教学实践和经验，认为本书是一本适合本科生学习的好教材，这也是译者欣然受托翻译本书的本意。

本书一直处于更新之中，目前是其第七版，英文原版于2015年由Pearson出版集团出版。作为译者之一，杨建红曾于2000年将本书的第五版作为国外先进教材首次翻译，由兰州大学出版社于2005年正式出版，2007年第2次印刷(ISBN 978-7-311-02564-9)。同期，该教材也被引进到其他四个主要语种的十多个国家作为本科生教材。从读者反馈和译者体会来看，该教材吸引读者的特色之处，在于其原理性描述清晰，文字说明充分，图片(或图示)配置恰当，不拘泥于烦琐且无实际意义的数学推导。在第七版中，除更新了前几版的习题和参考读物以外，各章均增加了“小结”和“自测题”作为组成部分。在器件种类方面，增加了新兴或先进器件的内容，如先进MOSFET(第6章，包括高 k 栅介质、应变硅、SOI MOSFET和FinFET)、量子级联激光器(第8章)、纳电子器件(第10章，包括量子点、量子线、层状晶体结构、自旋存储器、变阻存储器)等内容。这为读者进一步学习思考留下了空间。

全书正文部分共10章，其中有公式470多个，插图340多幅，另有附录9个。李海蓉主要翻译第10章，田永辉主要翻译各章中新增的“教学目的”、“小结”和“自测题”部分，杨建红主要翻译第1章至第9章和其余各部分，并负责全书文稿的初审和统稿。翻译文本保持了作者的原意，在此基础上，尽量避免因中英文表达习惯不同而影响读者的阅读感受。在个别可能影响读者理解的地方，增加了“译者注”。对某些明显的错误，如例题解答、物理量的单位、表达式符号等错误，则直接做了更正^①。

感谢电子工业出版社的信任，将本书的翻译工作交给译者；感谢杨博编辑在翻译出版过程中给予的有益指导和帮助。译者所在研究组的部分研究生庞正鹏、李玉苗、张洋等同学参与了部分章节的文字查错等工作，在此一并表示感谢。由于译者水平有限，译文中不妥或疏漏之处在所难免，敬请读者不吝指正。

译者
2016年3月

^① 由于原书中关于例题的解答步骤过于简略，不利于学生理解，译者特别进行了整理与补充，以帮助读者理解。

前 言

本书的适用对象是电子工程专业、微电子学专业的本科生，也可供对固态电子器件感兴趣的学生和科技工作者作为参考读物。本书的主要内容是固态电子器件的工作原理，同时对许多新型器件和制造技术也有所介绍。本书在内容安排上力求使那些具有物理背景知识的高年级学生对专业知识有更为深入的理解，从而使他们能够阅读关于新器件及其应用的参考文献。

课程目的

在我来看，对本科生开设的电子器件课程有两个基本目的：一是让学生对现有器件有一个透彻的理解，这样才能充分体现对电子线路和电子系统课程学习的意义；二是培养学生掌握分析器件的基本方法，使他们能够有效地掌握新型器件。从长远的观点来看，第二个目的可能会更重要些，因为从事电子学领域工作的人员在其工作中需要不断地学习和掌握新器件和新工艺。基于这样的考虑，我曾尝试把半导体材料和固态导电机理两方面的基本知识融合到一起；特别是在介绍新器件时更是如此。这些观念在指导性课程讲授中常常被忽略掉了。比如，有一种观点认为没有必要在本课程的讲授中去详细介绍有关半导体 p-n 结和晶体管的基本知识，但我认为：培养学生的学习的一个重要目的，就是要让学生能够通过阅读最新的、专业性很强的相关文献来理解一种新器件，而上述观点却忽视了这一点。所以，本书介绍了大多数常用的半导体术语和概念，并将它们与器件的各种性质联系起来阐述器件物理问题。

新增内容

1. 针对 MOS 器件，新增了弹道输运场效应晶体管、鳍栅场效应晶体管 (FinFET)、应变硅场效应晶体管、金属栅/高 k 介质栅场效应晶体管，以及 III~V 族高迁移率晶体管等内容。
2. 针对光电子器件，新增了宽带隙氮化物半导体器件和量子级联激光器的相关内容。
3. 新增了纳电子器件的相关内容，包括二维结构石墨烯、一维结构纳米线和纳米管，以及零维结构量子点等。
4. 新增了自旋电子器件、阻变存储器、相变存储器的相关内容。
5. 新增了大约 100 道习题，更新了参考读物列表。

参考读物

为培养学生独立学习的能力，在每章的参考读物列表中，给出了可供学生阅读的若干文章。某些文章选自科普期刊，比如《科学美国人》(Scientific American) 和《今日物理》(Physics Today) 等。还有些文章选自其他教材和专业刊物，对相关内容做了更为详细的阐述。一般来

说，学生阅读这些文章并不困难。我不期望学生读遍列表中的所有文章，但鼓励他们尽可能多地阅读一些有关文章，以便为以后的工作打好基础。

课后习题

学好本课程的关键之一是多做课后习题，以便加深理解并透彻掌握基本概念。每章的后面都有一定量的习题，其中有一小部分是“附加题”，用以扩展或深化每章的内容。另外，每章后面增加了自测题(Self Quiz)，便于读者自我检测对相关内容的掌握程度。

物理量的单位

本书对物理量采用的单位是半导体领域的常用单位。一般情况下均采用 MKS 单位制，但有时采用厘米作为长度单位更方便，这在例题和习题中已给出了不少实例。出于同样的原因，本书中能量的单位更多地采用的是电子伏特(eV)而不是焦耳(J)。附录 A 和附录 B 分别列出了常用物理量的符号及其单位。

内容安排

在给本科生讲授这门课程时，有时可能会使用“可以证明……”这样的术语来直接引用某些更高级或更复杂的内容，但往往得不到应有的效果。为避免这种情况过多出现，可以根据需要把课程的某些内容拖后，留待研究生阶段学习，因为那时就可以把统计力学、量子理论以及其他高级知识轻易地穿插进来。当然，这样做可以使课程讲授起来容易一些，但同时也使学生失去了探索某些器件问题的乐趣。

本书的内容包括硅和化合物半导体器件，特别是对化合物半导体在光电子和高速器件应用方面日益增长的重要性做了适度的介绍。某些内容，比如异质结、三元和四元合金的晶格匹配、带隙随杂质组分的变化，以及量子阱的共振隧穿等，拓宽了讨论的范围。但是，在讲授时不要太过强调化合物半导体的应用，硅基器件照样有显著的进展；这些进展在场效应晶体管结构和硅集成电路的讨论中得到了具体的反映。我们不可能介绍所有的、最新的器件，那是专业刊物和国际会议论文所关注的事；我们只对那些有代表性和说明性的器件加以介绍。

本书的前四章阐述半导体性质和半导体导电理论，其中第 2 章对量子力学的基本概念做了简要介绍，这主要是为那些尚不具备这方面基础知识的学生而准备的。第 3 章和第 4 章介绍半导体导电理论，第 5 章介绍半导体 p-n 结理论及其典型应用，第 6 章和第 7 章分别介绍场效应晶体管和双极结型晶体管的工作原理，第 8 章介绍光电子器件，第 9 章介绍集成电路(从器件物理和制造工艺的角度)。第 10 章基于半导体理论介绍了微波器件和功率器件，其中最后一节，即纳电子器件是新增的。书中介绍的所有器件在当今电子学中都很重要，对这些器件的学习将是充满乐趣、富有收获的，我们希望本书能让读者有这样一种体验。

致谢

那些使用过本书前六版的学生和教师提出的意见和建议使第七版受益匪浅；正是他们宝

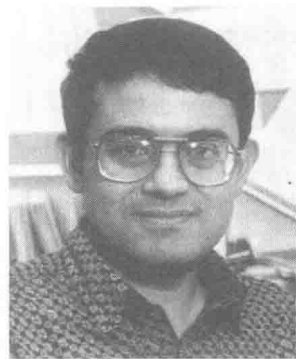
贵的、无私的意见，促成了本书的出版。在此，我们仍一如既往地向前六版序言中提到的那些人深表感谢，他们对本书的贡献巨大。特别要提到的是，Nick Holonyak 在整个七个版本的完成和出版过程中一直是我们的精神动力和信息源泉。我们还要感谢得克萨斯大学奥斯汀分校的同事们给我们提供的帮助，他们是 Leonard Frank Register, Emanuel Tutuc, Ray Chen, Ananth Dodabalapur, Seth Bank, Misha Belkin, Zheng Wang, Neal Hall, Deji Akinwande, Jack Lee 以及 Dean Neikirk。Hema Movva 对本书习题解答的文字录入工作提供了有益的帮助。本书图题中提到的诸多公司和机构为本书提供了器件和工艺照片，在此也谨向他们的慷慨帮助表示感谢；特别要向为本版本提供新图片的公司和个人表示感谢，他们是：TI 公司的 Bob Doering, Intel 公司的 Mark Bohr, Micron 公司的 Chandra Mouli, MEMC 公司的 Babu Chalamala 以及 TEL 公司的 Kevin Lally。最后，我们想说的是，珍视并感谢 Joe Campbell、Karl Hess 和后来的 Al Tasch 与我们多年的共事与合作，他们既是我们的好同事，又是难得的好朋友。

Ben G. Streetman
Sanjay K. Banerjee

作者简介



Ben G. Streetman 是得克萨斯大学奥斯汀分校 Cockrell 工程学院的名誉院长,也是电子与计算机工程名誉教授和 Dula D. Cockrell 主席(Centennial Chair)。1984—1996 年在得克萨斯大学奥斯汀分校工作期间,创立微电子研究中心并担任中心主任,1996—2008 年担任工程学院院长。长期从事半导体材料与器件的教学和科研工作。1966 年从得克萨斯大学奥斯汀分校获得博士学位后到伊利诺伊大学香槟分校任教,直到 1982 年返回得克萨斯大学工作。获得的主要荣誉有:电子与电气工程师学会(IEEE)教育奖、美国工程教育学会(ASEE)Frederick Emmons Terman 奖、化合物半导体国际会议 Heinrich Welker 奖。他是美国国家工程院院士和美国艺术与科学院院士,同时也是 IEEE 和电化学协会会员。曾荣膺得克萨斯大学奥斯汀分校杰出校友和工程学院优秀毕业生称号。因在电子工程教学方面成绩斐然,曾获得通用动力公司的优秀成果奖;本科生教学方面的工作受到广泛赞誉,曾获得家长协会授予的优秀教师称号。曾在工业界和政府的许多专业小组和委员会中担任重要职务。发表的论文有 290 多篇。在他的指导下,先后有 34 名电子工程专业、材料科学专业,以及物理学专业的学生获得了博士学位。



Sanjay K. Banerjee 现任得克萨斯大学奥斯汀分校电子与计算机工程首席教授、微电子研究中心主任。1979 年从印度理工学院获得电子工程学士学位,并分别于 1981 年和 1983 年从伊利诺伊大学香槟分校获得电子工程硕士和博士学位。1983—1987 年在得克萨斯仪器公司(TI)工作,参与研发了世界上第一块 4 MB DRAM,为此成为 ISSCC 最佳论文奖的共同获奖人之一。发表有 900 多篇被引论文和会议论文,拥有 30 项美国专利,指导过 50 多名博士研究生。获得的主要奖项和荣誉有:1988 年(美国)国家自然科学基金总统青年探索者奖,1990—1997 年得克萨斯原子能跨世纪人才奖,1997—2001 年 Cullen 教授奖,得克萨斯大学 Hocott 研究奖,2003 年 ECS Callinan 奖,2004 年工业研发杰出 100 奖,2005 年 IIT 杰出校友奖,2000 年 IEEE 千年奖,以及 2014 年 IEEE Andrew S. Grove 奖。他是 IEEE、APS 和 AAAS 会员。研究方向包括:基于二维材料和自旋电子学的后 CMOS 时代纳电子晶体管、先进 MOSFET 制造与建模、太阳能电池等。

目 录

第 1 章 晶体性质和半导体生长	1
1.1 半导体材料	1
1.2 晶格	2
1.2.1 周期结构	2
1.2.2 立方晶格	4
1.2.3 晶面与晶向	5
1.2.4 金刚石晶格	7
1.3 大块晶体生长	9
1.3.1 原材料的制备	9
1.3.2 单晶的生长	9
1.3.3 晶片加工	11
1.3.4 晶体掺杂	11
1.4 薄层晶体的外延生长	12
1.4.1 外延生长的晶格匹配	13
1.4.2 气相外延	14
1.4.3 分子束外延	16
1.5 周期性结构中波的传播	17
小结	18
习题	19
参考读物	20
自测题	20
第 2 章 原子和电子	22
2.1 关于物理模型	22
2.2 重要实验及其结果	23
2.2.1 光电效应	23
2.2.2 原子光谱	25
2.3 玻尔模型	26
2.4 量子力学基础知识	28
2.4.1 几率和不确定性原理	29
2.4.2 薛定谔波动方程	30
2.4.3 势阱问题	32
2.4.4 量子隧穿	33
2.5 原子结构和元素周期表	34

2.5.1	氢原子	34
2.5.2	元素周期表	36
小结		39
习题		40
参考读物		41
自测题		41
第3章	半导体的能带和载流子	43
3.1	固体结合性质与能带	43
3.1.1	固体的结合性质	43
3.1.2	能带	45
3.1.3	金属、半导体和绝缘体	47
3.1.4	直接禁带半导体和间接禁带半导体	48
3.1.5	化合物半导体能带结构随组分的变化	49
3.2	半导体中的载流子	50
3.2.1	电子和空穴	51
3.2.2	有效质量	54
3.2.3	本征半导体	56
3.2.4	非本征半导体	57
3.2.5	量子阱中的电子和空穴	60
3.3	载流子浓度	60
3.3.1	费米能级	61
3.3.2	平衡态电子和空穴浓度	62
3.3.3	载流子浓度对温度的依赖关系	66
3.3.4	杂质补偿和空间电荷中性	67
3.4	载流子在电场和磁场中的运动	68
3.4.1	电导率和迁移率	68
3.4.2	电阻率	71
3.4.3	迁移率对温度和掺杂浓度的依赖关系	72
3.4.4	高场效应	74
3.4.5	霍尔效应	74
3.5	平衡态费米能级的不变性	76
小结		77
习题		78
参考读物		80
自测题		81
第4章	半导体中的过剩载流子	83
4.1	半导体对光的吸收特性	83
4.2	半导体发光	85
4.2.1	光致发光	85

4.2.2	电致发光	87
4.3	载流子寿命和光电导	87
4.3.1	电子和空穴的直接复合	87
4.3.2	间接复合; 载流子俘获	89
4.3.3	稳态载流子浓度; 准费米能级	91
4.3.4	光电导	93
4.4	载流子在半导体中的扩散	93
4.4.1	扩散机制	94
4.4.2	载流子的扩散和漂移; 自建电场	96
4.4.3	扩散和复合; 连续性方程	98
4.4.4	稳态注入; 扩散长度	99
4.4.5	Haynes-Shockley 实验	101
4.4.6	准费米能级的空间梯度	103
	小结	104
	习题	104
	参考读物	107
	自测题	107
第 5 章	半导体 p-n 结和金属-半导体结	109
5.1	p-n 结的制造	109
5.1.1	热氧化	109
5.1.2	扩散	111
5.1.3	快速热处理	112
5.1.4	离子注入	113
5.1.5	化学气相淀积	114
5.1.6	光刻	115
5.1.7	腐蚀(刻蚀)	117
5.1.8	金属化	118
5.2	平衡态 p-n 结	120
5.2.1	接触电势	120
5.2.2	平衡态费米能级	123
5.2.3	结的空间电荷	124
5.3	结的正偏和反偏; 稳态特性	127
5.3.1	结电流的定性分析	127
5.3.2	载流子的注入	130
5.3.3	反向偏置	136
5.4	反向击穿	138
5.4.1	齐纳击穿	139
5.4.2	雪崩击穿	140
5.4.3	整流二极管	142

5.4.4	击穿二极管	144
5.5	瞬态特性和交流特性	144
5.5.1	存储电荷的瞬态变化	145
5.5.2	反向恢复过程	147
5.5.3	开关二极管	149
5.5.4	p-n 结电容	149
5.5.5	变容二极管	152
5.6	对二极管简单理论的修正	153
5.6.1	接触电势对载流子注入的影响	154
5.6.2	空间电荷区内载流子的产生和复合	155
5.6.3	欧姆损耗	157
5.6.4	缓变结	159
5.7	金属-半导体结	160
5.7.1	肖特基势垒	160
5.7.2	整流接触	161
5.7.3	欧姆接触	163
5.7.4	典型的肖特基势垒	164
5.8	异质结	165
	小结	168
	习题	169
	参考读物	175
	自测题	175
第 6 章	场效应晶体管	177
6.1	场效应晶体管的工作原理	178
6.1.1	晶体管的负载线	178
6.1.2	放大和开关作用	178
6.2	结型场效应晶体管	179
6.2.1	夹断和饱和	180
6.2.2	栅的控制作用	181
6.2.3	电流-电压特性	182
6.3	金属-半导体场效应晶体管	184
6.3.1	GaAs 金属-半导体场效应晶体管	184
6.3.2	高电子迁移率晶体管	185
6.3.3	短沟效应	186
6.4	金属-绝缘体-半导体场效应晶体管	187
6.4.1	MOSFET 的基本工作原理	187
6.4.2	理想 MOS 结构的性质	190
6.4.3	真实表面的影响	197
6.4.4	阈值电压	199

6.4.5	电容-电压($C-V$)特性分析	200
6.4.6	瞬态电容测量($C-t$ 测量)	203
6.4.7	氧化层的电流-电压($I-V$)特性	204
6.5	MOS 场效应晶体管	206
6.5.1	输出特性	207
6.5.2	转移特性	209
6.5.3	迁移率模型	211
6.5.4	短沟 MOSFET 的 $I-V$ 特性	213
6.5.5	阈值电压的控制	214
6.5.6	衬底偏置效应(体效应)	217
6.5.7	亚阈值区特性	219
6.5.8	MOSFET 的等效电路	220
6.5.9	按比例缩小和热电子效应	221
6.5.10	漏致势垒降低效应	225
6.5.11	短沟效应和窄沟效应	226
6.5.12	栅诱导泄漏电流	227
6.6	先进 MOSFET 结构	228
6.6.1	金属栅-高 k 介质 MOS 结构	228
6.6.2	高迁移率沟道材料和应变硅材料	229
6.6.3	SOI MOSFET 和 FinFET	231
	小结	233
	习题	234
	参考读物	237
	自测题	238
第 7 章	双极结型晶体管	242
7.1	BJT 的基本工作原理	242
7.2	BJT 的放大作用	244
7.3	BJT 的制造工艺简介	247
7.4	少数载流子分布和器件的端电流	249
7.4.1	基区内扩散方程的求解	249
7.4.2	端电流分析	252
7.4.3	端电流的近似表达式	253
7.4.4	电流传输系数	255
7.5	BJT 的偏置状态和工作模式	256
7.5.1	BJT 的耦合二极管模型	256
7.5.2	电荷控制分析	260
7.6	BJT 的开关特性	262
7.6.1	截止	262
7.6.2	饱和	263

7.6.3	开关周期	264
7.6.4	开关晶体管的主要参数	264
7.7	某些重要的物理效应	265
7.7.1	载流子在基区的漂移	266
7.7.2	基区变窄效应(Early 效应)	267
7.7.3	雪崩击穿	268
7.7.4	小注入和大注入; 热效应	269
7.7.5	基区串联电阻; 发射极电流集边效应	269
7.7.6	BJT 的 Gummel-Poon 模型	270
7.7.7	基区变宽效应(Kirk 效应)	274
7.8	BJT 的频率限制因素	275
7.8.1	结电容和充电时间	275
7.8.2	渡越时间效应	277
7.8.3	Webster 效应	277
7.8.4	高频晶体管	278
7.9	异质结双极型晶体管	279
	小结	281
	习题	281
	参考读物	284
	自测题	284
第 8 章	光电子器件	286
8.1	光电二极管	286
8.1.1	p-n 结对光照的响应	286
8.1.2	太阳能电池	289
8.1.3	光探测器	291
8.1.4	光探测器的增益、带宽和信噪比	293
8.2	发光二极管	295
8.2.1	发光材料	295
8.2.2	光纤通信	298
8.3	激光器	300
8.4	半导体激光器	303
8.4.1	粒子数反转	303
8.4.2	p-n 结激光器的发射光谱	304
8.4.3	半导体激光器的主要制造步骤	305
8.4.4	半导体异质结激光器	306
8.4.5	半导体激光器所用的材料	308
8.4.6	量子级联激光器	309
	小结	310
	习题	311

参考读物	312
自测题	313
第 9 章 半导体集成电路	314
9.1 集成电路的背景知识	314
9.1.1 集成化的优点	314
9.1.2 集成电路的分类	315
9.2 集成电路的发展历程	316
9.3 单片集成电路元件	318
9.3.1 CMOS 工艺集成	319
9.3.2 其他元件的集成	329
9.4 电荷转移器件	333
9.4.1 MOS 电容的动态效应	333
9.4.2 CCD 的基本结构和工作原理	334
9.4.3 CCD 器件结构的改进	335
9.4.4 CCD 的应用	336
9.5 超大规模集成电路	336
9.5.1 逻辑器件	338
9.5.2 半导体存储器	345
9.6 测试、压焊与封装	353
9.6.1 测试	354
9.6.2 引线压焊	354
9.6.3 芯片倒装技术	356
9.6.4 封装	357
小结	358
习题	359
参考读物	359
自测题	359
第 10 章 高频、大功率及纳电子器件	361
10.1 隧道二极管	361
10.2 碰撞雪崩渡越时间 (IMPATT) 二极管	364
10.3 耿氏 (Gunn) 二极管	366
10.3.1 电子转移机制	366
10.3.2 空间电荷畴的形成及其漂移	368
10.4 p-n-p-n 二极管	369
10.4.1 基本结构	370
10.4.2 双晶体管模型	371
10.4.3 电流传输系数的改变	371
10.4.4 正向阻断态	372
10.4.5 正向导通态	372

10.4.6	触发机制	373
10.5	半导体可控整流器	374
10.5.1	栅极的控制作用	374
10.5.2	SCR 的关断	375
10.6	绝缘栅双极型晶体管	376
10.7	纳电子器件	377
10.7.1	零维量子点	378
10.7.2	一维量子线	378
10.7.3	二维层状晶体	379
10.7.4	自旋电子存储器	380
10.7.5	纳电子阻变存储器	382
小结		382
习题		383
参考读物		384
自测题		384
附录 A	常用符号的定义	385
附录 B	物理常量和换算因子	389
附录 C	常用半导体材料的性质 (300 K)	390
附录 D	导带态密度的推导	391
附录 E	费米-狄拉克分布的推导	394
附录 F	Si(100)面干氧和湿氧生长 SiO_2 层的厚度随氧化时间和温度的变化关系	397
附录 G	某些杂质在 Si 中的固溶度	398
附录 H	某些杂质在 Si 和 SiO_2 中的扩散系数	399
附录 I	Si 中离子注入的射程与射程偏差随注入能量的变化关系	400
部分自测题答案		401
术语表		403