

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列



Microelectronic Circuits Analysis and Design

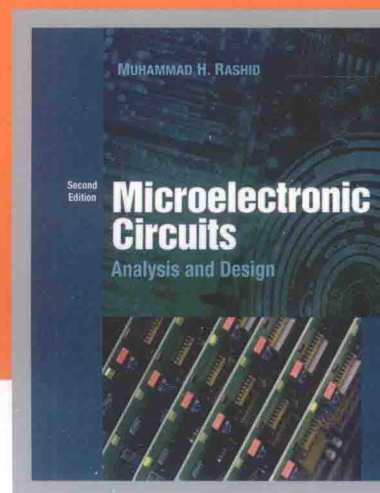
Second Edition

电子电路分析与设计 (第2版)

Muhammad H. Rashid 著

王永生 罗敏 田丽 曹贝 译

来逢昌 审



清华大学出版社



信息技术和电气工程学科国际知名教材中译



Microelectronic Circuits
Analysis and Design
Second Edition

电子电路分析与设计
(第2版)

Muhammad Rashid 著
王永生 罗敏 曹贝 译



清华大学出版社
北京

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2013-8356

Microelectronic Circuits: Analysis and Design, Second Edition

Muhammad H. Rashid, 王永生, 罗敏, 田丽, 曹贝

Copyright © 2011 by Brooks Cole, a part of Cengage Learning.

Original edition published by Cengage Learning. All Rights reserved.

本书原版由圣智学习出版公司出版。版权所有,盗印必究。

Tsinghua University Press is authorized by Cengage Learning to publish and distribute exclusively this simplified Chinese edition.

This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan).

Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or

distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体字翻译版由圣智学习出版公司授权清华大学出版社独家出版发行。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾)销售。未经授权的本书出口将被视为违反版权法的行为。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

978-0-496-66796-4

Cengage Learning Asia Pte. Ltd.

151 Lorong Chuan, #02-08 New Tech Park, Singapore 556741

本书封面贴有 Cengage Learning 防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电子电路分析与设计:第2版/(美)拉希德(Rashid, M. H.)著;王永生等译.--北京:清华大学出版社,2015

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

书名原文:Microelectronic Circuits: Analysis and Design, Second Edition

ISBN 978-7-302-40059-2

I. ①电… II. ①拉… ②王… III. ①超大规模集成电路—电路分析—教材 ②超大规模集成电路—电路设计—教材 IV. ①TN47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 089294 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:常雪影

责任校对:焦丽丽

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载:<http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:203mm×260mm 印 张:57.25

版 次:2015年7月第1版

印 数:1~2000

定 价:149.00 元

字 数:1607千字

印 次:2015年7月第1次印刷

产品编号:054268-01

译 者 序

当前,集成电路已成为电子工业的基石。本书比较全面系统地阐述了电路分析及集成电路设计技术,可以作为高等院校电子信息类专业本科生和研究生教材,也可作为相关领域研究生及工程师的参考用书。

第1章介绍了集成电路的发展过程以及设计流程,第2章~第16章分别论述了以下六部分内容:第2章和第3章中介绍了放大器的特性、频率响应以及应用;第4章和第5章介绍了半导体二极管的特性及其应用;第6章~第8章以及第11章分别介绍半导体基础、pn结、MOSFET、BJT晶体管特性,并且讨论了各种晶体管的模型以及电路分析与设计;第10章、第12章和第13章进行了包括反馈、有源滤波器、振荡器等电子电路的特性和分析;第15章介绍了BJT和MOS类型的数字逻辑门电路;第9章、第14章和第16章阐述了差分放大器的结构和设计、运算放大器结构和设计以及模拟集成电路与应用。教师可根据需要按照本书的教学计划建议或者自由安排讲授次序。

在本书中,每一章的开头都列出了读者应得到的学习目标、物理量符号及其含义,以便读者参考。每一章都有引言,给出本章内容在微电子领域的概貌。正文中给出了大量的例题。在各节结尾处给出了本节关键点。在每章的结尾都有小结,总结本章的全部要点。每章的结尾也列出了参考文献,供有兴趣的读者进一步阅读。每章结尾的练习分为问题回顾和习题。习题中包括设计类型的题目,并且有些习题可采用PSpice/SPICE来检查结果。

本书在讲授电子电路基本原理的基础上,精心编制了大量的例题,分析了重要电路的计算,使读者通过实际的例子掌握电路的原理,在很大程度上提高了读者的阅读兴趣、强化读者对基本理论概念的掌握,又能使读者掌握在实际应用中如何运用这些理论。

本书根据设计项目的规模,还给出多个小型、中型和大型设计项目。通过对这些项目的解决,读者不仅可以提高对电子电路知识的综合运用能力,而且还能提高采用电子电路软件来进行项目设计的实践能力。

本书是英文原版的中译本,电路中的符号和物理量均采用原版模式。

本书第2、3、5章、第7章的7.5~7.14节、第8、9、10、11章由哈尔滨工业大学的王永生负责翻译;第12~16章由哈尔滨工业大学的罗敏负责翻译;第4、6章和第7章的7.1~7.4节由哈尔滨工业大学的田丽负责翻译;前言、第1章及附录由黑龙江大学的曹贝负责翻译。哈尔滨工业大学的来逢昌和王永生进行了全书审校。王洪颖、宋琳、金杰和孙敬宇也参加了本书的翻译整理工作。

由于译者水平有限,书中难免存在疏漏和错误,恳切希望广大读者批评指正。

译 者

2015年1月

原书前言

半导体器件和集成电路(IC)是现代工业技术的基础,电子学研究的是半导体器件和集成电路的特性及其应用,是电气、电子或计算机工程专业本科生的主干课程。传统上,电子学的基本课程在大多数院校是一年(两个学期)的课程。然而,随着新技术的出现以及大学普及教育的要求,电气工程系迫于压力将基本电子学减至一个学期的课程。这本书可以用于一个学期的课程,也可以用于两个学期的课程,唯一的前提是作为基本电路分析的课程。一个学期的课程将会覆盖第1章至第8章,其中将采用IC作为例子来介绍分析电子电路的基本技术。在两个学期的课程中,第二学期将集中在IC及其应用中的器件和电路的详细分析。

本书的目标是:

- 拓展半导体器件及常用IC特性方面的知识;
- 拓展模拟和数字电路的分析和设计的技能;
- 为学生介绍工程设计过程的各种元素,包括设计说明的规范化、可供选择方案的分析、综合、决策、迭代、成本因素的考虑、仿真以及容差问题。

方法

本书采用自顶向下(top-down)的方法来研究电子学,而不是传统的自底向上(bottom-up)的方法。在传统的自底向上的方法中,首先学习半导体器件和IC的特性,然后介绍IC的应用。这样的方法通常需要一年的授课,有必要覆盖所有的基本素材以便给学生整体的电子电路和系统的知识。在这里采用了自顶向下的方法,首先介绍IC的理想特性以便确立设计和分析技术,然后研究IC中的器件和电路的特性及工作原理以便理解IC的缺陷和局限性。这种方法的优点是允许教师在第一个学期可以仅仅覆盖基本的技术和电路,而不需要进入分立器件的细节中。如果整体课程体系允许,可以在第二个学期进行分立器件及其应用的详细分析。

实际中,讲授和实验可以同步进行。如果由于IC实际特性限制而造成学生的实验结果不同于理想特性,学生们可能变得有些困惑。这种困惑可以通过对差异原因的基本解释进行解决。不管怎样,实验结果不会与理论结果存在明显的不同。

当前的ABET(Accreditation Board of Engineering and Technology,美国工程技术认证委员会)认证标准和在华盛顿协议(Washington Accord, <http://www.washingtonaccord.org>)下的其他工程认证标准要求在整个课程体系中设计与计算机使用一体化。在学生已经满足其他ABET以及在数学、基本科学、工程科学、通识教育选修课和任选课的认证要求之后,他们发现没有多少课程是满足设计要求的。在工程课程中缺少设计认证的机会是一个普遍关注的问题。电子学通常是第一个适用于设计元素和计算机使用一体化的电子工程课程。这本书的结构允许课程至少构建50%的设计内容,并且通过PSpice整合计算机使用。很多设计实例采用PSpice来验证设计要求,大量的计算机辅助设计实例说明个人计算机作为设计工具的有效性,特别是设计变量受元件容差和变化的影响的情况。

新版更新内容

第2版对章节进行了重新组织,加强了一些必要内容,并删减了一些不重要的条目。本版中关键的

变化总结如下:

- 增加了关于 MOSFET 和放大器的新章节;
- 增加了关于半导体和 pn 结的新章节;
- 全面修订了关于 BJT 的章节;
- 更加强调了 MOSFET 和有源偏置技术,使学生很容易地理解差分放大器和 IC;
- 扩展修订了功率放大器章节,包括 C、D 和 E 类放大器的 MOSFET 电路;
- 集成了用于分析和设计验证的 PSpice/OrCAD 例子;
- 开发了精心编制例子用于计算的 Mathcad 文件,使学生可以尝试解决类似问题以及探索设计参数的影响。

章节内容和组织

第 1 章介绍了设计流程,其他章节可以分为以下六个部分:

- (1) 第 2 章和第 3 章关于放大器的特性及频率响应;
- (2) 第 4 章和第 5 章关于二极管及其应用;
- (3) 第 6 章~第 8 章和第 11 章关于半导体基础、晶体管 and 放大器;
- (4) 第 10 章、第 12 章和第 13 章关于电子电路的特性和分析;
- (5) 第 15 章关于数字逻辑门电路;
- (6) 第 9 章、第 14 章和第 16 章关于集成电路及应用;

现代半导体技术已经发展到模拟和数字电路可以以集成电路(integrated circuit, IC)的形式出现。集成电路厂家提供可以实现电路功能的应用手册。然而,对于理解这些 IC 在电路设计中作为接口模块时的限制,IC 中的器件特性和工作原理方面的知识是必要的。这些知识也可作为开发新一代 IC 的基础。尽管 IC 技术的趋势是分立电路设计或许在将来完全消失,晶体管放大器(以大规模或超大规模集成的形式)仍然是 IC 的构建模块。因此,在第 2 章介绍放大器的通用类型及其说明之后,在第 6 章~第 8 章覆盖了半导体基础和晶体管放大器。由于二极管是很多电子电路的构建模块,同时二极管的分析技术与晶体管放大器的分析技术相似,所以在第 4 章和第 5 章详细讨论了二极管及其应用。

教学方法和补充

在本版中进一步完善了第 1 版的教学方法。依然通过采用运算放大器、晶体管和二极管的近似电路模型使数学推导保持到最低限度,并通过采用 PSpice 计算机辅助分析确立了这些近似的重要性。在精心编制的例子中分析了一些重要的电路,以便介绍基本技术和强调参数变化的影响。在每一章结尾有问题回顾和习题,测试学生对本章重要概念的学习情况。在每一章的开头列出了学生应有的学习目标。物理量符号及其含义也在每一章开头进行了说明,以便给学生快速参考。每章都以引言开始,给出本章内容在微电子领域的概貌。解题的例子给出了标题,以明确例子的目标。正文中穿插的注意事项提供与其他章节的连接以及指导学生避免一些常见的误解和错误。各节的结尾处以特殊字段的形式给出了关键点小结。在每章的结尾列出了参考文献,供那些有兴趣的读者进一步阅读。每章节结尾的练习分为问题回顾和习题,设计习题和 PSpice 仿真习题有相关的符号标识。

在本书的学生网站 www.cengage.com/engineering/rashid 可以获得 Cengage Learning(圣智学习出版公司)的学生支持。这个网站包含专门为帮助学生更有效地学习电子学而设计的工具,包括在本书出现的所有 PSpice 电路的源文件,以及本书所有精心编写的例题的 Mathcad 文件,这些可以下载并使學生可以自己解决问题。

教育版(面向学生)的 PSpice Schematics 和/或 OrCAD Capture 软件可以从以下公司网站获得或下载:

<http://www.cadence.com>

<http://www.orcad.com>

<http://www.ema-eda.com>

教师的支持

习题解答手册(打印格式和电子格式)和本书的教学课件(PPT)可以从 Cengage Learning(圣智学习出版公司)的全球工程网站 www.cengage.com/engineering 申请得到。

采用本书的一个学期和两个学期课程教学可参考本书“教学计划和课程大纲”。

致谢

感谢 Cengage Learning(圣智学习出版公司)的编辑团队, Chris Carson、Chris Shortt、Hilda Gowans、Swati Meherishi 和 Yumnam Ojen Singh 的指导和支持。

也要感谢以下评论者对第 1 版和第 2 版的意见和建议:

Dr. Ezzat G. Bakhoun

University of West Florida

Dr. William T. Baumann

Virginia Polytechnic Institute and State University

Dr. Paul J. Benkeser

Georgia Institute of Technology

Dr. Alok K. Berry

George Mason University

Dr. Michael A. Bridgwood

Clemson University

Dr. Nadeem N. Bunni

Clarkson University

Dr. Wai-Kai Chen

University of Illinois at Chicago

Dr. Shirshak K. Dhali

Southern Illinois University

Dr. Constantine Hatziadoniu

Southern Illinois University

Dr. Bruce P. Johnson

University of Nevada-Reno

Dr. Frank Kornbaum

South Dakota State University

Dr. Oguz Kucur

Gebze Institute of Technology, Turkey

Dr. John A. McNeill

Worcester Polytechnic Institute

Dr. Bahram Nabet

Drexel University

Dr. Hemanshu R. Pota

Australian Defense Force Academy

Dr. Jack R. Smith

University of Florida

Dr. Robert D. Strattan

University of Tulsa

最后,感谢我的家庭对我忙于本书编写和其他项目时所给予的支持。

欢迎关于本书的任何意见和建议。可以通过 mrashidfl@gmail.com 发给作者。

Muhammad H. Rashid

网址: <http://uwf.edu/mrashid>

教学计划和课程大纲

本教材是一本综合性的微电子教材,具有可以覆盖两个单学期课程的内容。教师经常不知道该在两个 16 周学期安排什么课程内容。

本书在运算放大器后覆盖二极管内容,以便包括非线性电路的运算放大器电路的完整内容不会出现在相同的章节中。然而,如果在课程中不包括非线性放大器电路,那么第 2 章后的运算放大器电路可以在一开始讲授。但是在第一学期的课程中可以略过第 2 章关于放大器介绍的大部分内容和第 5 章关于二极管应用的内容。下面给出典型的第一学期和第二学期电子学课程的安排方法。

第一学期电子学课程

本课程通常包括:①放大器的特性和模型以及它们的频率响应;②IC 运算放大器及其应用;③二极管的物理工作原理、特性和模型,这是理解晶体管小信号工作原理和模型的基础;④晶体管的工作原理、特性、模型和偏置;⑤有源(电流)源和差分放大器的基础,通常用于 IC 放大器中;⑥电子电路的频率响应。这些内容可以采用以下两种方法覆盖。课程内容的建议次序分别见表 1 和表 2。

表 1 第一学期电子学课程的建议内容(方法一)

周数	内 容	章	节
1	电子学 and 设计的简介	1	1.3~1.9
1	放大器和频率响应的简介	2	2.1~2.7
2	运算放大器简介	3	3.1~3.4,3.5.1~3.5.6
2	二极管	4	4.1~4.7
1	二极管的应用	5	5.1~5.3
1	半导体和 pn 结	6	6.1~6.4
3	MOSFET 和放大器	7	7.1~7.9
3	BJT 和放大器	8	8.1~8.9
1	差分放大器	9	9.1~9.5
1	考试		

表 2 第一学期电子学课程的建议内容(方法二)

周数	内 容	章	节
1	电子学 and 设计的简介	1	1.3~1.9
2	二极管	4	4.1~4.7
1	二极管的应用	5	5.1~5.3
1	半导体和 pn 结	6	6.1~6.4
3	MOSFET 和放大器	7	7.1~7.9
3	BJT 和放大器	8	8.1~8.9
1	放大器和频率响应的简介	2	2.1~2.7
2	运算放大器简介	3	3.1~3.4,3.5.1~3.5.6
1	差分放大器	9	9.1~9.5
1	考试		

方法一：运算放大器在二极管前开始讲授，这样的安排，不期望课程覆盖非线性放大器电路(采用二极管)。由于运算放大器是很多电子电路构建模块，简单运算放大器电路的分析经常覆盖在先前的电路分析(Circuit Analysis)课程中，其通常是电子学课程的先修内容。这种方法具有电路课程的连贯性的优点，更加适用于基于系统的学习方法。这种方法可以看作是自顶向下的方法。

方法二：运算放大器在二极管后讲授，以便学生可以采用非线性运算放大器电路(采用二极管)作为设计项目。这具有从器件(二极管和晶体管)到运算放大器的合乎逻辑进程的好处。

第二学期电子学课程

本课程覆盖放大器的特性和应用。课程通常包括：①放大器的频率响应；②有源滤波器的介绍；③反馈放大器；④振荡器；⑤采用有源电流源的差分放大器；⑥功率放大器；⑦运算放大器；⑧IC应用。课程内容的次序见表3。

表3 第二学期电子学课程的建议内容

周数	内 容	章	节
1	放大器的频率响应	2、7、8	2.7、7.13、8.15
1	差分放大器	9	9.1~9.5
2	反馈放大器	10	10.1~10.8、10.14
2	功率放大器	11	11.1~11.9
2	有源滤波器	12	12.1~12.9、12.14
2	振荡器	13	13.1~13.7
2	数字电子学的简介	15	15.1~15.4、15.7~15.8
1	运算放大器	14	14.1~14.4
2	IC应用	16	16.1、16.2、16.5~16.8
1	考试		

教学资源(学生)

圣智学习出版公司(Cengage Learning)的学生网站(www.cengage.com/engineering/rashid)提供以下素材：

- 本书中所有 PSpice 电路的源文件；
- 本书中例题的 Mathcad 文件。

教学资源(教师)

圣智学习出版公司(Cengage Learning)的全球工程网站(www.cengage.com/engineering)提供以下素材：

- 本书配套的习题解答手册(打印格式和电子格式)；
- 本书全部教学课件(PPT)。

软件工具

教育版(面向学生)的 PSpice Schematics 和 OrCAD Capture 软件可以从其公司网站申请：www.cadence.com；www.orcad.com；www.ema-eda.com。

目 录

译者序	1
原书前言	3
教学计划和课程大纲	7
第 1 章 电子学与设计绪论	1
1.1 引言	1
1.2 电子学的历史	1
1.3 电子系统	3
1.3.1 传感器	4
1.3.2 执行器	4
1.4 电信号和标记法	5
1.4.1 模数转换器	5
1.4.2 数模转换器	6
1.4.3 标记法	7
1.5 电子系统的分类	8
1.6 电子系统的规范	9
1.6.1 瞬态规范	9
1.6.2 失真	10
1.6.3 频率规范	10
1.6.4 直流和小信号规范	11
1.7 放大器类型	12
1.8 电子系统的设计	13
1.9 电子电路的设计	15
1.9.1 分析和设计	15
1.9.2 工程设计的定义	15
1.9.3 电路级设计过程	16
1.9.4 从设计的角度进行研究的好处	18
1.9.5 设计项目的类型	19
1.9.6 设计报告	20
1.10 电子器件	21
1.10.1 半导体二极管	21
1.10.2 双极型晶体管	21
1.10.3 场效应晶体管	22
1.11 新兴电子	24
1.11.1 忆阻器	24
1.11.2 有机电子	25

1.11.3 生物电子	26
参考文献	27
习题	28
第2章 放大器及频率响应概论	30
2.1 引言	30
2.2 放大器特性	30
2.2.1 电压增益	31
2.2.2 电流增益	31
2.2.3 功率增益	32
2.2.4 对数增益	32
2.2.5 输入输出电阻	33
2.2.6 放大器饱和	33
2.2.7 放大器非线性	34
2.2.8 上升时间	36
2.2.9 转换速率	36
2.3 放大器类型	38
2.3.1 电压放大器	38
2.3.2 电流放大器	39
2.3.3 跨导放大器	41
2.3.4 跨阻放大器	42
2.4 级联放大器	43
2.4.1 级联电压放大器	43
2.4.2 级联电流放大器	45
2.5 放大器的频率响应	46
2.5.1 低通特性	47
2.5.2 高通特性	49
2.5.3 带通特性	51
2.5.4 增益与带宽的关系	51
2.6 密勒定理	53
2.7 频率响应方法	54
2.7.1 低频传递函数方法	55
2.7.2 高频传递函数方法	56
2.7.3 密勒电容方法	57
2.7.4 低频短路方法	60
2.7.5 高频零值方法	61
2.7.6 中频电压增益	63
2.7.7 多级放大器	64
2.8 PSpice/SPICE 放大器模型	64
2.8.1 电压放大器	64
2.8.2 电流放大器	65

2.8.3 跨导放大器	65
2.8.4 跨阻放大器	65
2.9 放大器设计	65
本章小结	68
参考文献	68
问题回顾	68
习题	69
第3章 运算放大器和应用概论	77
3.1 引言	77
3.2 理想运算放大器的特性	77
3.2.1 运算放大器电路模型	78
3.2.2 运算放大器频率响应	79
3.2.3 共模抑制比	80
3.3 运算放大器 PSpice/SPICE 模型	82
3.3.1 直流线性模型	83
3.3.2 交流线性模型	83
3.3.3 非线性宏模型	84
3.4 理想运算放大器的分析	85
3.4.1 同相放大器	85
3.4.2 反相放大器	89
3.5 运算放大器的应用	94
3.5.1 积分器	94
3.5.2 微分器	101
3.5.3 差分放大器	105
3.5.4 仪表放大器	107
3.5.5 同相求和放大器	108
3.5.6 反相求和放大器	109
3.5.7 加法-减法放大器	110
3.5.8 光耦驱动器	113
3.5.9 光电探测器	114
3.5.10 电压-电流转换器	114
3.5.11 直流电压表	115
3.5.12 直流毫伏表	115
3.5.13 负阻抗转换器	116
3.5.14 恒流源	117
3.5.15 同相积分器	117
3.5.16 电感模拟器	118
3.5.17 交流耦合自举电压跟随器	119
3.6 运算放大器电路的设计	120
本章小结	122

参考文献	122
问题回顾	122
习题	123
第4章 半导体二极管	132
4.1 引言	132
4.2 理想的二极管	132
4.3 二极管电路的转移特性	135
4.4 实际二极管	136
4.4.1 实际二极管的特性	136
4.4.2 二极管常数的确定	137
4.4.3 温度效应	139
4.5 实际二极管电路的分析	140
4.5.1 图解法	140
4.5.2 近似法	141
4.5.3 迭代法	141
4.5.4 数学法	142
4.6 实际二极管的模型	143
4.6.1 恒压降直流模型	143
4.6.2 分段线性直流模型	144
4.6.3 低频小信号模型	146
4.6.4 PSpice/SPICE 二极管模型	149
4.7 齐纳二极管	152
4.7.1 齐纳稳压器	153
4.7.2 齐纳稳压器的设计	154
4.7.3 齐纳限幅器	157
4.7.4 齐纳二极管的温度效应	160
4.8 发光二极管	160
4.9 额定功率	161
4.10 二极管的数据表	162
本章小结	166
参考文献	166
问题回顾	166
习题	167
第5章 二极管的应用	174
5.1 引言	174
5.2 二极管整流器	174
5.2.1 单相半波整流器	175
5.2.2 单相全波中心抽头的整流器	181
5.2.3 单相全波桥式整流器	186
5.3 整流器的输出滤波器	190

5.3.1	L 滤波器	190
5.3.2	C 滤波器	192
5.3.3	LC 滤波器	197
5.4	二极管峰值检测器和解调器	199
5.5	二极管斩波器	202
5.5.1	并联斩波器	202
5.5.2	串联斩波器	203
5.6	二极管钳位电路	205
5.6.1	固定移位钳位电路	205
5.6.2	可变移位钳位电路	206
5.7	二极管电压乘法器	209
5.7.1	倍压器	209
5.7.2	电压三倍器以及四倍器	210
5.8	二极管函数产生器	211
	本章小结	213
	参考文献	214
	问题回顾	214
	习题	214
第 6 章	半导体和 pn 结特性	220
6.1	引言	220
6.2	半导体材料	221
6.2.1	n-型材料	222
6.2.2	p-型材料	223
6.2.3	多子和少子	223
6.2.4	费米函数	223
6.2.5	载流子浓度	225
6.3	零偏 pn 结	226
6.3.1	内建结电势	227
6.3.2	电场分布	227
6.3.3	结电势分布	229
6.3.4	空间电荷耗尽区宽度	229
6.4	反偏 pn 结	230
6.4.1	击穿条件	231
6.4.2	耗尽区宽度	232
6.4.3	结电容	233
6.5	正偏 pn 结	234
6.5.1	耗尽区宽度	234
6.5.2	少子电荷分布	235
6.6	结电流密度	237
6.7	温度依赖性	238

6.8	高频交流模型	238
6.8.1	耗尽电容	239
6.8.2	扩散电容	239
6.8.3	正偏模型	240
6.8.4	反偏模型	240
	本章小结	241
	参考文献	241
	问题回顾	241
	习题	242
第7章	金属氧化物半导体场效应晶体管	245
7.1	引言	245
7.2	金属氧化物场效应晶体管	246
7.3	增强型 MOSFET	246
7.3.1	工作过程	247
7.3.2	输出特性和转移特性	250
7.3.3	沟道长度调制	251
7.3.4	衬底偏置效应	252
7.3.5	互补 MOS	253
7.4	耗尽型 MOSFET	254
7.4.1	工作过程	254
7.4.2	输出和转移特性	255
7.5	场效应晶体管模型和放大器	256
7.5.1	直流模型	257
7.5.2	交流小信号模型	257
7.5.3	PSpice 模型	258
7.5.4	小信号分析	259
7.6	MOSFET 开关	261
7.7	MOSFET 的直流偏置	262
7.7.1	MOSFET 偏置电路	263
7.7.2	MOSFET 偏置电路的设计	264
7.8	共源极放大器	267
7.8.1	采用电流源负载的共源极放大器	268
7.8.2	采用增强型 MOSFET 负载的共源极放大器	270
7.8.3	采用耗尽型 MOSFET 负载的共源极放大器	271
7.8.4	采用电阻负载的共源极放大器	272
7.9	共漏极放大器	275
7.9.1	有源偏置的源极跟随器	276
7.9.2	电阻偏置的源极跟随器	277
7.10	共栅极放大器	279
7.11	多级放大器	281

7.11.1	电容耦合级联放大器	281
7.11.2	直接耦合的放大器	282
7.11.3	共源共栅放大器	282
7.12	直流电平移位和放大器	284
7.12.1	电平移位方法	284
7.12.2	电平移位的 MOS 放大器	285
7.13	MOSFET 放大器的频率响应	289
7.13.1	高频 MOSFET 模型	289
7.13.2	小信号 PSpice 模型	291
7.13.3	共源极放大器	292
7.13.4	共漏极放大器	295
7.13.5	共栅极放大器	297
7.14	MOSFET 放大器的设计	300
	本章小结	304
	参考文献	304
	问题回顾	305
	习题	305
第 8 章	双极型晶体管及放大器	319
8.1	引言	319
8.2	双极型晶体管	320
8.3	BJT 的工作原理	321
8.3.1	正向工作模式	322
8.3.2	截止、饱和与反向有源工作模式	324
8.3.3	基区致窄	324
8.3.4	饱和电流 I_S 和电流增益 β_F 的物理参数	327
8.4	输入输出特性	329
8.5	BJT 电路模型	331
8.5.1	线性直流模型	331
8.5.2	小信号交流模型	332
8.5.3	小信号混合模型	333
8.5.4	PSpice/SPICE 模型	333
8.5.5	小信号分析	334
8.6	BJT 开关	336
8.7	双极型晶体管的直流偏置	337
8.7.1	有源电流源偏置	338
8.7.2	单基极电阻偏置	339
8.7.3	发射极电阻反馈偏置	339
8.7.4	射极跟随器偏置	340
8.7.5	双基极电阻偏置	340
8.7.6	偏置电路设计	341

8.8	共射极放大器	344
8.8.1	有源偏置共射极放大器	345
8.8.2	阻性偏置共射极放大器	347
8.9	射极跟随器	351
8.9.1	有源偏置射极跟随器	352
8.9.2	阻性偏置射极跟随器	354
8.10	共基极放大器	356
8.10.1	输入电阻 R_i	357
8.10.2	无负载电压增益 A_{v_o}	358
8.10.3	输出电阻 R_o	358
8.11	多级放大器	360
8.11.1	电容耦合级联放大器	360
8.11.2	直接耦合放大器	361
8.11.3	级联晶体管放大器	361
8.12	达灵顿对晶体管	363
8.13	直流电平移位和放大器	366
8.13.1	电平移位方法	366
8.13.2	电平移位的直流放大器	367
8.14	双极型晶体管的频率模型和响应	370
8.14.1	高频模型	370
8.14.2	小信号 PSpice/SPICE 模型	372
8.14.3	BJT 的频率响应	373
8.15	BJT 放大器的频率响应	375
8.15.1	共射极 BJT 放大器	376
8.15.2	共集电极 BJT 放大器	381
8.15.3	共基极 BJT 放大器	384
8.15.4	多级放大器	387
8.16	MOSFET 与 BJT	391
8.17	放大器的设计	391
	本章小结	395
	参考文献	395
	问题回顾	395
	习题	396
第9章	差分放大器	410
9.1	引言	410
9.2	差分放大器的内部结构	410
9.2.1	差分放大器的特性	411
9.2.2	差分放大器的内部结构	412
9.3	MOSFET 电流源	414
9.3.1	基本电流源	415