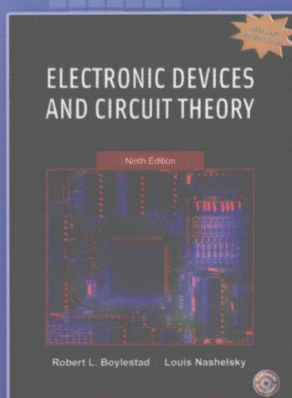


国外电子与通信教材系列



模拟电子技术

Electronic Devices and Circuit Theory
Ninth Edition



[美] Robert L. Boylestad 著
Louis Nashelsky

李立华 李永华 徐晓东 王莹 译



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

模拟电子技术

Electronic Devices and Circuit Theory

Ninth Edition

[美] Robert L. Boylestad 著
Louis Nashelsky 译

李立华 李永华 徐晓东 王莹 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是英文原版教材 *Electronic Devices and Circuit Theory, Ninth Edition* 之英文改编版《模拟电子技术》的翻译版, 内容包括半导体器件基础、二极管及其应用电路、晶体管和场效应管放大电路的基本原理及频率响应、功率放大电路、多级放大电路、差分放大电路、电流源等模拟集成电路的单元电路、反馈电路、模拟集成运算放大器、电压比较器和波形变换电路等。本书对原版教材进行了改编, 精简了内容, 突出了重点, 补充了必要知识点, 内容更加新颖和系统化, 反映了器件和应用的发展趋势, 强调了系统工程的概念。

本书与英文版教材配套使用, 适合电子、计算机、通信等相关专业电子电路基础课程 40 学时到 68 学时的中文或双语教学要求, 也可供相关专业工程技术人员的学习和参考。

Authorized translation from the English language edition, entitled *Electronic Devices and Circuit Theory, Ninth Edition*, ISBN: 0131189050 by Robert L. Boylestad, Louis Nashelsky, published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall, Copyright © 2006.

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 PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2008.

本书简体中文版由 Pearson Education 培生教育出版亚洲有限公司授权电子工业出版社。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。

本书简体中文版贴有 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: 01-2007-3853

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术 / (美) 博伊尔斯塔德 (Boylestad, R. L.) 等著; 李立华等译. —北京: 电子工业出版社, 2008.6

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: *Electronic Devices and Circuit Theory, Ninth Edition*

ISBN 978-7-121-06207-0

I. 模… II. ①博…②李… III. 模拟电路—电子技术—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 034454 号

责任编辑: 段丹辉

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市金马印装有限公司

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: 30.25 字数: 833.5 千字

印 次: 2008 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 49.00 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。

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。

服务热线: (010)88258888。

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。

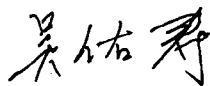
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,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工作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、南京邮电大学、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、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通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	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
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 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 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
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	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 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 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、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	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兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

译者序

本书是改编版《模拟电子技术(英文版)》(原著 *Electronic Devices and Circuit Theory, Ninth Edition* 的翻译版本,与英文版教材配套使用,适合电子、计算机、通信等相关专业电子电路基础课程 40 学时到 68 学时的英语或双语教学要求。本书也可作为相关专业工程技术人员的中文参考书。为了与英文版教材对照,本书中的所有符号沿用英文版中的符号。

原著作自 1972 年首次出版后,被多所大学作为教材使用,经过不断实践与修订,成为流行 30 多年的优秀经典教材。*Electronic Devices and Circuit Theory, Ninth Edition* 涵盖了广泛和新颖的内容,其内容体系与国内高校电子电路基础相关课程的教学内容有较高的一致性,仅在一些内容细节安排上与国内相关专业的教学课程设置以及实验课程设置存在不协调或者重复现象。基于此,为了使教材内容更合理,满足国内和国际高等教育相关专业电子电路基础课程的教学要求,李立华于 2007 年对原著作进行了改编,精简了内容,突出了重点,补充了必要知识点。并且于 2007 年秋季学期将改编英文版教材用于北京邮电大学国际学院电子电路基础课程的双语教学中,取得了良好的效果。

在进行电子电路基础双语教学的多年实践中,一方面体会到一本范围和内容适合的英文教材的重要性,同时也感受到学生对于配套中文教材的迫切需要。尤其对于电子类课程的英语或双语授课,知识难度和英语授课都增加了学生学好这些课程的难度,有一本与英文教材配套的中文教材作为辅助,便于学生在有限学时下把握重点,深入理解,提高学生自学的效率,也可以为不同基础和不同目标的读者提供更好的帮助和更多的选择。

本书的内容更加新颖和系统化,反映了器件和应用的发展趋势,强调了系统工程的概念。本书的组织非常合理:每一章都有一个概述,介绍本章的基本内容和重要的背景知识;每一章最后都有小结,总结本章的基本概念和结论;每一章最后都提供重要的公式列表,以便于读者复习。值得一提的是,本书提供了丰富的例题和非常详尽的解答,也在每一章提供了大量的练习题,对于提高读者对电子电路知识的应用能力大有帮助。本书在重要参数、公式、结论和概念的表示上采用不同字体样式以示突出,同时提供了大量总结性图表,增强了可读性。本书的上述特点使其不仅可以作为一本优秀的教材,也可以作为电子、计算机、通信等相关专业一本很有价值的参考书。

李立华负责全书的审校。序言及第 3~5,10,11 章由李立华翻译,第 6~9 章由李永华翻译,第 1,2 章由徐晓东翻译,第 12,13 章由王莹翻译。在本书的翻译过程中,北京邮电大学蒯志清教授、刘宝玲教授和已退休的张春茂教授都给予了大量的帮助和指导,译者在此表示衷心的感谢!

由于译者水平有限,书中难免存在错误与不妥之处,恳请广大读者批评指正。

译者
北京邮电大学
2007 年 12 月

序 言

本书对第八版的内容进行了多处重要的改进。除了为适应当前教学趋势提供大量资料所做的内容组织方面的改进外,还对内容进行了更新,以反映工艺技术和材料科学方面的最新进展。对一些具体研究领域的内容进行了重新编写以强调一些重要的观点,而不致使其湮没在大量的资料中。精心重编了一些实际例子以反映当前的市场趋势,同时使读者对当前元器件的实际使用有所了解。

最明显的变化是将第八版中第 7 章、第 8 章、第 10 章和第 12 章的部分内容合并成新的一章(第 5 章),命名为“BJT 交流分析”。初看上去,这种合并使这一章显得非常庞大而难以使用。然而,章节内容的重新编写、一些次要推导的删除及一些不相关章节的删减,使这一章的内容对于学生和老师都非常适宜。这一章涵盖了单个和多级 BJT 放大电路的全部小信号交流分析。

此外,另一个重要的变化是章节顺序,使 BJT 电路和 FET 电路的直流分析分别在介绍其相应交流分析之前的章节中涵盖。这非常重要,因为每一种电路的直流分析都直接影响交流分析结果。介绍一类电路的直流分析之后紧接着介绍其交流分析,使内容更加紧凑(在前面的版本中,BJT 电路和 FET 电路的直流分析是放在一起讲述的,然后再介绍它们的交流分析)。

如前所述,本书与之前版本的主要变化在于内容顺序的安排和一些章节的合并。同样重要的是,扩充了砷化镓(GaAs)、运算放大器(Op-amp)和齐纳(Zener)二极管的知识以反映该领域的发展。在高频分析章节中,应当前使用者和评审者的要求,扩展了混合 π 模型应用的知识。在交流分析的章节中,受控源都与当前的标准规定一致采用菱形外形,这种表示方式在教学和软件包中也越来越普遍。

总体来说,有些章节的变化很大,而有些章节改动很小。例如,第 1 章为了改进对介绍性内容的描述以及增加砷化镓材料的知识,几乎完全是重新编写的。而其他章节,例如对 BJT 和 FET 的介绍,内容和原来的相同,因为当前的读者普遍对该内容很满意。

在第九版的整个准备过程中,作者都致力于保证技术内容的准确性。因为解答和推导中的错误会令教师和学生很失望。使作者感到欣慰的是,在课堂上发现或由其他读者提供的内容错误非常少,令人感觉这本书几乎是没有错误的。当然,读者对于推导、结果或者结论等有任何意见或者建议,作者将表示深深的感谢。

特征

- 系统方法。与前一版本相同,本书不遗余力地增强介绍系统工程概念的内容。对于交流分析,强调了空载放大倍数和有载放大倍数的区别,并通过例题说明它们如何影响放大倍数和系统特性。尽管这部分内容只是所讨论器件交流分析这一章的一部分,但是所涉及的章节仍然说明了信号源内阻及负载电阻对系统的影响。
- 可视易读的表现形式。本书在排版格式方面做了大量努力。为了便于内容回顾学习,每一章最后都给出了内容小结和公式列举。

教学辅助信息

为了辅助教学过程,对于使用本书为教材的教师提供了完备的教辅资源包,参见教学支持说明。

学生教辅资源

- 试验手册(PSpice 程序重点), ISBN 0-13-118906-9
- 试验手册(Multisim 程序重点), ISBN 0-13-172088-0
- 学习网址(学生学习指导) www.prenhall.com/boylestad

教师教辅资源

- 教师资源手册(含有习题、试验解答以及测试题目), ISBN 0-13-118907-7
- 幻灯片讲义注解, ISBN 0-13-118908-5
- 电子测试题库 TestGen, ISBN 0-13-118915-8

致谢

首先对使用这本书作为教材并且反馈意见、建议以及纠错信息的教师们表示最诚挚的感谢!同时,我们也要感谢 Prentice Hall 出版公司的 Rex Davidson 和 Kate Linsner 为第九版内容编辑所做的贡献!

感谢 GTS/Techbooks 的 Penny Walker 为本书所做的协调工作!

感谢为我们提出宝贵建议并对多个版本内容进行评估的无数人员! 他们的建议和支持使我们能够完成本书的最新版。我们要特别感谢以下审校人员,他们在第九版的准备过程中提供了宝贵的帮助:

Joseph Booker	DeVry 大学 DuPage 校区
Charles F. Bunting	Old Dominion 大学
Mauro J. Caputi	Hofstra 大学
Denton Dailey	Butler 社区大学
Kevin Ford	Alvin 社区大学
David Krispinsky	Rochester 技术学院
William Mack	Harrisburg 地区社区大学
John Sherrick	Rochester 技术学院

目 录

第 1 章 半导体二极管	1
1.1 概述	1
1.2 半导体材料: 锗、硅和砷化镓	2
1.3 共价键和本征材料	2
1.4 掺杂材料: n 型材料和 p 型材料	5
1.5 半导体二极管	7
1.6 理想特性与实际特性	15
1.7 电阻水平	17
1.8 二极管等效电路	22
1.9 势垒电容和扩散电容	25
1.10 反向恢复时间	26
1.11 二极管规格表	26
1.12 半导体二极管符号	29
1.13 齐纳二极管	30
1.14 小结	33
1.15 计算机分析	35
习题	39
第 2 章 二极管应用	43
2.1 概述	43
2.2 负载线分析	43
2.3 等效模型分析	48
2.4 与/或门	51
2.5 正弦波输入、半波整流	53
2.6 全波整流	56
2.7 限幅电路	60
2.8 钳位电路	67
2.9 齐纳二极管	71
2.10 小结	77
习题	78
第 3 章 双极性结型晶体管	87
3.1 概述	87
3.2 晶体管的结构	88
3.3 晶体管的工作原理	89
3.4 共基组态	90
3.5 晶体管放大原理	93
3.6 共射组态	94
3.7 共集组态	100
3.8 晶体管的工作限	100
3.9 晶体管规格说明书	102

3.10	晶体管外形及引脚识别	105
3.11	小结	107
	习题	108
第4章	BJT 电路直流偏置	111
4.1	概述	111
4.2	工作点	111
4.3	固定偏置电路	113
4.4	射极偏置	119
4.5	分压式偏置	123
4.6	电压反馈式直流偏置	129
4.7	其他偏置电路	132
4.8	晶体管开关电路	136
4.9	pnp 型晶体管	140
4.10	偏置的稳定性	142
4.11	小结	143
	习题	144
第5章	BJT 交流分析	152
5.1	概述	152
5.2	交流放大	152
5.3	BJT 管建模	153
5.4	r_e 晶体管模型	155
5.5	混合等效模型	161
5.6	混合 π 模型	166
5.7	晶体管参数的变化	167
5.8	固定偏置共射放大电路	169
5.9	分压式偏置共射放大电路	171
5.10	射极偏置共射放大电路	173
5.11	射极跟随电路	178
5.12	共基电路	182
5.13	集电极反馈电路	184
5.14	集电极直流反馈电路	188
5.15	电流放大倍数的确定	190
5.16	R_L 和 R_S 的影响	192
5.17	双端口网络方法	196
5.18	总结表	201
5.19	级联系统	204
5.20	达林顿复合管	209
5.21	反馈对复合管	213
5.22	镜像电流源电路	216
5.23	电流源电路	218
5.24	简化混合等效模型	220
5.25	小结	225
	习题	228
第6章	场效应晶体管	243
6.1	概述	243

6.2	结型场效应管的构造和特性	244
6.3	转移特性	249
6.4	规格清单(结型场效应管)	253
6.5	重要关系	255
6.6	耗尽型 MOS 场效应管	255
6.7	增强型 MOS 场效应管	260
6.8	互补型 MOS 场效应管	266
6.9	总结表	267
6.10	小结	268
	习题	269
第 7 章	场效应管的偏置	273
7.1	概述	273
7.2	固定偏置电路	274
7.3	自偏置电路	276
7.4	分压偏置电路	281
7.5	耗尽型 MOSFET	285
7.6	增强型 MOSFET	288
7.7	总结表	293
7.8	组合电路	294
7.9	p 沟道场效应管	297
7.10	小结	299
	习题	299
第 8 章	场效应管放大器	306
8.1	概述	306
8.2	场效应管的小信号模型	306
8.3	结型场效应管的固定偏置电路	312
8.4	结型场效应管的自偏置电路	314
8.5	结型场效应管的分压偏置电路	319
8.6	结型场效应管的源极跟随器(共漏极)电路	320
8.7	结型场效应管的共栅极电路	323
8.8	耗尽型 MOSFET	326
8.9	增强型 MOSFET	327
8.10	增强型 MOSFET 漏极反馈电路	328
8.11	增强型 MOSFET 分压偏置电路	331
8.12	总结表	332
8.13	R_L 和 R_{sig} 的影响	334
8.14	级联电路	337
8.15	小结	340
	习题	340
第 9 章	BJT 和 FET 的频率响应	348
9.1	概述	348
9.2	一般的频率因素	348
9.3	低频分析——伯德图	350
9.4	低频响应——BJT 放大器	355
9.5	低频响应——FET 放大器	359

9.6	密勒效应电容或密勒电容	361
9.7	高频响应——BJT 放大器	363
9.8	高频响应——FET 放大器	368
9.9	多级频率响应	370
9.10	小结	372
	习题	373
第 10 章	运算放大器	377
10.1	概述	377
10.2	差分放大电路	379
10.3	差模和共模操作	388
10.4	BiFET, BiMOS 和 CMOS 构成的差分放大电路	391
10.5	运算放大器基础	394
10.6	运算放大器参数——直流补偿参数	398
10.7	运算放大器参数——频率参数	401
10.8	运算放大器规格说明书	403
10.9	小结	409
	习题	410
第 11 章	运算放大器的应用	413
11.1	运算电路	413
11.2	有源滤波器	417
11.3	比较器应用	420
11.4	施密特触发器	423
11.5	小结	425
	习题	426
第 12 章	功率放大器	431
12.1	概述——功率放大器的定义与类型	431
12.2	串馈型甲类功率放大器	433
12.3	变压器耦合甲类功率放大器	436
12.4	乙类功率放大器的工作	443
12.5	乙类功率放大器	446
12.6	丙类和丁类功率放大器	451
12.7	小结	453
	习题	454
第 13 章	反馈电路	456
13.1	反馈的概念	456
13.2	反馈的组态类型	456
13.3	实用反馈电路	462
13.4	反馈放大器——相位和频率考虑	467
13.5	小结	469
	习题	470

第1章 半导体二极管

本章提纲

1.1 概述

1.2 半导体材料:锗、硅和砷化镓

1.3 共价键和本征材料

1.4 掺杂材料: n 型材料和 p 型材料

1.5 半导体二极管

1.6 理想特性与实际特性

1.7 电阻水平

1.8 二极管等效电路

1.9 势垒电容和扩散电容

1.10 反向恢复时间

1.11 二极管规格表

1.12 半导体二极管符号

1.13 齐纳二极管

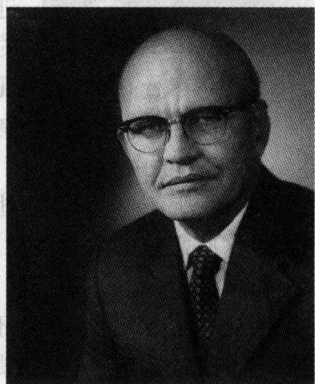
1.14 小结

1.15 计算机分析

1.1 概述

像其他领域的技术一样,本领域值得关注的事情之一是其基本原理随时间变化而变化的部分是如此之少。系统越来越小、操作速度越来越快、设计精巧的小装置层出不穷,让我们只能猜想技术到底会给我们带来什么。然而,如果我们花一点时间考虑一下,大多数我们当前使用的设备都是在20年前发明的,本书中介绍的设计技术从20世纪30年代开始就一直在沿用。可以认识到,我们看到的大多数事情其实主要是那些设备在构造技术和应用方面的稳定提高带来的,而不是新元件和基本设计方面的新理论发展而来的。因此,本书中讨论的大多数设备已经存在了一段时间了,写于几十年前的相关书籍仍然是很好的参考资料,其内容并没有太大改变,主要的变化体现在理解这些设备如何工作、其能力的全部范围以及相关基本理论的教学方法改进等。这样做给新同学带来的好处在于我们希望本书可以使学生相对容易地掌握其内容,并且提供的信息可以在未来多年内仍然可以得到应用。

近年来出现的小型化趋势让我们猜想其可能的极限到底有多大。现在,一个完整的系统可以做成晶片上,比早些年电路中一个元件的千分之一都还要小。第一个集成电路(IC)是由Jack Kilby在德州仪器工作时于1958年发明的,参见图1.1。而现在,英特尔奔腾4处理器拥有超过4200万晶体管及许多其他元件,如图1.2所示。目前的进展显示,不久之后10亿个晶体管可以放置在小指甲面积的硅片上。我们已经达到了一个很高的程度,使容器的主要作用仅仅成为提供处理设备或系统的方式,并提供与电路中其他部分连接的机制。



Jack St. Clair Kilby, 集成电路的发明人及电子手持计算机的共同发明人之一(德州仪器许可)。出生于密苏里州杰弗逊市,1923年,威斯康星州立大学硕士毕业,德州仪器公司器件部门工程技术总监,IEEE会士,持有60多项美国专利

这里介绍的第一个设备是所有电子设备中最简单的,然而它的应用范围却似乎是无穷尽的,我们将用两个章节来介绍这个设备,以介绍其通常用于电晶体设备的材料,并回顾电子电路的基本原理。

1.2 半导体材料:锗、硅和砷化镓

构造每一个分离(独立)的电晶体(硬晶体结构)电子设备或集成电路都是由高质量的半导体材料开始的。

半导体是一类特别的材料,其导电性介于良导体与绝缘体之间。

总体来说,半导体器件包含两大类,单晶体和复合晶体半导体,单晶体半导体如锗(Ge)和硅(Si),有重复的晶体结构,而复合半导体如砷化镓(GaAs)、硫化镉(CdS)、氮化镓(GaN)和磷砷化镓(GaAsP)等,是由具有不同原子结构的两种或更多种半导体材料构成的。

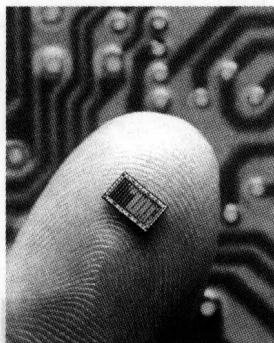


图 1.2 计算机芯片
(Stock 图像/
CORBIS 版权
所有)

构成电子设备最常用的三种半导体是锗、硅和砷化镓。

在二极管于 1939 年、晶体管于 1947 年被发明后最初的几十年中,锗基本上作为专用材料,因为它相对来说比较常见而且数量也较多,它也相对更容易提炼至高纯度,这是制作过程中非常重要的环节。然而,在早期使用中发现锗作为基本材料制作的二极管和晶体管,对温度变化的敏感性较大,因此其稳定性较差。当时,科学家们发现了另一种物质——硅,其温度敏感性较好,但是提炼高纯度硅的过程仍然有待改进。最终在 1954 年,第一批硅晶体管制作完成,硅迅速成为了半导体的使用材料。不仅因为硅对温度的敏感性较低,而且因为硅是世界上现存可用物质中数量最丰富的。硅的使用大量增加,其后经过多年,硅制造与设计技术日益进步,最终发展到当前的水平。

然而随着时间的推移,电子领域对速度的追求越来越高。计算机处理的速度越来越快,通信系统也工作在更高的性能水平,我们需要找到满足这些需求的半导体材料。20 世纪 70 年代早期,第一个砷化镓晶体管出现了,这种新的晶体管工作速度是硅的 5 倍。然而,由于硅在使用方面有着多年的设计与制造方面的成就,硅晶体管电路的成本更加便宜,而且还有高效设计策略的优势,这让硅得到了很多的应用。砷化镓在高纯度情况下很难制造,也更昂贵,而且在早期发展阶段,没有设计方面的支持。但是提高速度的需求也导致了更多支持砷化镓的研究,到今天为止,砷化镓材料已经广泛应用于新的高速、超大规模电路设计中。

上述对半导体材料发展历史的简要描述并不意味着砷化镓不久以后将成为唯一合适的电晶体构造材料,锗设备仍然还在制造,虽然其应用范围有限。尽管锗是对温度敏感的半导体,它还是具有一些特性,并在有限的一些领域中得到应用。由于其材料丰富、制造成本低,锗将仍然存在于产品目录中。如前面提到的,硅具有多年发展的优势,并且在电子元件和集成电路应用材料中处于主导地位。砷化镓更昂贵,但随着制造方法的改进和更高速度的需求,它将挑战硅在半导体材料中的主导地位。

1.3 共价键和本征材料

想要完全了解为什么锗、硅和砷化镓被选为电子工业的半导体材料,需要先了解每一种材料的原子结构及原子是如何结合在一起并构成晶体结构的。每个原子是由三种基本粒子组成的:电

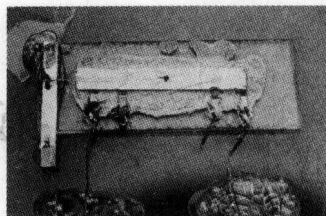


图 1.1 由 Jack St. Clair Kilby 于 1958 年发明的第一块集成电路,即一个相移振荡器(德州仪器公司许可)

子、质子和中子。在晶格结构中,中子和质子构成原子核,电子围绕原子核在固定的轨道运动,图 1.3 提供了这三种材料的玻尔模型。

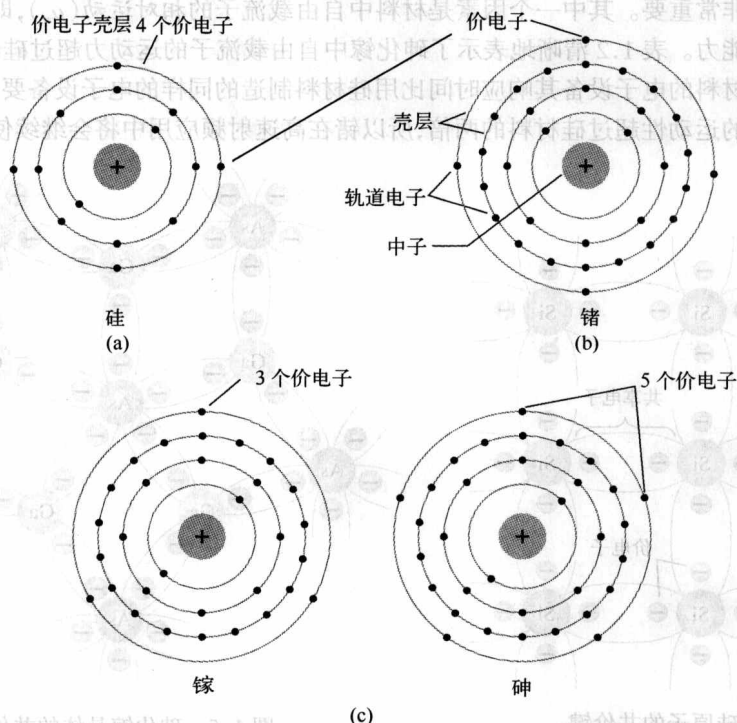


图 1.3 原子结构:(a)硅;(b)锗;(c)砷化镓

在图 1.3 中,硅具有 14 个电子,锗具有 32 个电子,镓具有 31 个电子,砷具有 33 个电子(砷还是一种剧毒的化学药剂)。锗和硅在最外层都具有 4 个电子,称为价电子。锗具有 3 个价电子,砷具有 5 个价电子。具有 4 个价电子的原子称为四价原子,具有 3 个价电子的原子称为三价原子,具有 5 个价电子的原子称为五价原子。“价”用于表示将其中一个价电子从原子结构中移除需要的势能(电离势能)远低于原子结构中的其他电子。

在一个纯的硅或锗晶体中,一个原子的 4 个价电子与相邻原子的 4 个价电子构成键合关系,如图 1.4 所示。

原子的键合是由共享电子加强的,称为共价键。

由于砷化镓是一种复合半导体,在两个不同原子间存在电子共享,如图 1.5 所示,每个原子都有补充类型的原子所环绕,也存在类似于锗和硅结构中的电子共享,只是砷原子提供 5 个电子,而镓原子提供 3 个电子而已。

虽然共价键将导致电子与其原子间更强的结合力,但是电子仍然有可能由外部原因而吸取足够的动能,突破共价键并处于“自由”状态。“自由”是指任何离开晶格结构的电子,并对外加电场敏感,例如由电压源或任何不同的电势造成的电场。外部原因包括由光子表示的光能和由环境媒介带来的热能(热量)等效应。在室温下,1 cm³ 的硅本征材料中大约含有 1.5×10^{10} 个自由载流子,即在一块方糖大小的空间里存在 15 000 000 000(150 亿)个电子——非常巨大的数量。

“本征”用于任何经过仔细提纯的半导体材料,将其杂质降低到一个很低的级别——最终达到目前工艺所能达到的纯度。

仅由于外部原因引起的材料中的自由电子称为本征载流子,表 1.1 中对比了每立方厘米的锗、

硅和砷化镓材料中的本征载流子数量。有趣的是,其中锗包含的数量最多,砷化镓最少。事实上,锗中的数量超过砷化镓的两倍,本征形式的载流子数量非常重要,但是材料的一些其他特性在确定其使用领域方面也非常重要。其中一个因素是材料中自由载流子的相对运动(μ_n),即自由载流子可以在材料中运动的能力。表 1.2 清晰地表示了砷化镓中自由载流子的运动力超过硅的 5 倍,对应地将导致使用砷化镓材料的电子设备其响应时间比用硅材料制造的同样的电子设备要快 5 倍。注意,锗中的自由载流子的运动性超过硅材料的两倍,所以锗在高速射频应用中将会继续使用。

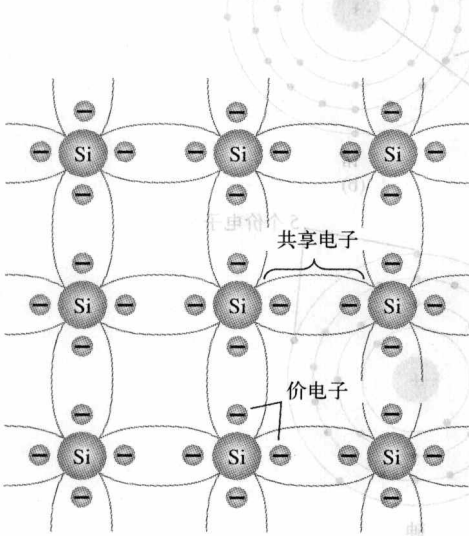


图 1.4 硅原子的共价键

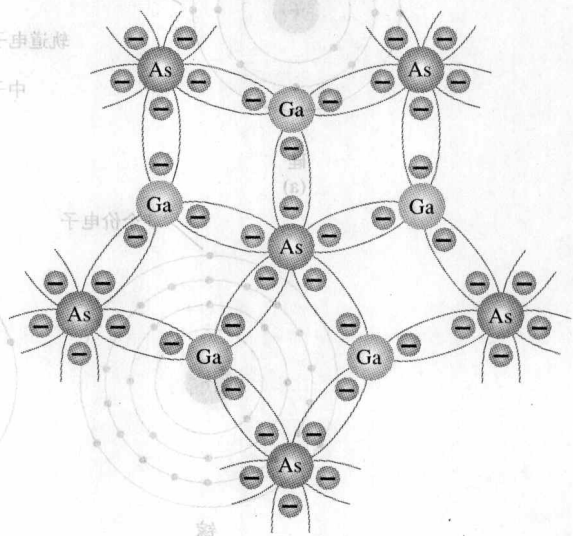


图 1.5 砷化镓晶体的共价键

表 1.1 本征载流子

半导体	本征载流子 (cm^3)
GaAs	1.7×10^6
Si	1.5×10^{10}
Ge	2.5×10^{13}

表 1.2 相对运动因子 μ_n

半导体	$\mu_n [\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})]$
Si	1500
Ge	3900
GaAs	8500

这几十年来最重要的进展之一是在制造半导体材料时提高纯度的能力,回忆一下,这曾经是硅在早期应用过程中碰到的问题之一——制造高纯度的锗更容易一些。杂质含量在十亿分之一级别的纯度今天已经很常见,可以应用于大规模集成电路的更高纯度也可以达到。有人或许会问,如此高的纯度是否需要?这是确实需要的。可以设想一下,在一片硅中加入百万分之一的杂质(合适的类型)就可以把一个非常差的导体变为具有很好导电性的导体。很明显,当我们处理半导体介质时,需要进行一个全新水平的比较,通过此过程改变材料特性的能力称为“掺杂”,锗、硅和砷化镓很容易接受。掺杂过程将在 1.4 节和 1.5 节详细介绍。

半导体与导体之间一个重要且有趣的区别是它们受热后的反应。对于导体,其电阻会随着热量增加而增大,这是因为导体中的载流子数量不会随着温度的升高而有明显的增加。但它们相对固定位置的振动模式使得通过材料的载流子的流动更加困难。具有这种反应方式的材料称为具有正温度系数。然而半导体材料在受热后具有更好的传导特性,因为当温度升高时,更多的价电子吸收到足够的热能来打破共价键的同时增加了自由载流子的数量。因此,半导体材料具有负温度系数。