

国家示范性高职院校建设项目成果

高等职业教育“十二五”规划教材

辽宁省省级精品课配套教材

模拟电子技术 项目式教程

姜俐侠 主编

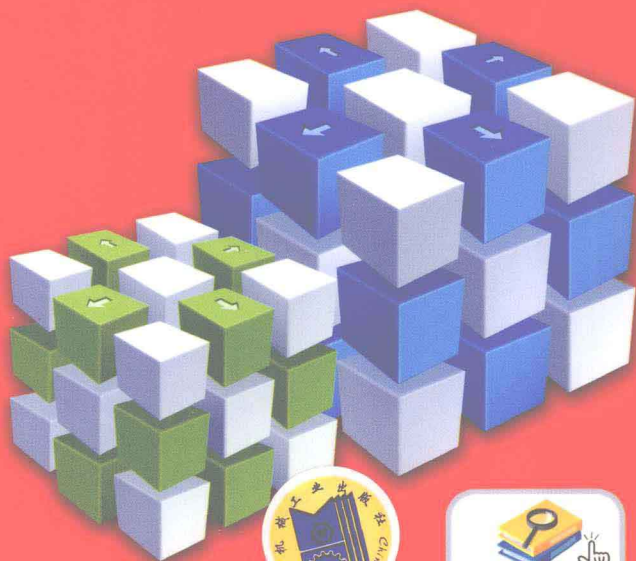


采用基于工作过程的教学方式，将模拟电子技术与语音放大器的制作过程相结合

以实际生产中的产品——语音放大器为导向，将语音放大器制作这一具体项目分为7个任务

引入了Multisim仿真，设计了教学目标、任务引入、相关知识、任务实施、任务考核、思考与训练等环节

立体化配套，内容丰富(www.bhcy.cn/jpk/mndz)



国家示范性高职院校建设项目成果
高等职业教育“十二五”规划教材
辽宁省省级精品课配套教材

模拟电子技术项目式教程

主 编 姜俐侠
副主编 蔡新梅
参 编 李 妍 张德孝

机 械 工 业 出 版 社

本书以语音放大器这一产品的制作过程为导向,采用基于工作过程的教学方式,遵循由浅入深、循序渐进的教育规律,将模拟电子技术与语音放大器的制作过程相结合,全书分为7个学习任务:常用电子器件的测试与判断、语音输入放大电路的制作、音调调整电路的制作、功率放大电路的制作、直流稳压电源的制作、正弦波信号源的制作及语音放大器的整机装调。为增强教学效果和拓展学生的职业技能,书中引入了 Multisim 仿真内容。

本书的特点是保证基础理论,注重应用技能。本书可作为高职高专电类、机电类、计算机类等专业的专业基础课教材,也可供初学者和电子工程技术人员参考使用。

为方便教学,本书配有免费电子课件等,凡选用本书作为授课教材的学校,均可来电(010-88379564)或邮件(cmpqu@163.com)索取。有任何技术问题也可通过以上方式联系。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术项目式教程/姜俐侠主编. —北京:机械工业出版社, 2011.2

国家示范性高职院校建设项目成果 高等职业教育“十二五”规划教材 辽宁省省级精品课配套教材

ISBN 978-7-111-33434-7

I. ①模… II. ①姜… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校:技术学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 023152 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:曲世海 责任编辑:王寅生 责任校对:李秋荣

封面设计:陈 沛 责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14.25 印张·351 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-33434-7

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

高职高专院校的培养目标是培养高素质、高级技能型的专门人才，这一目标决定了高职高专院校的教学内容，即“知识与技能相结合”。通过本书的学习，可使高职高专学生既具备基本的专业知识和职业技能，又具备更新知识、不断提高技能的可持续发展的能力。熟练的职业技能是学生未来从事某一行业工作的必备条件，而可持续发展的能力则决定了学生在行业中的发展空间。

本书从高职高专教育的培养目标出发，以全新的教学理念和教学方式介绍了现代模拟电子技术的基本理论及应用技能。

本书以语音放大器这一产品的制作过程为导向，采用基于工作过程的教学方式，遵循由浅入深、循序渐进的教育规律，将模拟电子技术与语音放大器的制作过程相结合，全书分为7个任务，分别为：常用电子器件的测试与判断、语音输入放大电路的制作、音调调整电路的制作、功率放大电路的制作、直流稳压电源的制作、正弦波信号源的制作及语音放大器的整机装调。

在编写过程中，本书力求使知识内容更贴近职业技能的需要。为增强教学效果和拓展学生的职业技能，书中引入了 Multisim 仿真内容，并且在每个任务中都配有教学目标、任务引入、相关知识、任务实施、任务考核、思考与训练等环节。

本书的特点是保证基础理论，注重应用技能。通过学习，学生不仅能够掌握一定的理论基础知识，为后续技能的提高奠定基础，而且还具备了一定的电路读图、电路安装、故障检修等能力。

本书由渤海船舶职业学院姜俐侠任主编，渤海船舶职业学院蔡新梅任副主编，渤海船舶职业学院李妍、张德孝参编。任务1、任务5由李妍编写，绪论、任务2由姜俐侠编写，任务3、任务6由蔡新梅编写，任务4、任务7由张德孝编写。书中的语音放大器由锦州通讯设备电子工程有限公司高级工程师李建文设计制作。

在此十分感谢锦州航星集团公司董事长刘义及锦州通讯设备电子工程有限公司总工程师贾成山给予的大力支持和帮助。

本书中有些元器件符号及电路图采用的是 Multisim 软件的符号标准，有些与国家标准不符，在此特提醒读者注意。

为方便教学，本书配有免费电子课件等，凡选用本书作为授课教材的学校，均可来电（010-88379564）或邮件（cmpqu@163.com）索取。有任何技术问题也可通过以下方式联系。

在此教材编写的过程中，尽管我们为体现高职高专教育的特色做了很多努力，但因编者水平有限，错误和不足在所难免，恳请使用多提宝贵意见和建议。

编 者

目 录

前言		教学目标	37
绪论	1	任务引入	37
任务1 常用电子器件的测试与判断	5	相关知识	38
教学目标	5	2.1 放大的概念及放大电路主要性能	
任务引入	5	指标与分类	38
相关知识	5	2.1.1 放大的概念与放大电路的主要性能指标	38
1.1 半导体的基础知识	5	2.1.2 放大电路的分类	41
1.1.1 本征半导体	5	2.2 基本放大电路	42
1.1.2 PN结	7	2.2.1 基本共发射极放大电路	42
1.2 半导体二极管	8	2.2.2 放大电路的分析方法	44
1.2.1 二极管的结构和符号	8	2.2.3 静态工作点稳定的共发射极放大电路	52
1.2.2 二极管的伏安特性	9	2.2.4 共集电极放大电路	57
1.2.3 二极管的主要参数	10	2.2.5 共基极放大电路	59
1.2.4 特殊二极管介绍	11	2.2.6 放大电路三种组态性能的比较	60
1.2.5 半导体二极管的应用	13	2.3 电流源电路	61
1.2.6 半导体器件的型号及二极管性能的判别	14	2.3.1 基本电流源电路	61
1.3 晶体管	16	2.3.2 镜像电流源	62
1.3.1 晶体管的结构和类型	16	2.3.3 以电流源为有源负载的共发射极放大电路	62
1.3.2 晶体管的电流放大作用	18	2.4 场效应晶体管放大电路	63
1.3.3 晶体管的共发射极特性曲线	19	2.4.1 共源极放大电路	64
1.3.4 晶体管的主要参数	20	2.4.2 共漏极放大电路	67
1.3.5 温度对晶体管参数的影响	21	2.5 多级放大电路	69
1.3.6 选择晶体管的注意事项	22	2.5.1 多级放大电路的组成与耦合方式	69
1.3.7 晶体管的识别与检测	22	2.5.2 多级放大电路的分析	71
1.4 场效应晶体管	23	2.6 放大电路中的反馈	72
1.4.1 场效应晶体管的特点与分类	23	2.6.1 反馈的基本概念及判别方法	73
1.4.2 结型场效应晶体管	24	2.6.2 负反馈放大电路的四种组态	76
1.4.3 绝缘栅型场效应晶体管	27	2.6.3 负反馈放大电路的一般表达式及深度负反馈的近似估算	79
1.4.4 场效应晶体管的主要参数及注意事项	30	2.6.4 负反馈对放大电路性能的改善	82
1.4.5 场效应晶体管的识别与检测	31	2.6.5 负反馈放大电路的自激振荡及消除方法	85
1.4.6 场效应晶体管与晶体管的比较	32	任务实施	86
任务实施	32		
任务考核	34		
思考与训练	34		
任务2 语音输入放大电路的制作	37		

任务考核	89	相关知识	152
思考与训练	89	5.1 常用稳压电源的基本组成	152
任务3 音调调整电路的制作	95	5.1.1 线性直流稳压电源	152
教学目标	95	5.1.2 开关稳压电源	152
任务引入	95	5.2 单相整流电路	153
相关知识	95	5.2.1 单相半波整流电路	153
3.1 差动放大电路	96	5.2.2 单相桥式整流电路	154
3.1.1 直接耦合放大电路的零点漂移		5.3 滤波电路	155
现象	96	5.3.1 电容滤波电路	155
3.1.2 差动放大电路的组成及工作原		5.3.2 电感滤波电路	157
理	96	5.3.3 Π 型滤波电路	157
3.2 集成运算放大器	104	5.4 稳压电路	158
3.2.1 集成运算放大器的组成、符号和		5.4.1 稳压二极管稳压电路	158
特点	104	5.4.2 集成线性稳压电路	159
3.2.2 集成运算放大器的主要性能指		5.4.3 集成开关稳压电路	163
标及选择方法	106	任务实施	170
3.2.3 常用集成运算放大器芯片介绍 ..	108	任务考核	173
3.2.4 理想集成运算放大器	109	思考与训练	174
3.3 集成运算放大器的应用	111	任务6 正弦波信号源的制作	177
3.3.1 集成运算放大器的线性应用分		教学目标	177
析	111	任务引入	177
3.3.2 集成运算放大器的非线性应用		相关知识	177
分析	116	6.1 正弦波振荡的基础知识	177
任务实施	121	6.1.1 产生正弦波振荡的条件	177
任务考核	126	6.1.2 振荡电路的起振和稳幅	178
思考与训练	127	6.1.3 正弦振荡电路的组成和分析	
任务4 功率放大电路的制作	131	方法	178
教学目标	131	6.2 常用正弦波振荡电路	179
任务引入	131	6.2.1 RC 桥式正弦波振荡电路	179
相关知识	131	6.2.2 LC 正弦波振荡电路	179
4.1 功率放大电路的特点和分类	132	6.2.3 石英晶体正弦波振荡电路	181
4.2 常用功率放大电路	133	任务实施	183
4.2.1 无输出电容功率放大电路	133	任务考核	184
4.2.2 无输出变压器功率放大电路	138	思考与训练	185
4.2.3 准互补 OCL 电路	141	任务7 语音放大器的整机装调	188
4.3 集成功率放大器	142	教学目标	188
任务实施	147	任务引入	188
任务考核	148	相关知识	188
思考与训练	149	7.1 电子电路识图	188
任务5 直流稳压电源的制作	151	7.1.1 识图的思路 and 步骤	188
教学目标	151	7.1.2 电路图的种类	189
任务引入	151	7.2 识图举例	190
		任务实施	193

VI

任务考核	199	附录 B Multisim 简介	202
思考与训练	199	附录 C 本书常用符号说明	212
附录	201	思考与训练部分答案	214
附录 A 常用半导体器件的型号和主要 参数	201	参考文献	221

绪 论

电子技术是在 19 世纪末发展起来的,至今已有一百多年的历史,随着电子技术的广泛应用,它已从根本上改变了世界的面貌,成为人类探索宏观世界和微观世界的技术基础。

1. 电子技术的发展史

自 1906 年第一只电子器件诞生以来,电子技术的发展经历了电子管、晶体管和集成电路三个发展阶段:

(1) 电子管阶段 电子管阶段是从 1905 年到 1948 年,以电子管为标志。在这一阶段诞生了无线电广播,使通信产业得到了发展。此阶段的标志性产品是 1946 年美国研制成功的世界上第一台电子计算机——ENIAC。这台计算机使用了 18800 个电子管,占地 170m^2 ,重达 30t,耗电 140kW,价格 40 多万美元,是一个价格昂贵、耗电量大的“庞然大物”。由于它采用了电子线路来执行算术运算、逻辑运算和信息存储,从而大大提高了运算速度。ENIAC 每秒可进行 5000 次加法和减法运算,它最初被专门用于弹道运算,后来经过多次改进而成为能进行各种科学计算的通用电子计算机。

(2) 晶体管阶段 晶体管阶段是从 1948 年到 1958 年,以晶体管为标志。1948 年,第一只半导体晶体管的问世,标志着电子技术的发展进入第二阶段。它以小巧、轻便、省电、寿命长等特点,被很快应用,在很大范围内取代了电子管。半导体进入电子领域,促进了广播电视和通信产业的高速发展,使得计算机小型化成为现实,实现了人造地球卫星的升空,预示了宇宙空间的探索即将开始,同时电子产品也逐渐由科研和军用领域向民用领域普及。

(3) 集成电路(IC)阶段 集成电路阶段从 1958 年开始,以集成电路为标志。1958 年,美国德克萨斯仪器公司和仙童公司研制成了第一个集成电路,它把许多晶体管等电子元器件集成在一块硅芯片上,使电子产品向更小型化发展。集成电路问世以来,其集成度(单片集成电路上所集成的元器件数目)跨越了小、中、大、超大、特大、巨大规模几个阶段。

1962 年,集成度为 12 个晶体管的小规模集成电路(SSI)问世。

1966 年,集成度为 100 ~ 1000 个晶体管的中规模集成电路(MSI)问世。

1971 年,英特尔公司推出 1KB 动态随机存储器(DRAM),标志着集成度为 1000 ~ 10 万个晶体管的大规模集成电路(LSI)出现。

1977 年,在 30mm^2 的硅晶片上集成 15 万个晶体管的超大规模集成电路(VLSI)研制成功,标志着电子技术从此迈入了微电子时代。

1993 年,随着集成了 1000 万个晶体管的 16MB Flash 和 256MB DRAM 研制成功,电子技术进入了特大规模集成电路(ULSI)时代。

1994 年,由于集成 1 亿个元器件的 1GB DRAM 研制成功,电子技术进入巨大规模集成电路(GSI)时代。

2010 年 1 月 8 日,英特尔公司推出了采用 32nm 制造工艺的全新的酷睿 i7/i5/i3 处理器,其线宽(集成电路内部晶体管之间连线的线宽)仅为 32nm,实现了前所未有的高集成度与先进性能。

集成电路制造技术的发展日新月异，它们构成了现代数字系统的基石，使电子产品向着小体积、高效能、低消耗、高精度、高稳定、智能化的方向发展。

我国的电子工业在建国前基本上是空白，建国后在一批归国科学家的引领下，于1956年自主生产出第一只半导体晶体管，1965年生产出第一块集成电路。2009年，我国首台千万亿次超级计算机系统“天河一号”研制成功，成为继美国之后世界上第二个能够研制千万亿次超级计算机的国家，这标志着我国电子技术的发展已进入世界前列。尽管如此，我国在电子核心元器件的生产和高级电子产品的生产等方面，与发达国家相比，还有着较大的差距。

2. 模拟电子技术研究的对象

电子技术的知识范围很广，有许多分支，模拟电子技术是电子技术的一个分支。

电子技术是研究电子器件、电子电路和电子系统及其应用的科学技术。

(1) 电子器件 电子器件是指电真空器件、半导体器件和集成电路等。

电真空器件是以电子在高度真空中运动为工作基础的器件。如电子管、示波器、显像管、雷达荧光屏和大功率发射管等。

半导体器件是以带电粒子（电子和空穴）在半导体中运动为工作基础的器件。如半导体二极管、晶体管、场效应晶体管等。

集成电路是把若干个元器件及电路用集成化工艺制作在很小的芯片上，使其成为一个不可分割的“整体电路”。

(2) 电子电路 电子电路是把电子元器件按不同的要求进行一定方式的连接，以实现预定功能，这种元器件的连接便构成了电子电路。如果按电路处理的信号不同来划分，电子电路可分为模拟电子电路和数字电子电路。

(3) 电子系统 电子系统是指有若干相互连接、相互作用的基本电子电路组成的具有特定功能的电路装置。电子系统有大有小，大到航天飞机的测控系统，小到一个电子门铃。单个芯片内可以集成许多种不同类型的电路，这些不同的电路可相互连接制成一个单片电子系统。

模拟电子技术研究的是基本半导体器件的性能、模拟电子电路及其应用的问题。它是以半导体二极管、晶体管和场效应晶体管为基本电子器件，研究由这些电子器件等构成的电子电路对模拟信号进行放大、传输、转换及控制的问题。可见，模拟电子电路是处理模拟信号的电路。

模拟信号是指连续变化的物理量，其信号的幅度、频率、相位在给定的时间范围内均随时间作连续变化，如温度、压力、转速、声音及图像信号等。

3. 模拟电子技术的应用

模拟电子技术在现代国防建设、科学研究、工农业生产、医疗、通信及文化生活等各个领域得到了极为广泛的应用，并起着巨大的作用。特别是各个领域的自动化控制中，需要测量、控制和传输的信息，绝大部分都是模拟信号，都要通过模拟电路来实现。当今人们生活在一个电子世界中，从机器人、航天飞机、宇宙探测仪到工农业生产中的自动控制装置、人们生活中的彩电、收音机、语音放大器等，模拟电子技术已无处不在。

本书以实际生产中的产品——语音放大器为导向，将语音放大器制作这一具体项目，分成7个任务，按照项目化教学方式，结合实际电路介绍模拟电子技术的基本概念、基本原理、

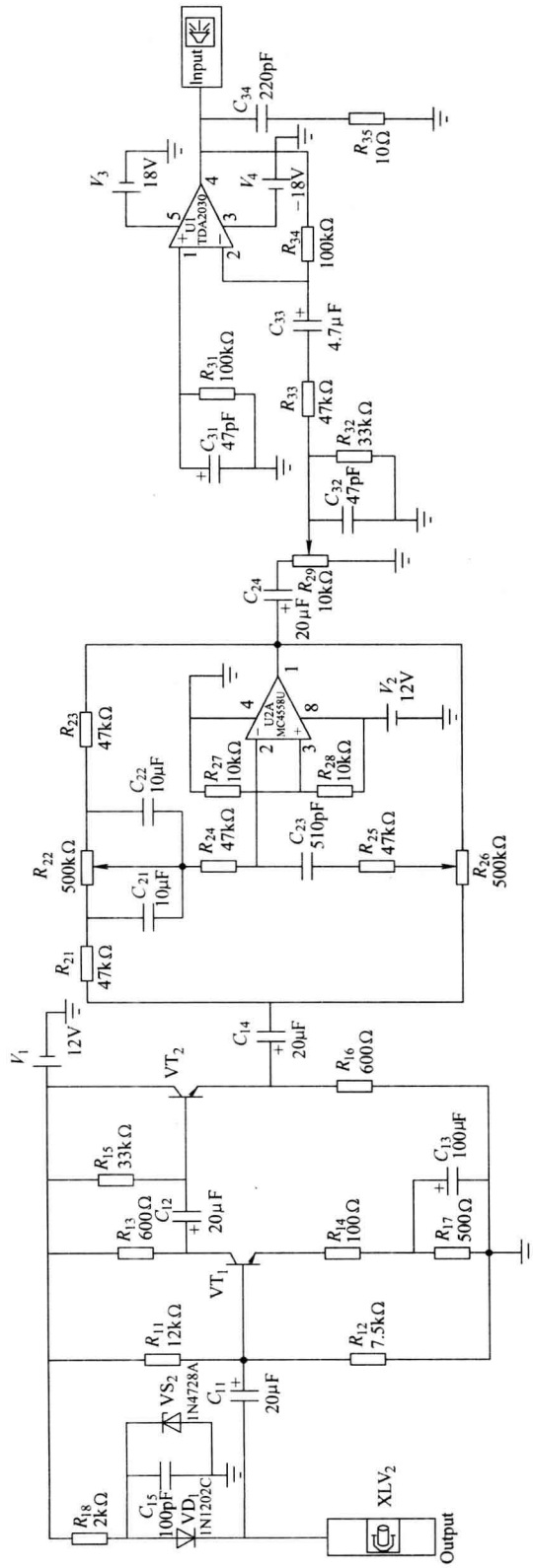


图 0-1 语音放大器原理电路图

基本分析方法，并运用所学的理论知识对语音放大器进行原理分析、组装、调试。图 0-1 所示为语音放大器的原理图，图 0-2 所示为语音放大器的流程框图。

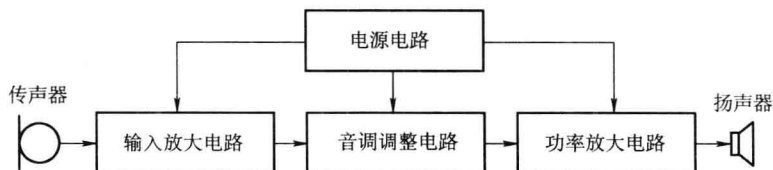


图 0-2 语音放大器流程框图

4. 电子技术的发展方向

电子技术的发展，要求电子器件及电子系统更小、更快、更冷（单个器件的功耗要小）。

科学家们在研究物质构成的过程中，发现用纳米技术（指在 $0.1 \sim 100\text{nm}$ 的尺度里，研究电子、原子和分子内的运动规律和特性）制造出的电子器件，其性能大大优于传统的半导体器件，纳米电子器件具有更高的响应速度和更低的功耗，从根本上解决日益严重的功耗、速度问题。由于器件尺度为纳米级，集成度也大幅度提高，同时还具有器件结构简单、可靠性高、成本低等诸多优点。因此，目前国际各科技大国和大型电子信息技术公司都纷纷将科研目光投向纳米电子领域，可以说未来的电子技术是纳米电子技术。

我国开始研发纳米技术在时间上几乎与世界先进水平同步，个别方面走在世界前沿，例如纳米材料，但科技研究在总体上与发达国家有不小的差距。目前国际上采用 90nm 技术已是主流，还有很多项目已采用了 65nm 、 45nm 技术，英特尔公司率先在酷睿 i7/i5/i3 处理器中引入了 32nm 技术。我国的制造企业虽然已经具有 45nm 技术，但目前大量的制造企业还停留在 90nm 或 130nm 的技术平台上进行产品生产， 90nm 和 65nm 的项目非常少。

缩小与发达国家差距，赶超世界先进水平，把中国的电子行业做大做强，是历史赋予我们年轻一代的光荣使命。

任务1 常用电子器件的测试与判断

●教学目标

- 1) 掌握半导体二极管、晶体管及场效应晶体管的基本特性、主要参数及电路符号，了解它们的主要应用。
- 2) 能够用万用表检测半导体二极管、晶体管及场效应晶体管等器件的极性及质量好坏，并能正确使用半导体二极管、晶体管及场效应晶体管。

●任务引入

半导体分立器件是构成电子电路的核心器件，它们所用的材料是经过特殊加工且性能可控的半导体材料。语音放大器是由许多电子元器件构成的，如二极管、晶体管、电阻及电容等。因此应掌握常用电子器件的结构、原理及识别方法。

●相关知识

本任务首先从半导体的基础知识入手，由 PN 结的形成到 PN 结的特点，再由二极管、晶体管及场效应晶体管的导电特性到它们的正确使用，带你走进多彩的电子世界。

相关内容有：

- 1) 半导体材料的特点。
- 2) 半导体二极管、晶体管及场效应晶体管的结构、基本特性、主要参数及应用。
- 3) 半导体二极管、晶体管及场效应晶体管的检测方法。

1.1 半导体的基础知识

自然界中的物质，按其导电能力可分为导体、半导体和绝缘体。金、银、铜、铝等金属材料是良导体；塑料、陶瓷、橡胶等材料是绝缘体，这些材料在电力系统中都得到了广泛的应用；还有一些物质如硅、锗等，它们的导电能力介于导体和绝缘体之间，被称为半导体。20 世纪 40 年代，科学家们在实验中发现半导体材料具有一些特殊的性能，并制造出了性能优良的半导体器件，从而引发了电子技术的革命。

1.1.1 本征半导体

纯净的具有晶体结构的半导体被称为本征半导体。本征半导体需要用复杂的工艺和技术才能制造出来。半导体器件的制造首先要有本征半导体，目前用于制造半导体器件的材料有

硅 (Si)、锗 (Ge)、砷化镓 (GaAs)、碳化硅 (SiC) 和磷化铟 (InP) 等, 其中以硅和锗最为常用。硅和锗都是四价元素。

1. 本征半导体的晶体结构

将纯净的半导体经过一定的工艺过程制成单晶体, 即为本征半导体。晶体中的原子在空间形成排列整齐的点阵, 称为晶格。由于相邻原子间的距离很小, 因此, 相邻的两个原子的一对最外层电子 (即价电子) 不但各自围绕自身所属的原子核运动, 而且出现在相邻原子所属的轨道上, 成为共用电子, 这样的组合称为共价键结构, 如图 1-1 所示。图中标有 “+4” 的圆圈表示除价电子外的正离子。

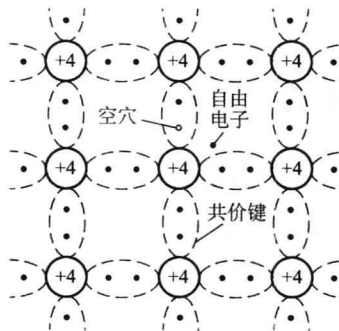


图 1-1 本征半导体结构

2. 本征半导体中的两种载流子

晶体中的共价键具有很强的结合力, 在常温下, 本征半导体中有极少数的价电子由于热运动 (热激发) 获得足够的能量, 从而挣脱共价键的束缚变成自由电子。与此同时, 失去价电子的硅或锗原子在该共价键上留下了一个空位, 这个空位称为空穴。原子因失掉一个价电子而带正电, 或者说空穴带正电。由于本征硅或锗每产生一个自由电子必然会有一个空穴出现, 即电子与空穴成对出现, 所以称为电子空穴对, 如图 1-1 所示。在常温下, 本征半导体内产生的电子空穴对数目是很少的。当本征半导体处在外界电场作用下, 一方面其内部自由电子逆外电场方向定向运动, 形成电场作用下的漂移电子电流; 另一方面由于空穴的存在, 价电子将按一定的方向依次填补空穴, 也就相当于空穴顺外电场方向定向运动, 形成电场作用下的漂移空穴电流。自由电子带负电荷, 空穴带正电荷, 它们都对形成电流做出贡献, 因此本征半导体中有两种载流子, 即自由电子和空穴。本征半导体在外电场作用下, 其电流为电子流与空穴流之和。

3. 本征半导体的热敏特性和光敏特性

实验发现, 本征半导体受热或光照后其导电能力大大增强。当温度升高或光照增强时, 本征半导体内原子运动加剧, 有较多的电子获得能量成为自由电子, 即电子空穴对增多, 所以本征半导体中电子空穴对的数目与温度或光照有密切关系。温度越高或光照越强, 本征半导体内载流子数目越多, 导电性能越强, 这就是本征半导体的热敏特性和光敏特性。利用这种特性就可以做成各种热敏器件和光敏器件, 在自动控制系统中有广泛的应用。

4. 本征半导体的掺杂特性

在本征半导体中掺入少量合适的杂质元素, 便可得到杂质半导体。按掺入的杂质元素不同, 可形成 N 型半导体和 P 型半导体。控制杂质元素的浓度, 就可控制杂质半导体的导电性能。例如, 在硅本征半导体中掺入百万分之一的其他微量元素, 它的导电能力就会增强一百万倍。

(1) P 型半导体 如果在本征半导体中掺入微量三价元素, 如硼 (B)、铟 (In) 等, 就形成了 P 型半导体。如在硅本征半导体中掺入三价元素硼 (B), 由于最外层有 3 个价电子, 所以当它们与周围四个硅原子形成共价键时, 就产生一个空位, 在室温或其他能量激发下, 与硼原子相邻的硅原子共价键上的电子就可能填补这些空位, 从而在电子原来的位置上形成带正电的空穴, 硼原子本身则因获得电子而成为不能移动的杂质负离子, 如图 1-2 所

示。

在 P 型半导体中，空穴是多数载流子，简称“多子”，电子是少数载流子，简称“少子”。但整个 P 型半导体是呈现电中性的。P 型半导体在外界电场作用下，空穴电流远大于电子电流。P 型半导体是以空穴导电为主的半导体，所以它又被称为空穴型半导体。

(2) N 型半导体 如果在本征半导体中掺入微量五价元素，如磷 (P)、砷 (As) 等，其中杂质元素的四个价电子与周围的四个半导体原子形成共价键，第五个价电子很容易脱离原子的束缚成为自由电子，因此在半导体内会产生许多自由电子，这种半导体叫做 N 型半导体。

在 N 型半导体中，自由电子数远大于空穴数，所以 N 型半导体的多子是自由电子，少子是空穴。但整个 N 型半导体是呈现电中性的。N 型半导体在外界电场作用下，电子电流远大于空穴电流。N 型半导体是以电子导电为主的半导体，所以它又被称为电子型半导体。

半导体中多子的浓度取决于掺入杂质的多少，少子的浓度与温度有密切的关系。

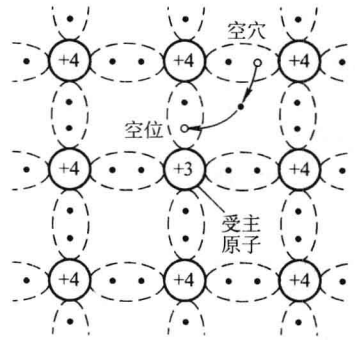


图 1-2 P 型半导体

1.1.2 PN 结

单纯的一块 P 型半导体或 N 型半导体，只能作为一个电阻元件。但是如果把 P 型半导体和 N 型半导体通过一定方法结合起来就形成了 PN 结。PN 结是构成半导体二极管、晶体管、晶闸管及集成运算放大器等众多半导体器件的基础。

1. PN 结的形成

在一块完整的本征硅（或锗）片上，用不同的掺杂工艺使其一边形成 N 型半导体，另一边形成 P 型半导体，在这两种杂质半导体的交界面附近就会形成一个具有特殊性质的薄层，这个特殊的薄层就是 PN 结。

PN 结的形成过程是：由于 P 区与 N 区之间存在着载流子浓度的显著差异，即 P 区空穴多、电子少，N 区电子多、空穴少，于是在 P 区与 N 区的交界面处发生载流子的扩散运动，如图 1-3a 所示。所谓扩散运动，就是因浓度差而引起载流子从浓度高的区域向浓度低的区域运动。

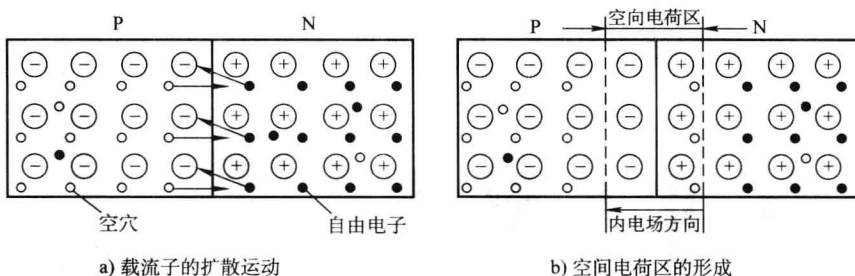


图 1-3 PN 结的形成

扩散的结果：交界面附近 P 区因空穴减少而呈现负离子区，N 区因电子减少而呈现正离子区。这样，在交界面上出现了由正负离子构成的空间电荷区，从而形成内电场，如图 1-3

b 所示。随着扩散运动的进行,空间电荷区加宽,内电场增强,其方向由 N 区指向 P 区,正好阻止扩散运动的进行,同时在内电场作用下,空穴从 N 区向 P 区运动,而自由电子从 P 区向 N 区运动。这种在电场力作用下,载流子的运动称为漂移运动。当参与扩散运动的多子数目等于参与漂移运动的少子数目时,达到了动态平衡,形成 PN 结。

2. PN 结的导电特性

实验发现,PN 结在外加电压作用下,形成了电流。随外加电压的极性不同,流过 PN 结的电流大小有极大差别。

(1) PN 结加正向电压 如图 1-4a 所示, P 区接高电位, N 区接低电位,这种接法叫正向偏置,形成的电流叫正向电流。当外加正向偏置电压稍微增加,则正向电流便迅速上升,PN 结呈现的电阻很小,表现为导通状态。

(2) PN 结加反向偏置电压 如图 1-4b 所示, P 区接低电位, N 区接高电位,这种接法叫反向偏置,形成的电流叫反向电流。当温度一定时,反向电流几乎不随外加反向偏置电压的变化而变化,所以又称反向饱和电流。反向饱和电流受温度的影响很大,但由于反向电流的值很小,与正向电流相比,一般可以忽略,所以 PN 结反向偏置时,处于截止状态,呈现的电阻很大。

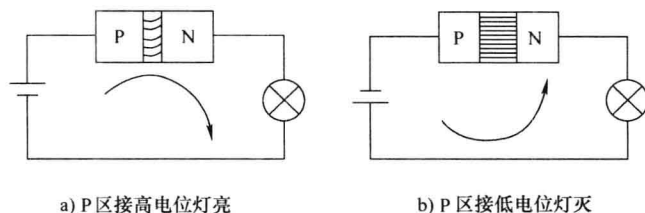


图 1-4 PN 结的单向导电性

结论: PN 结正偏时导通, PN 结反偏时截止,所以 PN 结具有单向导电性。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构和符号

在 PN 结的两端引出金属电极,外加玻璃、金属或用塑料封装,就做成了半导体二极管。由于用途不同,二极管的外形各异,几种常见的二极管外形如图 1-5 所示。

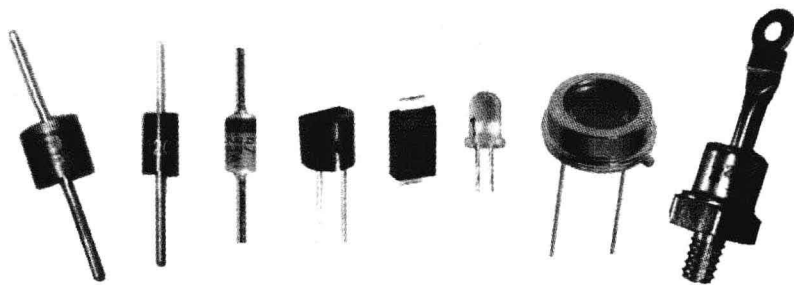


图 1-5 常见二极管的外形

二极管按 PN 结形成的制造工艺方式,可分为点接触型、面接触型和平面型等。点接触型二极管 PN 结的接触面积小,不能通过很大的正向电流和承受较高的反向电压,但它的高频性能好,工作频率可达 100MHz 以上,适宜于在高频检波电路和小功率电路中使用。面接触型二极管 PN 结的接触面积大,可以通过较大电流,能承受较高的反向电压,适宜于在整流电路中使用。平面型二极管是采用扩散法制成的,适宜用作大功率开关管,在数字电路中有广泛应用。图 1-6a、b、c 是二极管的结构示意图,符号如图 1-6d 所示。

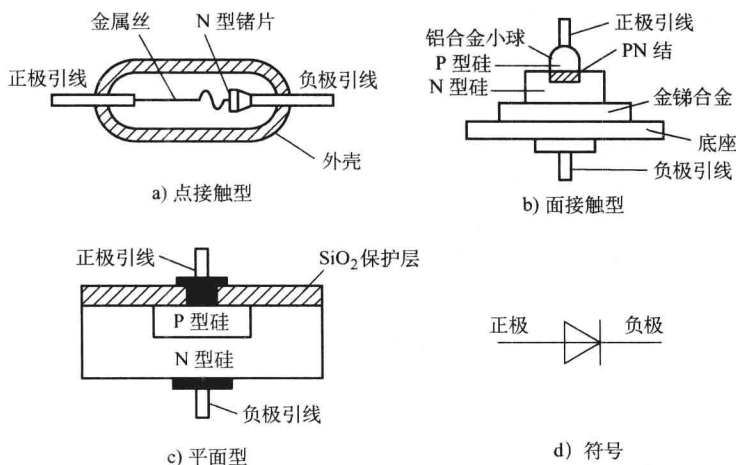


图 1-6 二极管的结构及符号

二极管有两个电极,由 P 区引出的电极是正极,由 N 区引出的电极是负极。符号中三角箭头方向表示正向电流的方向,正向电流只能从二极管的正极流入,从负极流出。二极管的文字符号用 VD 表示。

1.2.2 二极管的伏安特性

1. 二极管的伏安特性曲线

二极管的伏安特性就是流过二极管的电流 I 与加在二极管两端的电压 U 之间的关系曲线。图 1-7 所示为硅和锗二极管的伏安特性曲线。

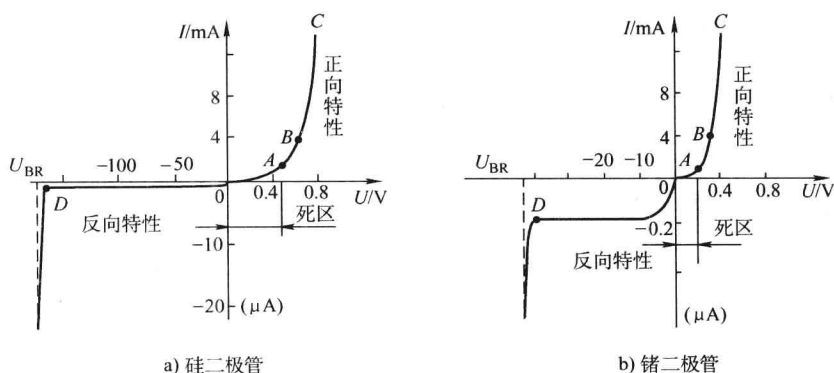


图 1-7 二极管的伏安特性曲线

(1) 正向特性 正向特性是指二极管加正向电压时的电流—电压关系。

死区：图中 OA 段，当外加正向电压较小时，正向电流非常小，近似为零。在这个区域内二极管实际上还没有导通，二极管呈现的电阻很大，故该区域常称为“死区”。硅二极管的死区电压约为 0.5V ，锗管的死区电压约为 0.1V 。

正向导通区：过 A 点后，当外加正向电压超过死区电压后，正向电流开始增加，但电流与电压不成比例。当正向电压超过 B 点，即大于 0.6V 以后（对于锗二极管，此值约为 0.2V ），正向电流随正向电压增加而急速增大，基本上是直线关系。这时二极管呈现的电阻很小，可以认为二极管是处于充分导通状态。在该区域内，硅二极管的导通压降约为 0.7V ，锗二极管的导通压降约为 0.3V 。但是流过二极管的正向电流需要加以限制，不能超过规定值，否则会使 PN 结过热而烧坏二极管。

(2) 反向特性 反向特性是指二极管加反向电压时的电流—电压关系。

反向截止区：图中 OD 段，在所加反向电压下，反向电流的值很小，且几乎不随电压的增加而增大，此电流值被叫做反向饱和电流。此时二极管呈现很高的电阻，近似处于截止状态。硅管的反向电流比锗管的反向电流小，约在 $1\mu\text{A}$ 以下，锗管的反向电流达几十微安甚至几毫安以上。这也是现在硅管应用比较多的原因之一。

反向击穿区：过 D 点以后，反向电压稍有增大，反向电流就急剧增大，这种现象称为反向击穿。二极管发生反向击穿时所加的电压叫做反向击穿电压。

二极管反向击穿分为电击穿和热击穿，反向击穿并不一定意味着器件完全损坏。如果是电击穿，则外电场撤消后器件能够恢复正常；如果是热击穿，则意味着器件损坏，不能再次使用。一般的二极管是不允许工作在反向击穿区的，因为这将导致 PN 结的反向导通而失去单向导电的特性。

综上所述，二极管的伏安特性是非线性的，因此二极管是一种非线性器件。在外加电压取不同值时，就可以使二极管工作在不同的区域，从而充分发挥二极管的作用。

在实际工程估算中，若二极管的正向导通电压比外加电压小许多时（一般按 10 倍来衡量），常可忽略不计，并将此时的二极管称为理想二极管。

2. 温度对二极管特性的影响

实验发现，二极管对温度很敏感，随着温度升高，二极管的正向压降将减小，即二极管正向压降有负的温度系数，约为 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ ；二极管的反向饱和电流随温度的升高而增加，温度每升高 10°C ，二极管的反向电流约增加一倍。实验还发现，二极管的反向击穿电压随着温度升高而降低。二极管的温度特性对电路的稳定是不利的，在实际应用中要加以抑制。但人们却可以利用二极管的温度特性，对温度的变化进行检测，从而实现温度的自动控制。

1.2.3 二极管的主要参数

在实际应用中，常用二极管的参数来定量描述二极管在某方面的性能。二极管的主要参数有：

1. 最大整流电流 I_F

最大整流电流 I_F 是指二极管长期工作时允许通过的最大正向直流电流。 I_F 与二极管的材料、面积及散热条件有关。点接触型二极管的 I_F 较小，而面接触型二极管的 I_F 较大。在