



教育部高职高专规划教材

模拟电子技术

● 孙建设 主编
张惠敏 主审



化学工业出版社
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

模拟电子技术

孙建设	主 编
李思政	副主编
张惠敏	主 审

化学工业出版社
教材出版中心
· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术/孙建设主编. —北京: 化学工业出版社, 2002. 6
教育部高职高专规划教材
ISBN 7-5025-3871-2

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 036634 号

教育部高职高专规划教材

模拟电子技术

孙建设 主 编

李思政 副主编

张惠敏 主 审

责任编辑: 张建茹

责任校对: 陶燕华

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 16 1/4 字数 405 千字

2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3871-2/G · 1026

定 价: 26.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分吸取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001年4月3日

前 言

为贯彻《教育部关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》(教高[2000]2号)有关精神,积极支持教育部面向21世纪高职高专教材建设,在教育部领导直接关怀下,全国高等职业院校协会专门课开发指导委员会确定了编写电子类专业的10门主干课程(《电路分析》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》、《电子技术实训》、《高频电子线路》、《电子测量与仪器》、《电视接收技术》、《电子设计自动化(EDA)技术》、《单片机应用技术》和《C语言》)供电子技术应用、应用电子技术、电子工程、通信、电子设备制造与维修等相关专业使用。

本套教材紧密结合高职高专教育特点,主动适应社会实际需要,突出应用性、针对性,加强实践能力的培养。内容叙述力求深入浅出,将知识点与能力点有机结合,注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力;内容编排力求简洁明快、形式新颖、目标明确,利于促进学生的求知欲和学习主动性。

本教材在理论分析上力求简单明了,配合举例内容,突出实用性的特点,编入技能训练内容。还介绍了电子仿真软件EWB,便于利用计算机进行演示教学。在格式编排上力求有新颖性,适当插入一些有一定思考意义、启发和提示性的指导内容,并在书中加入一些科技短文——科技花絮,以活跃教材内容,激发青少年朋友们对科学技术的兴趣,增添探索知识的动力。同时也启发读者在享受前人科技成果的同时,更要学习前人对科学孜孜不倦的进取精神。

本教材推荐学时102左右,其中技能训练内容各校可根据具体情况自行增减。大型作业或演练也由各校自定。书中带“*”号内容为参考选修内容。

本书由孙建设任主编,张惠敏任主审,李思政任副主编,参编的所有人员及内容如下。

孙建设编写绪论,第三章的前五节及第八节、第十节、第十一节,第四章的前六节,第五章的第七节,科技花絮1、4、5、6、7、8、11及对应内容的习题,并统一协调全书内容风格;李思政编写第一章前七节,科技花絮2及习题;王永红编写第二章前十一节,科技花絮3及习题;管俊洛编写第三章的第六节、第七节、第九节及对应内容的习题;首珩编写第五章的前六节及习题;李炜恒编写第六章的前六节及习题;刘素芳编写EWB技能训练一至四及科技花絮9;张延编写EWB技能训练五至七及科技花絮10。

随着社会的发展,电子技术的应用越来越广泛,教材内容也将不断改进,编写组全体成员诚恳欢迎社会各界多提改进意见,以便今后修改和完善,共同促进高职高专教育的发展。

本书编写过程中得到了教育部高等教育司领导及化工出版社领导的热情支持和帮助,各参编学院的领导和同行们都给予了极大的关怀和鼓励,在此表示衷心感谢。

编者

2002.3

内 容 提 要

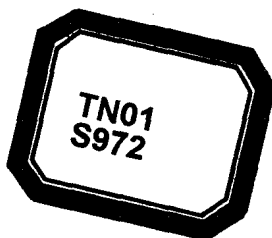
本书共分六章。主要内容为电子技术基础知识、基本放大电路、线性集成电路及其应用、正弦波振荡器、可控整流电路、电路仿真分析及自动设计软件 EWB 的应用等内容。参考学时为 102 学时。

本书结合高职高专的教学特点, 整体内容力求简明易懂, 同时尽量增加学习乐趣和知识面, 并广泛结合实际应用, 配以技能训练, 深入浅出, 既适合教学又适合自学。

本书可作为高职高专学校理工类专业的教学用书, 也可供各类成人高校及中专学校选用, 还可作为各级工程技术人员的参考用书。



A0979186



目 录

绪论	1
第一章 电子技术基础知识	4
第一节 半导体和 PN 结	4
第二节 二极管及其应用	6
科技花絮 1 奥妙的电子技术传奇 1	11
第三节 三极管	13
第四节 光电子器件	19
第五节 场效应管	21
第六节 常用晶体管手册	24
第七节 技能训练一	26
第八节 EWB 技能训练一	28
本章小结	38
科技花絮 2 诱人的纳米科技	39
思考题与习题	40
第二章 基本放大电路	42
第一节 共发射极单管放大电路	42
第二节 图解分析法	47
第三节 微变等效电路分析法	50
第四节 静态工作点的稳定措施	56
第五节 共集电极放大电路	60
第六节 共基极放大电路	62
科技花絮 3 防不胜防的声波武器	66
第七节 多级放大电路	67
第八节 放大电路的频率特性	71
第九节 基本功率放大电路	73
第十节 实用举例	79
第十一节 技能训练二	82
第十二节 EWB 技能训练二	85
本章小结	90
科技花絮 4 奥妙的电子技术传奇 2	91
思考题与习题	92
第三章 线性集成电路及其应用	99
第一节 差动放大电路	99
第二节 集成运算放大器电路简介	109
第三节 反馈的概念与分类	112
第四节 反馈的判别及电路分析	114
第五节 负反馈在放大电路中的应用	118
科技花絮 5 奥妙的电子技术传奇 3	124

第六节 基本运算电路	125
第七节 运算放大电路在信号处理方面的应用	131
第八节 有源滤波器	138
第九节 集成功率放大器	140
第十节 技能训练三	143
第十一节 技能训练四	146
第十二节 EWB 技能训练三	149
本章小结	152
科技花絮 6 谈吴承恩的西游记与爱因斯坦的相对论 (1)	152
思考题与习题	154
第四章 正弦波振荡器	160
第一节 概述	160
第二节 RC 正弦波振荡器	162
第三节 LC 正弦波振荡电路	164
科技花絮 7 谈吴承恩的西游记与爱因斯坦的相对论 (2)	173
第四节 石英晶体振荡器	174
第五节 振荡器实用举例	177
第六节 技能训练五	180
第七节 EWB 技能训练四	182
本章小结	186
科技花絮 8 共振现象趣闻	186
思考题与习题	187
第五章 直流稳压电源	190
第一节 直流电源的组成	190
第二节 整流与滤波电路	193
第三节 直流稳压电路	199
科技花絮 9 微电子技术与光电子集成技术	201
第四节 串联型稳压电路	202
第五节 三端式集成稳压器	206
第六节 开关电源	210
第七节 技能训练六	212
第八节 EWB 技能训练五	214
本章小结	217
科技花絮 10 美丽的数字	217

思考题与习题	218	第六节 技能训练七	240
第六章 可控整流电路	220	第七节 EWB 技能训练六	242
第一节 晶闸管	220	第八节 EWB 技能训练七	245
第二节 单相可控整流电路	225	本章小结	249
第三节 单结晶体管触发电路	229	科技花絮 11 哥伦布当过上帝	250
第四节 可控整流电路实用举例	234	思考题与习题	251
* 第五节 晶闸管变频电路	236	参考文献	253

绪 论

电子技术是当今世界科学技术领域中一颗耀眼的明星，她使整个科学技术插上了翅膀，有力地加快了世界前进的步伐。电子技术几乎随处伴随着人们，使人们对未来充满了幻想和希冀。在本书的开始，先一起来看一看电子技术对人类社会的影响，回顾一下她的发展历程，并了解一下本书的研究对象及主要内容。

一、电子技术对人类的影响

19 世纪末期，著名的科学家麦克斯韦、赫兹和汤姆生相继发现了电磁波和电子，使得科学技术领域出现了一个极具生命力的新兴分支——电子技术。电子技术的出现使人类许多远古的幻想和神话都变成了现实，她创造了一个又一个的奇迹。现代的电视机、收音机、手机、雷达等，都是古代神话中的故事。“嫦娥奔月”，是千古以来人类对月球可望而不可及的憧憬，但 1969 年人类就圆了这个梦。网络技术使地球成了地球村，人类的活动范围已经开始像神仙一样向太空延伸。这都是电子技术显现的无边的威力。

电子技术直接而现实地影响着每个人的生活，在 20 世纪的 70 年代，当时许多人都向往自己能拥有一台收音机。因为它是富有和时髦的象征。到了 20 世纪 80 年代初期，城市中录音机及黑白电视机成了时尚，进入 80 年代中期，18in (1in=2.54cm) 的彩色电视机还只是部分较富有的家庭时兴的家电。跨入 90 年代后，彩电才逐渐变为普通家庭的平常电器，而电脑已开始悄悄进入家庭，他们对现代人的生活有着巨大的影响。因此，人们把电视机和电脑称为 20 世纪电子技术最伟大的奇迹。

近几十年来，电子技术的发展推动了社会进步和经济发展，在政治、军事、文化、经济、医疗、工农业生产、市场营销、现代教育、现代管理等方面的应用极为广泛。如医疗设备中的 B 超、心电图机、脑电图机等，使现代医疗水平显著提高；现代工业也如虎添翼，航天航空技术更是乘上了电子技术的东风；现代国防技术无疑要靠电子技术显示威力，如导弹、雷达、坦克、潜艇、战斗机、军事联络等领域中离开了电子技术将成为聋子和瞎子，现代战争无处不闪现着电子技术的神通。未来世界中电子技术将会创造出更加惊人的奇迹。

二、电子技术的发展史

随着电子元器件的不断更新换代，电子技术的发展共经历了五次换代，即真空电子管电路→晶体管电路→中小规模集成电路→大规模集成电路→超大规模集成电路。

1904 年英国的弗来明发明了真空电子二极管，1906 年美国的德福雷斯特发明了真空电子三极管，同年，美国的费森登开始用电子管调制无线电收、发音乐和演讲系统，出现了最早的电子管收音机。电子管的外形结构主要是真空玻璃管，它们是近代电子技术的基础。目前人们只能偶尔从一些古董式的木箱结构的台式收音机中窥到其面目。不过电视机的显像管还是一种专用电子管的结构。在 20 世纪的前半叶，电子管电路独领风骚，在军事、通讯、交通等社会领域中，展现了无比的神通。1920 年美国建成了世界上第一座无线电台，1925 年，英国人贝尔德发明了电视机，1946 年在美国诞生了第一台电子管电子计算机，该机用

了 18000 多个电子管, 整机重达 30t, 功率 140kW, 运算速度仅为 5000 次/s, 且价格昂贵。

电子管缺点很多, 如体积大、工艺复杂、寿命短、不便运输等。因此电子元件的改进成为电子技术发展的必需。巴亨、肖克莱和布拉克, 这三位杰出的美国科学家在 1947 年成功地研制出了晶体三极管。晶体管是用固体的晶体材料——半导体制作, 其各种性能显然远远超过了真空玻璃管, 它使电子技术有了根本性的技术突破, 世界科学技术也随之产生了巨变。1953 年, 晶体管收音机问世, 1956 年第二代计算机——晶体管计算机诞生, 1957 年苏联采用晶体管自动控制设备, 发射了第一颗人造地球卫星。晶体管也使电视接收技术更加成熟实用, 在发达国家已经普及到家庭。

1958 年美国研制成了第一个集成电路, 它能把一个完整功能的电子电路做在一块小晶体片上, 使电子电路的体积大大缩小, 功能大大增强, 成本大大降低, 电子技术发生了又一次巨大的突破和变革。1962 年, 各种集成电路迅速发展, 1964 年出现了集成运算放大器, 同时诞生了由中小规模集成电路制造的电子计算机, 使计算机的功能、速度、体积、成本都有了重大突破。

到 20 世纪 60 年代末期, 已出现了第四代电子器件——大规模集成电路, 它可以在一块 5mm^2 左右的晶体上制造 1000 多个元件。在 1972 年诞生了用大规模集成电路制造的第四代计算机, 使得计算机进一步微型化, 并开始大量普及。

1977 年美国研制成了超大规模集成电路, 可以在 30mm^2 的硅晶体片上制造出 15 万多个晶体管, 同时日本的集成电子技术也进入了超大规模集成电路时代。由此产生了真正意义上的微型计算机, 其成本大幅下降, 开始向家庭普及。目前计算机仍在快速向前发展, 功能越来越强, 价格越来越便宜, 真可谓日新月异。

随着新兴的纳米技术的成长, 电子技术也将面临着新的突破, 目前电脑已进入全球网络化, 未来的电脑正向着更大的容量、更高的速度和智能型发展。人类所有的幻想和梦想都将随着时间的延伸而成为现实!

电子技术仅用一百年的时间就取得了无比辉煌的成果, 这本身就是一个神话般的奇迹。在 20 世纪二十年代初, 一位富于幻想的美国作家根斯巴克在其科幻小说中预言, “七百年后人们坐在家里可以观赏六公里以外的剧院演出”, 他的话当时受到了不少人的嘲笑, 许多人认为这是毫无根据的瞎想, 还有人认为这是永远不能实现的。岂料仅仅几年的功夫, 1925 年电视机就在英国诞生了, 轰动了整个英国。1931 年在伦敦大剧院用电视机实况转播了 23km 以外的赛马表演, 惊愕得人们把大剧院围得水泄不通。电视从此成为最受人类欢迎的亲密朋友。她让世界变小了, 她也使世界变得更加绚丽多彩, 电视极大程度地改变了人类的生活方式。从更深层次上讲, 远景宏大的电子技术甚至影响和改变着人类的命运 (如核武器的出现, 通讯技术的空前发达, 电子技术催化的人类基因工程等等)。她确实是神话中的神话。这怎能不令人对电子技术向往呢!

三、本课程研究的对象及内容

电子技术主要是研究怎样用电子器件构成电路去控制电子运动的规律。电子技术中主要把电子运动产生的电流和电磁波等物理量作为一种信息来进行传输和处理 (在此之前人们主要是把电磁现象作为一种能源与动力来研究, 如电机、照明、电器电路等)。而这种信息可以分为模拟信号和数字信号两大类。模拟信号是指幅度随时间连续变化的信号, 如用电压或电流的变化模拟声波的变化。数字信号是指幅度随时间不连续变化的、离散的信号, 如电报

码和用电平的高与低表示的二值逻辑信号等。最早把电流作为信息来处理的是 1844 年 5 月美国的摩尔斯发明的有线电报,他用电流分别构成点、横线和空格,组成“摩尔斯电码”,用其组合分别来表示 26 个英文字母等信息,这就是最早的数字信号,现代的数字信号仍和它类似。最早用电流产生和传输模拟信号的是 1875 年 6 月美国的贝尔发明的电话,它是直接把声音信号模拟转换成同样规律的电流信号进行传输。

根据这两类信号,电子电路也分为模拟电子电路和数字电子电路两大类(简称为模电和数电)。模拟电子电路就是用来产生、传输和处理模拟信号的,典型设备有收音机、电视机、扩音机等。数字电子电路是专门用来传输和处理数字信号以实现逻辑功能的,典型设备是电子计算机等。这两部分电路目前的结合越来越广泛。在技术上正趋向于把模拟信号数字化,以获取更好的效果。如数码相机、数码电视机等。本书研究的对象是模拟电子电路,模拟电路最主要的任务之一是对微弱的电信号进行模拟放大。本书的主要内容有半导体器件的结构与原理、基本放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大器、集成功率放大器、振荡器、直流电压源和可控整流电路等。电子技术是一门实用性很强的技术理论课,必须加强实践能力的培养。本书专门在每章配有 EWB 电子仿真实验内容,以便在多媒体教室演示和同学们在课余进行训练。本书中的硬件技能训练内容,主要作为各校的参考内容及同学们进行实践学习的资料,教学中各校可根据自己已有的实训设备安排技能训练。

当翻阅本书的内容和电路图的时候,也许会对它感到平淡无奇,就像大家看到收音机、电视机一样司空见惯。但是,回首电子技术的经历,会感到书中所学的每一个元器件、每一个电路,几乎都有着一个曲折的经历和传奇的故事,它们都对科学发展产生过巨大影响。多少科学巨人们为之付出了几年、几十年甚至更长时间的努力,这更应当激发大家学习的斗志和兴趣。因为人类的伟大就在于人类自身创造了灿烂的文化,能在大自然中用其无限的智慧不断地进行学习和创新,并且能把智慧的结晶以图书资料的方式留传下来,这就是知识积累。几千年来人类积累的智慧能量是非常巨大的,勇敢地去探索和学习是每个人光荣的使命。现在学习电子技术基础知识就好像是在前人修建的科学殿堂中参观和游览,只要多动脑筋思考,多动手操作训练,多花时间理解就肯定能学好、用好电子技术。如果能在前人的基础上有所开拓创新,有所前进,则是最大的成功。

通过对本书的学习,读者可以掌握模拟电路的基本原理和分析方法,具有设计和维护简单模拟电路的能力。

第一章 电子技术基础知识



目的与要求 实物或图片演示收音机、电视机或其他电子整机线路板，可以看到组成它们的不但有电阻、电容，还有二极管、三极管、集成块等半导体器件。在各种电子设备 (Electronic equipment) 中，其主要组成部分是电子线路 (circuits)。而电子线路中最重要的核心部分是半导体器件 (Semiconductor device)。本章主要讲解半导体二极管、三极管的特性、应用、测试以及识别方法，并介绍部分特种电子器件，如光电元器件等。

第一节 半导体和 PN 结

一、半导体 (Semiconductor)

纵观宇宙，各种物质的导电能力是互不相同的，按照导电能力的强弱，可以分为三大类。

- (1) 导体 导电能力特别强的物质。例如一般的金属、碳、电解液等。
- (2) 绝缘体 导电能力特别差，几乎不导电的物质。例如胶木、橡胶、陶瓷等。
- (3) 半导体 导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。常用的半导体材料有锗 (Ge)、硅 (Si)、砷化镓 (GaAs) 等，最常用的是锗和硅。

如果仅仅从定义上来认识和评价半导体，就无法理解半导体在现代电子技术舞台上所扮演的重要角色了。的确，正是由于不是很好的导电材料，又不是可靠的绝缘材料，所以在电工电子技术的发展史上，曾长期受到冷遇，它的“才华”一直被埋藏着。直到 1940 年美国全球联合公司研制出第一只半导体二极管，1947 年第一只半导体三极管在美国著名的贝尔实验室里诞生，人们才发现了半导体的许多奇妙而可贵的特性，显示出半导体强大的生命力。

半导体之所以应用广泛，正是由于它具有一些独特的导电特性，这些特性主要表现在其导电能力对一些因素的影响很敏感。

(1) 杂敏性 半导体对杂质很敏感。在半导体硅中只要掺入亿分之一的硼 (B)，电阻率就会下降到原来的几万分之一。

人们就用控制掺杂的方法，人为地精确地控制半导体的导电能力，制造出各种不同性能、不同用途的半导体器件。如普通半导体二极管、三极管、可控硅等。

(2) 热敏性 半导体对温度很敏感。温度每升高 10°C ，半导体的电阻率减小为原来的二分之一。这种特性对半导体器件的工作性能有许多不利的影响，但利用这一特性可制成自动控制中有用的热敏电阻，热敏电阻可以感知万分之一摄氏度的温度变化。

把热敏电阻装在机器的各个重要部位，就能集中控制和测量它们的温度。用热敏电阻制作的恒温调节器，可以把环境温度稳定在上下不超过 0.5°C 的范围。在农业上，热敏电阻能

准确地测出植物叶面的温度和土壤的温度。它还能测量辐射，几百米远人体发出的热辐射或1km外的热源都能方便地测出。

(3) 光敏性 半导体对光照很敏感。半导体受光照射时，它的电阻率会显著减小。例如，一种硫化镉(CdS)的半导体材料，在一般灯光照射下，它的电阻率是移去灯光后的几十分之一或几百分之一。

自动控制中用的光电二极管、光电三极管和光敏电阻等，就是利用这一特性制成的。

应用这些光电器件可以实现路灯、航标灯的自动控制，制成火灾报警装置，可以进行产品自动计数，实现机器设备的人身安全保护等。

半导体为什么会具有这些特性呢？根本的原因在于半导体的特殊结构及其导电特性。首先应该了解一下本征半导体。

二、本征半导体

本征半导体(Intrinsic Semiconductor)是一种完全纯净的、结构完整的半导体晶体。本征半导体又称为纯净半导体。

半导体和其他各种物质一样，是由原子组成的，但这些原子不是任意地堆在一起，而是按照一定的规律、很整齐地排列着，是一种晶体结构，如图1-1所示，所以半导体管又称为晶体管。

在电子器件中，用得最多的材料是硅和锗，由化学知识可知，它们的简化原子模型如图1-2所示。

在室温下，价电子就会获得足够的能量而挣脱共价键的束缚，成为自由电子(Free electron)，这种现象称为本征激发。这时，共价键中就留下一个空位，这个空位叫空穴(Hole)。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。

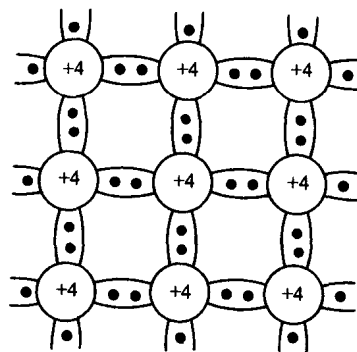


图 1-1 硅或锗晶体的共价键结构示意图

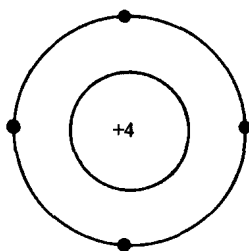


图 1-2 硅和锗的原子结构简化模型

在半导体中，有两种载流子，即空穴和自由电子。在本征半导体中，它们总是成对出现。利用杂敏特性，可以在本征半导体中掺入微量的杂质，就会使半导体的导电性能发生显著改变。下面就来研究杂质半导体。

三、杂质半导体 (Doped Semiconductor)

根据掺入杂质性质的不同，杂质半导体可分为空穴(P)型半导体和电子(N)型半导体两大类。

1. P型半导体

在硅(或锗)的晶体内掺入少量的三价元素杂质，如硼(或铟)等，因硼原子只有三个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，缺少一个电子，在晶体中便多产生了一个空穴。控制掺入杂质的多少，便可控制空穴数量。这样，空穴数就远大于自由电子数，在这种半导体中，以空穴导电为主，因而空穴为多数载流子，简称多子(Majority Carriers)；自由电子为少数载流子，简称少子(Minority Carriers)。

由于失去电子，带正电，因此就取英文单词“正”(Positive)的第一个字母“P”，把掺

入三价元素杂质的空穴型半导体，称为 P 型 (P type) 半导体。

2. N 型半导体

仿效 P 型半导体，掺入五价元素杂质，如磷、砷和锑等。由于掺入有五个价电子的杂质，所以多出了自由电子，自由电子就成为多数载流子，空穴为少数载流子。

由于得到电子，带负电，因此就取英文单词“负”(Negative)的第一个字母“N”，把掺入五价元素杂质的电子型半导体称为 N 型 (N type) 半导体。

如果把这两种杂质半导体结合到一起，会怎样呢？下面就加以说明。

四、PN 结 (PN junction) 及其特性

PN 结是半导体器件的核心。

如果在一块纯净半导体（如硅和锗等）中，通过特殊的工艺，在它的一边掺入微量的三价元素硼，形成 P 型半导体；在它的另一边掺入微量的五价元素磷，形成 N 型半导体。人们就会有一项重大的发现，在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面上，形成了一个具有特殊电性能的薄层，即空间电荷区 (Space charge region)，也就是所谓的 PN 结，如图 1-3 所示。

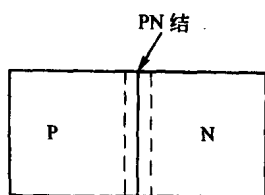


图 1-3 半导体的 PN 结

为了直观地了解 PN 结的主要特性，可以用图 1-3 加以说明。

在图 1-4 (a) 中，将 P 区接在电池的正极上，N 区通过小灯泡接在电池的负极上，可以看到小灯泡正常发光，因此称这个方向的外加电压为正向电压或正向偏置电压，简称正向偏置 (Forward bias)；图 1-4 (b) 中，将电池的正、负极反接后，小灯泡不能发光，这时 PN 结处于反向偏置 (Reverse bias)。

这个实验说明，PN 结具有单方向导电的特性，即单向导电性 (Unilateral conductivity)。

注意：单向导电性只有在外加电压时才显示出来。

半导体二极管就是由一个 PN 结构成的电子器件。在此基础上，将两个 PN 结有机地组合在一起又组成了半导体三极管；将三个 PN 结有机地组合在一起又制成了晶闸管（或可控硅）。在半导体集成电路中，利用成千上万个 PN 结构成了电阻、电容等元件以及多种类型的半导体器件。

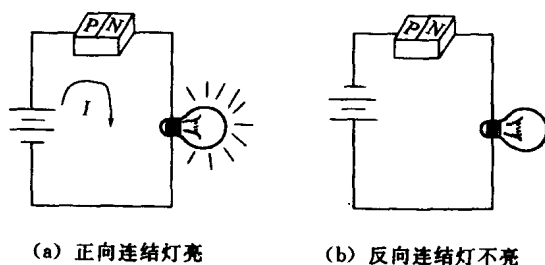


图 1-4 PN 结的单向导电性

第二节 二极管及其应用

二极管 (diode) 是由一个 PN 结构成的，所以二极管具有上述 PN 结的特性。上一节介绍了一个理想的 PN 结，但是一个实际二极管，与理想 PN 结的特性有所不同，下面将介绍实际二极管的特性。

一、二极管的分类

半导体二极管又叫晶体二极管（以下简称二极管）。二极管的电路符号如图 1-5 所示，

有三角形的一边是二极管的正极（阳极，用字母 a 表示），有短线的一边是负极（阴极，用字母 k 表示）。二极管的极性通常标示在它的封装上，有的二极管用黑色或白色色环表示它的负极端。正极与 PN 结的 P 区相连，负极与 N 区相连。根据 PN 结的单向导电性，电流只能按图 1-4 (a) 中箭头所示方向从 P 区经 PN 结流向 N 区，反方向的电流则被 PN 结截断。

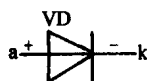


图 1-5 二极管的电路符号

国际的标法是，三角形表示 P 型，横线是 N 型。（图 1-5 中的短线仿佛在说此路不通）。

根据所用的半导体材料不同，可分为锗二极管和硅二极管。按照管芯结构不同，分类如下。

1. 点接触型二极管

点接触型二极管的触丝与半导体接触面很小，只允许通过较小的电流（几十毫安以下），由于其在高频下工作性能很好，适用于收音机中对高频信号的检波和微弱交流电的整流，如国产的锗二极管 2AP 系列、2AK 系列等。

2. 面接触型二极管

面接触型二极管 PN 结面积较大，并做成平面状，它可以通过较大的电流，适用于对电网的交流电进行整流。如国产的 2CP 系列、2CZ 系列的二极管都是面接触型的。

3. 平面型二极管

它的特点是在 PN 结表面被覆一层二氧化硅薄膜，避免 PN 结表面被水分子、气体分子以及其他离子等沾污。这种二极管的特性比较稳定可靠，多用于开关、脉冲及超高频电路中。国产 2CK 系列二极管就属于这种类型。

根据管子用途不同，可分为整流二极管、稳压二极管、开关二极管、光电二极管及发光二极管等。

二、二极管的特性

1. 正向特性

图 1-6 是二极管正向连接时的电路。二极管的正极接在高电位端，负极接在低电位端，二极管就处于导通状态（灯泡亮），如同一只接通的开关。但实际上，二极管导通后其有一定的管压降（硅管 0.6~0.7V，锗管 0.2~0.3V），因此认为它是恒定的，且不随电流的变化而变化。

当加在二极管两端的正向电压很小，正向电流微弱，二极管呈现很大的电阻，这个区域成为二极管正向特性的“死区”，只有当正向电压达到一定数值（这个数值称为“门槛电压”，锗二极管约为 0.2V，硅二极管约为 0.6V）以后，二极管才真正导通。此时，正向电流将随着正向电压的增加而急速增大，如不采取限流措施，过大的电流会使 PN 结发热，超

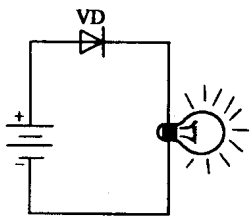


图 1-6 二极管的正向连接

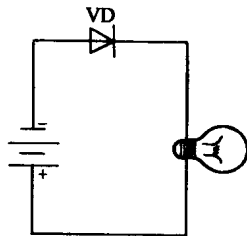


图 1-7 二极管的反向连接

过最高允许温度（锗管为 $90\sim 100^{\circ}\text{C}$ ，硅管为 $125\sim 200^{\circ}\text{C}$ ）时，二极管就会被烧坏。

2. 反向特性

图 1-7 是二极管反向连接时的电路。二极管的负极接在电路的高电位端，正极接在电路的低电位端，二极管就处于截止状态，如同一只断开的开关，电流被 PN 结所截断，灯泡不亮。二极管承受反向电压，处于截止状态时，仍然会有微弱的反向电流（通常称为反向漏电流）。反向电流虽然很小（锗二极管不超过几微安，硅二极管不超过几十纳安），却和温度有极为密切的关系，温度每升高 10°C ，反向电流约增大一倍，称为加倍“规则”。反向电流是衡量二极管质量好坏的重要参数之一，反向电流太大，二极管的单向导电性能和温度稳定性就很差，选择和使用二极管时必须特别注意。

当加在二极管两端的反向电压增加到某一数值时，反向电流会急剧增大，这种状态称为二极管的击穿。对普通二极管来说，击穿就意味着二极管丧失了单向导电特性而损坏了。

【演示】用万用表（以 FM47 型为例）判别普通二极管的极性

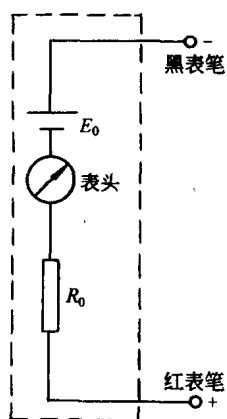


图 1-8 万用表电阻挡等效电路

判别之前，首先要了解万用表电阻挡的等效电路，如图 1-8 所示，可以利用万用表的内部电池给二极管外加正反向电压，测其正反向电阻来判别它的极性。

半导体二极管是具有明显单向导电特性或非线性伏安特性的半导体两极器件。由于 PN 结的单向导电性，其测量方法基本是一样的。

通常小功率锗二极管的正向电阻值为 $300\sim 500\Omega$ ，硅管为 $1\text{k}\Omega$ 或更大些。锗管反向电阻为几十千欧，硅管反向电阻在 $500\text{k}\Omega$ 以上（大功率二极管的数值要小得多）。正反向电阻差值越大越好。

(1) 极性的判别 根据二极管正向电阻小，反向电阻大的特点可判别二极管的极性。

将万用表拨到欧姆挡（一般用 $R\times 100$ 或 $R\times 1\text{k}$ 挡，不用 $R\times 1$ 或 $R\times 10\text{k}$ 挡，因为 $R\times 1$ 挡使用的电流太大，容易烧坏管子，而 $R\times 10\text{k}$ 挡使用的电压太高，可能击穿管子），将表笔分别与二极管的两极相连（如图 1-9 所示），测出两个阻值 R_1 、 R_2 （ $>/=/<$ ） R_0 ，在所测得阻值较小的一次，与黑表笔相接的一端为二极管的____（正极/负极），与红表笔相接的一端为二极管的____（正极/负极）。如果测得的正反向电阻均很小，说明二极管内部____（断路/短路）；如果测得的正反向电阻均很大，

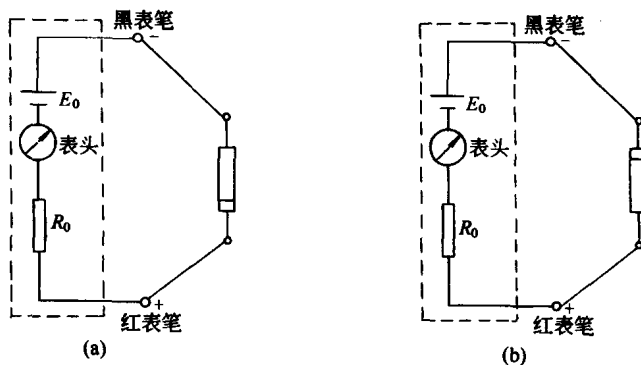


图 1-9 万用表测试二极管的正反向电阻

则说明二极管内部____（断路/短路）。在这两种情况下二极管____（正常/报废）。

任意测量两种不同类型的二极管，将有关内容填入表 1-1 中。

表 1-1 万用表检测二极管

序 号	型 号	正向电阻	反向电阻	判别极性与性能好坏
1				
2				

(2) 二极管材料的判别方法 因为硅二极管一般正向压降为 $0.6 \sim 0.7\text{V}$ ，锗二极管的正向压降为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ ，所以测量一下二极管的正向导通电压，便可判别被测二极管是硅管还是锗管。

方法 在干电池（ 1.5V ）的一端串一个电阻（约 $1\text{k}\Omega$ ），同时按极性与二极管相接（如图 1-10 所示），使二极管正向导通，这时用万用表测量二极管两端的管压降，将有关内容填入表 1-2 中。根据正向压降判别二极管的材料。

表 1-2 判别二极管的材料

序 号	型 号	正向电压降/V	结 论
1			
2			

定量的说明一个电子器件的特性，一般来说有三种方法，就是特性曲线图示法、解析式表示法以及参数表示法。这三种表示法各有优缺点，可互为补充。在这里，仅讨论特性曲线图示法和参数表示法。

三、特性曲线图示法

在《电工基础》这门课程中，曾经讨论过电阻器、电容器、电感器等元件两端的伏安关系。在这里，用同样的方法来讨论二极管两端的伏安关系。

二极管的伏安特性测量有逐点法和图示仪两种。

图 1-11 给出了两种二极管的伏安特性曲线。

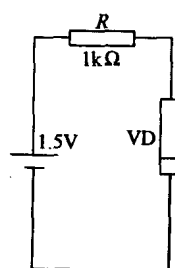
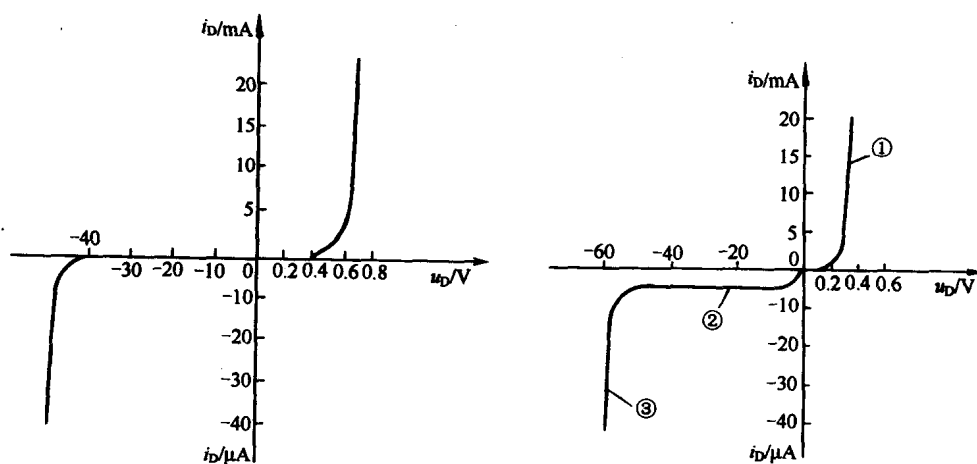


图 1-10 二极管材料的判别



(a) 硅二极管 2CP10 的伏安特性

(b) 锗二极管 2AP15 的伏安特性

图 1-11 二极管的伏-安特性曲线