



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高职高专机电类专业规划教材

MONI DIANZI JISHU JI YINGYONG

MONI DIANZI JISHU JI YINGYONG

# 模拟电子 技术及应用

第2版

■ 王成安 主编



赠电子课件



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



教育部“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育电子信息类规划教材

教育部“十一五”国家级规划教材 普通高等教育电子信息类规划教材

# 模拟电子 技术及应用

■ 主编 刘坤

第三版



人民邮电出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高职高专机电类专业规划教材

# 模拟电子技术及应用

第 2 版

主 编 王成安  
副主编 郭 辉  
参 编 王 春 王 超  
主 审 童建华



机械工业出版社

本书从高职教育的角度出发,秉承“教学工厂”的理念,以全新的角度介绍模拟电子技术的基础知识,以基础知识为引导,突出介绍模拟电子技术的新发展、新器件、新电路、新技术、新工艺,特别注重实际应用,贴近岗位技能需要。为方便教学与学生自学,在每章首写有本章导言,章末有本章小结、动手做、实用资料、自测题和练习题。

全书内容包括半导体器件及其应用、基本放大电路及其分析方法、多级放大器及其频率特性、差动放大电路与集成运算放大电路、放大电路中的反馈、集成运算放大电路及其应用、功率放大电路、信号的产生和波形变换、模拟电子技术的应用实例。

本书适用于高职高专、成教学院、技师学院及广播电视大学的电子信息类专业、应用电子技术专业以及电类其他专业作为模拟电子技术基础课教材,还可供从事电子技术的工程技术人员参考。

为方便教学,本书备有电子课件、习题解答和模拟试卷等,凡选用本书作为教材的学校均可来电索取。咨询电话:010-88379564。

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术及应用/王成安主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2009.11

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专机电类专业规划教材

ISBN 978-7-111-28656-1

I. 模... II. 王... 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(2009)第193568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:于宁 责任编辑:曹雪伟 封面设计:马精明

责任校对:纪敬 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2010年1月第2版第1次印刷

184mm×260mm·12.5印张·306千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-28656-1

定价:22.00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

销售一部:(010)68326294

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

门户网:<http://www.cmpbook.com>

教材网:<http://www.cmpedu.com>

封面防伪标均为盗版

# 前 言

《现代电子技术基础》(上、下册)是为高职高专院校的电子信息技术、应用电子技术等专业编写的教材,于2006年被评选为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。考虑到与很多院校所开设课程的名称相对应,所以此次再版,将书名改为《模拟电子技术及应用》和《数字电子技术及应用》,并且在内容方面做了比较大的修改,删掉了一些与现在高职高专教育不适应的知识,增加了近几年来电子技术的新知识、新技术和新器件,将电子技术的许多应用实例作为教学内容加以介绍和讲解。

但我们仍然要清醒地认识到,随着电子技术的飞速发展,使得将电子技术简单划分为模拟电子和数字电子两部分已无法涵盖现代电子技术所需的基础知识,也不适应高职高专教育对电子技术基础教学的要求。比如大家熟悉的时基电路555就是模拟电路与数字电路的有机结合,很难将其划分为是模拟电子还是数字电子;现在正在兴起的D类放大器,晶体管工作在开关状态,输入和输出的却是模拟信号;实际的电子电路中几乎无一不包含各种传感器器件和各种负载,而传统的电子技术基础却只讲中间的电路部分,形成有中间无首尾的状况;由于电子技术的发展非常迅速,各种新器件、新电路、新技术、新工艺如雨后春笋般涌现,电子技术基础的教材必须及时反映出这些新进展,与时俱进,才能胜任现代电子技术基础的教学任务。特别是在大规模集成电路被广泛应用的今天,电子技术正朝着专用电子集成电路(ASIC)方向、硬件和软件合为一体的电子系统(CPLD和FPGA)方向发展,以硬件电路设计为主的传统设计方法,正向着充分利用器件内部资源和外部引脚功能的设计方法转化。正是从适应高职高专教学和现代电子技术基础的实际需要出发,我们编写了这本教材,力图解决上述矛盾,反映新知识和新技术,介绍新器件和新电路,体现新思路和新方法,更好地为高职高专教育服务。

根据高等教育培养目标的要求,高职高专层次培养的人才必须具有大学专科的理论基础,并有较强的本专业职业技能。高职高专教育培养的人才面向生产第一线的技术型人才。这类人才不同于将学科体系转化为图样和设计方案的工程技术人员,而主要是如何将方案和图样转化为实物和产品的实施型高级技术人才,因此课程的教学内容必须要按照培养目标来制定。只有培养学生思考、会学习、会应用,才能使培养出的高职高专学生适应飞速发展的社会要求。

本书在力求保证基础、掌握基本概念的基础上,注重集成电路以及新器件、新电路的应用,在编写中着重于理论联系实际。我们编写的目标是:

- 1) 电子技术是一门专业基础性质的课程,既要有知识的连续性,又要有知识的先进性。纵观电子技术的发展历程,模拟电子技术是首先应该学习的内容,从高职教育的特殊性出发,在书中专门增加了模拟电子技术应用实例。考虑到直流稳压电源在电子技术中的重要性,专门为其设立了一节。模拟电子技术知识的学习要遵循循序渐进的原则,由浅入深,深入浅出,由历史到现代,使电子技术教材的内容跟上时代的发展步伐。

- 2) 在知识的讲解上,以“必需”和“够用”为原则。对典型电路进行分析时,不做过

于繁杂的理论推导；对于电子器件着重介绍其外部特性和主要参数，重点放在其使用方法和实际应用上；对分立元器件组成的电路尽可能精简，明确分立元器件为集成电路服务的方向；对精选的集成电路主要介绍最新器件的型号、特点和典型应用。

3) 从高职高专的培养目标出发，本书在内容的安排上突破了传统的顺序，以章为段，以便更好地配合教学的进度和时数；在每章的章首安排了本章导言以引导学生进入本章的学习，在章末安排有本章小结，归纳出本章的知识重点；在每章都精心设计了自测题和练习题，以方便教师和学生对本章的学习效果进行检查；更有特色的是，结合各章的知识内容，精心安排了“动手做”、“新资料”、“新技术”、“新工艺”等内容，为学生提供了花钱少、取材方便、容易制作、有实用价值的电子电路和一些不容易查找的新资料，相信会对提高学生的电子技术技能和开拓学生的视野有所帮助，为学生迈入电子世界的大门起到引路的作用。

本教材可作为高职高专、成教学院、技师学院、广播电视大学的电子信息技术专业、应用电子技术专业等电子技术基础的教材，还可供中等专业学校或普通高校本科有关专业或从事电子技术的工程人员参考。

本书由辽宁省2003年高等职业教育专业精品课主讲人——辽宁机电职业技术学院王成安教授任主编，新疆工业高等专科学校郭辉任副主编。王成安制定了编写大纲，撰写了前言、绪论，编写了第1、2、3、4章和附录，并对全书进行统稿。郭辉编写了第5、6章，王春编写了第7、8章，安徽机电职业技术学院的王超编写了第9章。无锡商业职业技术学院童建华教授仔细审阅了全书，并提出了很多宝贵的意见和建议。对书后所列参考书籍和资料的各位作者，编者表示深深的感谢。

尽管我们在现代电子技术基础教材的建设方面做了许多努力，但由于编者水平所限，加之时间仓促，书中不妥之处在所难免，在取材新颖性和实用性等方面定有诸多不足，敬请兄弟院校的师生和广大读者给予批评和指正。我们衷心盼望本书能对有志于从事电子技术应用的读者有所帮助。请您把对本书的意见和建议告诉我们，以便修订时改进。所有意见和建议请发往：

E-mail: wang-ca420@sohu.com      联系电话: 0415-2533489

编 者

# 目 录

## 前言

绪论 ..... 1

## 第 1 章 半导体器件及其应用 ..... 3

本章导言 ..... 3

1.1 半导体的基础知识 ..... 3

1.1.1 本征半导体 ..... 3

1.1.2 PN 结 ..... 4

1.2 半导体二极管 ..... 5

1.2.1 二极管的结构和符号 ..... 5

1.2.2 二极管的伏安特性 ..... 6

1.2.3 温度对二极管特性的影响 ..... 7

1.2.4 半导体器件型号命名法 ..... 8

1.2.5 二极管的主要参数 ..... 8

1.2.6 特殊二极管介绍 ..... 9

1.3 半导体二极管的应用 ..... 12

1.3.1 整流 ..... 12

1.3.2 钳位 ..... 12

1.3.3 限幅 ..... 13

1.3.4 元器件保护 ..... 13

1.3.5 定向 ..... 13

1.4 单相整流滤波电路 ..... 13

1.4.1 半波整流电路 ..... 14

1.4.2 单相桥式整流电路 ..... 14

1.4.3 滤波电路 ..... 16

1.5 晶体管 ..... 18

1.5.1 晶体管的结构和符号 ..... 18

1.5.2 晶体管中的电流分配关系 ..... 19

1.5.3 晶体管的伏安特性 ..... 20

1.5.4 晶体管的主要参数 ..... 22

1.5.5 特殊晶体管介绍 ..... 23

1.6 场效应晶体管 ..... 24

1.6.1 场效应晶体管的特点和类型 ..... 24

1.6.2 绝缘栅型场效应晶体管 ..... 24

1.6.3 结型场效应晶体管 ..... 26

1.6.4 场效应晶体管与晶体管的比较 ..... 28

1.6.5 场效应晶体管的主要参数 ..... 29

1.7 集成电路 ..... 30

1.7.1 集成电路的分类 ..... 31

1.7.2 模拟集成电路 ..... 31

1.7.3 数字集成电路 ..... 31

1.8 直流稳压电源电路 ..... 33

1.8.1 直流稳压电源的组成和技术指标 ..... 33

1.8.2 二极管稳压式稳压电源 ..... 34

1.8.3 三端式集成稳压器 ..... 34

本章小结 ..... 39

动手做：简单实用的功率控制电路 ..... 40

实用资料：常用晶体管的型号和参数 ..... 40

自测与练习 ..... 41

## 第 2 章 基本放大电路及其分析方法 ..... 46

本章导言 ..... 46

2.1 晶体管的基本放大电路 ..... 46

2.1.1 晶体管放大器的三种组态 ..... 46

2.1.2 固定偏置式共发射极放大电路 ..... 46

2.2 分压偏置式放大器 ..... 53

2.2.1 分压偏置式放大器的电路结构 ..... 53

2.2.2 分压偏置式放大器稳定  $Q$  点的原理 ..... 54

2.2.3 分压偏置式放大器的分析 ..... 54

2.3 其他组态放大器 ..... 56

2.3.1 共集电极放大器——射极跟随器 ..... 56

2.3.2 共基极放大器 ..... 57

2.3.3 三种组态放大器的比较 ..... 58

2.4 场效应晶体管基本放大器 ..... 60

2.4.1 场效应晶体管的基本放大电路 ..... 60

2.4.2 功率 MOS 管介绍 ..... 60

本章小结 ..... 61

动手做：方便实用的充电/稳压两用电源 ..... 61

实用资料：国产场效应晶体管和进口功率晶体管的型号和主要参数 ..... 62

自测与练习 ..... 63

## 第 3 章 多级放大器及其频率特性 ..... 69

本章导言 ..... 69

3.1 多级放大器 ..... 69

3.1.1 电子电路的一般组成方式 ..... 69

3.1.2 多级放大器的级间耦合方式	69	5.1.3 反馈放大电路的一般关系式	94
3.2 多级放大器的分析	71	5.2 反馈放大电路的基本类型及分析方法	94
3.2.1 多级放大器电压放大倍数的计算	71	5.2.1 反馈信号的极性与判断	94
3.2.2 多级放大器的输入电阻和输出电阻	71	5.2.2 负反馈放大器的四种组态	97
3.2.3 多级放大器的功率放大倍数	72	5.2.3 四种类型的负反馈放大器	98
3.3 放大器的频率响应	73	5.3 负反馈对放大电路性能的影响	100
3.3.1 放大器的频率特性	73	5.3.1 闭环增益的三种结果	100
3.3.2 影响放大器频率特性的因素	74	5.3.2 负反馈对放大器性能的影响	100
3.3.3 多级放大器的频率特性	74	5.4 负反馈放大电路应用中的几个问题	102
本章小结	75	5.4.1 放大电路引入负反馈的一般原则	102
动手做: 实用的助听器电路	75	5.4.2 深度负反馈放大电路的特点	104
实用资料: 国产常用大功率晶体管的型号和主要参数	76	5.4.3 负反馈放大电路的稳定性	104
自测与练习	77	本章小结	105
<b>第4章 差动放大电路与集成运算放大电路</b>	79	新技术: 电子设计自动化技术(EDA)简介	106
本章导言	79	实用资料: Protel 99 的元器件库名中英文对照表	107
4.1 差动放大电路	79	自测与练习	108
4.1.1 差动放大电路的组成及工作原理	79	<b>第6章 集成运算放大电路及其应用</b>	111
4.1.2 差动放大器的主要技术指标	82	本章导言	111
4.2 差动放大器的输入、输出方式	82	6.1 基本运算放大电路	111
4.3 差动放大器的改进电路	84	6.1.1 比例运算	111
4.3.1 恒流源式差动放大电路的组成	85	6.1.2 加法与减法运算	113
4.3.2 恒流源式差动放大器抑制温漂的工作原理	85	6.2 集成运算放大器组成的运算电路在实际工程中的应用	115
4.4 集成运算放大器	86	6.2.1 测量放大器	115
4.4.1 集成运算放大电路的组成及其基本特性	86	6.2.2 滤波器	116
4.4.2 集成运算放大器的主要参数	87	6.2.3 精密整流电路	119
4.4.3 集成运算放大器工作的两个区域	88	6.2.4 电压比较器	121
4.4.4 集成运算放大器的发展和使用	89	本章小结	123
本章小结	90	新技术: 轨对轨放大器	124
动手做: 音频信号发生器	91	实用资料: 进口集成电压比较器的类型和主要参数	124
新器件和新技术: 无引脚电子元件和表面贴焊接技术	91	自测与练习	124
自测与练习	91	<b>第7章 功率放大电路</b>	128
<b>第5章 放大电路中的反馈</b>	93	本章导言	128
本章导言	93	7.1 功率放大电路的任务及功率晶体管的特点	128
5.1 反馈的基本概念	93	7.1.1 功率放大电路的任务与技术指标	128
5.1.1 什么是反馈	93	7.1.2 使用功率晶体管需要注意的几个问题	129
5.1.2 反馈放大电路的框图	93		



7.1.3 复合管 .....	130	8.4.1 5G8038 多种函数信号发生 集成电路的组成和功能 .....	159
7.2 常见的几种功率放大电路 .....	131	8.4.2 5G8038 的应用 .....	160
7.2.1 变压器耦合功率放大电路 .....	131	8.5 锁相环技术及其应用 .....	161
7.2.2 OCL 互补对称式功率放大电路 .....	132	8.5.1 锁相环电路 .....	161
7.2.3 OTL 互补对称式功率放大电路 .....	134	8.5.2 频率合成器 .....	162
7.2.4 采用复合管的功率放大电路 .....	136	8.5.3 电压—频率变换器 .....	164
7.3 集成功率放大器及其应用 .....	136	本章小结 .....	165
7.3.1 LM386——小功率通用型集成功 率放大电路 .....	136	实用资料：集成时基电路 555 .....	165
7.3.2 TDA2616/Q——中功率集成功率 放大电路 .....	137	自测与练习 .....	166
7.3.3 “傻瓜”型集成功率放大电路 .....	138	<b>第 9 章 模拟电子技术的应用实例</b> .....	169
7.4 BTL 功率放大器 .....	138	9.1 应用一 用发光二极管判断电源的 极性 .....	169
7.4.1 BTL 功率放大电路的组成 .....	138	9.2 应用二 用发光二极管充当仪器设备的 电源指示灯 .....	169
7.4.2 BTL 功率放大电路的工作原理 .....	139	9.3 应用三 巧用贺年卡内的音乐片制作 音乐门铃 .....	170
7.4.3 集成电路 BTL 功率放大器 .....	139	9.4 应用四 巧查有绝缘层的导线内部 断点 .....	170
本章小结 .....	141	9.5 应用五 测量电压记忆电路 .....	170
新技术：D 类放大器 .....	141	9.6 应用六 可给多种手机电池充电的快速 充电器电路 .....	171
实用资料：智能功率集成电路模块 (IPM) ..	142	9.7 应用七 用电压表测量温度的电路 .....	171
自测与练习 .....	143	9.8 应用八 能将 MP3 输出音频信号放大的 电路 .....	172
<b>第 8 章 信号的产生和波形变换</b> .....	146	9.9 应用九 调试收音机的步骤和技巧 .....	173
本章导言 .....	146	9.10 应用十 充电器和稳压电源两用电路的 装配与调试 .....	177
8.1 正弦波振荡电路 .....	146	9.11 应用十一 集成电路扩音机的设计 与装调 .....	179
8.1.1 正弦波振荡器的基本概念 .....	146	9.12 应用十二 正弦波信号发生器的设计 与装调 .....	183
8.1.2 RC 正弦波振荡电路 .....	148	<b>附录 常用电子元器件的型号 和主要参数</b> .....	188
8.1.3 LC 正弦波振荡电路 .....	150	<b>参考文献</b> .....	191
8.1.4 石英晶体振荡器 .....	153		
8.2 非正弦波信号发生电路 .....	155		
8.2.1 方波信号发生器 .....	155		
8.2.2 三角波信号发生器 .....	156		
8.3 用集成时基电路 555 构成的 矩形波发生器 .....	158		
8.3.1 555 时基电路的基本组成和 引脚用途 .....	158		
8.3.2 555 时基电路的应用 .....	159		
8.4 5G8038 多种函数信号发生集成电路 ..	159		

# 绪 论

世界正在受到新科技革命浪潮的冲击，科学技术正处在历史上最伟大的变革时期。在 20 世纪为人类生产和生活条件的改善做出巨大贡献的电子技术，仍然充当着 21 世纪高新技术的领头羊。电子技术的发展历史很短，迄今不过百年，却从根本上改变了世界的面貌。纵观电子技术的发展历程，炎黄子孙将感到振兴中华的责任重大而迫切，中国的科学技术面临着国情的挑战，面临着世界的挑战。

电子技术的发展大致可分为三个阶段。20 世纪 20 ~ 40 年代为第一阶段，以电子管为标志，由此促生了电子工业的诞生，发展了无线电广播和通信产业。1946 年诞生的世界上第一台电子计算机(美国制造,名为 ENIAC)可以认为是这个阶段的典型代表和终极产品。虽然它的运算速度只有 5000 次/s，却是一个重为 28t、体积为 85m<sup>3</sup>、占地 170m<sup>2</sup> 的庞然大物。它由 18000 只电子管组成，耗电 150kW，其内部的连线总长可以绕地球 20 圈。

1948 年，第一只半导体晶体管的问世，标志着电子技术第二阶段的开始，掀起了电子产品向小型化、大众化和高可靠性、低成本进军的革命风暴。半导体进入电子领域，促进了无线广播电视和移动通信的高度发展，使得计算机的小型化变为现实。电子产品逐渐由科研和军用领域向民用领域普及，极大地提高了人们的生活质量。

到 20 世纪 70 年代，集成电路的使用已经不再新奇，电子技术步入了第三个发展阶段。正是在这个阶段，电子技术飞速发展，各种电子产品如雨后春笋般涌现，世界进入了空前繁荣的电子时代。电子计算机朝着大型化和微型化发展，其使用领域由科研转向工业及各个行业，自动控制、智能控制得以真正实现，航天工业得到从未有过的发展。随着制造工艺的提高，在一块 36mm<sup>2</sup> 的硅片上制造 100 万只晶体管已经不是梦想。1999 年美国英特尔公司宣布，其生产的奔腾 4CPU，在一块芯片上集成了 2975 万只晶体管，使微型机的运算速度远远超过以往的大型计算机。掌上电脑已经问世，移动通信已发展到全球通，数字式 CDMA 通信技术已非常成熟，手机已不再是奢侈品。笔记本电脑正在把人们的工作地点从办公室里解放出来。家用电器已经普及，人们的生活质量大幅提高，中国古代传说中的“千里眼”和“顺风耳”都在电子技术的发展过程中变成现实。人们可以“上九天揽月”，能够“下五洋捉鳖”。2003 年，人类将高度智能化的火星探测器送上火星，研制成功了可用于修补大脑的集成电路芯片，量子计算机的基本电路也研制成功。这一切都有赖于电子技术的巨大成就。可以预料，在新的世纪里，电子技术仍将高速发展，其所能达到的水平和发展速度，无论你怎么想象都不过分。

我国的电子工业在解放前基本上空白的。新中国成立后，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，1983 年研制出银河 I 型亿次机，标志着中国的计算机行业迈入了巨型机的行列。1992 年我国又研制出 10 亿次银河计算机，1995 年研制成功的曙光 1000 型并行处理计算机，其运行速度可达 25 亿次/s。2003 年，曙光 4000L 百万亿数据处理超级服务器研制成功，每秒峰值速度达到 6.75 万亿次。我国的电子工业从无到有，从小到大，虽然起步晚，但起点高，现在在我国

用电器的产量已居世界第一，质量提高也很快。神州系列载人飞船的成功发射和回收，标志着我国在空间技术领域已跃居世界前列。这些成就的取得，电子技术功不可没。尽管如此，我国在电子核心元器件的生产和高级电子产品等方面，与发达国家相比还有较大差距。努力缩小差距，赶超世界先进水平，这正是历史赋予我们这一代人的光荣使命。

电子技术的知识范围很广，其分支也很多，有些分支已发展成为一门独立的学科，如计算机、单片机、晶闸管、可编程序控制器等，但电子技术仍然是这些学科的知识基础。

从对信号的处理方式上来分，电子技术可分成模拟电子技术和数字电子技术。模拟电子技术是研究使用硅、锗等半导体材料做成的电子器件组成的电子电路，对连续变化的电信号（如正弦波）进行控制、处理的应用科学技术。比如我们日常生活中使用的固定电话、收音机、电视机等都属于模拟电子技术应用的产品。数字电子技术是研究处理二值数值信号的应用科学技术。像 VCD 机、DVD 机、数码照相机、数码摄像机和计算机都是数字电子技术应用的典型产品。现代电子技术的发展，已经将模拟电子技术和数字电子技术融为一体，在一个电路甚至是一个芯片中，将模拟信号和数字信号同时进行处理，比如移动通信所使用的手机，就是将语音这样的模拟信号进行数字化处理后再发射出去。

从电子技术所包含的内容上来分，电子技术可以分成电子元器件和电子电路两部分。在电子元器件这部分内容中，主要研究各种电子元器件的结构、特点、主要参数和生产工艺，其设计和制造属于电子技术的一个重要领域，但不在本书的研究范围内。电子电路是把电子元器件按照对电信号处理的要求进行一定的连接，以实现预定的功能，它的种类很多，过去是将其分成模拟电路和数字电路分别进行阐述，现在已不能简单地将其划分为哪一部分了。

高等职业技术学院电类专业的学生都必须学习电子技术基础这门课，这是电子技术入门性质的课程。这本教材将把现代电子技术中最需要的基础内容加以阐述，当然也要涉猎到一些电子技术在生产和生活方面的实际应用。我们要学习现代电子技术中的基本概念和基本原理，学习基本的电子电路和新型的电子电路，掌握电子电路的分析方法，认识和使用现代电子技术中常用的电子元器件和新型元器件，要学习现代电子电路设计的新思想和新方法，了解现代电子技术的新工艺和新技术，还要学习电子电路中常用的传感器件，学会读电子电路图，这样才能掌握比较扎实的电子技术基础，为学习电子技术专业课打下良好的基础。

电子技术是一门实践性很强的课程，我们要在学习理论的基础上，多参与实践，通过做电子实验和参加电子实训，学习和掌握电子技术方面的基本技能。同学们通过学习电子技术要达到四会：会认识和检测常用电子元器件、会认识和分析常用基本电子电路、会焊接和安装小型电子电器产品、会调试和维护小型电子系统。通过实践你会发现，电子技术就在你的身边，学习电子技术，会激起你的极大兴趣，会给你带来无穷的欢乐。让我们共同遨游在电子世界的海洋里，为社会的发展和进步，为人类生活得更加美好，做一名合格的建设者。当然，你也会分享到社会进步带给你的幸福。

# 第 1 章 半导体器件及其应用

## 本章导言

一向沉默于世的半导体自从诞生了奇妙的 PN 结，顿时身价倍增，竟然成为引领世界技术革命的急先锋。PN 结的奥秘在哪里，这是本章首先要探索的问题。从 PN 结到二极管，从二极管到晶体管，结构上仅仅多了一个 PN 结，却实现了半导体器件性质上的飞跃，微弱的信号经过由晶体管组成的放大器，就可以变成绚丽多彩的图像和优美动听的歌声，更可以实现系统的自动控制。这一切全有赖于晶体管的特殊结构和晶体管各极电流的分配关系。晶体管的伏安特性，将晶体管的工作状态和工作条件一览无余地表现出来，指导着人们对放大器的设计和调试。从晶体管到场效应晶体管，是半导体器件发展进程的又一次飞跃，对提高电子电路的性能起到很大的作用，更重要的是为集成电路的发展和器件的集成规模做出了巨大贡献。集成电路的普遍应用是电子技术得以迅速普及和提高的基础，学习了这些知识，你就会迈进奥妙无穷的电子世界，若结合书中介绍的二极管整流电路和稳压电路亲自实践一下，你就会发现：原来学习电子技术并不难！

## 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，科学家在实验中发现半导体材料具有一些特殊的性能，并制造出性能优秀的半导体器件，从而引发了电子技术的飞跃。

### 1.1.1 本征半导体

纯净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，这也是半导体材料没有导体和绝缘体材料应用早的原因。目前用于制造半导体器件的材料主要有硅(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. 本征半导体中的两种载流子——电子和空穴

在室温下，本征半导体中少数价电子因受热而获得能量，摆脱原子核的束缚，从共价键中挣脱出来，成为自由电子。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。电子与空穴是成对出现的，所以称为电子—空穴对。在室温下，本征半导体内产生的电子—空穴对数目很少。当本征半导体处在外界电场中，其内部自由电子逆外电场方向作定向运动，形成漂移电子流；空穴顺外电场方向作定向运动，形成漂移空穴流。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，因此称自由电子为

电子载流子，称空穴为空穴载流子。本征半导体在外电场的作用下，其电流为电子流与空穴流之和。

## 2. 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，本征半导体内的原子运动加剧，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，本征半导体内的载流子数目越多，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，这些器件在自动控制系统中有广泛的应用。

## 3. 本征半导体的掺杂特性

实验发现，在本征半导体中掺入微量的其他元素，会使其导电能力大大加强。例如，在硅本征半导体中掺入百万分之一的其他元素，它的导电能力就会增加1百万倍。这就是半导体的掺杂特性。掺入的微量元素称为杂质，掺入杂质后的本征半导体称为杂质半导体。杂质半导体有P型半导体和N型半导体两大类。

(1) P型半导体 如果在本征半导体中掺入三价元素，如硼(B)、铟(In)等，在半导体内就产生了大量空穴，这种半导体叫做P型半导体。

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型半导体在外电场作用下，空穴电流远大于少子电流。P型半导体是以空穴导电为主的半导体，所以它又称为空穴型半导体。

(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，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，电子载流子数远大于空穴数，所以电子是N型半导体中的多子，空穴是N型半导体中的少子，但整个N型半导体是呈现电中性的。N型半导体在外电场作用下，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。

### 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型半导体通过一定的制作工艺结合起来就形成了PN结。PN结是构成半导体二极管、半导体晶体管、晶闸管、集成电路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，如图1-1所示。

#### 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。外加电压的极性不同，流过PN结的电流大小有极大的差别。

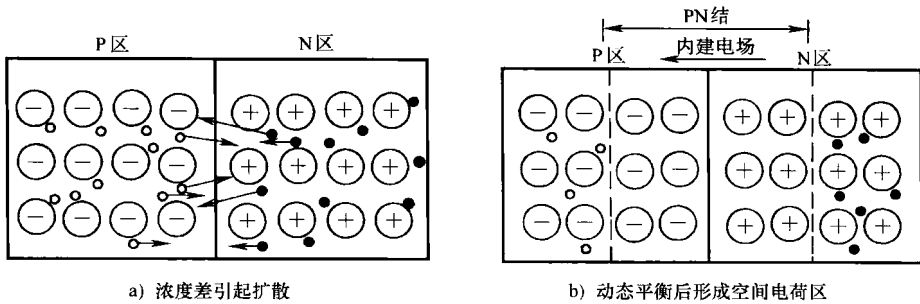


图 1-1 PN 结的形成

(1) PN 结加正向电压时的情况 如图 1-2a 所示，P 区接电源正极，N 区接电源负极，这种接法叫正向偏置，形成的电流叫做正向电流。而且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 结加反向电压的情况 如图 1-2b 所示，P 区接电源负极，N 区接电源正极，这种接法叫反向偏置，形成的电流叫做反向电流。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，所以又称为反向饱和电流。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。

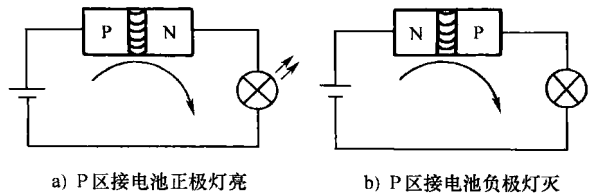


图 1-2 PN 结的单向导电性

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。由于使用的用途不同，二极管的外形各异，几种常见的二极管外形及符号如图 1-3 所示。

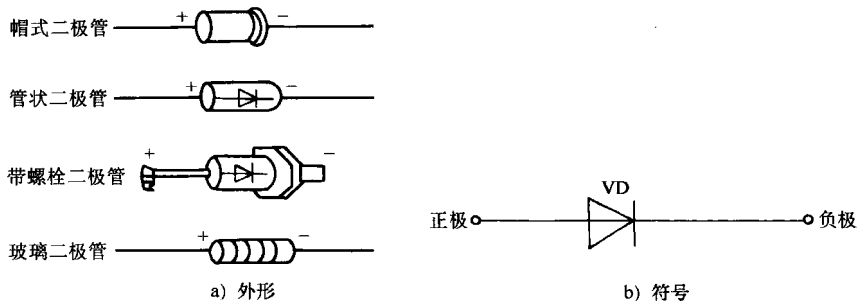


图 1-3 常见二极管的外形及符号

二极管的结构按 PN 结形成的制造工艺方式可分为点接触型、面接触型和平面型几种。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，也不能承受较高的反向电压，但它的高频性能好，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。平面型二极管适宜用作大功率开关管，在数字电路中有广泛的应用。图 1-4 是二极管的类型结构示意图。

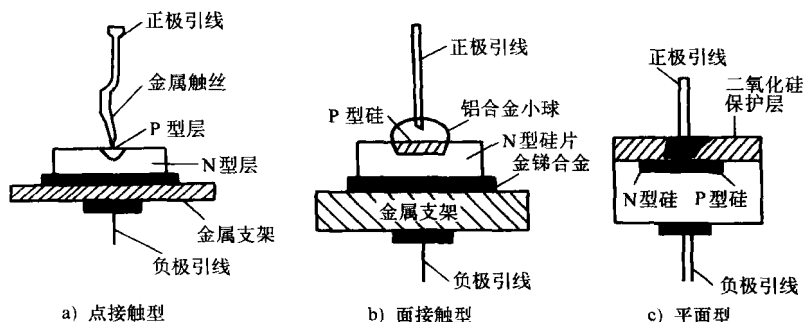


图 1-4 二极管的类型结构示意图

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。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。二极管的文字符号在国际标准中用 VD 表示。

### 1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的主要特点是单向导电性。可以通过实验来认识二极管两端的电压和流过二极管电流的关系。由实验所得到的一组数据，见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 2CP31 型二极管的实验数据(加正向电压)

电压/mV	000	100	500	550	600	650	700	750	800
电流/mA	000	000	000	010	060	085	100	180	300

表 1-2 2CP31 型二极管的实验数据(加反向电压)

电压/V	0	-10	-20	-60	-90	-115	-120	-125	-135
电流/ $\mu$ A	000	10	10	10	10	25	40	150	300

将实验数据在坐标纸上标出，并连成线，就是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 1-5 所示为硅和锗二极管的伏安特性曲线。

二极管的伏安特性曲线可分成几部分讨论：

#### 1. 正向特性(二极管加正向电压时的电流—电压关系)

0A 段：当外加正向电压较小时，正向电流非常小，近似为零，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。

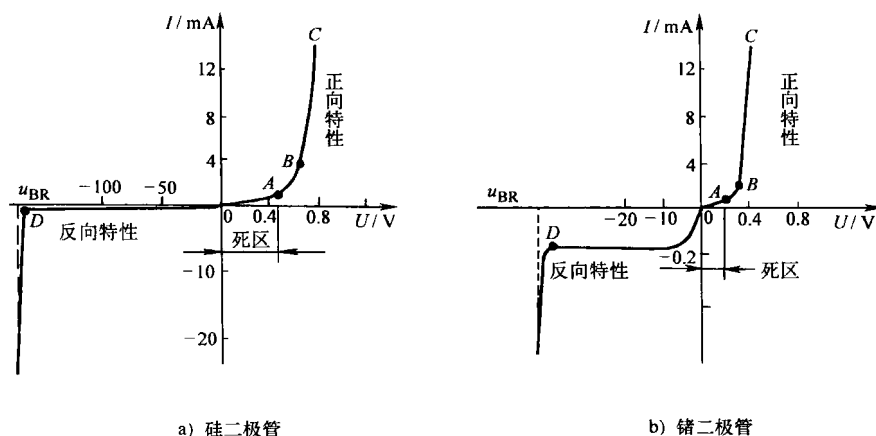


图 1-5 二极管的伏安特性曲线

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, 基本上呈线性关系。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, 硅二极管的导通电压降约为 0.7V, 锗二极管的导通电压降约为 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(二极管加反向电压时的电流—电压关系)

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。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。

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。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, 可知二极管的伏安特性是非线性的, 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。

### 1.2.3 温度对二极管特性的影响

二极管的特性对温度很敏感。实验发现, 随着温度的升高, 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, 负温度系数约为  $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$  左右; 二极管的反向饱和电流随温度的升高而增加, 温度每升高  $10^\circ\text{C}$ , 二极管的反向电流约增加 1 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克服。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。



### 1.2.4 半导体器件型号命名法

根据国家标准 GB/T 249—1989，半导体器件的型号由五个部分组成：

第一部分：用阿拉伯数字表示器件的电极数目，规定：2 代表二极管，3 代表三极管。

第二部分：用汉语拼音字母表示器件的材料，规定：A、B 是锗材料，C、D 是硅材料。

第三部分：用汉语拼音字母表示器件的类别，如：P 普通管；Z 整流管；K 开关管；W 稳压管等。

第四部分：用阿拉伯数字表示序号，反映了管子在极限参数、直流参数和交流参数等方面的差别。

第五部分：用汉语拼音字母表示规格号，反映了管子承受反向击穿电压的程度。如 A、B、C、D…。其中 A 承受的反向击穿电压最低，B 次之……。

国产半导体器件的型号组成部分的符号及其意义见表 1-3。

表 1-3 国产半导体器件的型号组成部分的符号及其意义

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分	第五部分		
用阿拉伯数字表示器件的电极数目		用汉语拼音字母表示器件的材料和极性		用汉语拼音字母表示器件类别		用阿拉伯数字表示序号	用汉语拼音字母表示规格号		
符号	意义	符号	意义	符号	意义	意义	意义		
2	二极管	A	N 型，锗材料	P	小信号管	反映了极限参数、直流参数和交流参数等的差别	承受反向击穿电压的程度。如规格号为 A、B、C、D…。其中 A 承受的反向击穿电压最低，B 次之……		
		B	P 型，锗材料	V	混频检波管				
		C	N 型，硅材料	W	电压调整管和电压基准管				
		D	P 型，硅材料	C	变容管				
3	三极管	A	PNP 型，锗材料	Z	整流管				
		B	NPN 型，锗材料	L	整流堆				
		C	PNP 型，硅材料	S	隧道管				
		D	NPN 型，硅材料	K	开关管				
		E	化合物材料	X	低频小功率晶体管 ( $f < 3\text{MHz}, P_c < 1\text{W}$ )				
				G	高频小功率晶体管 ( $f \geq 3\text{MHz}, P_c < 1\text{W}$ )				
				D	低频大功率晶体管 ( $f < 3\text{MHz}, P_c \geq 1\text{W}$ )				
		A	高频大功率晶体管 ( $f \geq 3\text{MHz}, P_c \geq 1\text{W}$ )						
		T	闸流管						
		Y	体效应管						
		B	雪崩管						
		J	阶跃恢复管						

美国、日本等其他国家生产的半导体器件，其型号命名方法和中国不同，比如日本用 1 代表二极管，用 2 代表三极管，具体型号可参见其他书籍。

### 1.2.5 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一方面的性能。二极管的主要参数有：

#### 1. 最大整流电流 $I_F$