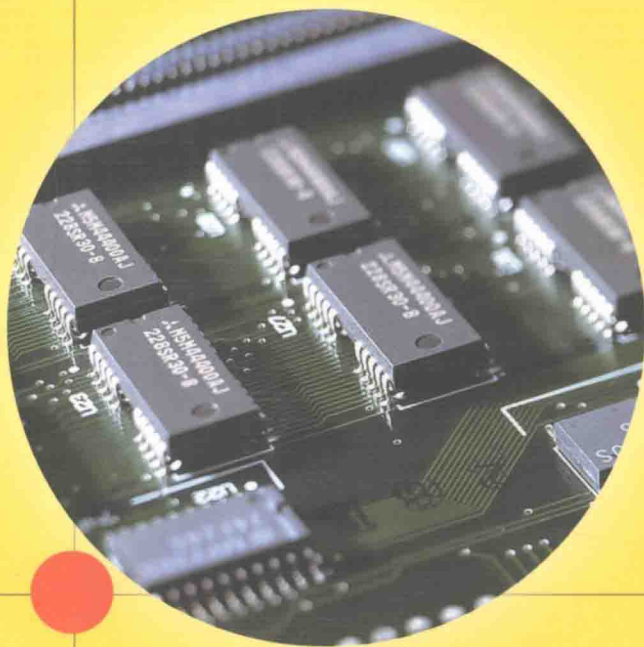


高等职业教育电子信息类专业“十二五”规划教材

模拟电子技术

MONI DIANZI JISHU

徐 遵 刘莉莉 主编



ELECTRONIC
FORMATION

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等职业教育电子信息类专业“十二五”规划教材

模 拟 电 子 技 术

徐 遵 刘莉莉 主 编

苏品刚 赵 卉 王 茜 副主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书以实用为导向,从工程实践的角度对相关知识删繁就简,理论知识强调“实用为主,必需和够用为度”的原则,在知识与结构上有所创新,采用较新的编写体例,符合高职学生的认知特点。本书既有基本概念的详细讲解,又有画龙点睛的知识拓展,真正体现学以致用。

本书共分 8 个单元,主要内容包括:基础知识、电源电路、基本放大电路、反馈电路、振荡电路、低频功率放大电路、模拟滤波电路、模拟电子技术实验。除单元 1、单元 8 外,其余各单元均以课题为教学单元,每个课题既包含基本理论知识的介绍、课题内容的分析和实物展示,也包含对课题相关知识的拓展以及仿真实验,有利于学生对相关知识的理解和掌握。**本书配套教学 PPT 课件,可登录 www.51eds.com 下载。**

本书适合作为高职院校电子信息、应用电子技术、电气自动化、通信技术等专业教材,也可供从事电子技术应用的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/徐遵,刘莉莉主编.—北京:
中国铁道出版社,2013.2
高等职业教育电子信息类专业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-113-15599-5

I. ①模… II. ①徐… ②刘… III. ①模拟电路—电
子技术—高等教育—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 280628 号

书 名: 模拟电子技术
作 者: 徐遵 刘莉莉 主编

策 划: 吴 飞 读者热线: 400-668-0820
责任编辑: 吴 飞
编辑助理: 绳 超
封面设计: 刘 颖
责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街 8 号)
网 址: <http://www.51eds.com>
印 刷: 北京新魏印刷厂
版 次: 2013 年 2 月第 1 版 2013 年 2 月第 1 次印刷
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 15.5 字数: 378 千
印 数: 1~3 000 册
书 号: ISBN 978-7-113-15599-5
定 价: 30.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010) 63550836

打击盗版举报电话:(010) 63549504

教材建设是高职院校教学改革工作的重要部分，高职教材如何体现高等职业教育特色，如何体现培养应用型人才的理念，是一个值得研究的问题。本书以实用为导向，从工程实践的角度对相关知识删繁就简，理论知识强调“实用为主，必需和够用为度”的原则。在知识与结构上有所创新，采用较新的编写体例，符合高职学生的认知特点。既有基本概念的详细讲解，又有画龙点睛的知识拓展，真正体现学以致用。

本书具有以下特色：

(1) 结构创新。本书以课题作为介绍模拟电子技术相关知识的教学单元，不同于传统教材的编写结构。本书根据相关专业所需最基本、最主要的基础知识内容进行排列和连接。

(2) 删繁就简。知识点的选取以“必需”、“够用”为度。减去了过多的推导，给出一定的结论，既保证了基本知识的系统性，又强调了生产实践的实用性。本书将重点放在提高学生解决问题和分析问题的能力上。

(3) 图文并茂。每个课题既有原理图又有实际应用图，还有课题的实物图，使学生在分析电路的同时，获得一定的感性认识。

(4) 仿真验证。每个课题均有仿真实验，教师可在上课时用仿真软件模拟在实验室用实物做的实验，帮助学生掌握相关电路的连接方式。由于实际应用图中的图形符号与国家标准不符，特附图形符号对照表，详见附录。

本书由徐遵、刘莉莉任主编，苏品刚、赵卉、王茜任副主编。全书由徐遵和刘莉莉统稿。

本书适合作为高职院校电子信息、应用电子技术、电气自动化、通信技术等专业教材，也可供从事电子技术应用的工程技术人员参考。

本书配套教学 PPT 课件，可登录 www.51eds.com 下载。

由于时间仓促，编者水平有限，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

单元1 基础知识.....	1
一、信号与电路.....	1
二、半导体与半导体器件.....	2
三、模拟电路的其他基本器件.....	16
四、常用测量仪器.....	23
五、电路仿真软件简介.....	27
六、二极管和三极管的测量.....	29
小结.....	31
习题.....	31
单元2 电源电路.....	35
课题1 固定直流稳压电源电路.....	35
课题2 正、负双电压输出的稳压电源电路.....	53
课题3 可调正、负双电压输出稳压电源.....	59
小结.....	70
习题.....	70
单元3 基本放大电路.....	73
课题1 单级放大电路.....	73
课题2 多级放大电路.....	94
课题3 差分放大电路.....	104
小结.....	121
习题.....	121
单元4 反馈电路.....	126
课题1 负反馈放大电路.....	126
课题2 集成运放电路.....	140
课题3 基本运算电路.....	144
小结.....	149
习题.....	149
单元5 振荡电路.....	153
课题1 正弦波振荡电路.....	153
课题2 方波振荡电路.....	164
课题3 三角波振荡电路.....	170
小结.....	174

习题.....	175
单元6 低频功率放大电路	179
课题1 甲乙类双电源功率放大电路	179
课题2 甲乙类单电源功率放大电路	187
课题3 集成功放电路	193
小结.....	197
习题.....	197
单元7 模拟滤波电路.....	199
课题1 无源 RC 低通滤波器	199
课题2 无源 LC 低通滤波电路	207
课题3 二阶有源 RC 低通滤波电路	213
小结.....	217
习题.....	218
单元8 模拟电子技术实验.....	219
实验1 单管共射极放大电路	219
实验2 共集电极放大电路	221
实验3 负反馈放大电路	223
实验4 差分放大电路	225
实验5 集成运算放大器的基本应用一：模拟运算电路.....	227
实验6 集成运算放大器的基本应用二：波形发生器.....	230
实验7 RC 正弦波振荡器	232
实验8 低频功率放大器：OTL 功率放大器.....	233
实验9 串联型直流稳压电源	235
附录 本书图形符号对照表.....	238
部分习题参考答案.....	239
参考文献	242

单元 1 基础知识

一、信号与电路

1. 信号

1) 信号简介

信号是指随时间变化的物理量。信号又是反映消息的物理量，因为消息（如语音、文字、图片、数据等）不适合在信道中直接传输，需将其调制成适合在信道中传输的信号。消息中包含信息，信息是指消息中所包含的有意义的内容，消息是信息的载体，信号是消息的表现形式。例如，工业控制中的温度、速度、压力、流量和转速，自然界的光、声音通过不同的传感器转换成电信号。在通信系统中，传递消息要依靠电信号。例如，打电话时所听到的声音就是消息，朋友的话语就是信息，传递声音的电磁波就是电信号。

信息通过电信号可以进行传递、交换、存储和提取。电信号是随时间而变化的电压 u 或电流 i ，它可用时间函数来表示，即 $u = f(t)$ 或 $i = f(t)$ ，并可画出时间域波形。电子电路中常将电信号简称为信号。

2) 模拟信号和数字信号

电子电路中常将信号分为模拟信号和数字信号。

模拟信号是指在时间上和数值上均具有连续性的信号，即对应于任意时间值 t 均有确定的函数值 u 或 i ，而且 u 或 i 的数值也是连续取值的。正弦信号就是典型的模拟信号，图 1.1 (a) 所示的图形也是模拟信号。

数字信号则与模拟信号相反，其在时间和数值上均具有离散性，函数值 u 或 i 的变化在时间上是不连续的，其数值的大小是最小量值的不同整数倍，如图 1.1 (b) 所示。

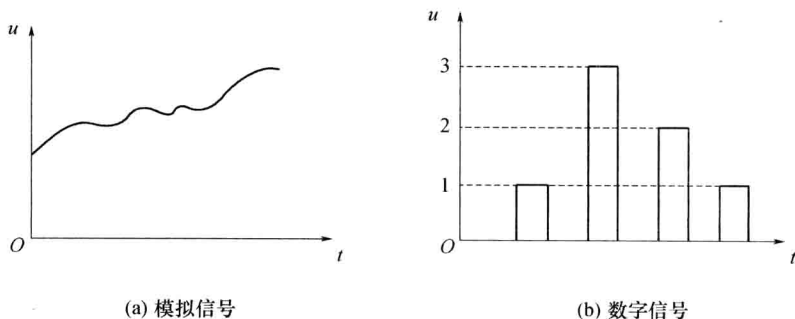


图 1.1 模拟信号与数字信号

通常大多数物理量都被转换为模拟信号，而计算机识别的是数字信号，因此对信号进行处理和控制必须将模拟信号转换为数字信号，这一过程称为模-数转换；然而驱动负载的是模

拟信号，故还须将数字信号转换为模拟信号，这一过程称为数-模转换。本书介绍的信号多为模拟信号。

2. 电路

1) 电路及电路的作用

电路是电流所流经的路径。它由电源、负载和中间环节三大部分组成。简单电路中间环节由连接导线和一些开关构成，而复杂电路因电路的各种功能不同，其中间环节各不相同。

电路的作用通常分为两大功能：电能的传输、分配与转换控制；信号的传递与处理。电力、电气专业通常研究电能的传输、分配与转换控制，电子、通信专业则较多研究信号的传递与处理，即通常意义上的强电和弱电。

2) 电路的种类

根据所处理信号的不同，电路可以分为模拟电路和数字电路。模拟电路处理的信号是与某些物理量对应的模拟量，它们在数值上是连续的；数字电路处理的信号是二进制的数字量“1”或“0”，在电路中以高、低电平来体现，故在数值上是离散的。

模拟电路与数字电路除处理信号不同之外，在电路功能上，模拟电路通常实现模拟信号的放大、变换和产生，数字电路则大多在输入、输出的数字量之间实现一定的逻辑关系；在三极管（又称晶体管）的作用和工作区域上，模拟电路中三极管为放大器件，其工作区域在放大区，数字电路则将三极管用作开关，工作区域在截止区和饱和区。

二、半导体与半导体器件

1. 半导体的基础知识

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体，经过特殊加工且性能可控的半导体材料制作成的半导体器件是构成电子电路的基本器件。用来制作半导体器件的材料主要有硅（Si）、锗（Ge）和砷化镓（GaAs）等，其中硅用得最广泛。

1) 本征半导体

纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体。用于制造半导体器件的材料纯硅和锗都是四价元素，它们的最外层原子轨道上有四个电子（称为价电子），受外界影响极易挣脱原子核的束缚成为自由电子。将纯净半导体经过一定工艺过程制成单晶体，由于原子排列的有序性，价电子为相邻的原子共有，形成图 1.2 所示的共价键结构。图 1.2 中+4 表示四价元素原子核和内层电子所具有的净电荷。价电子受共价键束缚，但在室温或光照下，少数价电子由于热运动获得了足够的能量，挣脱共价键的束缚成为自由电子，同时在共价键中留下一个空位，如图 1.2 所示，这种现象称为本征激发，这个空位称为空穴。原子因失掉一个价电子而带正电，即空穴带正电。可见这种本征激发产生的自由电子和空穴是成对出现的，故将它们称为电子-空穴对。自由电子在运动中很容易被邻近的空穴所吸引，空穴被自由电子所填补，自由电子填补空穴的运动可看成空穴在运动，但由于自由电子和空穴所带电荷极性不同，故它们的运动方向相反。运载电荷的粒子称为载流子，本征半导体中有两种载流子，故本征半导体中的电流是两种载流子电流之和，这与导体导电只有一种载流子的性质不同。

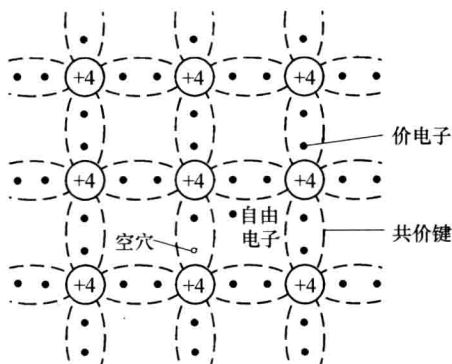


图 1.2 本征半导体结构和本征激发示意图

自由电子和空穴在运动中因重新结合而成对消失，这种现象称为复合。温度一定时，这种复合将达到动态平衡，这时自由电子和空穴的浓度一定。在一定电场作用下，自由电子和空穴作定向运动，这种运动称为漂移，所形成的电流称为漂移电流。

综上所述，在常温下，本征激发出的载流子较少，即载流子浓度较低，故漂移电流小则导电能力很弱，由此可见载流子浓度与环境温度有关，半导体器件的温度稳定性较差。然而还可以一方面通过增加载流子浓度来加强导电能力；另一方面可利用半导体材料对温度和光照的敏感特性制作热敏和光敏器件。

2) 杂质半导体

为了提高半导体的导电能力，在本征半导体中掺入微量的杂质元素，这种掺杂后的半导体称为杂质半导体。按掺入的杂质元素不同，可形成 N 型半导体和 P 型半导体。

(1) N 型半导体。在纯净的硅（或锗）中掺入少量的五价元素（如磷、砷、锑等），使之取代晶格中硅原子的位置，杂质原子与周围的四价元素原子结合成共价键时多余一个电子，多余电子在常温下受热激发极易挣脱原子核的束缚成为自由电子，而杂质原子因在晶格上，缺少了电子变为不能移动的正离子，称为施主原子，如图 1.3 所示。掺杂后使得自由电子的浓度大大增加，自由电子的数量远远大于本征激发的电子-空穴对，这种以电子导电为主的半导体称为 N 型半导体，其中自由电子为多数载流子（简称多子），空穴为少数载流子（简称少子）。

(2) P 型半导体。在纯净的硅（或锗）中掺入少量的三价元素（如硼、铝、镓等），使之取代晶格中硅原子的位置，杂质原子与周围的四价元素原子结合成共价键时因缺少一个价电子而产生一个空位，在常温下本征激发的电子极易填入该空位，使杂质原子变为负离子，称为受主原子，如图 1.4 所示。掺杂后使得空穴的浓度大大增加，空穴的数量远远大于本征激发的电子-空穴对，这种以空穴导电为主的半导体称为 P 型半导体，其中空穴为多子，自由电子为少子。

综上所述：杂质离子虽然带电荷，但不能移动，因此它不是载流子；杂质半导体中有一种载流子占多数，但整个半导体仍呈电中性；杂质半导体的导电性能主要取决于多子浓度，多子浓度取决于掺杂浓度，其值较大且稳定，故导电性能显著改善；少子浓度与本征激发有关，其大小随温度的升高而增大，即对温度较敏感。

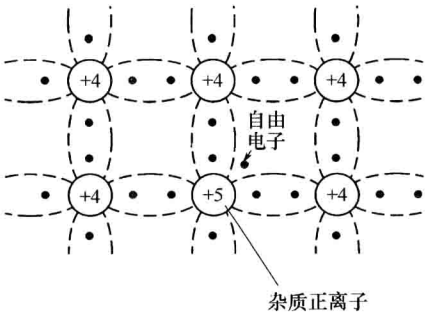


图 1.3 N 型半导体的晶体结构图

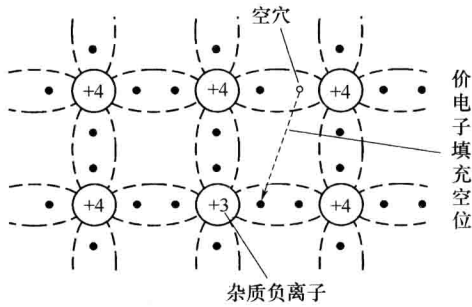


图 1.4 P 型半导体的晶体结构图

3) PN 结

(1) PN 结的形成。将 N 型半导体和 P 型半导体制作在同一块硅片上，由于浓度差很大，在它们的交界处产生了载流子从高浓度区向低浓度区的运动称为扩散运动，如图 1.5 (a) 所示。P 区的多子空穴扩散到 N 区，N 区的电子向 P 区扩散，在扩散的同时电子与空穴复合并消失，使得交界面附近的多子浓度骤减，P 区出现负离子区，N 区出现正离子区，则形成了不能移动的空间电荷区，从而建立了内电场，内电场的方向由 N 区指向 P 区，如图 1.5 (b) 所示。

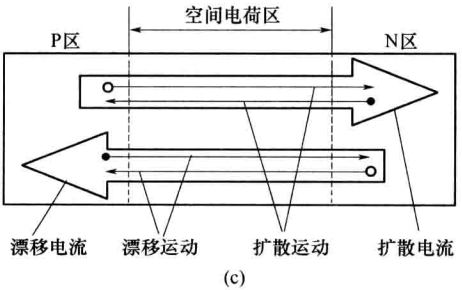
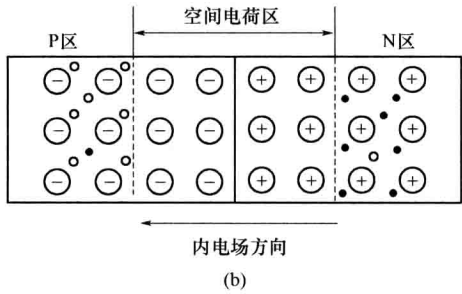
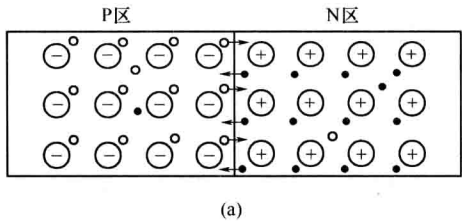


图 1.5 PN 结的形成

由于内电场方向与空穴运动方向一致，与电子运动方向相反，故内电场是阻碍多子的扩散运动，促使靠近交界面少子的漂移运动。起始时内电场较小，扩散运动较强。漂移运动较弱。随着扩散的进行，空间电荷区增宽，内电场增大扩散运动逐渐受阻，漂移运动逐渐增强。在外部条件一定时，扩散运动和漂移运动最终达到动态平衡，即扩散的多子与漂移的少子相等，因此扩散电流等于漂移电流，如图 1.5 (c) 所示。这时空间电荷区的宽度一定，内电场一定，则形成了所谓的 PN 结。由于空间电荷区内载流子非常少，故又称空间电荷区为耗尽层。PN 结内电场的电位称为内建电位差，其数值一般较小，与材料有关。在室温下，硅材料 PN 结的内建电位差为 $0.5 \sim 0.7 \text{ V}$ ，锗材料则为 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ 。

(2) PN 结的单向导电性。在 PN 结两端外加电压，称为给以 PN 结偏置电压，这将打破原来的动态平衡，使空间电荷区变化，呈现单向导电性。

① PN 结正向偏置。给 P 区接高电位、N 区接低电位，则称为 PN 结正向偏置（简称正偏），如图 1.6 所示。

PN 结正偏时，外电场的方向与内电场的方向相反，削弱了内电场，使 PN 结变窄，利于多子的扩散运动，形成了较大的正向电流 I ，其方向在 PN 结中是从 P 区流向 N 区，当外加正向电压增加到一定值后，正向电流将显著增加，此时 PN 结呈现很小的电阻，处于正向导通状态（简称导通）。为限制正向电流值，通常在回路中串联限流电阻。

② PN 结反向偏置。给 P 区接低电位、N 区接高电位，则称为 PN 结反向偏置（简称反偏），如图 1.7 所示。

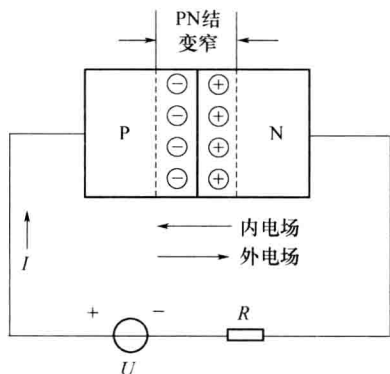


图 1.6 正向偏置的 PN 结

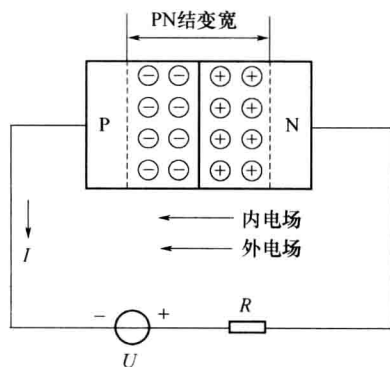


图 1.7 反向偏置的 PN 结

PN 结反偏时，外电场的方向与内电场的方向相同，增强了内电场，使 PN 结变宽，阻碍了多子的扩散运动，有利于少子的漂移运动，由于少子的浓度很低，反向电流 I 极小，一般为微安级，其方向在 PN 结中是从 N 区流向 P 区，相对于正向电流可以忽略不计，反向电流几乎不随外加电压而变化，故又称反向饱和电流。此时 PN 结呈现很大的电阻，处于反向截止状态（简称截止）。

综上所述，PN 结具有单向导电特性，即正偏时导通，呈现很小的电阻，产生较大正向电流；反偏时截止，呈现很大的电阻，反向电流近似为零。

(3) PN 结的击穿特性及电容效应:

① PN 结的击穿特性。PN 结反向偏置时,在一定电压范围内,反向饱和电流很小,处于截止状态。但当反向电压超过某一数值(称为击穿电压)后,反向电流将急剧增大,这种现象称为 PN 结的反向击穿。

PN 结的反向击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿,反向击穿是由于 PN 结中电子被电离所致,但并不一定意味着 PN 结被损坏,若反向电压下降到击穿电压以下后,其性能恢复到原有情况,即这种击穿是可逆的,称为电击穿;若反向击穿电离过大,导致 PN 结结温过高而烧坏,这种击穿是不可逆的,称为热击穿。通常利用这种电击穿的性能可制作特殊半导体器件。

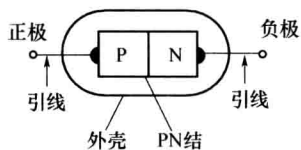
② PN 结的电容效应。PN 结内有电荷的存储,当外加电压变化时,存储的电荷也随之变化,表明 PN 结具有电容的性质。PN 结的结电容由势垒电容和扩散电容两部分组成。结电容的大小与结面积有关,通常很小,只有几皮法到几十皮法。

2. 半导体器件

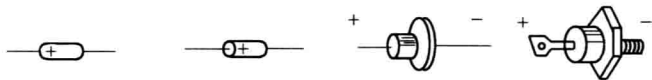
1) 半导体二极管

半导体二极管通常可用作检波、整流、稳压、混频、调谐、光电转换和开关控制等。

(1) 二极管的结构及分类。在 PN 结的 P 区和 N 区分别引出两根金属线,并用外壳封装起来就构成了半导体二极管,简称二极管。其结构如图 1.8 (a) 所示,常见的外形如图 1.8 (b) 所示。



(a) 二极管结构示意图



(b) 二极管常见的外形

图 1.8 二极管结构示意图及常见的外形

二极管的种类很多,按材料分有硅二极管和锗二极管。按结构分通常有以下几种:

① 点接触型二极管。由一根很细的金属触丝(如三价元素铝)和一块 N 型半导体(如锗)的表面接触,然后在正方向通过很大的瞬间电流,使金属触丝和半导体牢固地熔接在一起,三价金属与锗结合构成 PN 结,如图 1.9 (a) 所示。点接触二极管的特点是结面积小,适用于高频下工作,但不能通过很大的电流。主要用于检波、混频及小功率整流电路。

② 面接触型二极管。其 PN 结是用合金法或扩散法工艺制成的,如图 1.9 (b) 所示。由于这种二极管的 PN 结的面积大,可承受较大电流,但结电容也大,只适用于较低频率工作,

主要用于整流电路。

③ 硅平面型二极管。采用扩散法制成，如图 1.9 (c) 所示。结面积大的可用于大功率整流，结面积小的可作为数字电路中的开关管。

二极管不论什么类型和材料，在电路中的符号是统一的，如图 1.9 (d) 所示，P 区引出的电极称为正极（又称阳极），N 区引出的电极称为负极（又称阴极），正向导通电流从正极流向负极。

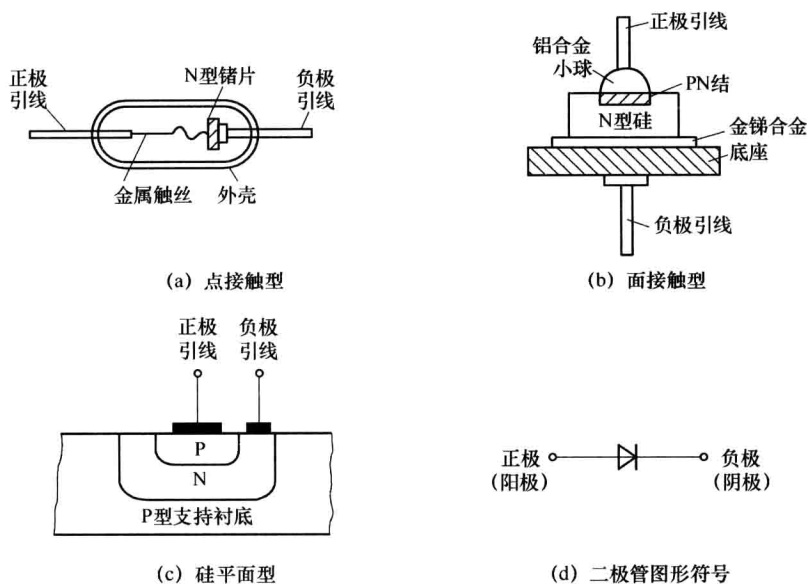


图 1.9 二极管常见种类及图形符号

(2) 二极管的伏安特性。二极管的核心是 PN 结，在外加电压 u_D 的作用下，二极管电流 i_D 的变化规律用曲线来描述，这种曲线称为二极管的伏安特性曲线，如图 1.10 所示。二极管具有单向导电的特性在曲线图中一目了然。根据半导体物理的理论分析，其数学表达式为

$$i_D = I_S (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1) \quad (1.1)$$

式中： $U_T = kT/q$ ， I_S 为二极管反向饱和电流，单位为 A； $k \approx 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ，为玻耳兹曼常量； T 为热力学温度，单位为 K； $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，为电子电量； U_T 为温度的电压当量，在常温（300K）下， $U_T \approx 26 \text{ mV}$ 。

① 正向特性。当加在二极管上的正向电压较小时，外电场不足以克服 PN 结内电场对多子扩散运动造成阻力，故正向电流几乎为零。当正向电压超过某一数值时，正向电流从零随电压按指数规律增大，使二极管导通的这一电压称为开启电压（又称门槛电压、死区电压），用 U_{ON} 表示。在室温下硅管的开启电压为 0.5 V，锗管为 0.1 V。在外加电压大于 U_{ON} 后，随着电压的升高，正向电流迅速增大，二极管呈现很小的电阻而处于导通状态。如图 1.10 所示，硅管的正向导通电压约为 0.6~0.7 V，锗管约为 0.1~0.3 V。工程上，一般将二极管正向导通电压降定义为硅管 0.7 V，锗管 0.2 V。

② 反向特性。当给二极管加反向电压时，反向电流值很小，且与反向电压无关，约等于 I_s 。在室温下，小功率硅管的反向饱和电流 I_s 小于 $0.1 \mu\text{A}$ ，锗管为几十微安。此时，二极管处于截止状态，呈现电阻很大，如图 1.10 所示。

③ 击穿特性。当二极管反向电压增加到某一数值 U_{BR} 时，二极管内 PN 结被击穿，二极管的反向电流急剧增大，如图 1.10 所示。 U_{BR} 称为反向击穿电压。式 (1.1) 不能反映击穿特性。

④ 温度特性。温度对二极管的特性有显著影响，如图 1.11 所示。温度升高时，正向特性曲线向左移，正向电压减小；反向特性向下移，反向电流增大。在室温附近，温度每升高 1°C ，正向压降约减小 $2\sim 2.5 \text{ mV}$ ，温度每升高 10°C ，反向电流约增大一倍，可见二极管对温度很敏感。

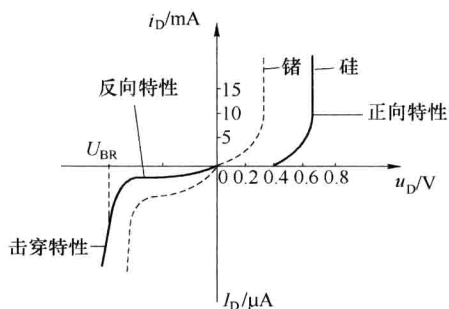


图 1.10 二极管的伏安特性曲线

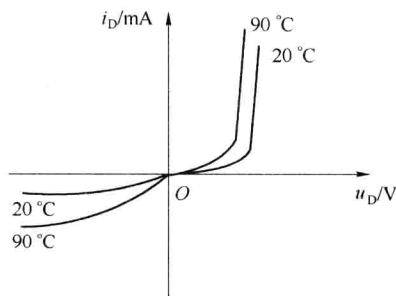


图 1.11 温度对二极管特性的影响

(3) 二极管的主要参数。二极管的特性还可以用参数来描述，实际工作中一般通过查阅器件手册来合理地使用二极管。

① 最大整流电流 I_F 。 I_F 是指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。使用时若超过此电流二极管可能会因过热而损坏。

② 最高反向工作电压 U_{RM} 。 U_{RM} 是指二极管工作时允许外加的最大反向电压，为防止二极管反向击穿，通常规定 U_{RM} 为击穿电压的一半。

③ 反向电流 I_R 。 I_R 是指二极管未被击穿时的反向电流。 I_R 愈小，二极管的单向导电性愈好。 I_R 对温度非常敏感。

④ 最高工作频率 f_M 。 f_M 是指保证二极管单向导电性作用的最高工作频率。其大小与 PN 结的结电容的大小有关，其值越大， f_M 就越大。点接触型锗管由于结电容较小，其最高工作频率可达数百兆赫兹，而面接触型硅整流管，其最高工作频率只有 3 kHz 。

(4) 二极管的等效电路。二极管的伏安特性具有非线性特性，在二极管应用电路的分析中，通常根据其特性进行等效，一般有两种情况：理想化和实际近似折线化。

① 理想二极管。在实际使用中，希望二极管具有正向偏置导通特性，电压降为零；反向偏置截止，电流为零的理想特性。其伏安特性用两条直线表示，可等效为一开关，正向偏置时开关闭合，二极管两端压降为零，反向偏置时开关打开，电流为零。理想二极管的伏安特性曲线、图形符号、等效模型如图 1.12 所示。

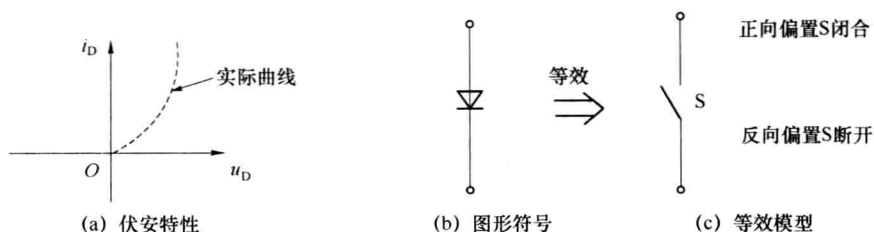


图 1.12 理想二极管的等效

② 近似折线化。将二极管特性曲线用两条直线逼近，称为特性曲线折线近似，如图 1.13 (a) 所示。两段直线在 U_{ON} 处转折， U_D 为导通电压。二极管两端电压小于 U_{ON} 时电流为零，大于 U_{ON} 后，直线的斜率为 $1/r_D$ ， $r_D = \Delta U / \Delta I$ ，称为二极管正向导通电阻，因此二极管的近似折线化模型为一个理想二极管串联电源 U_D 和电阻 r_D ，如图 1.13 (b) 所示。二极管两端压降大于 U_{ON} 时开关闭合，等效为电阻 r_D 及电源 U_D 串联；二极管两端压降小于 U_{ON} 时电路断开。

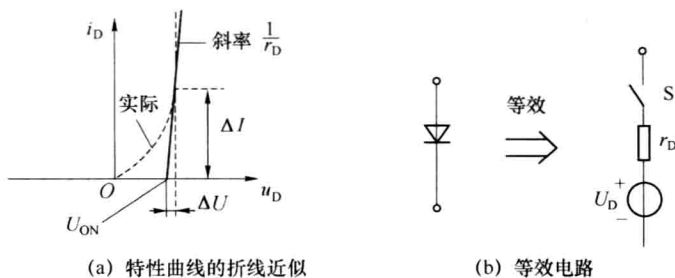


图 1.13 二极管特性折线模型

在近似分析中，理想二极管误差大些，一般情况下将近似折线中 r_D （通常很小）忽略，用一理想二极管及电源 U_D 串联来分析电路。

2) 半导体三极管

半导体三极管通常用作放大、混频和光电转换等，它是各类放大电路中的核心器件。半导体三极管（英文缩写 BJT）又称晶体三极管、双极型三极管，简称三极管。常见的外形如图 1.14 所示。

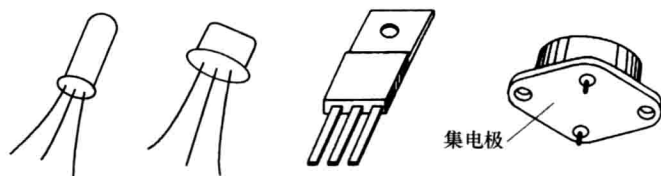


图 1.14 常见半导体三极管的外形

(1) 三极管的结构及分类：

① 三极管的结构及图形符号。在同一硅片上制造出三个掺杂区域，并形成两个 PN 结，就构成了三极管。按 P 区和 N 区的不同组合方式分为 NPN 型三极管和 PNP 型三极管，其结

构示意图及图形符号如图 1.15 所示。

图 1.15 (a) 为硅平面管管芯剖面图，位于上层的 N 区是发射区，掺杂浓度很高；位于中间的 P 区称为基区，它很薄且杂质浓度很低；位于下层的 N 型衬底作为集电区，掺杂浓度比发射区低且面积很大。这种制造工艺和结构特点是保证三极管具有电流放大能力的内部条件。

无论是 NPN 型管还是 PNP 型管，它们均包含三个区：发射区、基区、集电区，只是排列不同。从三个区分别引出三个电极：发射极 (e)、基极 (b)、集电极 (c)。同时在三个区的交界面上形成两个 PN 结，发射区与基区之间形成的 PN 结称为发射结，集电区与基区之间形成的 PN 结称为集电结，如图 1.15 (c) 所示。

NPN 型三极管与 PNP 型三极管图形符号如图 1.15 (b) 所示，发射极箭头方向表示发射结加正向电压时发射极电流的方向。NPN 型与 PNP 型三极管几乎具有相同的特性，只是各电极的电压极性和电流流向不同而已。

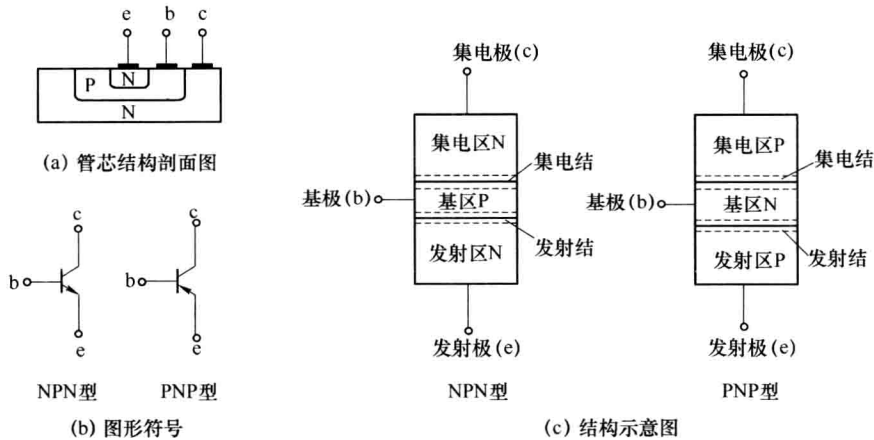


图 1.15 三极管的结构与图形符号

② 三极管的分类。三极管种类很多，主要有以下几种分类方式：

- a. 按结构类型分为 NPN 型管和 PNP 型管；
- b. 按制作材料分为硅管和锗管；
- c. 按制作工艺分为合金管和平面管；
- d. 按工作频率分为高频管和低频管；
- e. 按功率大小分为大功率、中功率和小功率三极管。

(2) 三极管的电流放大原理。放大是对模拟信号最基本的处理，三极管是放大电路的核心器件，它能够控制能量的转换，将输入的微小变化不失真地放大输出。

三极管在满足一定条件下能够进行放大，其制造工艺已满足了放大的内部条件，而外部条件是在发射结加正向偏置电压，集电结加反向偏置电压。如图 1.16 所示，给三极管加上电压后，为满足外部条件，必须使 $V_{CC} > V_{BB}$ ，三极管内部载流子运动有三个过程，下面以 NPN 型三极管为例讨论。

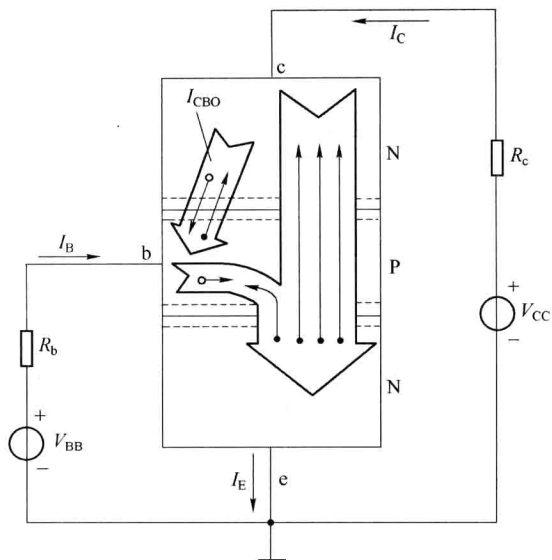


图 1.16 NPN 型三极管内部载流子的运动和各级电流

① 发射区向基区发射电子。由于发射结加正向电压，又因为发射区杂质浓度高，发射区大量的多子电子向基区扩散，形成电子电流，由于电子带负电，电子流动的方向与电流的方向相反。与此同时，基区多子空穴也向发射区扩散形成空穴电流，由于基区空穴浓度远低于发射区电子浓度，与电子电流相比空穴电流可忽略，所以可以认为，发射区向基区发射电子形成发射极电流 I_E 。

② 电子在基区扩散和复合。电子扩散到达基区后，很少一部分电子与基区的空穴复合，复合的空穴由外电源 V_{BE} 不断补充，形成基极电流 I_B ，由于基区很薄，且掺杂浓度很低，因而绝大多数电子继续扩散到集电结边缘。

③ 集电区收集电子。由于集电结反向偏置且结面积较大，外电场将阻止集电区的多子向基区扩散，同时将扩散到集电结边缘的电子收集到集电区，在外电源 V_{CE} 的作用下形成集电极电流 I_C 。

可见，三极管在外电源的作用下，发射区向基区注入的载流子几乎都到达集电区形成集电极电流 I_C ，只有很小部分载流子在基区复合形成基极电流 I_B ，显然 $I_C \gg I_B$ ，且发射极电流为

$$I_E = I_B + I_C \quad (1.2)$$

当发射结正向电压改变时，即基极电流改变时，发射区注入载流子数将跟随改变，从而集电极电流 I_C 产生相应的变化，由于 $I_B \ll I_C$ ，很小的 I_B 变化就能引起 I_C 较大的变化，这就是三极管的电流放大作用。三极管的放大能力用集电极电流与基极电流之比来反映，即

$$\bar{\beta} \approx \frac{I_C}{I_B} \quad (1.3)$$

$\bar{\beta}$ 称为三极管共射极电路的直流电流放大系数。三极管制成后， $\bar{\beta}$ 也就确定了，其值远大于 1。