

General Education

普通高等教育“十一五”规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANZI JISHU

电子技术

张 杰 主 编
王晓容 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANZI JISHU

电子技术

主 编 张 杰
副主编 王晓容
编 写 左 能 崔海文
主 审 佟维权



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材（高职高专教育）。

本书共分八章，主要内容包括：半导体器件、三极管放大电路、集成运算放大器及其应用、直流电源、数字电路基础知识、组合逻辑电路、时序逻辑电路和脉冲波形的产生与变换。本书以器件、电路与应用三者的有机结合为主线，注重实践和应用，突出对学生基本技能的培养，并努力反映现代电子的新技术、新成果。

本书可供高职高专、成人高校的电力技术类、自动化类、机械类等工科专业的师生使用，也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电子技术/张杰主编. —北京：中国电力出版社，2007

普通高等教育“十一五”规划教材·高职高专教育

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5533 - 7

I. 电... II. 张... III. 电子技术—高等学校：技术学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 066455 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 6 月第一版 2007 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 327 千字

印数 0001—3000 册 定价 21.60 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

考虑到高职高专教育的培养目标是技术应用性专门人才，本教材在编写中突出了以下几个特点：

（1）在重点保证基础理论、基本知识够用的前提下，注重实践和应用，并突出了对学生基本技能的培养。

（2）书中引用很多实例，每章均有相关的练习，帮助学生加深对本章内容的理解与掌握。

（3）努力反映现代电子的新技术、新成果，使教材尽可能跟上电子技术领域的新发展。

（4）以器件、电路与应用三者的有机结合为主线，注重实用性。

本书由哈尔滨电力职业技术学院和四川电力职业技术学院的教师共同编写，其中王晓容编写第1、2章，崔海文编写第4章，张杰编写第3、5、6章，左能编写第7、8章，并由张杰负责全书的统稿工作。

全书由哈尔滨电力职业技术学院佟维权教授主审，他对初稿提出了许多宝贵的意见。在编审过程中，中国电力出版社的同志给予了大力支持。值本书完稿之际，对书末所附参考文献的作者，以及以上各位同志，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免存在一些问题，希望读者批评指正。

编者

2007年3月

目 录

前言

第1章 半导体器件	1
1.1 半导体特性	1
1.2 半导体二极管	3
1.3 半导体三极管	7
1.4 场效应管	11
本章小结	14
习题	14
第2章 三极管放大电路	17
2.1 基本放大电路	17
2.2 稳定静态工作点的放大电路	24
2.3 微变等效电路分析法	25
2.4 共集电极放大电路	29
2.5 多级放大电路	31
2.6 功率放大电路	34
2.7 正弦波振荡器	40
本章小结	47
习题	48
第3章 集成运算放大器及其应用	53
3.1 差动放大器	53
3.2 集成运算放大器	56
3.3 放大电路中的反馈	59
3.4 基本运算电路	65
本章小结	70
习题	70
第4章 直流电源	73
4.1 整流滤波电路	73
4.2 稳压电路	77
4.3 可控整流电路	84
本章小结	104
习题	104
第5章 数字电路基础知识	107
5.1 数字电路概述	107
5.2 数制与编码	108

5.3 二极管和三极管的开关特性	110
5.4 逻辑代数	113
5.5 逻辑函数的表示方法	117
5.6 逻辑函数的化简	119
5.7 集成门电路及其芯片	124
本章小结	133
习题	133
第6章 组合逻辑电路	135
6.1 组合逻辑电路的分析和设计方法	135
6.2 常用组合逻辑部件	139
本章小结	149
习题	149
第7章 时序逻辑电路	151
7.1 RS 触发器	151
7.2 JK 触发器	156
7.3 D 触发器	158
7.4 触发器的应用	161
7.5 寄存器	164
7.6 计数器	168
本章小结	185
习题	186
第8章 脉冲波形的产生与变换	191
8.1 单稳态触发器	191
8.2 施密特触发器	196
8.3 多谐振荡器	200
8.4 555 集成定时器及其应用	202
本章小结	206
习题	206
参考文献	209

第1章 半导体器件

半导体器件是组成各种电子电路的基础,只有掌握半导体器件的结构、性能和工作原理,才能正确分析电子电路的工作原理,正确选择和合理使用半导体器件。本章在阐明半导体导电特性后,分析了PN结的单向导电性,并在此基础上着重讨论二极管、三极管、场效应管的结构特点、工作原理、外特性和主要参数。

1.1 半导体特性

1.1.1 半导体

自然界的物质就其导电性能可分为导体、绝缘体和半导体。导体的导电性能很好,如金、银、铜等。绝缘体的导电性能很差,如塑料、云母、陶瓷等。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,常用的半导体材料有硅、锗、硒和砷化镓等。

半导体之所以在电子器件中得到广泛应用,是由于它具有以下独特的导电性能:

(1) 热敏性。半导体对温度很敏感,电阻率随温度变化显著。当温度升高时,电阻率随温度成指数规律下降,导电能力显著增强。利用半导体的温度特性,可制造热敏元件。

(2) 光敏性。半导体对光照也很敏感,其电阻率随光照而变化。利用半导体的光敏性,可制造光敏元件。

(3) 可掺杂性。半导体的电阻率随掺入微量杂质而发生显著变化。利用这一特性,通过工艺手段,可以制造出各种性能和不同用途的半导体器件。

纯净的半导体(本征半导体)中载流子数量很少,导电能力很弱,其载流子——自由电子和空穴,在热或光照作用下(称为热激发或本征激发)成对地产生。

1.1.2 杂质型半导体

在本征半导体中有选择地加入某些其他元素(称为杂质),就会使它的导电能力大大增强,这样的半导体称为杂质半导体。杂质半导体分为P型半导体和N型半导体两种。

1. P型半导体

在本征半导体硅或锗中掺入微量三价元素(如硼),则空穴的浓度大大增加,空穴成为多数载流子,而自由电子成为少数载流子。这种以空穴导电为主的半导体称为空穴型半导体或P型半导体,如图1-1所示。

2. N型半导体

在本征半导体硅或锗中掺入微量五价元素(如磷),将会使自由电子的浓度大大增加,自由电子成为多数载流子,而空穴成为少数载流子。这种以自由电子导电为主的半导体称为电子型半导体或N型半导体,如图1-2所示。

无论是P型半导体,还是N型半导体,虽然它们各自有一种载流子占多数,但是整个半导体仍然呈电中性。

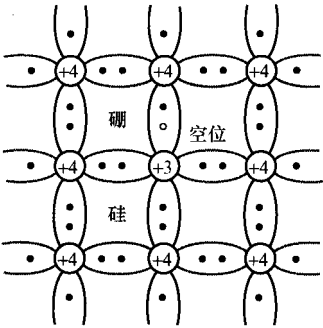


图 1-1 P 型半导体

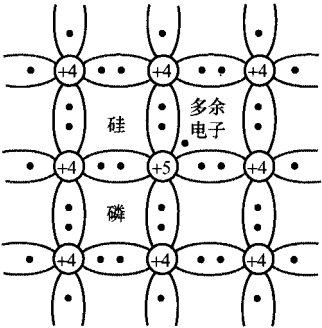


图 1-2 N 型半导体

1.1.3 PN 结

1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体接触以后，由于交界面两侧的半导体类型不同，存在电子和空穴的浓度差，就会产生多数载流子的扩散运动，即 N 区电子向 P 区扩散，P 区空穴向 N 区扩散。由于载流子的扩散运动，P 区一侧失去空穴剩下负离子，N 区一侧失去电子剩下正离子，结果在交界面附近形成一个空间电荷区，这个空间电荷区就是 PN 结，如图 1-3 所示。PN 结内产生一个方向由 N 区指向 P 区的内电场，这个内电场使 PN 结的宽度不变。

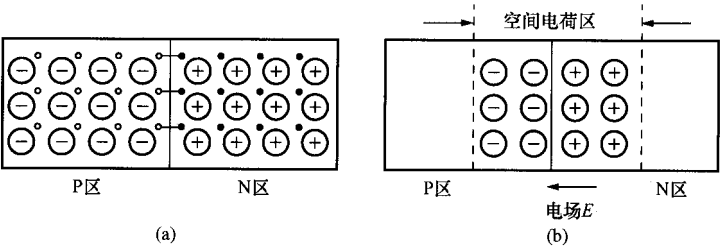


图 1-3 PN 结的形成
(a) 载流子的扩散运动；(b) PN 结

2. PN 结的特性

(1) PN 结的正向导通特性。

当 PN 结外加正向电压，即把电源正极接 P 区，电源负极接 N 区，称 PN 结为正向偏置，简称正偏。此时外电场与内电场方向相反，PN 结变窄，N 区的多数载流子自由电子和 P 区的多数载流子空穴进行扩散运动，在回路中形成较大的正向电流 I_F ，PN 结正向导通，呈低阻状态，如图 1-4 (a) 所示。

(2) PN 结的反向截止特性。

当 PN 结外加反同电压，即把电源正极接 N 区，电源负极接 P 区，称 PN 结为反向偏置，简称反偏。这时外电场与内电场方向相同，PN 结变宽，N 区的少数载流子空穴和 P 区的少数载流子自由电子，在强电场作用下，在回路中形成非常小的反向电流 I_R ，PN 结反向截止，呈高阻状态，如图 1-4 (b) 所示。

综上所述，加正向电压时 PN 结的正向电阻很小，正向电流 I_F 较大；外加反向电压时 PN 结的反向电阻很大，反向电流 I_R 很小，即 PN 结具有单向导电性。

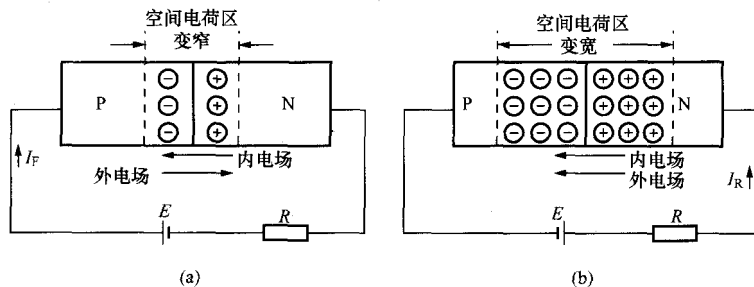


图 1-4 PN 结的单向导电性

(a) 正向导通; (b) 反向截止

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构和类型

半导体二极管（简称二极管）是由一个 PN 结加上电极引线 and 外壳封装而成的。P 端的引出线是正极（又称阳极），N 端的引出线是负极（又称阴极）。二极管的结构和图形符号如图 1-5 所示。

二极管的类型较多，按制作二极管的半导体材料可分为硅二极管和锗二极管；按结构可分为点接触型二极管和面接触型二极管。点接触型二极管的结面积小，结电容也小，高频性能好，但允许通过的电流

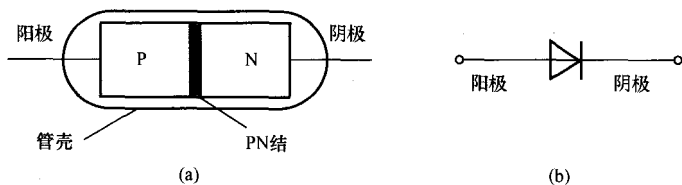


图 1-5 二极管的结构和图形符号

(a) 结构; (b) 图形符号

较小，一般应用于高频检波和小功率整流电路中，也用作数字电路的开关元件。面接触型二极管则相反，结面积较大，结电容也大，可通过较大的电流，但工作频率较低，常用于低频整流电路中。

小功率二极管常用玻璃壳或塑料壳封装。大功率二极管为便于散热，一般使用金属外壳，并制作成螺栓式或平板压接式。

1.2.2 二极管的伏安特性曲线

二极管的伏安特性曲线是指流过二极管的电流随外加偏置电压变化的关系曲线，它定量地表示了二极管的单向导电性。二极管的伏安特性曲线如图 1-6 所示。

1. 正向特性

在正向特性曲线的起始段（OA 段），由于正向电压较小，外电场不足以克服内电场的作用，正向电流很小，称为死区。通常将 A 点对应的电压称为死区电压或阈值电压，硅管的死区电压约为 0.5V，锗管约为 0.1V。当正向电压超过死区电压后，外电场抵消了内电场，正向电流迅速增大，二极管正向电阻变得很小，二极管导通。二极管导通后，它两端的电压变化很小，基本上是个常数，通常硅管电压降约为 0.7V，锗管约为 0.3V。

2. 反向特性

在反向电压的作用下，反向电流极小，二极管反向截止。反向电流越小，二极管的反向

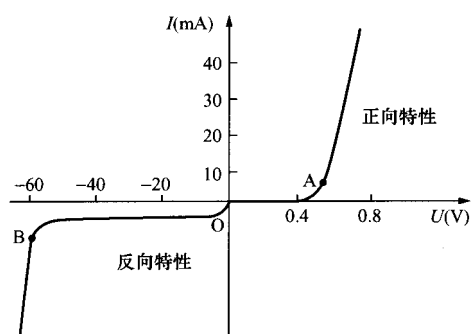


图 1-6 二极管的伏安特性曲线

电阻越大, 反向截止性能越好。硅管的反向电流比锗管小得多 (通常硅管约为几微安到几十微安, 锗管可达几百微安)。

当外加反向电压增大到一定值时, 反向电流突然增大, 二极管被反向击穿。这时所加的反向电压值称为反向击穿电压 U_B 。

二极管的特性对温度的变化很敏感。当温度升高时, 正、反向电流都随着增大, 表现为正向特性曲线向左移, 反向特性曲线向下移。但是, 若温度过高, 则可能导致本征激发所引起的少子

浓度超过杂质原子所提供的多子浓度, 此时杂质半导体变得与本征半导体相似, PN 结就不存在了。为此, 必须规定一个二极管的最高工作温度 (结温), 也保证它能正常工作。一般硅管所允许的最高结温为 $150 \sim 200^\circ\text{C}$, 锗管为 $75 \sim 100^\circ\text{C}$ 。

1.2.3 二极管的主要参数和使用常识

1. 二极管的主要参数

管子的参数是其特性的定量表述, 是合理选用管子的依据。各类管子的主要参数均可从晶体管手册中查到。二极管有以下主要参数:

(1) 最大整流电流 I_{FM} 。它是指在规定的环境温度下, 二极管长期运行时允许通过的最大正向电流的平均值。使用时不能超过此值, 否则会导致二极管过热烧坏。在选用二极管时, 工作电流不允许超过 I_{FM} 。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} 。它是指允许加在二极管上的最大反向电压。为了防止二极管因反向击穿而损坏, 通常将 U_{RM} 规定为反向击穿电压 U_B 的一半。

2. 二极管的型号

二极管的品种很多, 各类二极管用不同型号来表示, 国产二极管的型号由五部分组成, 其各部分的代号及意义见表 1-1。

表 1-1

二极管型号各部分的代号及意义

第一部分 (数字)	第二部分 (汉语拼音字母)	第三部分 (汉语拼音字母)	第四部分 (数字)	第五部分 (汉语拼音字母)
电极数目: 2—二极管	材料与极性: A—N 型锗 B—P 型锗 C—N 型硅 D—P 型硅	二极管类型: P—普通管 W—稳压管 Z—整流管 K—开关管 E—发光管 U—光电管	二极管序号: 表示同一类型中某些性能与参数的差别	规格号: 表示同型号中的档别

例如: 2DP6 是 P 型硅普通二极管; 2AK6 是 N 型锗开关二极管; 2CZ14F 是 N 型硅整流二极管中的 F 档。

3. 二极管的检测

在实际电路中, 二极管损坏是常见的故障, 在使用二极管时, 必须注意极性不能接错。

因此,用万用表判别二极管的好坏和管脚极性是二极管应用中的一项基本技能。

(1) 判别二极管的好坏。将万用表的电阻档置 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 量程(一般不用 $R \times 1$ 或 $R \times 10k$ 量程),如果测得二极管的正向电阻为几百欧到几千欧,反向电阻在几百千欧以上,则可确定二极管是好的;如果测得正、反向电阻均很小,则管子内部短路;如果测得正、反向电阻差别不大,则管子质量不好;如果测得正、反向电阻均很大,则管子开路。

需要说明的是,使用万用表的不同量程测量同一只二极管时,测得的正向电阻是有一定差异的。这是因为二极管是一种非线性元件,其正向电阻值与流过它的电流有关,电流愈大,电阻愈小。万用表不同量程对应的电流不同,所以测出的电阻也就不同。另外,如果用 $R \times 1$ 或 $R \times 10k$ 档测量小功率二极管,有可能损坏管子。

(2) 判别二极管的管脚极性。用万用表的 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 档测量二极管的正、反向电阻,当测得电阻较小时,黑表笔所接的是二极管正极,红表笔所接的是二极管负极;反过来,当测得电阻很大时,红表笔所接的是二极管正极,而黑表笔所接的是二极管负极。

1.2.4 二极管的应用电路举例

二极管是电子电路中最常用的半导体器件之一。利用其单向导电性及导通时正向压降很小的特点,可应用于整流、检波、钳位、限幅、开关以及元件保护等各种电路。

1. 整流

所谓整流就是将交流电变为单方向脉动的直流电。利用二极管的单向导电性可组成单相、三相等各种形式的整流电路。交流电经过整流、滤波、稳压便可获得平稳的直流电。这些内容将在第4章详细介绍。

2. 钳位

利用二极管正向导通时压降很小的特性,可组成钳位电路,如图1-7所示。

图1-7中,若A点 $U_A = 0V$,二极管VD可正向导通,其压降很小,故F点的电位也被钳制在 $0V$ 左右,即 $U_F \approx 0V$ 。

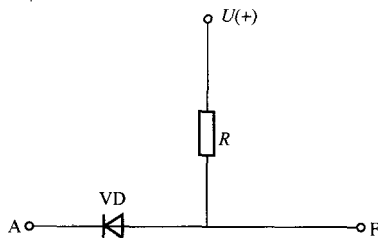


图1-7 二极管钳位电路

3. 限幅

利用二极管正向导通后其两端电压很小且基本不变的特性,可以构成各种限幅电路,使输出电压限幅在某一电压值以内。图1-8(a)所示为一正、负对称限幅电路,设 $u_i = 10\sin\omega t V$, $U_{S1} = U_{S2} = 5V$ 。

在 $-U_{S2} < u_i < U_{S1}$ 期间,VD1、VD2都处于反向偏置而截止,因此 $i = 0$, $u_o = u_i$; 当 $u_i > U_{S1}$ 时,VD1处于正向偏置而导通,使输出电压保持在 U_{S1} ; 当 $u_i < -U_{S2}$ 时,VD2处于正向偏置而导通,输出电压保持在 $-U_{S2}$ 。由于输出电压 u_o 被限制在 $+U_{S1}$ 与 $-U_{S2}$ 之间,即 $|u_o| \leq 5V$,好像将输入信号的高峰和低谷部分削掉一样,因此这种电路又称为削波电路。其输出波形如图1-8(b)所示。

1.2.5 常用的特殊二极管

前面介绍了普通二极管,还有一些具有某种特殊用途的二极管,称为特殊二极管,如稳压管(第四章介绍)、光电二极管、发光二极管等,分别介绍如下。

1. 光电二极管

光电二极管又叫光敏二极管,其反向电流大小随光照强度的变化而变化。它的图形符号

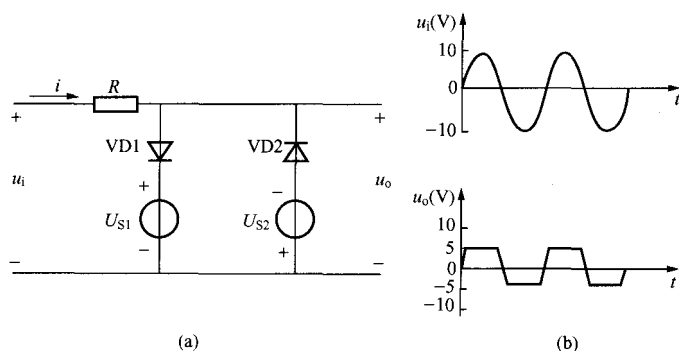


图 1-8 二极管限幅电路及波形

(a) 限幅电路; (b) 波形

和伏安特性曲线如图 1-9 所示。曲线中 E 表示照度, lx 为照度单位。由曲线可知, 反向电流与照度成正比。

光电二极管可用作光的测量传感或光电转换控制器件。

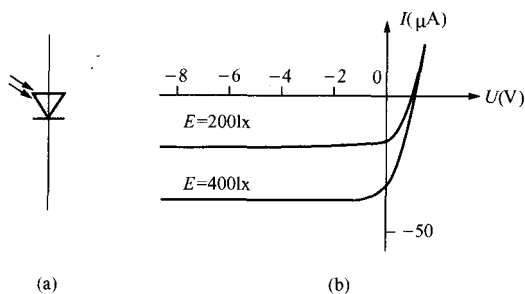


图 1-9 光电二极管

(a) 图形符号; (b) 特性曲线

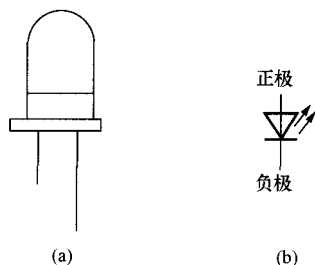


图 1-10 发光二极管的外形及图形符号

(a) 外形; (b) 图形符号

2. 发光二极管

(1) 发光二极管的图形符号及特性。

发光二极管是一种将电能转换成光能的半导体器件, 管芯仍是一个 PN 结, 通常用透明塑料封装, 简称 LED。其外形及图形符号如图 1-10 所示。

发光二极管加正向电压, 且电流达到一定值 (几毫安至几十毫安) 时就能正常发光, 正向压降约为 $2 \sim 3\text{V}$ 。发光二极管所发光的颜色由其材料决定, 通常有红色、绿色、蓝色、橙色等。一般, 管脚引线较长的为正极, 较短的为负极。

(2) 发光二极管的应用。

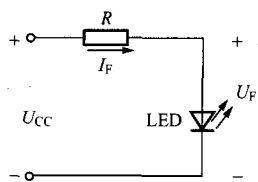


图 1-11 电源通断指示电路

1) 电源通断指示电路。电源通断指示电路如图 1-11 所示。在指示电路中发光二极管通常称为指示灯, 在实际应用中给人们提供很大的方便。发光二极管的供电电源既可以是直流也可以是交流, 但必须注意的是, 发光二极管是一种电流控制器件, 应用中只要保证发光二极管的正向工作电流在所规定的范围之内, 它就可以正常发光。具体的工作电流可查阅有关资料。

2) 数码管。数码管是电子技术应用的主要显示器件, 数码

管就是用发光二极管经过一定的排列组成的。图 1-12 所示是最常用的七段型数码管，要使它显示 0~9 的一系列数字，只要点亮其内部相应的显示段即可。七段型数码管可分为如图 1-12 (b) 所示的共阳极和如图 1-12 (c) 所示的共阴极。

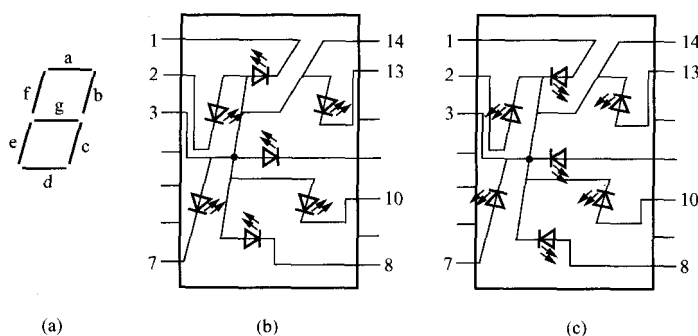


图 1-12 七段型数码管

(a) 笔段编码；(b) 共阳极 LED 分布；(c) 共阴极 LED 分布

1.3 半导体三极管

1.3.1 三极管的结构和类型

1. 三极管的结构和符号

半导体三极管（简称三极管），是组成放大电路的核心器件。三极管有 NPN 型和 PNP 型两种结构，其结构和图形符号如图 1-13 所示。NPN 型和 PNP 型三极管符号的区别是发射极箭头的方向不同，箭头方向代表发射结正偏时发射极的电流方向。

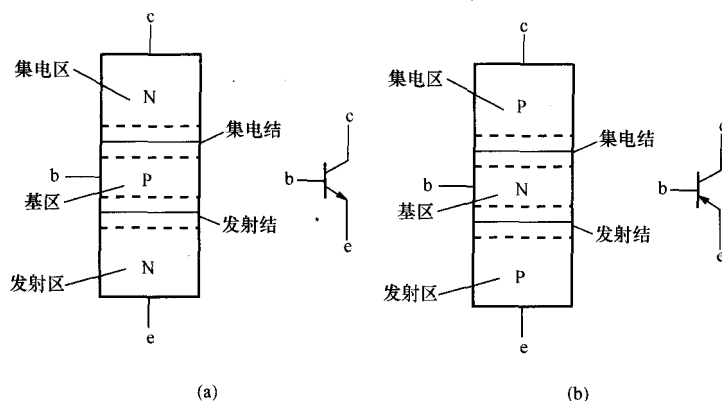


图 1-13 三极管结构示意图和图形符号

(a) NPN 型的结构和图形符号；(b) PNP 型的结构和图形符号

无论是 NPN 型还是 PNP 型三极管，都有集电区、基区和发射区三个区，分别从这三个区引出集电极 c、基极 b 和发射极 e 三个电极。它还有两个 PN 结：集电区与基区之间的集电结和基区与发射区之间的发射结。三极管的结构特点是：基区很薄，发射区掺杂浓度很高，集电结截面积大于发射结截面积。在使用三极管时，发射极和集电极不能互换，否则三极管的放大能力会下降。

2. 三极管的分类和型号

(1) 分类。按制造材料的不同，三极管分为硅管和锗管两类，硅管的热稳定性比锗管好，所以在电子电路中多用硅管。目前国内生产的硅管多为 NPN 型，锗管多为 PNP 型。根据功率大小，三极管分为小功率管、中功率管和大功率管等。根据频率特性，三极管分为低频管和高频管。

(2) 三极管的型号。按照国家标准 GB249—1974 的规定，国产三极管的型号由五个部分组成，各部分的代号及意义见表 1-2。

表 1-2 三极管型号各部分的代号及意义

第一部分 (数字)	第二部分 (汉语拼音字母)	第三部分 (汉语拼音字母)	第四部分 (数字)	第五部分 (汉语拼音字母)
电极数目： 3—三极管	材料与极性： A—PNP 锗 B—NPN 锗 C—PNP 硅 D—NPN 硅 K—开关管 CS—场效应器件	三极管类型： X—低频小功率管 G—高频小功率管 D—低频大功率管 A—高频大功率管 U—光电器件	三极管序号： 表示某些性能与 参数的差别	规格号： 表示同型号三极 管的档别

例如：3DG100A 是 NPN 型高频小功率硅管；3AD50A 是 PNP 型低频大功率锗管。

1.3.2 三极管的电流放大作用

1. 三极管的电流分配关系

三极管要具有一定的放大作用，必须使其发射结正向偏置，集电结反向偏置。只要满足

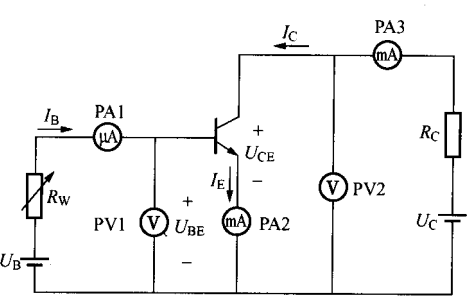


图 1-14 测量三极管电流的实验电路

这个条件，三极管内部载流子就会按一定的规则运动，载流子的运动，就形成集电极电流 I_C ，基极电流 I_B 和发射极电流 I_E 。为了定量地分析三极管的电流分配关系和放大原理，下面先介绍一个实验，图 1-14 为测量三极管电流的实验电路。

电源 U_B 、 R_W 使三极管发射结正偏， U_C 、 R_C 使集电结反偏，三极管处于放大状态。 R_W 可以调节基极电流 I_B 。三只电流表分别测量三个电极的电流。实验数据如表 1-3 所示。

表 1-3 三极管电流实验数据

I_B (mA)	0	0.02	0.03	0.04	0.05
I_C (mA)	≈ 0	1.4	2.3	3.2	4
I_E (mA)	≈ 0	1.42	2.33	3.24	4.05
I_C/I_B	0	70	76	80	80

由表 1-3 可知，每一组数据都满足以下关系式，即

$$I_E = I_B + I_C$$

上式说明流入三极管的电流等于流出三极管的电流之和，满足基尔霍夫电流定律。

2. 三极管的电流放大作用

从表 1-3 的数据分析可知, $I_E \approx I_C$, I_B 虽然很小, 但对 I_C 有控制作用, I_C 随 I_B 改变而改变。例如, 基极电流 I_B 由 0.04mA 上升到 0.05mA 时, 集电极电流 I_C 由 3.2mA 上升到 4mA, 即集电极电流的变化量与基极电流变化量之比 $\Delta I_C / \Delta I_B = (4 - 3.2) / (0.05 - 0.04) = 80$ 。这说明 I_C 的变化量近似为 I_B 变化量的 80 倍, 也就是说 I_B 的微小变化可以控制 I_C 的较大变化, 这就是三极管的电流放大作用。可见三极管是一种电流控制器件。

很显然, $\Delta I_C / \Delta I_B$ 反映了三极管电流的放大能力, 也可以说是电流 I_B 对 I_C 的控制能力。所以, 我们定义 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$ 为三极管的电流放大系数。

1.3.3 三极管的特性曲线

三极管的特性曲线全面反映了三极管各级电压与电流之间的关系, 是分析三极管各种电路的重要依据。工程上最常用的是输入特性曲线和输出特性曲线。这两种特性曲线可由晶体管特性图示仪直接显示, 也可通过实验电路进行测试。

1. 输入特性曲线

输入特性曲线是指当集电极与发射极间的电压 u_{CE} 为常量时, 基极电流 i_B 与基极和发射极的电压 u_{BE} 之间的关系曲线。图 1-15 是用晶体管特性图示仪观察到的三极管 (3DG141A 型) 的输入特性曲线。

由图 1-15 可知, 输入特性与二极管的正向特性相似。当电压 u_{BE} 小于三极管的死区电压 (硅管约为 0.5V, 锗管约为 0.1V) 时, 基极电流 i_B 几乎为零。当 u_{BE} 大于死区电压后, 基极电流 i_B 才随 u_{BE} 迅速增大, 三极管导通。管子导通后, 硅管的发射结电压 u_{BE} 约为 0.7V, 锗管 u_{BE} 约为 0.3V。

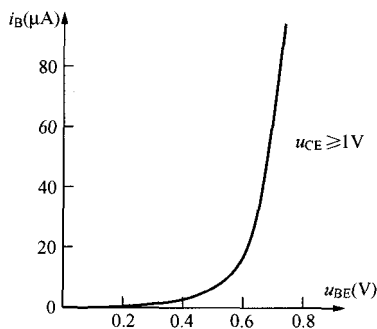


图 1-15 三极管输入特性曲线

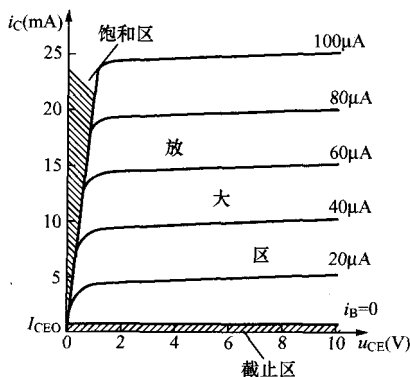


图 1-16 三极管输出特性曲线

2. 输出特性曲线

输出特性曲线是指当基极电流 i_B 为常量时, 集电极电流 i_C 与输出电压 u_{CE} 之间的关系曲线。用晶体管特性图示仪观察到的三极管 (3DG141A 型) 的输出特性曲线如图 1-16 所示。

根据三极管的工作状态不同, 可将输出特性分为三个区域:

(1) 截止区。将 $i_B = 0$ 对应曲线以下的区域称为截止区。这时 $i_C = I_{CEO} \approx 0$, 集电极到发射极只有很微小的电流, 称为穿透电流。三极管工作于截止状态, 管子的集电极与发射极之间接近开路, 等效于开关断开状态, 三极管无放大作用。三极管工作在截止状态的外部条件是: 发射结反偏 (或零偏), 集电结反偏。

(2) 放大区。当 $i_B > 0$, $u_{CE} > 1V$ 后, 每条曲线几乎与横轴平行, i_C 不受 u_{CE} 的影响, i_C 只受 i_B 的控制, 并且 i_B 微小的变化就能控制 i_C 较大的变化, 三极管工作在放大状态, 具有电流放大能力。三极管工作于放大状态的外部条件是: 发射结正偏, 集电结反偏。

(3) 饱和区。当 $i_B > 0$ 且 $u_{CE} < 1V$ 时, 特性曲线的起始上升部分, i_C 不受 i_B 控制, 但随 u_{CE} 的增大而迅速增大, 三极管工作在饱和状态, 无放大作用。因为 u_{CE} 值很小, 三极管的集电极和发射极电位近似相等, C、E 电极之间接近短路, 等效于开关闭合状态。三极管工作于饱和状态的外部条件是: 发射结和集电结均为正偏。

综上所述, 三极管工作在放大区时才有电流放大作用, 常用来构成各种放大电路。三极管工作于饱和区和截止区时, 相当于开关的断开和接通, 常用于开关控制和数字电路。

1.3.4 三极管的主要参数

三极管的特性除用特性曲线描述外, 还可以用参数来表征, 三极管的参数是正确选用管子的重要依据。三极管的参数较多, 下面介绍几个主要参数。

1. 电流放大系数

(1) 共发射极交流电流放大系数 β 为

$$\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$$

(2) 共发射极直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 为

$$\bar{\beta} = (I_C - I_{CEO}) / I_B \approx I_C / I_B$$

一般情况下认为 $\bar{\beta} \approx \beta$ 。需要指出的是, β 并不是一个不变的常数, 它要受 I_C 的影响, I_C 过大或过小都会使 β 值减小, 在选择三极管时, β 值不宜太大, 以免影响电路的稳定性。

2. 极间反向电流

(1) 集电极——基极间的反向饱和电流 I_{CBO} 。此电流是指在发射极开路时, 集电极和基极之间的反向电流。在一定温度下, I_{CBO} 基本上是个常数, 故称为反向饱和电流。 I_{CBO} 可由图 1-17 测得。 I_{CBO} 受温度影响较大, 硅管的 I_{CBO} 比锗管小得多, 所以在环境温度变化较大时, 尽可能选用硅管, 以保证电路稳定工作。

(2) 集电极——发射极间的反向电流 I_{CEO} 。 I_{CEO} 是在基极开路时, C、E 极间的反向电流 (也称穿透电流), 测试电路如图 1-18 所示。通常情况下有

$$I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$$

I_{CEO} 大的管子热稳定性差。

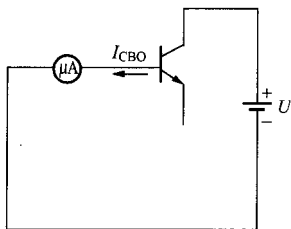


图 1-17 I_{CBO} 测试电路

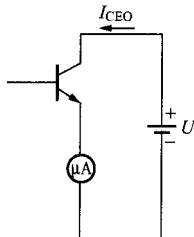


图 1-18 I_{CEO} 测试电路

3. 极限参数

极限参数是三极管正常工作时, 电压、电流、功率等的极限值, 使用时不能超过任何一个极限值, 以防止管子性能变坏甚至损坏。

(1) 集电极最大允许电流 I_{CM} 。当 I_C 过大时, β 将下降, 放大性能变差。一般规定, 使 β 下降至正常值的 $2/3$ 时所对应的 I_C 定义为 I_{CM} 。实际应用时, 不允许工作电流超过 I_{CM} , 以免使三极管放大能力显著下降, 甚至造成三极管损坏。

(2) 反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。 $U_{(BR)CEO}$ 是指当基极开路时, 集电极与发射极之间能承受的最大电压。当电压 $U_{CE} > U_{(BR)CEO}$ 时, 三极管将被击穿。

(3) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 。 P_{CM} 表示集电结允许损耗功率的最大值, 超过 P_{CM} 时, 管子过热会使其性能变坏或损坏, 因此规定 $P_C = i_C u_{CE} \leq P_{CM}$ 。根据给定的 P_{CM} 值可以做出一条 P_{CM} 曲线, 如图 1-19 所示, 由 P_{CM} 、 I_{CM} 和 $U_{(BR)CEO}$ 包围的区域为三极管安全工作区。

由于半导体材料对温度比较敏感, 因此三极管的参数要随温度发生变化, 而其中 I_{CBO} 、 I_{CEO} 、 β 及 U_{BE} 受温度的影响最大, 从而导致三极管的集电极电流 I_C 也随之发生变化。当温度升高时, I_C 就会增大, 这样会使电路工作不稳定。

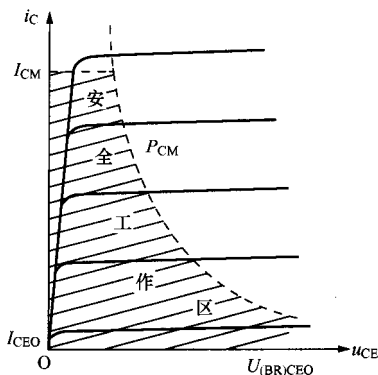


图 1-19 三极管安全工作区

1.4 场效应管

场效应管是一种新型的半导体器件, 它利用电场来控制半导体中的多数载流子运动, 又称为单极型晶体管。它除了兼有一般晶体管体积小、寿命长等特点外, 还具有输入阻抗高、噪声低、热稳定性好、抗辐射能力强、功耗小、工作电源电压范围宽等优点, 因此得到广泛应用。

根据结构不同, 场效应管分成结型场效应管和绝缘栅型场效应管两大类, 其中绝缘栅型场效应管由于制造工艺简单, 便于实现集成化, 因此应用更为广泛。本节仅介绍绝缘栅型场效应管, 又称 MOS 管。

1.4.1 绝缘栅型场效应管的结构

绝缘栅型场效应管可分为增强型 (有 N 沟道、P 沟道之分) 和耗尽型 (也有 N 沟道、P 沟道之分) 两种。凡栅源电压 u_{GS} 为零时, 漏极电流 i_D 也为零的管子均属于增强型管; 凡 u_{GS} 为零时, i_D 不为零的管子均属于耗尽型管。

N 沟道增强型 MOS 管的结构和图形符号如图 1-20 所示。它在一块低掺杂的 P 型硅片上生成一层 SiO_2 薄膜绝缘层, 然后用光刻工艺扩散两个高掺杂的 N 型区, 并引出两个电极, 分别是漏极 D 和源极 S; 在源极和漏极之间的绝缘层上镀一层金属铝作为栅极 G; P 型硅片称为衬底, 用字母 V 表示。

1.4.2 绝缘栅型场效应管的原理和特性

1. 栅源电压 u_{GS} 的控制作用

当 $u_{GS} = 0V$ 时, 漏源之间相当于两个背向的二极管, 不存在导电沟道, 不论加在 D、S 极间的电压如何, 不会在 D、S 极间形成电流。

当栅源极加有电压时, 若 $0 < u_{GS} < u_{GS(th)}$ ($u_{GS(th)}$ 称为开启电压), 通过栅极和衬底间的