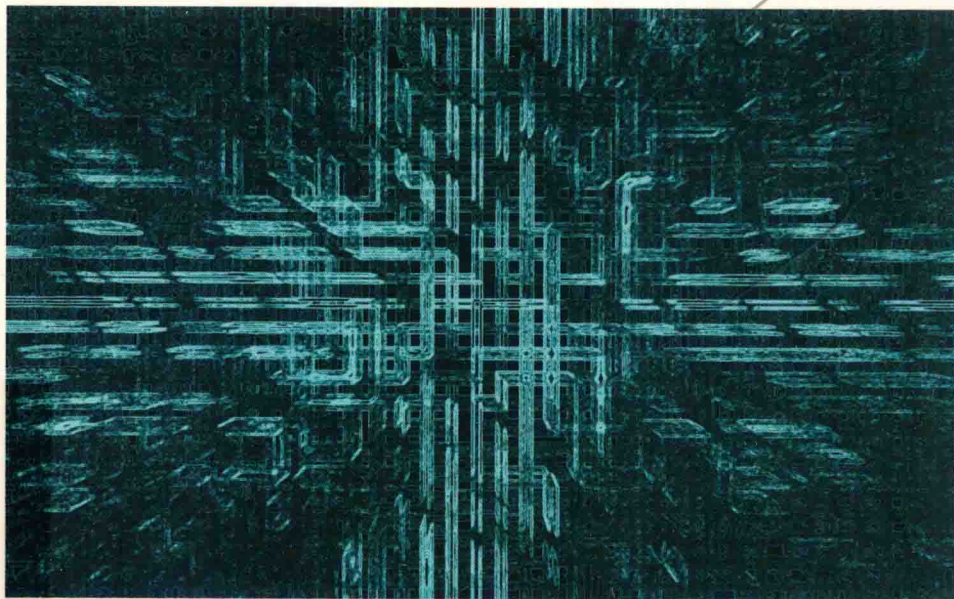


电子技术理论与应用

靳响来◎著



天津出版传媒集团

天津科学技术出版社

电子技术理论与应用

靳响来 著



天津出版传媒集团

天津科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

电子技术理论与应用 / 靳响来著. — 天津 : 天津科学技术出版社, 2018.3

ISBN 978-7-5308-9971-7

I. ①电… II. ①靳… III. ①电子技术 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 142251 号

责任编辑: 张 婧

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

出版人: 蔡 颢

天津市西康路 35 号 邮编 300051

电话: (022)23332400

网址: www.tjkjcbbs.com.cn

新华书店经销

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 10 字数 256 000

2018 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定价: 39.80 元

作者简介



靳响来,男,1982年出生于山东省邹城市,2006年毕业于烟台大学电子信息科学与技术专业。现为山东省邹城市技工学校教师,目前主要从事电子技术、电子CAD、维修电工技能训练、电力拖动控制线路与技能训练等一体化教学与研究工作。自工作以来多次被评为“优秀教师”;2010年辅导学生参加第三届全国技工院校技能大赛山东省选拔赛中获“优秀指导教师称号”;2014年参加中国技能大赛山东省选拔赛电子技术项目组荣获“个人三等奖”。此外,制作的教案、课件多次荣获省二等奖、三等奖,辅导学生参加济宁市技工院校技能大赛多次荣获团体一等奖。

目 录

第1章 基本半导体器件	1
1.1 半导体二极管	1
1.2 半导体三极管	7
1.3 场效应晶体管	16
1.4 模拟集成电路	21
第2章 常用放大器单元	22
2.1 基本放大电路	23
2.2 集成运算放大电路	43
2.3 功率放大电路	52
第3章 正弦信号产生电路	60
3.1 正弦波振荡电路的基本概念	60
3.2 RC 正弦波振荡电路	61
3.3 LC 正弦波振荡电路	64
第4章 直流稳压电源	69
4.1 整流电路	70
4.2 滤波电路	73
4.3 稳压电路	75
第5章 数字电子技术基础知识	79
5.1 数制与编码	80
5.2 基本逻辑关系与逻辑门	83
5.3 逻辑函数	94
5.4 逻辑函数的卡诺图	98
第6章 数字逻辑电路	105
6.1 组合逻辑电路	106
6.2 时序逻辑电路	118
6.3 半导体存储器与可编程逻辑器件	135
第7章 脉冲信号的产生与整形	143
7.1 电压比较器	144
7.2 555 定时器与应用电路	147

第1章 基本半导体器件



你的位置



各种电子器件连接起来构成电子电路，电子器件是电子电路、电子系统乃至电子技术学科的基础。电子器件的基本材料是半导体，所以电子器件被普遍地称为半导体器件。半导体器件可以分为分立器件和集成器件。

了解了绪论中关于半导体的基本知识后，本章学习半导体二极管、三极管和场效应管等基本半导体分立器件的原理、符号、特性与应用，了解典型模拟集成器件的类型、特点，为电子技术的学习打下基础。



本章热身

进入新的学习之前请先来温习本章题目中的概念：

- (1) 什么是“半导体”？
 - (2) 什么是“分立”器件？什么是“集成”器件？
- 这几个问题并不难，答案都在绪论中哦！



本章关键词

- ◆ 二极管、单向导电性、正偏导通、反偏截止；
- ◆ 三极管、电流控制器件、双极型、放大区、饱和区、截止区；
- ◆ 场效应管、电压控制器件、单极型、恒流区、可变电阻区、截止区；
- ◆ 集成电路。

1.1 半导体二极管

1.1.1 二极管的结构与类型

半导体二极管是将一个PN结装入管壳密封并引出电极而成的，因此二极管的特性就是



图 1.1.1 半导体二极管的
电路符号

PN结的特性，也就是说，二极管具有单向导电性。

图 1.1.1 为半导体二极管的电路符号，二极管的两极分别称为正极或阳极 a(P 区)，负极或阴极 k(N 区)。因此

二极管的单向导电性表现为：当外加正向偏置电压（阳极接高电位、阴极接低电位）时，正偏的二极管呈现较小的电阻，理想状态下可以看成是短路，即正偏导通；反之，反偏二极管呈现很大的电阻，理想情况下可以看做是断路，即反偏截止。

不同结构与种类的二极管内 PN 结的面积不同，比如结面积很小的点接触型锗二极管 2AP1，最大整流电流是 16mA，最高工作频率是 150MHz，不能承受高的反向电压和大的电流，但适用于高频的检波、调制电路及脉冲数字电路里的开关元件，也可以用作小电流整流。

结面积较大的面接触型二极管能通过较大的正向电流，适合用于低频电路中。如 2CZ54 为整流二极管，最大整流电流为 500mA，最高工作频率为 3kHz。

按照适用范围，可以将二极管分为用于检波、限幅和小电流整流的普通二极管、将交流电转换成直流电的整流二极管以及用于计算机、脉冲控制和开关电路中的开关二极管等类型。二极管的型号命名方法参见附录 D。

常见二极管的外形如图 1.1.2 所示。

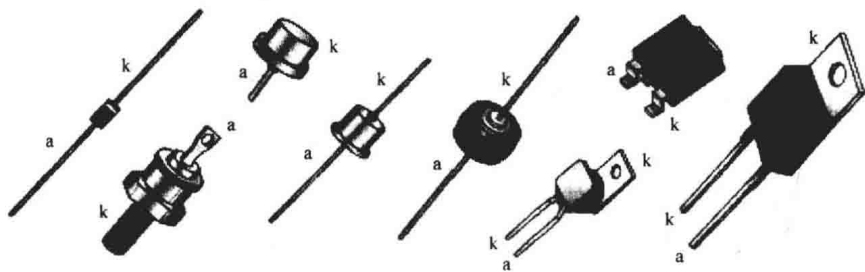


图 1.1.2 半导体二极管的常见外形

1.1.2 二极管的伏安特性与参数

1. 伏安特性曲线

将二极管的电流随外加偏置电压的变化规律以曲线的形式描绘出来就是二极管的伏安特性曲线，如图 1.1.3 所示。

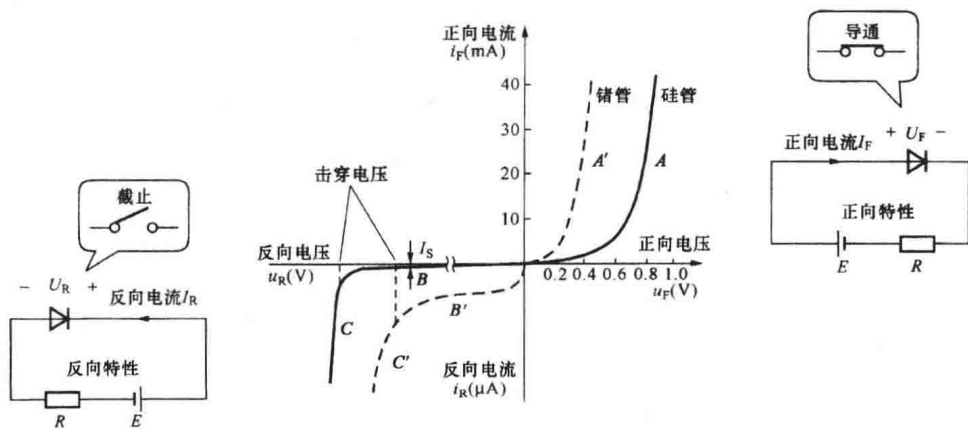


图 1.1.3 二极管的伏安特性

(1) 正向特性——外加正向电压 U_F 。正向电压 U_F 较小 (锗管约小于 0.1V, 硅管约小于 0.5V, 这个电压称为死区电压 U_{th}) 时, 还不足以产生正向电流。当 U_F 大于一定数值后, 扩散运动迅速增加, 开始产生正向电流, 并随 U_F 的增加以指数规律急剧上升, 如图 1.1.3 中 A 段所示。此时二极管正偏导通, 正向电阻极小, 理想情况下可以看成闭合开关 (短路)。

因为二极管正向导通电阻极小, 所以使用时必须外加限流电阻, 以免当 U_F 增加时, I_F 急剧增大而烧坏管子。从二极管的正向特性还可以看出: 当二极管正向电流在很大范围内变化时, 二极管两端的电压几乎不变。一般小功率硅管约为 0.7V, 锗管为 0.2~0.3V, 这个数值可以作为小功率二极管正向工作时管子两端直流压降的估算值, 简称正向压降或正向导通电压。

(2) 反向特性——外加反向电压 U_R 。当外加反向电压时, 管子内部为少子漂移运动, 形成的反向电流 I_R 极小, 即反向电阻极大。此时二极管反偏截止, 理想情况下可以看成断开开关 (断路)。

当反向电压 U_R 在一定范围内变化时, 由少子组成的反向电流 I_R 几乎不变, 又称为反向饱和电流 I_S , 即

$$I_R = I_S \quad (1.1.1)$$

当温度升高时, 少子数目增加, 所以 I_S 增加。室温下一般硅管的反向饱和电流小于 $1\mu A$, 锗管为几十微安到几百微安, 如图 1.1.3 中 B 段所示。

因此, 二极管正偏导通、反偏截止, 与 PN 结一样具有单向导电性。

(3) 击穿特性——外加反向电压 U_R 增大到一定程度。击穿特性属于反向特性的特殊部分。当 U_R 继续增大并超过某一特定电压值时, 反向电流将急剧增大, 这种现象称为击穿, 发生击穿时的 U_R 称为击穿电压 U_{BR} 。如图 1.1.3 中 C 段所示。

如果击穿时的反向电流过大, 二极管可能因过热而损坏。

2. 二极管的主要参数

只有了解了二极管的主要参数, 才能正确选用和判断二极管的好坏。

(1) 最大整流电流 I_F 。指二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流, 否则会使二极管因过热而损坏。

(2) 最高反向电压 U_{RM} 。 U_{RM} 为二极管工作时允许加的最大反向电压, 为使二极管安全工作, 一般手册上给出的最高反向电压为反向击穿电压 U_{BR} 的一半。

(3) 反向饱和电流 I_S 。指管子未击穿时的反向电流, 其值越小, 管子的单向导电性越好, 反向电流受温度影响较大。

(4) 最高工作频率 f_M 。 f_M 是二极管仍能保持单向导电性的外加电压频率上限。

(5) 二极管的温度特性。半导体具有热敏性, 而电子电路又不可避免地要受到外界温度及电路本身发热的影响。所以, 温度变化容易造成半导体器件工作不稳定。

例如, 温度每升高 $1^\circ C$, 二极管的正向压降将减小 $2\sim 2.5mV$; 温度每升高 $10^\circ C$, 反向饱和电流 I_S 将增加一倍。从图 1.1.3 的伏安特性曲线可以看出, 硅管的反向饱和电流较小, 因此比锗管稳定, 适用于温度变化较大的场合。总之, 当温度升高时, 二极管的单向导电性将变坏。

1.1.3 二极管的等效模型

半导体器件的特性复杂, 外加偏置不同, 半导体管的特性也随之改变, 不同于电阻等简单线性无源器件。因此, 为简化电路分析, 由若干可以代替实际非线性半导体器件的线性电

路元件组成的网络就是其等效模型。一般来说,模型精度越高,模型本身就越复杂,分析电路时的计算量就加大。因此,根据不同的工作条件和要求选择合适的等效模型,在分析和设计电子电路等实际工作中有着十分重要的作用。

另外,由于二极管反偏时反向电阻极大,一般模型中都认为反偏二极管是理想开路的,正偏二极管可根据不同情况建立不同的模型。

1. 理想模型

将二极管的单向导电特性理想化,忽略其正向导通电压和较小的正向电阻,认为正偏二极管的管压降为0,相当于短路导线,其伏安特性如图1.1.4所示。

一般在电源电压远大于^①二极管的正向导通压降时,利用理想模型来分析,不会产生较大的误差。

2. 恒压降模型

恒压降模型的伏安特性如图1.1.5所示,认为二极管除正偏导通后电阻为0外,二极管有一个恒定的管压降,对于硅管和锗管来说,分别取典型值0.7V和0.3V。恒压降模型比理想模型更接近实际,应用较广,一般在二极管电流大于1mA时,恒压降模型的近似精度还是相当高的。

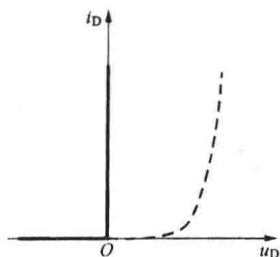


图 1.1.4 采用理想模型的二极管伏安特性

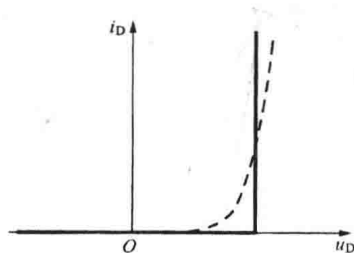


图 1.1.5 采用恒压降模型的二极管伏安特性

除以上模型外,还有更精确但也相对复杂的折线模型等,一般情况下,采用理想模型或恒压降模型即可满足精度要求。

1.1.4 特殊二极管

1. 稳压二极管

稳压二极管简称稳压管,又称为齐纳(Zener)二极管,是用特殊工艺制造的硅半导体二极管,其外形、结构、伏安特性均与普通二极管相似,也具有单向导电性。稳压二极管的特点是击穿区特性陡直且可以稳定地工作于击穿区而不损坏,其电路符号如图1.1.6所示。

稳压管的稳压作用是:在反向击穿区内,反向电流有很大变化,而稳压管两端的电压几乎保持不变。因此,稳压管稳压工作时应工作在反向击穿区。稳压管的反向击穿电压称为稳压管的稳定电压 U_Z ,反向击穿曲线越陡,稳压效果越好。



图 1.1.6 稳压二极管的电路符号

^① 一般,同一量纲的两个物理量 A 和 B 之间,若满足 $A > (5 \sim 10) B$,则可以认为 A 远大于 B ,记为 $A \gg B$ 。

2. 发光二极管

(1) 发光二极管。发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 是一种可以将电能直接转换成光能的半导体光电器件, 其电路符号如图 1.1.7 所示。



图 1.1.7 发光二极管
的电路符号

发光二极管也具有单向导电性: 反偏截止不发光, 正偏导通时因流过正向电流而发光, 其颜色与发光二极管的材料及掺杂元素有关。发光二极管可以分为发不可见光和发可见光两种, 前者有发红外光的砷化镓发光二极管等, 后者有发红光、黄光、绿光、蓝光和紫光的发光二极管等。

发光二极管的工作电流一般为几毫安至几十毫安, 正偏电压比普通二极管要高, 为 $1.5 \sim 3\text{V}$, 具有功耗小、体积小、可直接与集成电路连接使用的特点, 并且稳定、可靠、长寿 ($10^5 \sim 10^6\text{h}$)、光输出响应速度快 ($1 \sim 100\text{MHz}$), 应用十分方便和广泛, 除应用于各种发光显示方面以外, 另一重要应用是将电信号转变为光信号, 通过光缆传输, 接受端配合光电转换器件再现电信号, 实现光电耦合、光纤通信等应用。

(2) 半导体数码管。将做成条形字段的发光二极管按一定方式排列, 通过使其中某些字段的点亮来显示数字或符号的半导体发光器件称为半导体数码管。七段显示数码管是最常见的一种, 其内部除小数点外的字符由七个发光字段组成, 其字段排列如图 1.1.8 (a) 所示, 小数点用 DP 表示。例如, 图 1.1.8 (a) 中 “a”、“b”、“c” 字段发光则显示数字 “7”, 相应字形如图 1.1.8 (b) 所示。

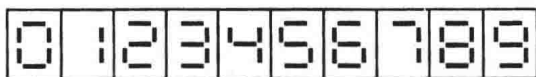
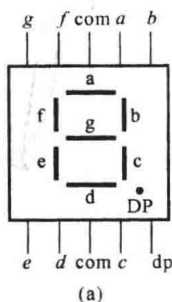


图 1.1.8 七段半导体数码管

(a) 外形与字段排列; (b) 数码字型

根据发光二极管的连接形式, 半导体数码管可以分为共阴和共阳两种。图 1.1.9 (a)、(b) 分别为共阴和共阳两种半导体数码管的内部原理图。从图 1.1.9 中可以看出: 对于共阴

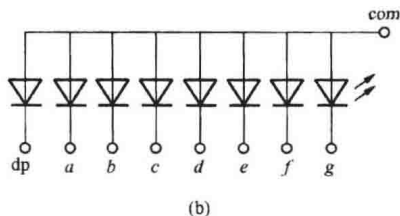
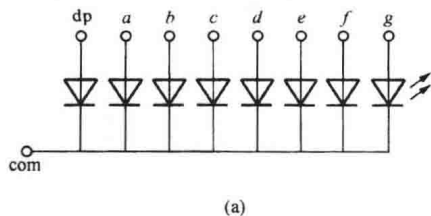


图 1.1.9 七段半导体数码管内部电路原理图

(a) 共阴极结构; (b) 共阳极结构

结构的数码管，应该将“com”接低电位，欲点亮的字段接高电位；对于共阳结构的数码管，应将“com”接高电位，欲点亮的字段接低电位^❶。需要注意的是，与普通二极管一样，也要注意限流电阻的使用，以免造成数码管的损坏。

半导体数码管字形清晰，工作电压低，体积小，可靠性好，寿命长，响应速度快，发光颜色因所用材料不同有红色、绿色、黄色等，其缺点是工作电流较大，段电流为几毫安至几十毫安。

3. 光电二极管

光电二极管也称为光敏二极管，其 PN 结被封装在透明玻璃外壳中，可以直接受到光的照射，电路符号如图 1.1.10 所示。

正偏时光电二极管的光敏特性不明显，所以，光电二极管在电路中一般处于反偏状态。无光照时，反向电阻很大，反向电流很小，处于截止状态；当有光照射在 PN 结上时，将产生光生电流，光的照度越大，光电流就越大。

光电二极管的材料几乎都是硅，光电二极管可以用来做测光元件、光电信号转换的传感器或与发光二极管配合实现光电传输和耦合。



图 1.1.10 光电二极管的电路符号

1.1.5 二极管在电子技术中的应用

二极管在电子技术中广泛地应用于整流、限幅、钳位、开关、稳压、检波等方面，大多是利用二极管单向导电的特点。

1. 整流

利用二极管的单向导电性可以把大小和方向都变化的正弦交流电变为单向脉动的直流电，简单、经济，在日常生活及电子电路中经常采用。简单的整流电路如图 1.1.11 所示。

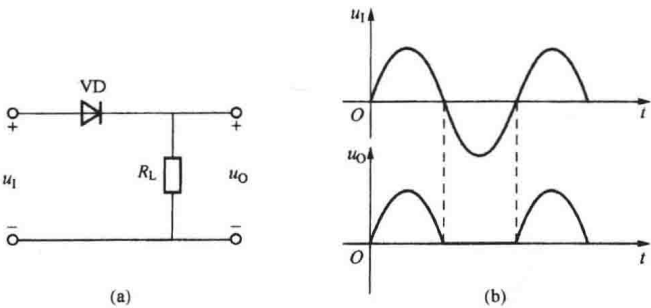


图 1.1.11 二极管的整流应用

(a) 二极管整流电路；(b) 输入与输出波形

电，简单、经济，在日常生活及电子电路中经常采用。简单的整流电路如图 1.1.11 所示。

2. 限幅

利用二极管的单向导电性，将输入电压限定在要求的范围之内，称为限幅。

图 1.1.12 (a) 所示的双向限幅电路中，交流输入电压 u_1 和直流电压 E_1 都对二极管 VD1 起作用；相应的 VD2 也同时受

u_1 和 E_2 的控制。在假设 VD1、VD2 为理想二极管时，有如下限幅过程发生：当输入电压 $u_1 > 3V$ 时，VD1 导通，VD2 截止， $u_0 = 3V$ ；当 $u_1 < -3V$ 时，VD2 导通，VD1 截止， $u_0 = -3V$ ；当 u_1 在 $-3V$ 与 $+3V$ 之间时，VD1 和 VD2 均截止，因此 $u_0 = u_1$ ，输出波形如图 1.1.12 (b) 所示。电路稍加变化，还可以得到各种不同的限幅应用，图 1.1.11 也可以

❶ 七段数码管的两个“com”端内部是连通的，实际应用中任意使用其中一个均可。

理解为限幅电路的一种。

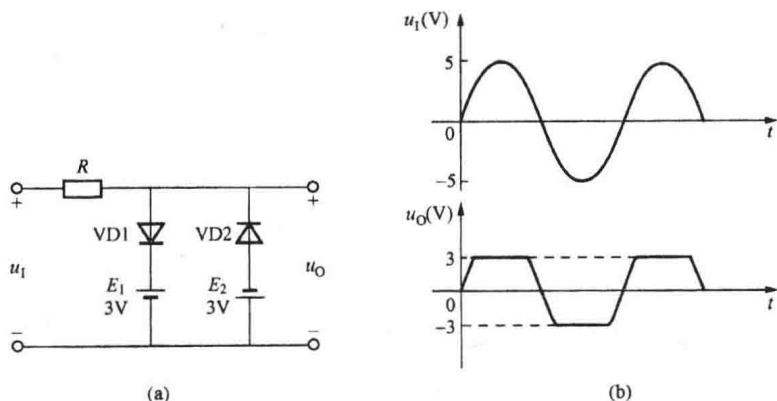


图 1.1.12 二极管的限幅应用
(a) 双向限幅电路；(b) 输入与输出波形

3. 稳压

除用不同系列的稳压二极管实现要求的稳定电压输出外，在需要较低的稳定电压输出时，可以利用几个二极管的正向压降串联来实现。

4. 开关

由于二极管具有单向导电性，可以相当于一个受外加偏置电压控制的无触点开关，因此经常将半导体二极管作为开关元件来使用。尤其在本书的下篇——数字电子技术部分，二极管大多作为开关元件来使用。

5. 二极管的识别与简单测试

从图 1.1.2 中可以看出，有的二极管从外壳的形状上可以区分其电极，还有的二极管用色环或色点来标志：靠近色环的一端是负极，有色点的一端是正极，如图 1.1.13 中所示。若标志脱落，可用万用表测其正反向电阻值来确定二极管的电极。一般，数字万用表还有专门用来测量二极管的“ ∇ ”挡，当二极管被正偏时，显示屏上将显示二极管的正向导通压降，从图 1.1.13 中万用表显示的数据可以看出该管为正偏时的硅管。

二极管正、反向电阻的测量值相差越大越好，一般来说，硅二极管的正向电阻在几百欧到几千欧，锗管小于 $1\text{k}\Omega$ ，因此如果正向电阻较小，基本上可以认为是锗管。从数字万用表的“ ∇ ”挡，也可以方便地知道二极管的材料。

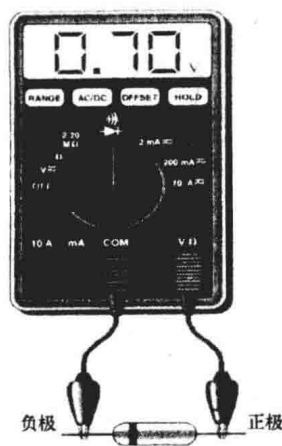


图 1.1.13 利用“ ∇ ”挡测量二极管

1.2 半导体三极管

半导体三极管是通过一定的工艺，将两个 PN 结结合在一起形成的半导体器件。由于两个 PN 结的相互影响，使半导体三极管呈现出不同于单个 PN 结的电流放大作用，是电子技术中的重要元件。

1.2.1 三极管的结构与类型

半导体三极管又称为晶体三极管，按照半导体材料的不同，三极管可分为硅管、锗管；按功率分有小功率、中功率和大功率管；按照频率分有高频管和低频管；而按照三极管的结构又可以分为 NPN 型和 PNP 型两类。图 1.2.1 所示为几种常见三极管的外形。三极管的型号命名方法参见附录 D。



图 1.2.1 常见三极管的外形

图 1.2.2 给出了 NPN 型和 PNP 型三极管的结构示意图和电路符号，符号中的箭头方向是三极管的实际电流方向。

由图 1.2.2 可见，三极管具有发射区、基区和集电区三个区域，发射极 e、基极 b 和集电极 c 三个电极以及发射结（发射区与基区交界）和集电结（集电区与基区交界）两个 PN 结的内部结构。图 1.2.2 只是三极管结构的示意图，三极管的实际结构并不对称，具有发射区掺杂浓度高、基区很薄且低掺杂、集电结面积大的内部结构特点，所以三极管的发射极和集电极不能对调使用。

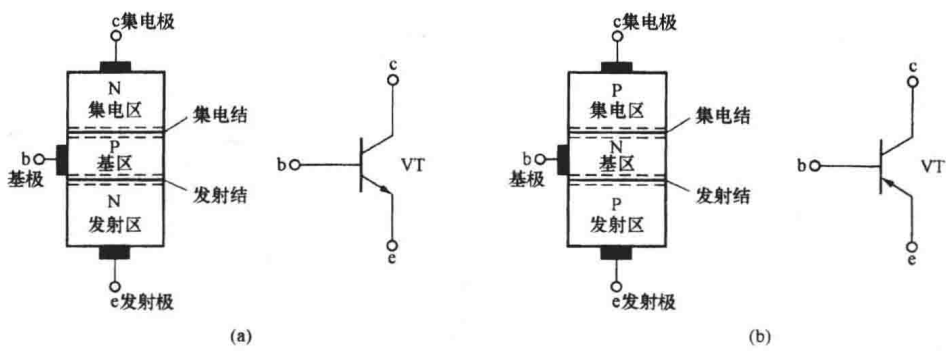


图 1.2.2 三极管的结构与电路符号
(a) NPN 型三极管；(b) PNP 型三极管

1.2.2 三极管的伏安特性与参数

1. 三极管的工作原理

由于 NPN 管和 PNP 管的结构对称、工作原理相同，下面以硅材料 NPN 管为例，讨论三极管的基本工作原理。

(1) 三极管放大的外部偏置条件。要使三极管具有放大作用，无论 NPN 管还是 PNP 管、无论何种电路形式，都必须使三极管满足发射结正偏、集电结反偏的外部偏置条件，如

图 1.2.3 所示。其中, 电源 V_{BB} 使发射结正偏, 基极电位约为 0.7V , 电源 V_{CC} 大于 0.7V 即可使集电结反偏。图 1.2.3 中的电阻可以起到限流和电流电压的转换作用。

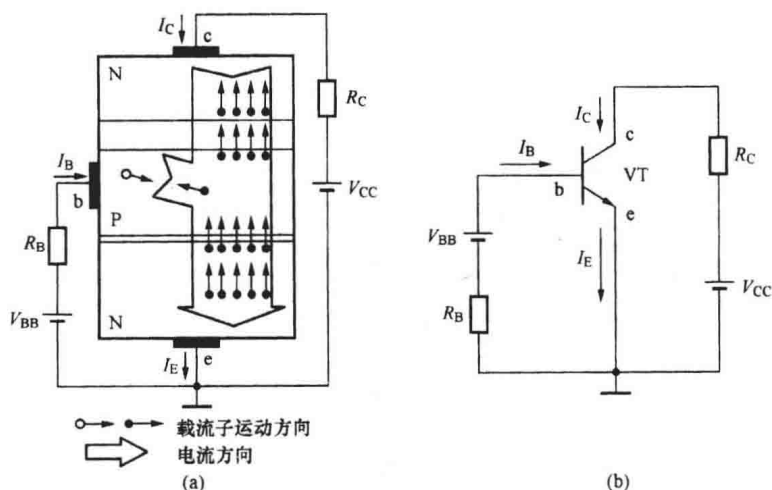


图 1.2.3 三极管内的载流子运动规律与其形成的外部电流

(a) 三极管内部的载流子运动; (b) 载流子运动形成的外部电流

(2) 三极管内部载流子的微观传输过程。

1) 发射区多子自由电子向基区扩散, 形成发射极电流 I_E 。图 1.2.3 (a) 中, 由于发射结正偏, 发射区中高掺杂的多子自由电子因扩散运动越过发射结到达基区 (同时, 基区多子空穴也向发射区扩散, 但因基区掺杂浓度低, 数量和发射区的电子相比极少, 可忽略不计), 形成从三极管发射极流出的发射极电流 I_E 。

2) 自由电子在基区扩散与复合, 形成基极电流 I_B 。发射区来的自由电子注入基区后, 有一部分自由电子要与基区的多子空穴复合。由于基区的厚度只有微米数量级, 掺杂浓度又低, 所以复合掉的极少, 大部分自由电子可以很快到达集电结。 V_{BB} 不断从基区抽走电子形成新的空穴以维持基区空穴浓度不变, 形成流入基极的基极电流 I_B , 基极电流的数值较小, 一般为微安数量级。

3) 集电区收集电子形成集电极电流 I_C 。由于集电结反偏, 集电极电位较高, 自由电子很快就被吸引、漂移过了集电结, 到达集电区, 形成流入集电极的集电极电流 I_C 。

值得注意的是: 以上分析忽略了一些反向漂移电流, 如由于集电结反偏产生的由基区的少子电子与集电区少子空穴产生的漂移电流 I_{CBO} 。由于 I_{CBO} 是少子电流, 数量较少, 近似分析中忽略不计。但 I_{CBO} 的大小不受 I_B 控制, 对放大没有贡献, 且极易受温度影响, 容易引起三极管工作不稳定, 所以 I_{CBO} 的大小是衡量三极管质量好坏的一个重要因素。

从以上分析可以看出, 三极管中的两种载流子都参与导电, 所以称为双极型晶体管 (Bipolar Junction Transistor, BJT)。

由于 PNP 管和 NPN 管结构对称, 发射区发射的不是自由电子而是空穴, 所以 PNP 管的电流方向恰好与 NPN 管的电流方向相反。

(3) 三极管各电极电流分配关系。三极管各电极间的电流分配实质上是三极管内部载流子运动的外部体现。将三极管看成是一个节点, 可以得到发射极电流 I_E 与 I_B 、 I_C 的关

系, 即

$$I_E = I_B + I_C \quad (1.2.1)$$

I_C 与 I_B 的比例, 取决于制造三极管时的结构和工艺, 基本上为定值。近似分析时, 定义三极管的直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 为 I_C 与 I_B 的比值, 即

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1.2.2)$$

$\bar{\beta}$ 一般在几十到 200 之间, $\bar{\beta}$ 越大, 三极管的电流放大能力越强。从式 (1.2.1) 和式 (1.2.2) 中可以解出

$$I_E = I_B + I_C = (1 + \bar{\beta}) I_B \quad (1.2.3)$$

考虑 I_{CBO} 的影响时

$$I_C = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \quad (1.2.4)$$

式中, $I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$, 称为穿透电流。

式 (1.2.4) 表明, 集电极电流 I_C 由两部分组成: 第一部分是 $\bar{\beta} I_B$, 表明集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 成正比关系, 即 I_B 控制 I_C , $\bar{\beta}$ 越大, 控制作用也就越大; 第二部分是对放大不起作用又极易受温度影响的 I_{CEO} , 由于 I_{CEO} 是 I_{CBO} 的 $(1 + \bar{\beta})$ 倍, 当 I_{CBO} 较小时, 将 I_{CEO} 忽略不计, 可以得到与式 (1.2.2) 一致的 I_C 与 I_B 的近似关系式, 即

$$I_C = \bar{\beta} I_B \quad (1.2.5)$$

由于 $\bar{\beta}$ 较大, 通常认为 $I_E \approx I_C$ 。基极电流通常是微安级别, I_C 和 I_E 的数量级可以达到毫安级。

式 (1.2.1)~式 (1.2.5) 就是关于三极管各电极间电流的分配关系, 也适用于 PNP 管。这几个公式十分重要, 在讨论三极管及其放大电路时经常要用到。

(4) 三极管的电流放大作用。图 1.2.3 (b) 中包含由三极管的基极与发射极构成的输入回路和由集电极与发射极构成的输出回路, 发射极作为输入和输出回路的公共端, 称为共发射极放大电路。三极管内载流子有规律的传输, 产生了 I_E 、 I_B 以及 I_C 电流, 并在集电极电阻上产生输出电压 U_O 。其中, 输出电流

I_C 是输入电流 I_B 的 $\bar{\beta}$ 倍, 这是对直流电流的放大作用。

在电子电路中, 更关心的是三极管对微弱变化信号——交流信号的放大作用, 而不是直流。接入待放大输入信号 ΔU_i 的共发射极放大电路如图 1.2.4 所示, 发射结的外加电压等于 $V_{BE} + \Delta U_i$, 使发射极电流产生 ΔI_E 的变化, 并引起相应的 ΔI_C 和 ΔI_B 。定义 ΔI_C 与 ΔI_B 的比值为三极管共发射极交流电流放大系数 β , 即

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (1.2.6)$$

或

$$\Delta I_C = \beta \Delta I_B \quad (1.2.7)$$

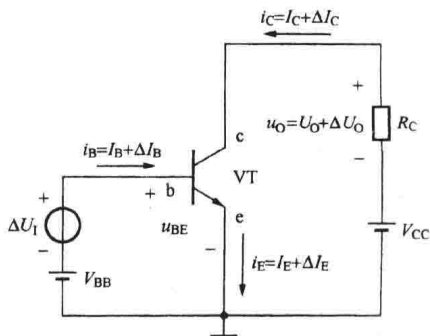


图 1.2.4 加入交流信号后的电流放大作用

以及

$$\Delta I_E = (1 + \beta) \Delta I_B \quad (1.2.8)$$

输出电流 ΔI_C 是输入电流 ΔI_B 的 β 倍, 可见三极管对变化的输入电流 ΔI_B 有放大作用, β 为几十到 200 之间, 一般有 $\beta \approx \bar{\beta}$ 。 β 表征了 ΔI_B 对 ΔI_C 的控制能力, β 越大, 控制能力越强。因此, 三极管是一个具有电流放大作用的电流控制器件, 用基极电流来控制集电极电流。同样, 在集电极电阻 R_C 上产生的压降也增加了一个 ΔU_O , 在参数合适的情况下, ΔU_O 可以达到 ΔU_I 的几十倍以上, 这样就得到了被放大的输出电压。

2. 伏安特性曲线

三极管的伏安特性是指三极管各极间电压与各电极电流的关系, 是管内载流子运动的外部体现, 三极管的伏安特性也是非线性的。

(1) 共发射极输入特性曲线。当管压降 u_{CE} 一定时, 输入回路中基极电流 i_B 与发射结电压 u_{BE} 间的关系曲线称为输入特性曲线, 即

$$i_B = f(u_{BE}) \big|_{u_{CE}=\text{常数}} \quad (1.2.9)$$

图 1.2.5 (a) 为某硅 NPN 型三极管的输入特性曲线, 从图上可以看出: 由于三极管 BJT 的发射结正偏, 因此三极管的输入特性曲线与二极管的正向特性类似。但由于三极管的两个 PN 结靠得很近, i_B 不仅与 u_{BE} 有关, 还受到 u_{CE} 的影响。

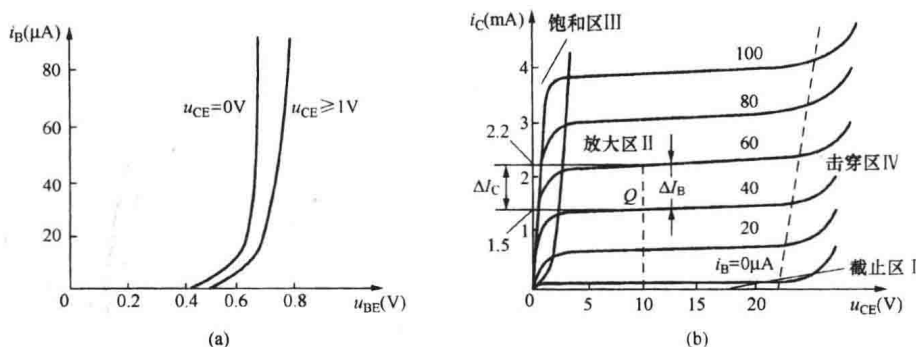


图 1.2.5 三极管的输入、输出特性曲线

(a) 输入特性曲线; (b) 输出特性曲线

当 $u_{CE} = 1V$ 时, 集电结受到足够的反偏, 吸引发射区发射过来的自由电子, 使 I_E 按照确定的分配关系分为 I_B 和 I_C 两部分。 u_{CE} 继续增大, 对 I_B 与 I_C 之间的分配关系影响不大, 所以 $u_{CE} \geq 1$ 后的输入特性曲线基本重合。

三极管的输入特性也存在死区: 硅管约为 0.5V, 锗管约为 0.1V。发射结正偏导通后, 硅管的发射结压降 U_{BE} 约为 0.7V, 锗管约为 0.3V。与二极管一样, 今后分别以 0.7V 和 0.3V 作为硅三极管和锗三极管的发射结导通压降估算值。

(2) 共发射极输出特性曲线。基极电流 i_B 一定时, 输出回路中集电极电流 i_C 与管压降 u_{CE} 之间的关系曲线称为输出特性曲线, 即

$$i_C = f(u_{CE}) \big|_{i_B=\text{常数}} \quad (1.2.10)$$

图 1.2.5 (b) 为某三极管共射极放大电路的输出特性曲线, 图中各条曲线的形状基本一样, 取其中一条进行分析。

输出特性曲线的起始部分很陡, 当 u_{CE} 略有增加时, i_C 增大得很快。这是因为 u_{CE} 较小

时,集电结的反偏较弱,对发射过来的多子的吸引力不强,所以 u_{CE} 稍有增大, i_C 就会有很大的增加。当 $u_{CE} > 1V$ 后,反偏集电结的内电场已经足够强,足以把能吸引过来的电子都吸引到集电区形成 i_C , I_C 和 I_B 的分配比例固定,即使 u_{CE} 再增加, i_C 也不会有明显的增加。若改变基极电流 i_B 的值,就可以得到另外一条输出特性曲线。若 ΔI_B 为一常数,将得到一族间隔基本均匀且比较平坦的曲线族。

(3) 三极管的三个工作区。半导体三极管的输出特性可以分为截止区、放大区和饱和区三个区域,如图 1.2.5 (b) 中标注。

1) 截止区。 $i_B = 0$ 的输出特性曲线与横坐标轴之间的区域称为截止区,即 $i_B \leq 0$ 。

要使 $i_B \leq 0$,发射结必须在死区以内或反偏。为使三极管可靠截止,一般给发射结加反偏电压。因此,截止区的偏置特点是发射结与集电结均反偏。 $i_B = 0$ 时对应的集电极电流 $i_C \approx i_E = I_{CEO}$ 。因 I_{CEO} 较小,可认为截止状态时三极管各电流均为 0,即三个电极间相当于开路,三极管等效为断开开关。

由于截止区所有电流约为 0,截止区的三极管不具备放大作用。

2) 放大区。图 1.2.5 (b) 中与横轴平行等距且近似为直线部分的区域称为放大区。

放大区的偏置条件是发射结正偏,集电结反偏。由于 i_C 与 i_B 之间满足电流分配关系 $i_C = \beta i_B + I_{CEO}$,输出特性曲线近似为水平线。理想情况下,当 i_B 等量增加时,输出特性曲线是一族与横轴平行等距的曲线族。在放大区内, i_C 仅取决于 i_B ,而与 u_{CE} 无关。由此也可以很容易地估算 β 的大小——在相同的 i_B 间隔下(即相同的 ΔI_B),各条曲线间的间隔越大(即 ΔI_C 越大), β 值就越大。按图 1.2.5 (b) 中的数据估算,该三极管的 $\beta \approx \frac{(2.2-1.5)mA}{(60-40)\mu A} = 35$ 。

放大区体现了三极管基极电流对集电极电流的控制作用,说明三极管是一种具有电流放大能力的电流控制器件。

3) 饱和区。图 1.2.5 (b) 中靠近纵轴的区域称为饱和区。

为更好地理解饱和区,可以根据图 1.2.4 来分析:放大状态时, i_C 随 i_B 增加而增加,由于 $u_{CE} = V_{CC} - i_C R_C$,所以管压降 u_{CE} 随 i_C 的增加而下降,当 u_{CE} 下降到 0.7V (对于硅管来说)的临界点后若继续下降,则集电结由反偏变为正偏,三极管经历从放大到临界饱和再到完全饱和的过程,饱和状态的三极管两结均正偏。饱和时小功率硅管的 u_{CE} 约为 0.3V,锗管约为 0.1V,其值称为三极管的饱和压降 U_{CES} 。

因为饱和后三极管的管压降约为 U_{CES} ,已经近似为 0, u_{CE} 无法再随 i_B 增加而下降, i_C 受到限制也无法再随 i_B 增加^①, ΔI_B 失去了对 ΔI_C 的控制作用,也就是说,饱和状态的三极管不再具有放大作用,放大区的 β 也不再适用于饱和区。

定义临界饱和时的 i_C 和 i_B 为临界饱和集电极电流 I_{CS} 和临界饱和基极电流 I_{BS} ,由于是在临界点,仍然有 $I_{CS} = \beta I_{BS}$ 成立,但进入饱和区后, i_C 不再随 i_B 变化,而是 $i_C \approx I_{CS}$,其中

$$I_{CS} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_C} \approx \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (1.2.11)$$

对应的临界饱和基极电流为

① 饱和时集电结正偏,失去了对扩散过来的多子的收集能力,因此基极电流失去了对集电极电流的控制能力。