

普通高等教育“十一五”规划教材
高职高专电工与信息类专业精品教材



电子技术基础

主 编 张先永 尼 喜

副主编 贾承军 王德合

普通高等教育“十一五”规划教材
高职高专电工与信息类专业精品教材

电子技术基础

主 编 张先永 尼 喜
副主编 贾承军 王德合

华中科技大学出版社
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础/张先永 尼 喜 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2009 年 1 月
ISBN 978-7-5609-4944-4

I. 电… II. ①张… ②尼… III. 电子技术-高等学校-教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 165105 号

电子技术基础

张先永 尼 喜 主编

责任编辑:李 德

封面设计:潘 群

责任校对:朱 霞

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心图文激光照排中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:16.25

字数:340 000

版次:2009 年 1 月第 1 版

印次:2009 年 1 月第 1 次印刷

定价:26.00 元

ISBN 978-7-5609-4944-4/TN·130

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

前 言

电子技术的发展是以电子器件的进步为牵引的。在今天这个新器件不断涌现的时代,不可避免地会带来电路分析和设计方法的不断创新,从而使电子技术学科的教学内容越来越广泛。另外,随着高等教育改革的深入进行,电子技术课程的学时在不断地被压缩,教学学时少而内容多的矛盾越来越突出。

本书是为适应高等职业技术教育院校教学改革的需要而编写的,根据职业技术教育的特点,在编写中依据“精选内容,强化概念,突出应用,通俗易懂”的原则。在内容选取上,删去陈旧内容,简化理论性较强内容,突出实用性较强内容。对复杂的理论推导只给出结论,对集成电路内部结构和工作原理少讲或不讲,尽可能多地介绍中规模以上集成电路的功能、特点及使用方法。在编写思路,以培养能力为目的,从工程实际出发,重点介绍电路的分析和设计方法。在编写过程中,力求文字简洁,便于自学。

本书可以作为普通高等职业技术院校的教材,参考学时为 100 学时。也可以作为普通高等院校师生的参考书。

本书的第 1、2、3、4、5 章由张先永编写,并负责模拟电子技术部分的统稿,第 11、12、13、14 章由尼喜编写,并负责数字电子技术部分的统稿,第 8、9、10 章由贾承军编写,第 7 章由王德合编写,第 6 章由尹光编写。梁伟洋教授担任主审。

由于编者水平有限,错误之处在所难免,敬请读者批评、指正。

编 者

2008 年 8 月

内 容 提 要

本书共十四章,主要内容为:常用半导体器件;基本放大电路;放大电路中的负反馈;集成运算放大器及其应用;集成功率放大器及其应用;正弦波振荡电路;直流电源;数字电路基础;逻辑门电路;组合逻辑电路;触发器;时序逻辑电路;脉冲波形的产生与整形;数/模和模/数转换器。每章开始都有内容提要,结束有习题。

本书可作为高等职业技术学院和高等专科学校电子类、电气类、自动化类及其他相近专业的教材,亦可供电子工程技术人员参考。

目 录

第 1 章 常用半导体器件	(1)
1.1 半导体基础知识	(1)
1.2 半导体二极管	(3)
1.3 半导体三极管	(7)
1.4 场效应管简介	(13)
习题	(15)
第 2 章 基本放大电路	(19)
2.1 放大电路的基本概念	(19)
2.2 共发射极放大电路	(20)
2.3 放大电路的基本分析方法	(23)
2.4 放大电路的其他几种形式	(31)
2.5 多级放大电路	(35)
习题	(37)
第 3 章 放大电路中的负反馈	(42)
3.1 反馈的基本概念与分类	(42)
3.2 负反馈对放大电路性能的影响	(48)
习题	(51)
第 4 章 集成运算放大器及其应用	(54)
4.1 集成运算放大器基础	(54)
4.2 集成运算放大器	(59)
4.3 集成运放的线性应用	(64)
4.4 集成运放的非线性应用	(71)
4.5 集成运放的信号变换	(79)
4.6 集成运放的典型产品介绍及应用实例	(82)
习题	(86)
第 5 章 集成功率放大器及其应用	(91)
5.1 功率放大电路的基础	(91)
5.2 集成功放的典型产品及其应用	(96)
习题	(100)
第 6 章 正弦波振荡电路	(102)
6.1 正弦波振荡电路的基本工作原理	(102)

12.3 常用时序逻辑器件功能分析及应用·····	(202)
习题·····	(221)
第 13 章 脉冲波形的产生与整形 ·····	(224)
13.1 集成 555 定时器·····	(224)
13.2 集成脉冲整形电路介绍·····	(231)
习题·····	(234)
第 14 章 数/模和模/数转换器 ·····	(237)
14.1 概述·····	(237)
14.2 数/模转换器(DAC) ·····	(237)
14.3 模/数转换器(ADC) ·····	(242)
习题·····	(249)
参考文献 ·····	(250)

第 1 章 常用半导体器件

[内容提要]

半导体器件是组成各种电子电路的基础。本章首先简要介绍半导体基础知识;然后介绍半导体二极管和三极管的结构、伏安特性曲线及主要参数;最后简单介绍绝缘栅场效应管的特性。

1.1 半导体基础知识

电子技术发展到今天这样的先进水平,无疑要归功于半导体材料的发现和半导体器件制造工艺水平的提高。无论是制造半导体二极管、三极管、场效应管,还是制造各种规模的集成电路,都要用到半导体材料。因此,在介绍半导体器件之前,应当对半导体材料的基本性能有一定了解,这将有助于对半导体器件外部特性的理解。

1.1.1 半导体及其特性

根据物质导电能力的不同,可将物质分为三类。

导体 —— 具有良好导电能力的物质称为导体。例如金、银、铜、铝等。

绝缘体 —— 导电能力极差的物质称为绝缘体。例如石英、云母、玻璃、橡胶、塑料等。

半导体 —— 导电能力介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体。目前制造半导体器件的主要材料是硅(Si)、锗(Ge) 和砷化镓(GaAs) 等。

半导体材料之所以能获得广泛应用,并不是在于它的导电能力介于导体与绝缘体之间,而是在于它具有如下独特性质。

热敏特性 —— 导电能力受温度影响很大。温度升高时,可使其导电能力大大提高。利用热敏特性可将半导体制成热敏元件。

光敏特性 —— 导电能力受光的影响很大。光照度升高时,可使其导电能力大大提高。利用光敏特性可将半导体制成光敏元件。

掺杂特性 —— 在纯净半导体中掺入微量杂质,可使导电能力大大提高。利用掺杂特性可将半导体制成各种不同性质、不同用途的半导体器件。

1.1.2 纯净半导体及杂质半导体的特点

在电子技术中,通常把能够定向运动而形成电流的带电粒子称为载流子。我们知道,金属导体中有大量带负电荷的自由电子,这些自由电子在电场作用下可以定向运动而形成电流。因此,自由电子是金属导体中的载流子,而且是唯一的一种载流子。这就是

金属导体的特点。

1. 纯净半导体及其特点

作为制造半导体器件的材料(硅或锗),必须首先进行高纯度的提炼。经过提炼之后的高纯度半导体称为纯净半导体,也叫本征半导体或晶体,其特点如下。

(1) 有两种数目相等的载流子——自由电子和空穴。其中:自由电子带负电荷,空穴带正电荷。在电场作用下,自由电子将逆着电场方向运动形成电子电流,而空穴将顺着电场方向运动形成空穴电流。

(2) 两种载流子的浓度受温度或光照度的影响很大。例如:温度升高或光照度增强时,将使载流子的浓度增大,导电能力提高。

注意:在纯净半导体中虽然有两种载流子,但在常温条件下载流子的数目很少,导电能力很低,只能利用其热(光)敏特性制造热(光)敏元件,而不能直接用来制造半导体二极管或三极管。

2. 杂质半导体及其特点

在纯净半导体中掺入微量的杂质,使之成为杂质半导体,并可以通过控制掺杂的多少来改变其导电能力。根据所掺杂质的不同,杂质半导体可分为N型半导体和P型半导体两种。

1° N型半导体

在纯净半导体(硅或锗)中掺入微量的杂质(砷、锑或磷),便可成为N型半导体,也叫电子型半导体,其特点是:自由电子为多数载流子,空穴为少数载流子,主要靠自由电子导电。

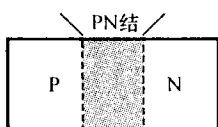
2° P型半导体

在纯净半导体(硅或锗)中掺入微量的杂质(硼、镉或铝),便可成为P型半导体,也叫空穴型半导体,其特点是:自由电子为少数载流子,空穴为多数载流子,主要靠空穴导电。

注意:在杂质半导体中,多数载流子的数目主要取决于掺杂的多少,因此,可以控制掺杂的多少来控制其导电能力。而少数载流子的数目主要取决于温度,因此,半导体器件工作的稳定性是受温度影响的。

1.1.3 PN结及其单向导电性

虽然杂质半导体的导电能力大大提高,但是,单一的P型半导体或N型半导体只能起电阻作用。而在工程实践中,通过特殊的掺杂工艺,将纯净半导体的一侧做成P型半导体,另一侧做成N型半导体。由于内部载流子运动的结果,在P型区和N型区的交界处形成了一个特殊的导电区域,称之为PN结,其平面示意图如图1.1所示。



PN结具有如下特点。

(1) PN结具有单向导电性,即外加正向电压(电源正端接P型区,负端接N型区)时,流过PN结的电流较大,视为导

图1.1 PN结平面示意图

通;外加反正向电压(电源负端接 P 型区,正端接 N 型区)时,流过 PN 结的电流几乎为零,视为截止。PN 结的单向导电示意图如图 1.2 所示。

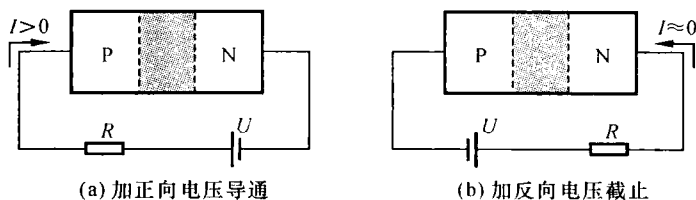


图 1.2 PN 结的单向导电示意图

(2) 流过 PN 结的正向电流受外加正向电压大小的控制,即外加正向电压增大时,正向电流将增大,否则将减小。

正因为 PN 结具有上述特点,所以,PN 结是构成各种半导体器件的基本结构。例如,半导体二极管和三极管分别由一个或两个 PN 结所构成。

注意:当 PN 结两端外加交变电压时,PN 结的宽度将发生变化,使结内的电荷量也随之变化,这种变化相当于一个电容充放电现象,故将此现象等效成一个电容,称为结电容。

1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的结构

半导体二极管由 PN 结加引脚和管壳构成,P 型区引出的电极称为正极(或阳极),N 型区引出的电极称为负极(或阴极),其结构、外形及电路符号如图 1.3 所示。

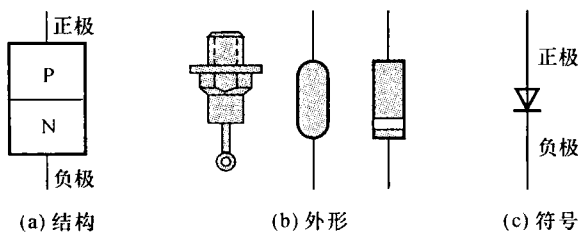


图 1.3 半导体二极管的结构、外形及符号

二极管的分类有多种方法:按照内部的结构不同,可分为面接触型和点接触型二极管;按照所用的材料不同,可分为硅和锗二极管。

面接触型二极管的特点是 PN 结面积大,允许流过较大的电流。但因面积大,其结电容较大,只能在较低频率条件下工作,常用于较大功率的整流电路。

点接触型二极管的特点是 PN 结面积小,工作电流小,结电容小,可以在高频条件下工作,常用于高频检波、混频及小功率整流电路。

此外,还有一种开关型二极管,适用于脉冲和数字电路。

1.2.2 半导体二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指:流过二极管的电流 I_D 与加在二极管两端的电压 U_D 之间的关系,即 $I_D = f(U_D)$ 。

二极管的伏安特性可以通过测试电路得到,如图 1.4 所示。测试方法是在二极管两端加上不同极性、不同数值的电压,同时测出流过二极管的电流,就可逐点描绘出二极管的伏安特性曲线,如图 1.5 所示的为某硅二极管的伏安特性曲线。可以把它分为以下 3 个部分来说明。

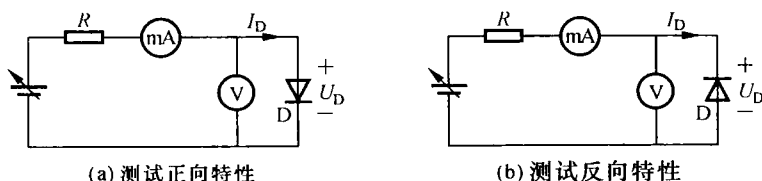


图 1.4 二极管伏安特性测试电路

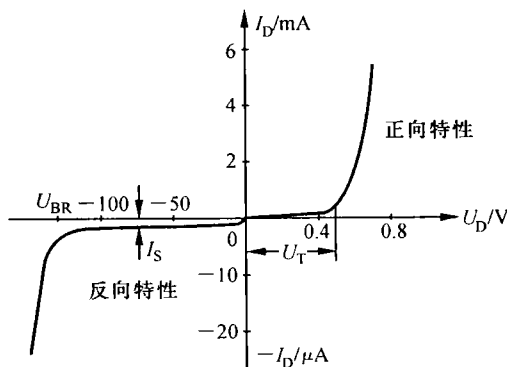


图 1.5 硅二极管的伏安特性

1. 正向特性

当加在二极管两端的正向电压 $U_D \leq U_T$ 时,正向电流 I_D 很小,管子处于截止状态,把 U_T 称为死区电压。通常,硅管的死区电压约为 0.5 V,锗管的死区电压约为 0.1 V。

在二极管两端的正向电压 $U_D > U_T$ 后,正向电流 I_D 随 U_D 明显增加,管子进入正向导通状态。通常,硅管的导通压降约为 0.7 V,锗管的导通压降约为 0.3 V。

2. 反向饱和特性

当加在二极管两端的反向电压 $|U_D| < |U_{BR}|$ 时,反向电流 I_D 很小,而且几乎不随反向电压变化,称为反向饱和电流,用 I_S 表示。常温下,硅管的 $I_S < 1 \mu A$,锗管的 $I_S \geq 10 \mu A$ 。

3. 反向击穿特性

当加在二极管两端的反向电压 $|U_D| \geq |U_{BR}|$ 时,反向电流急剧增大,这种现象称为反向击穿,此时所对应的电压 U_{BR} 称为反向击穿电压。二极管反向击穿后,若无

一定的限流措施,二极管将永久损坏。

1.2.3 半导体二极管的电路模型

在实际应用时,普通二极管只能工作在导通或截止状态,而不能工作在反向击穿状态,否则将损坏二极管。在分析电路时,为了简单起见,通常可采用二极管的电路模型进行计算。

1. 实用模型

所谓实用模型,就是当二极管正向导通时,对于硅管,正向压降按 0.7 V 计算,对于锗管,正向压降按 0.3 V 计算。当二极管截止时,认为电流等于零,二极管实用模型的伏安特性如图 1.6 所示。

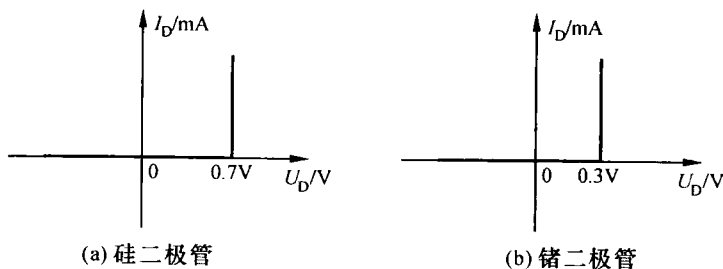


图 1.6 二极管实用模型的伏安特性

2. 理想模型

所谓理想模型,就是将二极管的特性进行理想化处理,即:当二极管正向导通时,认为正向压降等于零;当二极管截止时,认为电流等于零。二极管理想模型的伏安特性如图 1.7 所示。

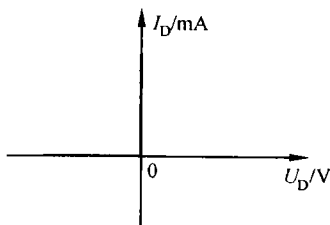


图 1.7 二极管理想模型的伏安特性

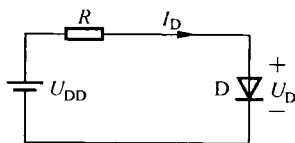


图 1.8 例 1.1 电路

在电路的分析计算中,利用二极管实用模型与理想模型的差距很小,这可通过下面的例题来说明。

例 1.1 电路如图 1.8 所示,其中, $U_{\text{DD}} = 10\text{ V}$, $R = 10\text{ k}\Omega$ 。试利用二极管的实用模型和理想模型分别计算流过二极管的电流 I_{D} 。

解 利用实用模型

$$I_{\text{D}} = \frac{U_{\text{DD}} - U_{\text{D}}}{R} = \frac{10 - 0.7}{10 \times 10^3} \text{ A} = 0.93 \text{ mA}$$

利用理想模型

$$I_D = \frac{U_{DD} - U_D}{R} = \frac{10 - 0}{10 \times 10^3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$$

可见,两种情况的差值很小,只有 0.07 mA,这种误差在实际应用中是允许的。

1.2.4 半导体二极管的主要参数

半导体器件的参数是对其特性和极限运用条件的定量描述,也是设计电路时选用器件的依据。使用时可查阅手册。半导体二极管的主要参数如下。

(1) 最大整流电流 I_F : 二极管长期使用时允许流过的最大正向平均电流。

(2) 最高反向工作电压 U_R : 二极管使用时允许承受的最高反向电压,一般定义为反向击穿电压 U_{BR} 的一半。

(3) 反向饱和电流 I_S : 二极管未击穿时的反向电流,其值愈小,表示二极管的单向导电性愈好。

(4) 最高工作频率 f_M : 主要取决于二极管的结电容。使用时若工作频率超过 f_M ,二极管的单向导电性将变差,甚至失去单向导电性。

1.2.5 稳压二极管

稳压二极管是一种特殊的面接触型二极管,因在电路中能起稳压作用,故称为稳压二极管。

稳压二极管的电路符号及伏安特性曲线如图 1.9 所示。其中,稳压二极管的伏安特性曲线与普通二极管的伏安特性曲线(见图 1.5)相比,其主要区别在于反向击穿特性曲线更陡。正因为如此,在采取一定限流措施的条件下,可以利用反向击穿特性来进行稳压,其稳压原理如下:当某种原因引起流过稳压管的电流产生很大的变化量 ΔI_Z 时,稳压管两端电压的变化量 $\Delta U_Z \approx 0$ 。这就是说,稳压管两端的电压是稳定的(具体稳压电路见第七章)。

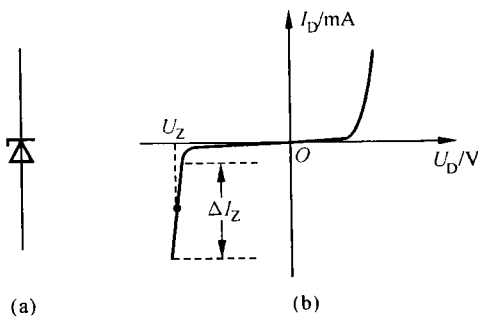


图 1.9 稳压二极管的电路符号及伏安特性

稳压管的主要参数如下。

稳定电压 U_Z : 在稳压范围内,稳压管两端的稳定电压值。不同型号的稳压二极管,

其稳定电压值各不相同。

动态电阻 r_z : 在稳压范围内, 稳压管两端的电压变化量与流过稳压管的电流变化量之比。该值愈小, 说明反向击穿特性曲线愈陡, 即稳压性能愈好。

注意, 要使稳压管正常工作, 电路中必须加限流措施。否则, 将损坏稳压管。

1.3 半导体三极管

1.3.1 半导体三极管的结构

半导体三极管由两个 PN 结组成。根据排列方式不同, 可分为 NPN 型和 PNP 型两种类型, 其结构及电路符号如图 1.10 所示。

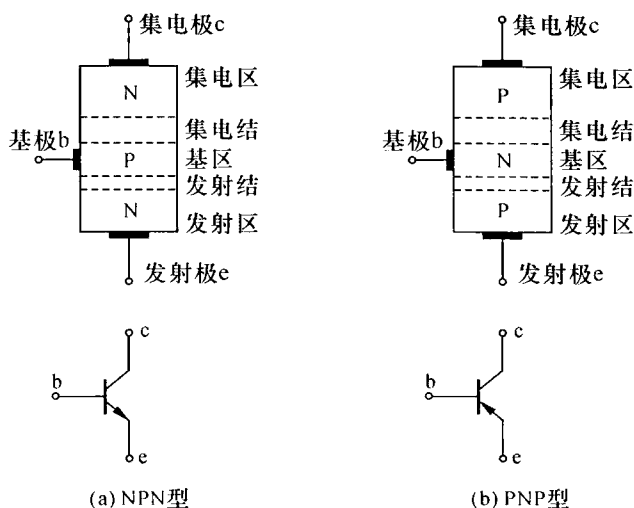


图 1.10 半导体三极管的结构及符号

两个 PN 结把三极管划分为发射区、基区和集电区。它们的引出线分别称为发射极 e、基极 b 和集电极 c。发射区和基区之间的 PN 结称为发射结(e 结); 集电区和基区之间的 PN 结称为集电结(c 结)。电路符号中的箭头方向表示发射结正向导通时的实际电流方向。

半导体三极管在内部结构上具有如下特点: 第一, 发射区掺杂浓度很高; 第二, 基区很薄且掺杂浓度很低; 第三, 集电结面积大。这些特点是三极管具有电流放大作用的内部条件。

半导体三极管又称为晶体管, 由于管内有自由电子和空穴两种载流子参与导电, 所以也称为双极型晶体管(简称 BJT)。晶体管的种类繁多, 除按结构分为 NPN 型和 PNP 型外, 按所用材料可分为硅管和锗管; 按适用频率范围可分为低频管和高频管; 按管子所能承受的功耗可分为小功率管、中功率管和大功率管。

1.3.2 三极管的电流分配关系及放大作用

以 NPN 型三极管为例,说明三极管的电流分配关系及放大作用,电路如图 1.11 所示。

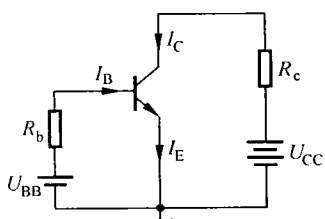


图 1.11 三极管共发射极电路

图中,直流电源 U_{BB} 的正极经电阻 R_b 接基极, U_{BB} 的负极接发射极,使发射结获得正向电压(即正偏);直流电源 U_{CC} 的正极经电阻 R_c 接集电极, U_{CC} 的负极接发射极,通常由于 U_{CC} 远大于 U_{BB} ,故使集电结获得反向电压(即反偏)。

1. 电流分配关系

在图 1.11 所示电路中,由于直流电源 U_{BB} 和 U_{CC} 的作用,将产生实际方向如图所示的直流电流。其中:流进三极管基极的电流称为基极电流,用 I_b 表示;流进三极管集电极的电流称为集电极电流,用 I_c 表示;从三极管发射极流出的电流称为发射极电流,用 I_E 表示。

为了简单说明三极管的电流分配关系,不妨将三极管看成一个节点。根据基尔霍夫电流定律可得

$$I_E = I_C + I_B \quad (1.1)$$

另外,三极管一旦制成,其内部结构特点已经确定,因此, I_C 与 I_B 的比例关系也基本确定。这种比例关系称为三极管共发射极直流电流放大系数,用 β 表示,即

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (1.2)$$

通常, β 为几十到几百,其大小主要取决于管子的内部结构特点,此外还与管子的工作电流及温度有关。根据式(1.1)和式(1.2)可得三极管各极电流关系为

$$I_C = \beta I_B \quad (1.3)$$

$$I_E = I_C + I_B = (1 + \beta) I_B \quad (1.4)$$

$$I_B = I_E - I_C \quad (1.5)$$

2. 电流放大作用

在 $\beta \gg 1$ 的条件下,由式(1.3)和式(1.4)可得如下近似关系:

$$I_E \approx I_C = \beta I_B$$

这意味着 I_C (或 I_E) 的大小不仅取决于 I_B ,而且远大于 I_B 。因此,只要确定较小的电流 I_B ,就能实现对较大电流 I_C (或 I_E) 的控制,这个电流控制能力就是所谓的电流放大作用。

必须注意,为了保证三极管具有电流放大作用,除了管子的内部结构特点外,还必须保证管子的外部使用条件,即:发射结必须正偏,集电结必须反偏。只有在这样的使用条件下,才能实现其电流放大作用。

1.3.3 三极管的 3 种连接方式

半导体三极管有 3 个电极,在构成电子电路时,可以有共发射极、共基极和共集电

极 3 种连接方式。所谓共哪个电极,就是指该电极为电路输入回路和输出回路的公共端,如图 1.12 所示。

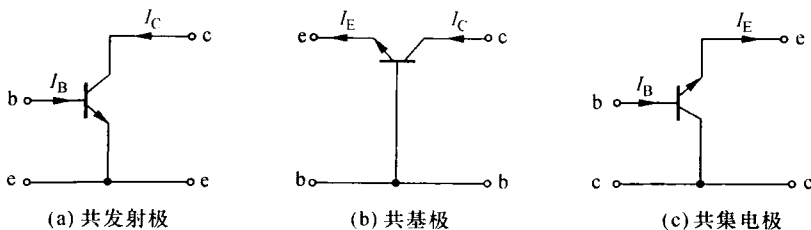


图 1.12 半导体三极管的 3 种连接方式

1.3.4 三极管的共发射极伏安特性

三极管的伏安特性是描述三极管各极电流与电压之间关系的一种常用方式,也是三极管内部载流子运动规律的外部表现,通常包括输入特性和输出特性。这些特性曲线可用三极管特性图示仪直观地显示出来,亦可通过图 1.13 所示的实验电路测绘出来。

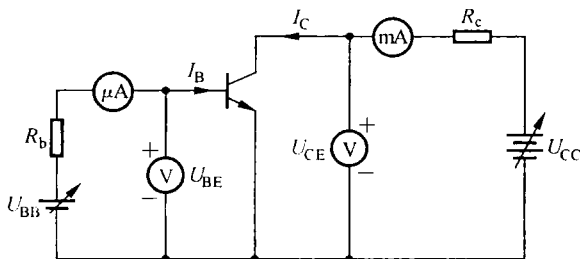


图 1.13 三极管共发射极伏安特性的实验电路

1. 共发射极输入特性

共发射极输入特性是 U_{CE} 为参变量,描述 I_B 与 U_{BE} 之间的关系,即

$$I_B = f(U_{BE}) |_{U_{CE}} \quad (1.6)$$

由式(1.6)可知,当 U_{CE} 取不同值时,可得到不同的输入特性曲线。但是,实验证明,当 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 时,所有曲线几乎重合。因此,通常只给出 $U_{CE} = 1\text{V}$ 时的输入特性曲线,如图 1.14 所示。

由三极管的输入特性曲线可见,其形状与二极管的正向特性曲线相似。因此,三极管的发射结也同样具有死区电压和导通电压,即:硅管的死区电压约为 0.5V ,导通电压约为 0.7V ;锗管的死区电压约为 0.1V ,导通电压约为 0.3V 。

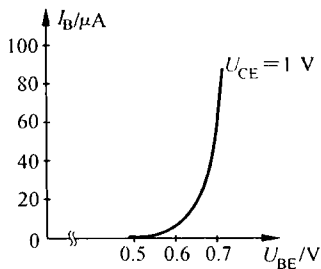


图 1.14 共发射极输入特性

2. 共发射极输出特性

共发射极输出特性是以 I_B 为参变量,描述 I_C 与 U_{CE} 之间的关系,即

$$I_C = f(U_{CE}) | I_B \quad (1.7)$$

由式(1.7)可知,当 I_B 取不同值时,可得到不同的输出特性曲线。测绘方法是在实验电路图 1.13 中,通过调节 U_{BB} ,使 I_B 为某一固定值,随后改变 U_{CC} ,测出一组 I_C 、 U_{CE} 值,即可绘出一条曲线。按此方法每改变一次 I_B ,均可获得一条曲线,最终可获得输出特性曲线族,如图 1.15 所示。

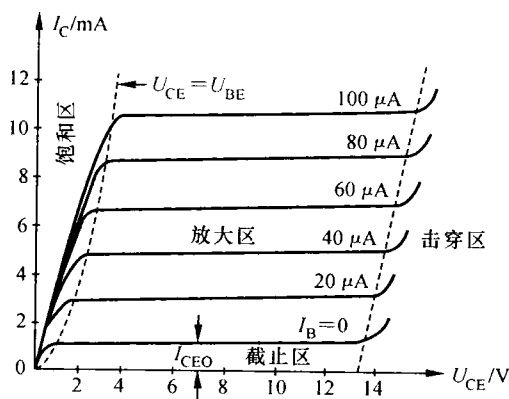


图 1.15 共发射极输出特性

由图可见,各条特性曲线的形状是基本一致的。按不同特点,可将整个曲线划分为截止区、放大区、饱和区和击穿区,下面分别介绍各区的条件和特点。

(1) 截止区。一般将 $I_B = 0$ 以下的区域称为截止区。工作在截止区的条件是发射结和集电结均处于反偏。特点是 $I_C \leq I_{CEO}$ (I_{CEO} 称为穿透电流,其值很小),三极管无放大作用,仅相当于开关断开。

(2) 放大区。各条输出特性曲线的平坦段所对应的区域称为放大区。工作在放大区的条件是发射结处于正偏,集电结处于反偏。其特点是,当 I_B 有很小的变化时, I_C 就有很大的变化,这就是前面所说的电流放大作用;而当 I_B 一定时, I_C 基本上不受 U_{CE} 变化的影响,这说明三极管工作在放大区时还具有恒流作用。

(3) 饱和区。各条输出特性曲线从上升段到平坦段的拐弯处左右的区域称为饱和区。工作在饱和区的条件是发射结处于正偏,集电结处于零偏或正偏。在这个区域内,不同 I_B 值的各条曲线几乎重叠在一起,其最大特点是在 U_{CE} 较小且一定时, I_C 基本上不随 I_B 变化,好像“饱和”了一样,因此称为饱和区,此时,三极管失去放大作用;但是 I_C 随 U_{CE} 的增大而急剧增大,即 U_{CE} 与 I_C 的比值很小,说明集电极到发射极之间的直流电阻很小,相当于开关闭合。三极管进入饱和区的原因是由于 U_{CC} 通过 R_C 接到集电极,在 U_{CC} 一定条件下,当 I_C 或 R_C 增大时, U_{CE} 必然减小,在 U_{CE} 小到一定程度后,集电结由反偏变为正偏,因此进入了饱和区。在饱和区内,三极管集电极和发射极之间的电压称为“饱和压降”,用 U_{CES} 表示,其数值对于小功率管为 $0.2 \sim 0.3$ V,对于大功率管可达 1V 以上。

(4) 击穿区。当 U_{CE} 足够大时,集电结反偏电压也足够大,使集电结进入反向击穿