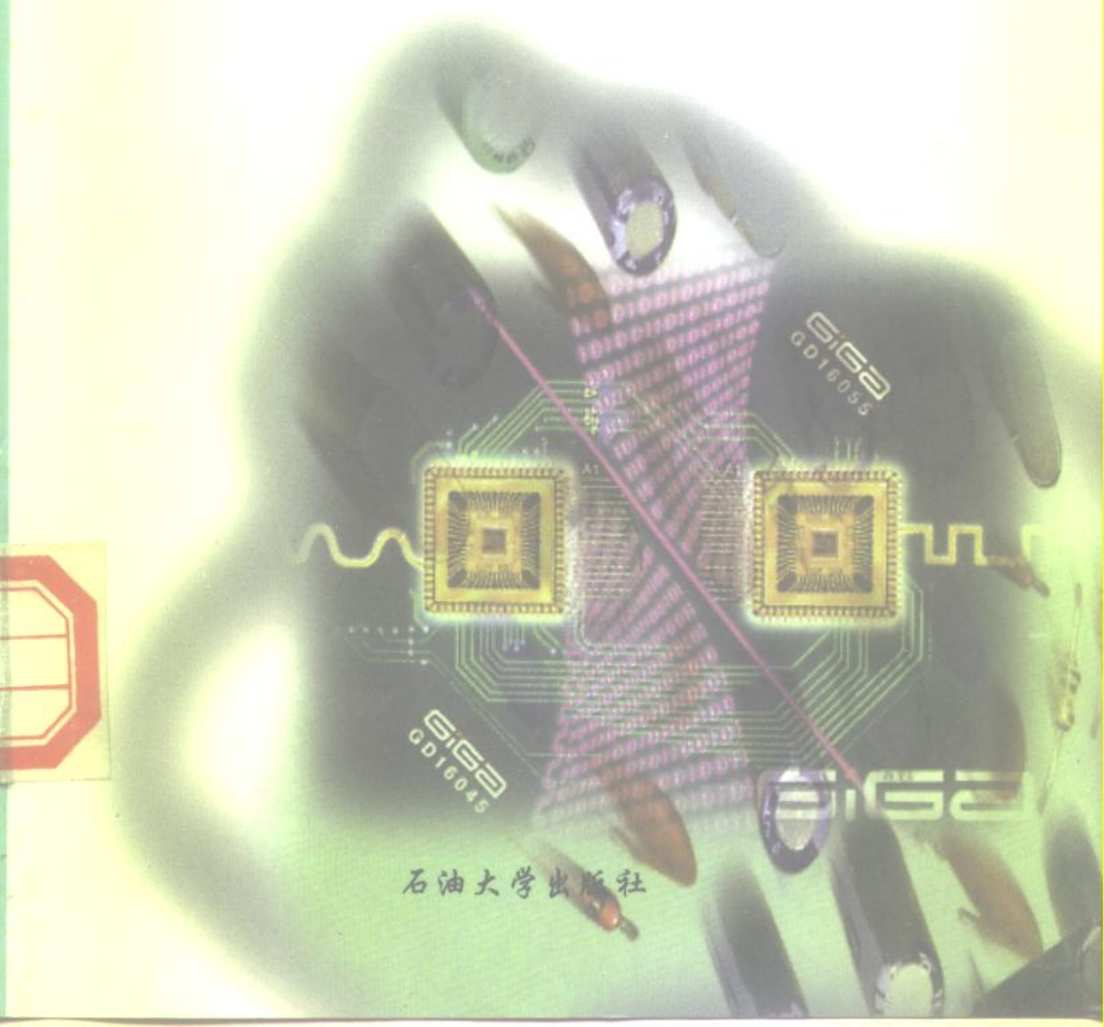


电工学Ⅱ

电子技术

刘润华 单亦先 吴贞焕 编著



石油大学出版社

绪 论

电子技术(也称电子学)是研究电子器件与电子电路应用的一门科学。

第一代电子器件(电子管)问世于本世纪初,30年代达到了鼎盛时期,它们的诞生和发展,使电子技术作为一门新的学科而兴起;第二代电子器件(晶体管)出现于40年代末,它以体积小、重量轻、功耗低、寿命长、可靠性高等优点得到迅速发展,因而在许多领域已经取代了电子管;第三代电子器件(集成电路)诞生于50年代末,它是将各种半导体元件所组成的电路集合在一小块晶体上,它的出现促进了微机的发展。科学是不断发展的,今天,电子器件又从电路的集成朝着系统的集成迈进,这就是称为第四代电子器件的大规模集成电路和第五代电子器件的超大规模集成电路。随着大规模和超大规模集成电路的出现,使得电子计算机微型化的程度愈来愈高,应用范围愈来愈广,在科学技术上形成了新的学科——微电子学。

随着工业生产发展的需要,又对半导体器件提出了电流大、电压高的要求,因而从50年代末开始,晶闸管、可关断晶闸管、大功率晶体管和场效应管以及复合器件也陆续问世,使得半导体器件在强电领域获得了广泛应用,于是逐步形成了另一新的学科——功率电子学。

电子技术的应用极为广泛,从电子玩具到家用电器,从天气预报到资源勘查,从雷达警戒到导弹精确制导等等,可以说电子技术几乎渗透到国民经济的各个领域。

电子技术在非电工业领域的应用主要涉及两个方面,即测量

和控制,其系统组成框图如图 0-1 所示。

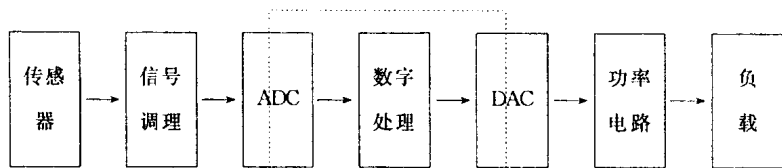


图 0-1 测控系统组成框图

电子电路包括两大类,即模拟电路和数字电路。若电路中的信号(电压或电流)随时间连续变化,称这种信号为模拟信号,该电路称为模拟电路;若电路中的信号随时间不连续变化,称这种信号为数字信号,该电路称为数字电路。在图 0-1 所示系统中,虚框外部的电路为模拟电路,虚框内部的电路为数字电路。各方框的功能如下:

传感器:将待测物理量(如温度、压力、流量、物位等)转换为电信号。

信号调理:将传感器输出的电信号进行放大、滤波、运算、电平转换等。

ADC:将模拟信号转换为数字信号(Analog to Digital Converter)。

数字处理:对数字信号进行处理,包括算术运算、逻辑运算、数码转换、控制等。简单的数字处理可由数字集成电路实现,复杂的数字处理可由微处理器实现。

DAC:将数字信号转换为模拟信号(Digital to Analog Converter)。

功率电路:将 DAC 的输出进行功率放大或用 DAC 的输出控制功率的转换(如交流变直流、直流变交流)。

负载:工业生产中用的电动机、继电器、电加热装置、调节阀、显示器等。

本书的章节基本是按图 0-1 的次序安排的,第一章是全书内

容的基础,首先介绍了常用半导体器件,第二章至第三章属于信号调理的范畴,第四章至第七章属于数字处理的范畴,第八章属于功率电路的范畴。传感器和负载有的已在先修课中作了介绍,有的将在后续课中介绍,本书不再介绍这方面的内容。随着计算机技术的发展,电子设计自动化(EDA)将成为设计电子产品的必经之路,因此,第九章介绍了有关软件。

电子技术涉及面广,内容丰富,但因学时有限,本书着重讲述电子技术中最基本的共性问题,因此学习时应注重基本概念、基本理论和基本技能三个方面,为今后深入学习专业课和进一步研究设计电子技术新产品打下坚实的基础。

电子技术是一门实践性很强的课程,实践环节在本课程中有着重要的地位和作用,它不仅能巩固所学理论,养成严谨求实的科学作风,而且能培养分析问题和解决问题的能力。因此应高度重视实践环节,坚持理论联系实际。

第一章 常用半导体器件

半导体器件种类繁多,常用的有二极管、三极管、场效应管等,了解它们的特性并学会合理的选用,是非常重要的,它们不但应用广泛,还是深入学习电子技术的基础,而 PN 结是构成各种半导体器件的共同基础。

§ 1.1 PN 结及其单向导电特性

一、半导体基本知识

半导体就是导电性能介于导体和绝缘体之间的物质,常用的是四价元素锗和硅。半导体具有热敏、光敏特性,利用这些特性,可以制成热敏元件、光敏元件。

本征半导体就是完全纯净的、不掺任何杂质的半导体,通常具有晶体结构,也称晶体。本征半导体的每个原子最外层通常有四个价电子,它们与周围相邻的四个原子形成四个共价键,形成比较稳定的原子结构。半导体在获得一定的能量后,部分价电子会挣脱原子核和共价键的束缚而成为自由电子,同时在原来共价键的位置上留下一个空位叫“空穴”。所以,本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现的,而且数量有限,在外电场作用下,通过半导体的电流由两部分组成:一部分是自由电子定向运动形成的电子电流;另一部分是价电子递补空穴所形成的空穴电流。

半导体的一个重要特征就是有电子和空穴两种载流子参与导电。载流子的数量与温度、光照等因素有关,这就是半导体具有热敏、光敏特性的原因。

若在本征半导体中掺入微量的三价元素(如硼),就形成了 P

型半导体。P 型半导体中空穴为多数载流子(简称多子),自由电子为少数载流子(简称少子),所以 P 型半导体也称空穴型半导体。相反,如果在本征半导体中掺入微量的五价元素(如磷),就会形成 N 型半导体,也称电子型半导体;N 型半导体中多子是自由电子,少子是空穴。

在本征半导体中掺入微量杂质只是增加载流子的数量,而掺杂后的杂质半导体对外不显示电性。

二、PN 结的形成

在一块半导体晶片的两边,用一定的工艺措施,分别形成 P 型半导体和 N 型半导体,又称 P 区和 N 区,如果把空穴和自由电子分别看成带一个单位的正、负电荷,则形成的杂质半导体可用图 1-1 表示。由于在 P 区的空穴浓度远大于 N 区的空穴浓度,因此 P 区的空穴必然向 N 区移动,并与 N 区中的电子复合而消失;同理 N 区中的自由电子必然向 P 区移动,并与 P 区中的空穴复合而消失。这种由于浓度差而引起的载流子的运动称为扩散运动。扩散的结果就在 P、N 区的交界面处形成了一个空间电荷区,并建立内电场,该电场阻碍多子的扩散运动,有利于 P 区和 N 区的少子往对方运动,通常把少子在电场作用下的运动称为漂移运动。刚开始扩散时,多子的扩散运动占优势,随着扩散的不断进行,内电场不断增强,少子的漂移运动也逐渐增强,当多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡,即从 N 区扩散到 P 区的电子数与从 P 区漂移到 N 区的电子数相等,从 P 区扩散到 N 区的空穴数与从 N 区漂移到 P 区的空穴数相等,通过交界面的净载流子数目为零时,就形成了 PN 结。

由于 PN 结的内电场阻碍多子的扩散运动,故称 PN 结为阻挡层。空间电荷区内的载流子数量极少,电阻率很高,这个区域内的多数载流子已扩散到对方被复合,或者说消耗尽了,所以空间电荷区又叫耗尽层。

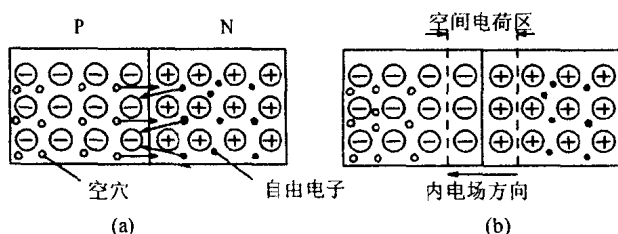


图 1-1 PN 结的形成

三、PN 结的单向导电特性

加在 PN 结上的电压称为偏置电压。如图 1-2(a) 所示, 若 P 区接电源的正极, N 区接电源的负极, 或 P 区电位高于 N 区电位, 称 PN 结正向偏置, 简称正偏。此时外加电压形成的外电场与内电场方向相反, 因而削弱了内电场, 使空间电荷区变窄, PN 结呈低阻导通状态, 多子在外加电场的作用下顺利通过 PN 结, 形成较大的扩散电流, 其方向由 P 区指向 N 区, 称为正向电流。外加正向电压愈大, 扩散电流愈大。

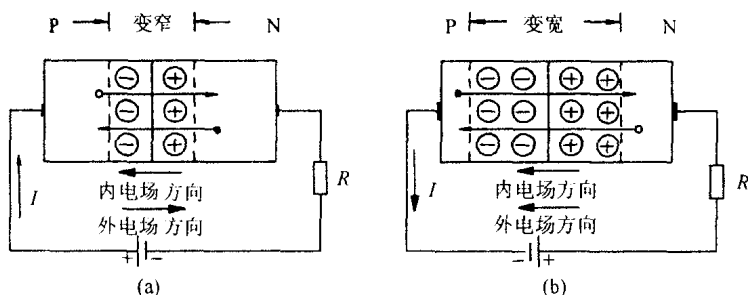


图 1-2 PN 结的单向导电特性

(a) 加正向电压; (b) 加反向电压

如图 1-2(b) 所示, 若 PN 结加反向电压 (P 区接电源的负极, N 区接电源的正极), 称为反向偏置, 简称反偏。此时外电场和内

电场的方向相同,使空间电荷区变宽,多子的扩散运动难以进行,此时的PN结有利于少子的漂移运动,因为少子的数量有限,所以反向漂移电流很小,此时PN结呈高阻截止状态。

以上分析说明,PN结加正向电压时呈导通状态,加反向电压时呈截止状态。因此,PN结具有单向导电特性。

PN结还具有电容效应,这是因为PN结也能储存电荷,如当外加正向电压时,空间电荷区变窄,即空间电荷减少;当外加反向电压时,空间电荷区变宽,即空间电荷增加,所以只要外加电压发生变化,空间电荷随之改变,即PN结具有电容特性。PN结的电容随外加电压的变化而变化,且其值很小,一般为几个皮法到几十个皮法。

【思考与练习题】

1-1-1 PN结两端存在空间电荷区,问将二极管两端短路后是否有电流通过?

§ 1.2 半导体二极管

一、二极管的结构

半导体二极管是由PN结加上相应的电极引出线和管壳做成的。P区为阳极,N区为阴极。其电路符号如图1-3所示。

二极管的种类很多,按构成材料分,常用的有硅二极管和锗二极管;按用途分,常用的有整流二极管、稳压二极管、开关二极管和普通二极管等;按结构分,有点接触型和面接触型两类,点接触型二极管PN结面积很小,所以不能通过大的电流,一般在十几或几十毫安以下,但结电容小,高频性能好,多用于检波、变频等,例如2AP系列;面接触型二极管PN结面积比较大,可以通过较大的电流,一



图 1-3 半导体二极管的符号

一般为几百毫安以上,有的甚至可达上千安培的电流,多用于整流、稳压等,例 2CP、2CZ、2CW 等系列。

二、二极管的伏安特性

所谓二极管的伏安特性就是加在二极管两端的电压 U 和通过二极管的电流 I 之间的关系。二极管的伏安特性曲线如图 1-4 所示。

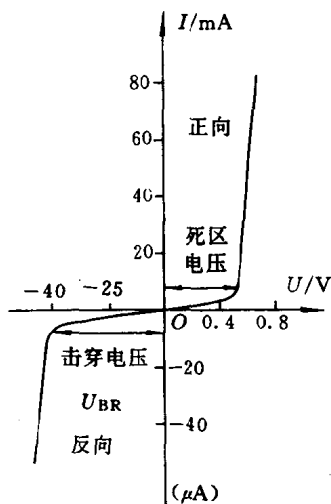


图 1-4 二极管伏安特性曲线

1. 正向特性

由图 1-4 可见,当外加正向电压很低,尚不能克服内电场时,正向电流很小,这个区域称为死区。通常把二极管电流开始明显增大的正向电压称为二极管的死区电压。室温下硅管的死区电压约为 0.5 V,锗管约为 0.1 V。当外加电压增加到大于死区电压后,电流明显增大,二极管充分导通;正常工作时,二极管正向压降几乎恒定,硅管为 0.6~0.8 V,锗管为 0.2~0.3 V。

2. 反向特性

加反向电压时,二极管的反向电流很小,小功率硅管的反向电流一般为纳安级,而锗管通常约为几十微安。

当反向电压过高时,反向电流会突然增大,二极管失去单向导电特性,这种现象称为反向击穿。二极管被击穿后,一般将不能恢复原来的性能而损坏。击穿的主要原因是强电场使 PN 结中的载流子获得足够大的能量,载流子碰撞晶格,而将价电子碰撞出来,使价电子成为自由电子,产生新的电子空穴对,新生的载流子又碰撞晶格产生更多的电子空穴对;如此连锁反应,反向电流越来越大。另一个原因是外电场强拉出共价键中的价电子,产生电子空穴对,形成大的反向电流。产生击穿的反向电压称反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 。

三、二极管的主要参数

二极管的主要参数有下面几个:

1. 最大整流电流 I_{OM}

它是指二极管长期正常工作时所允许通过的最大正向平均电流,使用时不能超过此值,否则可能烧坏管子。

2. 最大反向工作电压 U_{RM}

二极管正常工作时所允许承受的最大反向电压,一般为反向击穿电压的 $1/2$ 到 $2/3$ 。

3. 最大反向电流 I_{RM}

它是指二极管加反向电压 U_{RM} 时的反向电流。其值越小,说明二极管的单向导电特性越好。反向电流受温度的影响较大。

4. 最高工作频率 f_M

二极管工作在高频时,管子的单向导电性能变差,最高工作频率 f_M 就是不使二极管失去单向导电特性时所允许加的信号的最高频率。

为了分析问题、解决问题方便,人们常常将二极管理想化,即正向导通时将其看做是短路(或说成正向压降或正向电阻忽略不计),反向截止时将其看做是断路(或说成反向电流忽略不计)。利用二极管的单向导电性,可组成许多很有用的电路。

例 1-1 在图 1-5(a)中, $E=5\text{ V}$, 输入电压 u_i 如图 1-5(b)所

示,若忽略二极管上的正向压降,试画出输出电压 u_o 的波形。

解 当 u_i 大于 E 时, D 导通,相当于短路, $u_o = E$ 。

当 u_i 小于 E 时, D 截止,相当于断路,电路中电流为零, $u_o = u_i$ 。

于是可画出输出电压 u_o 的波形。

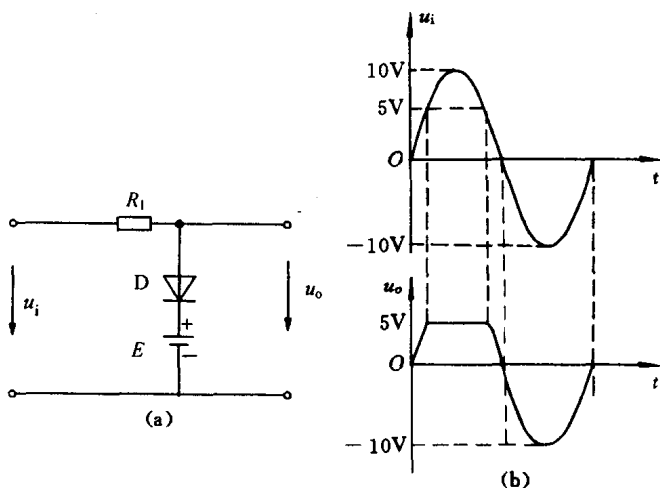


图 1-5 例题 1-1 的图

(a) 电路; (b) 输入输出波形

本例题中,当输入电压 u_i 超过 5 V 时,输出电压 u_o 被限幅,即 u_o 被削去顶部,输出电压被限制在 5 V 以下,二极管在这里起限幅或削波作用。限幅分上限幅、下限幅和双向限幅,本例属上限幅。

例 1-2 在图 1-6 中,当 $U_A = 3\text{ V}$, $U_B = 0\text{ V}$ 时,求输出端 F 点的电位 U_F 。忽略二极管导通时的正向压降。

解 因为 B 点的电位比 A 点的低, D_B 优先导通, D_B 导通后, D_A 因加反向电压而截止。 D_B 导通使输出端 F 点的电位 $U_F = 0\text{ V}$ 。

本例题中,二极管 D_B 起箝位作用,使 F 点固定在某一电位上; D_A 截止起隔离作用,将 A 点与 F 点的电位隔离开来。

由以上分析可知,判断电路中的二极管是否导通,最主要的就

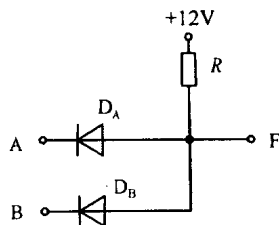


图 1-6 例 1-2 的图

是比较二极管阳极和阴极电位,当阳极电位高于阴极电位时二极管导通,否则截止。如果多个二极管共阳极(或共阴极)联接,只有阴极电位低(或阳极电位高)的管子导通。

四、稳压管

稳压管是一种特殊的面接触型硅二极管。其伏安特性曲线和表示符号如图 1-7 所示。稳压管的伏安特性曲线与普通二极管的伏安特性曲线类似,主要区别在于稳压管的反向击穿特性曲线比

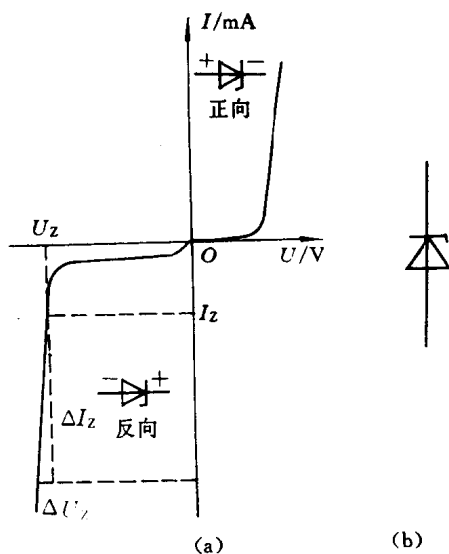


图 1-7 稳压管的伏安特性曲线及表示符号

较陡,当反向击穿电流在较大范围内变化时,击穿电压或稳定电压 U_Z 基本不变。因此,利用这一特性可以稳压,正常工作时,稳压管一般工作在反向击穿区域。

在稳压电路中,为使反向电流不超过允许范围,稳压管必须串联一个适当数值的限流电阻,如图 1-8 所示。

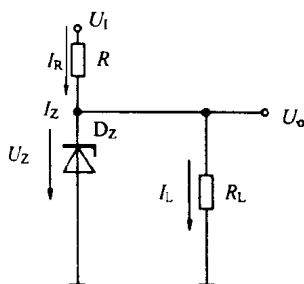


图 1-8 稳压管应用电路

稳压管的主要参数有:

1. 稳定电压 U_Z

U_Z 是指稳压管正常工作时管子两端的电压,因工艺方面的原因,稳压管的稳定电压离散性比较大,同一型号的管子 U_Z 也不相同,使用时可根据实际情况选用。

2. 动态电阻 r_Z

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad (1-1)$$

r_Z 实际上是反向特性曲线的斜率的倒数。稳压管的反向伏安特性曲线愈陡,则动态电阻 r_Z 愈小,稳压性能愈好。

3. 最大允许耗散功率 P_{ZM}

管子的最大功耗为 $P_{ZM} = U_Z \cdot I_{Z\max}$,是管子不至因温度过高而损坏的最大允许功率损耗,它实际上规定了稳压管允许通过的最大工作电流。

【思考与练习题】

1-2-1 为什么当环境温度升高时,二极管的反向饱和电流会明显增大?

1-2-2 怎样用万用表判断二极管的阳极和阴极？如何判断管子的好坏？

1-2-3 为什么稳压管的动态电阻 r_z 愈小，则稳压性能愈好？

§ 1.3 半导体三极管

半导体三极管又称晶体三极管，简称晶体管或三极管，它是分立元件放大电路的核心，在工业、农业、国防、日常生活中应用非常广泛。

一、三极管的结构

半导体三极管的结构示意图如图 1-9 所示，它有三层半导体，形成三个区，分别叫发射区、基区和集电区，由三个区各引出一个电极，分别称为发射极、基极和集电极，分别用字母 E、B 和 C 来表示。发射区和基区之间的 PN 结叫发射结，集电区和基区之间的 PN 结叫集电结。

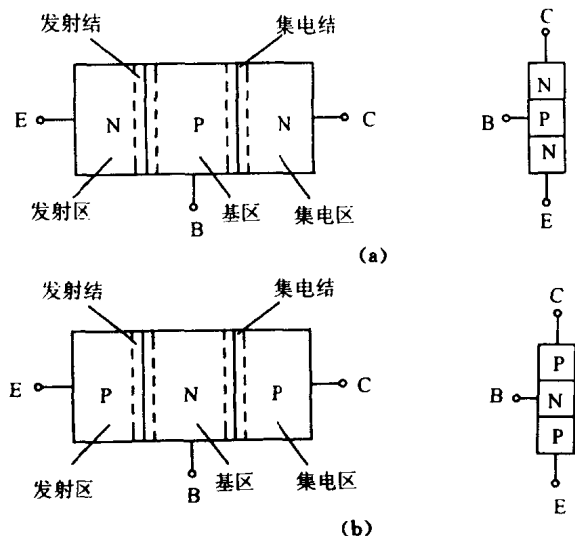


图 1-9 晶体管的结构示意图

(a) NPN 型；(b) PNP 型

半导体三极管有 NPN 型和 PNP 型两种组合形式,其表示符号如图 1-10 所示,两种管子在表示符号上的区别是发射极的箭头方向(该方向表明了发射结的正向电流方向)不同,但放大原理类似。下面以 NPN 型管子为例进行讨论。

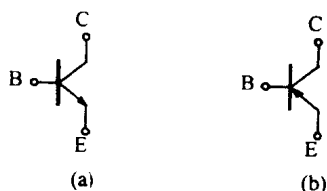


图 1-10 晶体管的表示符号

(a) NPN 型; (b) PNP 型

二、三极管的放大作用

晶体管正常放大工作时,外加电源必须满足一定条件,即:发射结加正向电压(正向偏置),集电结加反向电压(反向偏置),对 NPN 型三极管来说,此时发射区向基区发射电子,少量在基区被复合后,大部分被集电区所收集,形成了发射极电流 I_E 和基极、集电极电流的主要部分 I_{BN} 、 I_{CN} ;晶体管的制造工艺决定了被复合和被收集的电子在数量上的固定比例关系;集电区和基区还将形成反向截止电流 I_{CBO} ,其方向与 I_B 相反,它是 I_C 和 I_B 的一小部分,如图 1-11 所示。

由图 1-11 可得出如下结论:

(1) $I_B = I_{BN} - I_{CBO}$, I_{CBO} 是集电极-基极反向截止电流。

(2) $I_C = I_{CN} + I_{CBO}$ 。

(3) $I_E = I_C + I_B$, 该结论符合 KCL。

(4) I_{CN} 与 I_{BN} 的比值反映了三极管对直流电流的放大能力,

用 $\bar{\beta}$ 表示,称为电流放大系数。即 $\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I_{BN}}$, 于是

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO} = \bar{\beta}I_B + (1 + \bar{\beta})I_{CBO} \approx \bar{\beta}I_B \quad (1-2)$$

(5) 当 $I_B = 0$ (基极开路) 时,无论集电极和发射极之间怎样加

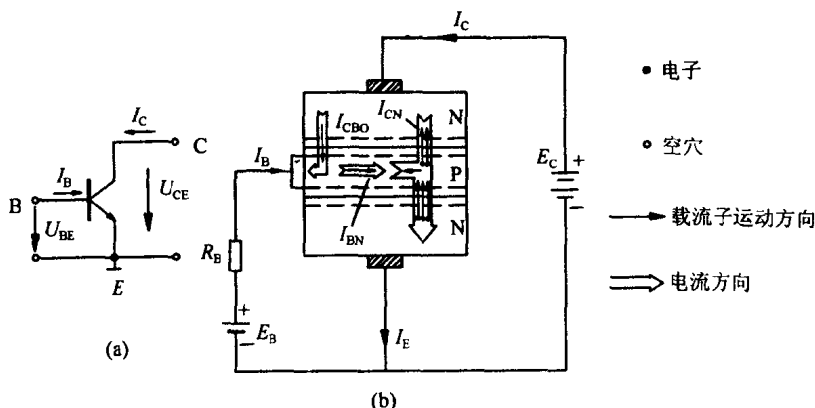


图 1-11 NPN 型三极管电流分配关系示意图

(a) 共发射极连接的 NPN 型三极管; (b) 电流分配关系示意图

电压,总有一个 PN 结工作于反向截止状态。此时, $I_C = I_{CE0}$ 定义为集-射极反向截止电流,又称集-射极穿透电流。很明显, $I_{CE0} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$ 。

由式(1-2),当基极电流 I_B 变化时, I_C 将会有相应的变化, I_B 对 I_C 的这种控制作用,就是三极管的电流放大作用。

三、三极管的特性曲线

晶体管的特性曲线是用来表示三极管各极电压和电流之间关系的曲线,最常用的是共发射极接法输入特性曲线和输出特性曲线,它们是分析晶体管放大器的重要依据;特性曲线可以由晶体管特性图示仪直观地显示出来,也可通过实验电路进行测试得到。

1. 输入特性曲线

输入特性曲线是指当 U_{CE} 为常数时,三极管基极电流 I_B 和发射结电压 U_{BE} 之间的关系曲线 $I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE}=C}$,如图 1-12 所示。

从图中可以看出,输入特性曲线是非线性的,且随 U_{CE} 的增加曲线右移;当 $U_{CE} > 1\text{ V}$ 时,继续增加 U_{CE} 曲线不再明显右移。因此常用 $U_{CE} = 1\text{ V}$ 时的一条曲线作为输入特性曲线。输入特性曲线同

二极管的伏安特性曲线一样,也有一段死区,只有当 U_{BE} 大于死区电压时,才出现 I_B (导通)。硅管的死区电压为 0.5 V, 锗管的死区电压不超过 0.2 V。正常情况下 NPN 型硅管发射结的导通电压 $U_{BE}=0.6\sim 0.7\text{ V}$, PNP 型锗管发射结的导通电压 $U_{BE}=-0.2\sim -0.3\text{ V}$ 。

当温度上升时,特性曲线将左移,这是半导体热敏特性造成的结果。

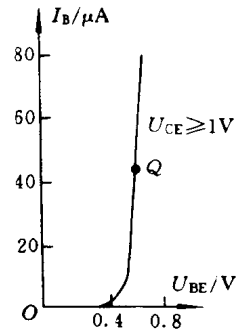


图 1-12 晶体管的输入特性曲线

2. 输出特性曲线

输出特性曲线是指当基极电流 I_B 为常数时,集电极电流 I_C 与集-射极电压 U_{CE} 之间的关系曲线 $I_C=f(U_{CE})|_{I_B=C}$ 。不同的 I_B 得到不同的曲线,所以输出特性曲线是一组曲线,如图 1-13 所示。

从图中可以看出,晶体管的输出特性曲线可以分成三个区:

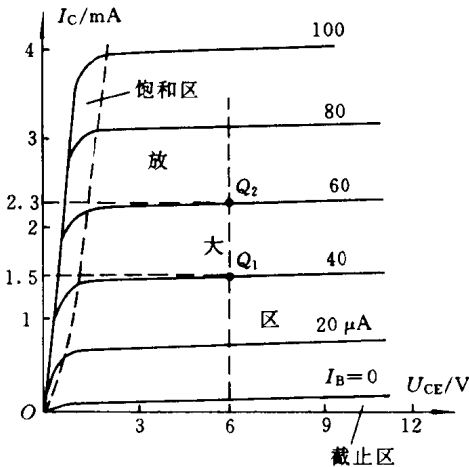


图 1-13 晶体管的输出特性曲线