

# 常用半导体元件性能与测试

## 学习目标

- (1) 了解半导体的导电特性,理解PN结的单向导电性;
- (2) 掌握二极管的伏安特性及主要参数;
- (3) 理解三极管的电流放大原理;
- (4) 掌握三极管的输入/输出特性及主要参数;
- (5) 掌握场效应管的转移特性和输出特性。

## 任务 1.1 二极管的性能与测试

### 1.1.1 PN结及其单向导电性

#### 1. N型半导体和P型半导体

自然界的半导体材料主要是硅(Si)和锗(Ge),它们都是四价元素,如果通过一定的工艺提纯,所有原子便基本上排列整齐,形成晶体结构。所以,由半导体构成的管件也称晶体管。在晶体结构中,外层价电子与原子核间有很强的束缚力,因此,纯半导体(又称本征半导体)的导电能力不强,电阻率介于导体和绝缘体之间。

硅(或锗)原子最外层轨道有四个价电子,相邻原子间组成共价键结构。当温度为绝对零度时,共价键中的电子被束缚得很紧,不存在自由电子。当温度升高或受到外界因素(如光照)激发时,少量的价电子挣脱原子核的束缚成为自由电子,同时在共价键上留下空位,叫做空穴。电子带负电,空穴带正电,但作为一个整体,半导体仍是中性的。

电子和空穴都称为载流子。受激后自由电子和空穴总是成对产生的,称为电子空穴对。自由电子在运动中如果和空穴相遇,可以放出多余的能量而填补这个空穴,二者同时消失,这种现象称为复合。在一定温度下,激发与复合达到动态平衡,载流子维持一定的数量。常温下,本征半导体中的载流子数量很少,其导电性能很差。随着环境温度升高,载流子数量按指数规律增加。

在电场作用下,自由电子可以定向移动,形成电流。空穴虽不能移动,但因为带正电,故能吸引相邻原子中的价电子来填补。相邻原子一旦失去电子,便产生新的空穴。一部分空穴被填补,另一部分空穴相继产生,如此继续,就好像带正电的粒子(空穴)在运动。因此,半导体中出现两部分电流:一是自由电子逆电场方向运动形成的电子电流;二是空穴顺电场方向运动形成的空穴电流。

在本征半导体中加入某些其他元素即杂质,导电能力可显著提高。这种掺入杂质的半导体,称为杂质半导体。按照掺杂的不同,杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体。

### (1) N 型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素,例如磷(P),就得到 N 型半导体。由于掺入杂质数量很少,整个晶体的结构不变,只是在某些位置上,原来的硅(或锗)原子被磷原子取代。磷原子有五个价电子,其中的四个价电子与相邻的四个硅原子组成共价键,多余的一个电子便成为自由电子。磷原子由于丢失一个价电子成为带正电荷的磷离子。磷离子不能移动,故不参与导电。因正离子数目与自由电子数目相等,半导体仍然是中性的。本征半导体中还有原来因激发产生的数量不多的自由电子和空穴。掺杂后,自由电子总数大大超过空穴数目。因此,在 N 型半导体中,自由电子是多数载流子,简称多子。空穴是少数载流子,简称少子。这种半导体主要靠自由电子导电,故又称为电子型半导体。

### (2) P 型半导体

在本征半导体中掺入微量三价元素,例如硼(B),就得到 P 型半导体。硼原子只有三个价电子,与相邻的三个硅原子组成三对完整的共价键,还有一个共价键因缺少一个价电子而形成空位。在常温下,邻近原子的价电子很容易过来填补这个空位,这就使邻近原子中形成一个新的空穴。硼原子因获得一个电子成为带负电的硼离子,它不能移动也不参与导电。因此,在 P 型半导体中,空穴是多数载流子,电子是少数载流子,它主要靠带正电的空穴进行导电,故又称为空穴型半导体。

## 2. PN 结及其单向导电性

如果采取工艺措施,在一块本征半导体中掺入不同的杂质,一边做成 N 型,另一边做成 P 型,则在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面上就形成一个特殊的薄层,称为 PN 结。许多半导体器件都含有 PN 结。

实际工作中的 PN 结,总加有一定的电压。当外加电压的极性不同时,PN 结的情况也明显不同。

(1) 外加正向电压时,正向电流较大。PN 结加正向电压的情况,如图 1-1 所示,即直流电源正极接 P 区,负极接 N 区。此时,PN 结处于导通状态,导电方向从 P 区到 N 区,PN 结呈现的电阻称为正向电阻,其值很小,一般为几欧到几百欧。

(2) 外加反向电压时,反向电流很小。PN 结外加反向电压的情况如图 1-2 所示。即直流电源正极接 N 区,负极接 P 区,PN 结基本上处于截止状态。此时的电阻称为反向电阻,其值很大,一般为几千欧至十几千欧。

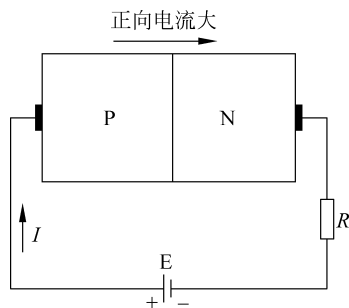


图 1-1 PN 结外加正向电压

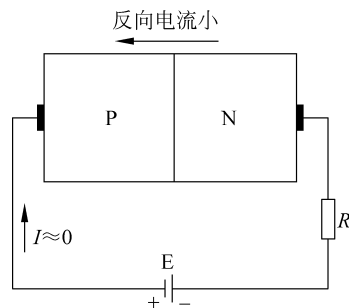


图 1-2 PN 结外加反向电压

综上所述,PN 结外加正向电压时,正向扩散电流较大,PN 结呈导通状态,结电阻小;PN 结外加反向电压时,反向漂移电流很小,PN 结呈截止状态,结电阻很大。因此,PN 结具有单向导电性。

### 1.1.2 二极管的结构与特性

#### 1. 二极管的结构

将一个 PN 结的两端加上电极引线并用外壳封装起来,就构成一只半导体二极管。常用二极管的外形、结构和符号如图 1-3 所示,图 1-3(c)中的符号箭头表示正向电流的方向。

不论何种型号、规格的二极管,都有两个电极:由 P 区引出的电极,称为正极(也叫阳极);由 N 区引出的电极,称为负极(也叫阴极)。

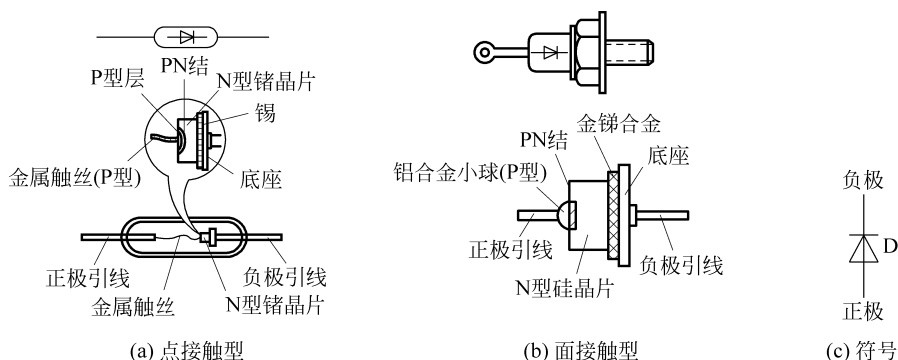


图 1-3 二极管的外形、结构和符号

#### 2. 二极管的伏安特性

二极管两端所加电压与流过管子的电流之间的关系曲线,称为伏安特性,如图 1-4 所示。

由图 1-4 可见,当外加正向电压很低时,二极管正向电流几乎为零。只有在外加电压大于某一数值时,正向电流才明显增加,这个电压称为死区电压。硅管约 0.5V,锗管约 0.2V。当外加电压超过死区电压后,二极管处于正向导通状态,其正向压降很小,硅管为 0.6~0.7V,锗管为 0.2~0.3V。因此,使用二极管时,如果外加电压较大,应串接限流电阻,防止过电流烧坏 PN 结。

当外加反向电压时,二极管反向电流很小。小功率硅管的反向电流约在  $1\mu\text{A}$  以下,锗管也只有几十  $\mu\text{A}$ ,二极管相当于一个开关断开的状

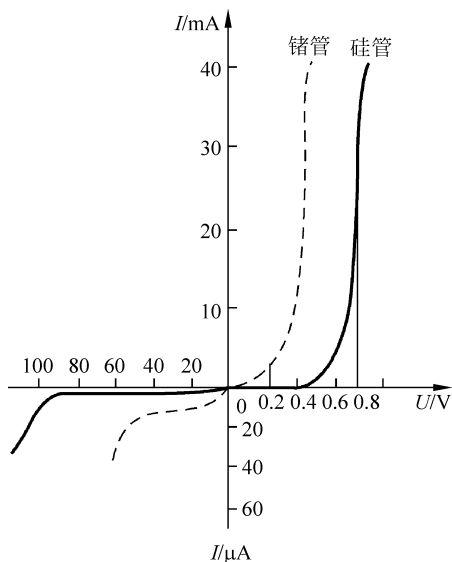


图 1-4 二极管伏安特性

态。二极管的反向电流在一定温度下为常数,不随外加电压变化,故又称该反向电流为反向饱和电流。在同样温度下,硅管的反向电流比锗管小得多。当外加反向电压超过某一定值时,反向电流急剧增大,这种现象称为反向击穿。对应的反向电压称为二极管反向击穿电压。

从图 1-4 还可看出,二极管的伏安特性不是直线,而是曲线。因此,二极管是非线性电阻元件。其正向电阻是工作点的函数,大小随工作点的改变而变化,反向电阻则近似为无穷大。

### 1.1.3 二极管参数与分类

#### 1. 二极管的参数

二极管的参数用来表征二极管的性能和适用范围,主要有以下方面。

##### (1) 最大整流电流 $I_{OM}$

最大整流电流指二极管长时间使用时,允许流过二极管的最大正向平均电流。它的大小取决于 PN 结的面积、材料和散热情况。点接触型二极管的  $I_{OM}$  一般在几十毫安以下,面接触型二极管的  $I_{OM}$  较大,一般在几百毫安以上。

##### (2) 最高反向工作电压 $U_{RM}$

最高反向工作电压指二极管上允许加的反向电压最大值。若工作时所加反向电压值超过此值,管子就有可能反向击穿而失去单向导电性。点接触型二极管的  $U_{RM}$  一般为数十伏,面接触型二极管则可达到数百伏。

##### (3) 最大反向电流 $I_{RM}$

最大反向电流指在二极管上加最高反向工作电压时的反向电流值(又称为反向饱和电流)。反向电流越小,二极管的单向导电性越好。反向电流受温度影响较大,常温下,硅管的反向电流一般在几微安以下,锗管的反向电流一般在几十至几百微安之间。

##### (4) 最高工作频率 $f_M$

由于 PN 结的电容效应,当二极管工作在超过某一频率限度时其单向导电性将变差。一般点接触型二极管的  $f_M$  值较高(可达 100MHz 以上),而面接触型二极管的较低,只为几 kHz。

##### (5) 反向恢复时间 $t_{rr}$

反向恢复时间指二极管所加的电压由正向突然变为反向时,电流由很大衰减到接近  $I_S$  时所需的时间,一般为 ns 级。此项指标一般在大功率高频电路中要加以考虑。

二极管的参数很多,实际应用时,可查阅半导体器件手册。附录 B 中列出了部分常用二极管的参数。

#### 2. 二极管的分类

二极管的种类很多。按制造材料分,主要有硅二极管和锗二极管;按用途分,主要有整流二极管、检波二极管、稳压二极管、开关二极管等;按结构分,主要有点接触型二极管和面接触型二极管。点接触型二极管结面积小,因而结电容小,允许通过的电流小,适用于高频,常用于检波、脉冲技术中,国产有 2AP 系列和 2AK 系列;面接触型二极管结面积大,结电容大,适用于整流,不适于高频,国产有 2CP 系列和 2CZ 系列。国产半导体器

件的型号及命名方法见附录 A。

### 1.1.4 二极管识别与质量检测

#### 1. 二极管的外形特征

- (1) 二极管一般体积都很小,有两根引脚,两引脚有正、负之分,使用时不能接反。
- (2) 二极管两根引脚轴向伸出,有的用长、短脚的短脚表示负极。
- (3) 有的二极管外壳上标有二极管的电路符号或标记负极符号“—”,据此可确定引脚的正负极。

#### 2. 二极管的简易测试

##### (1) 使用指针式万用表测试

##### ① 判断二极管的正负极

将万用表的挡位选在  $R \times 1k\Omega$  或  $R \times 100\Omega$  挡,并调零。按图 1-5 所示,用红、黑表笔分别接被测二极管的两个引脚,测试数据记入表 1-1 中。当所测阻值为正向电阻时,黑表笔所接引脚是二极管的正极,红表笔所接引脚是二极管的负极。



图 1-5 用指针式万用表测试二极管

表 1-1 二极管正反向电阻测量

二极管类型	2AP 型		2CP 型	
	万用表电阻挡	正向电阻	反向电阻	
	$R \times 1k\Omega$	$R \times 100\Omega$	$R \times 1k\Omega$	$R \times 100\Omega$
正向电阻				
反向电阻				

##### ② 判断是硅管还是锗管

硅管的正向电阻比锗管大得多。一般硅管的正向电阻为几千欧,锗管的正向电阻只有  $100\Omega \sim 1k\Omega$ ,据此可判断所测二极管是硅管还是锗管。还有一种方法是在二极管上加正向电压,通过测试二极管的正向压降来判断管子类型。硅管正向压降为  $0.6 \sim 0.7V$ ,锗管为  $0.1 \sim 0.3V$ 。

##### ③ 检查二极管的好坏

一般二极管的反向电阻比正向电阻大几百倍,可通过测量正、反向电阻来判断二极管的好坏。若测得正、反向电阻都很小或都很大,说明该二极管已损坏。

##### (2) 使用数字万用表测试

用数字万用表测试普通二极管也很方便,这里以使用 DT840 型数字式万用表为例说

明。测量时,将黑表笔插入 COM 插孔,红表笔插入 V/ $\Omega$  插孔,然后将功能开关置于二极管挡,将两表笔连接到被测二极管两端,显示器将显示二极管正向压降的 mV 值。当二极管反向时则过载。

根据万用表的显示,可检查二极管的质量及鉴别所测量的管子是硅管还是锗管(注意:数字万用表的红表笔是表内电池的正极,黑表笔是电池的负极)。

#### ① 判别二极管的正负极

将万用表的红、黑表笔分别与被测二极管的两个引脚相接。测量结果若在 1V 以下,红表笔所接为二极管正极,黑表笔为负极;若显示“1”(超量程),则黑表笔所接为正极,红表笔为负极。

#### ② 判别是硅管还是锗管

红、黑表笔分别与被测二极管的两个引脚相接时,测量显示若为 550~700mV(即 0.55~0.70V),则为硅管;若为 150~300mV(即 0.15~0.30V),则为锗管。

#### ③ 检查二极管的好坏

红、黑表笔分别与被测二极管的两个引脚相接时,如果两个方向均显示超量程,则二极管开路;若两个方向均显示“0”V,则二极管击穿、短路。

### 1.1.5 二极管选用与代换原则

二极管常用于整流、检波、稳压等电路。不同的使用场合,对二极管有不同的要求。

#### 1. 整流二极管

##### (1) 选用原则

整流二极管一般为平面型硅二极管,主要用于各种低频半波整流电路,如需达到全波整流则需连成整流桥使用。选用时,主要应考虑其最大整流电流、最大反向电流、最高工作频率及反向恢复时间等参数。

普通串联稳压电源电路中使用的整流二极管,对最高工作频率和反向恢复时间要求不高,只要根据电路的要求,选择最大整流电流和最大反向电流符合要求的整流二极管即可。

开关稳压电源的整流电路及脉冲整流电路中使用的整流二极管,应选用工作频率较高、反向恢复时间较短的整流二极管或选择快恢复二极管。

##### (2) 代换原则

整流二极管损坏后,若无同型号二极管更换时,可以选择参数相同的其他型号整流二极管代换。

通常,高耐压值(反向电压)的整流二极管可以代换低耐压值的整流二极管,而低耐压值的整流二极管不能代换高耐压值的整流二极管。整流电流值高的二极管可以代换整流电流值低的二极管,而整流电流值低的二极管则不能代换整流电流值高的二极管。

#### 2. 检波二极管

##### (1) 选用原则

检波是从被调制波中取出信号成分,是对高频波整流,要求二极管的结电容要小,一

般选用点接触型锗二极管,例如 2AP 系列等。能用于高频检波的二极管大多能用于限幅、钳位、开关和调制电路。

选用时,应根据电路的具体要求,选择工作频率高、反向电流小、正向电流足够大的检波二极管。

### (2) 代换原则

检波二极管损坏后,若无同型号二极管更换时,也可以选用半导体材料相同、主要参数相近的二极管来代换。在要求不高的条件下,也可用损坏了一个 PN 结的锗材料高频晶体管来代用。

## 3. 稳压二极管

### (1) 选用原则

稳压二极管一般用在稳压电源中作为基准电压源或用在过电压保护电路中作为保护二极管。

选用时,应满足应用电路中主要参数的要求。稳压二极管的稳定电压值应与应用电路的基准电压值相同,稳压二极管的最大稳定电流应高于应用电路的最大负载电流 50% 左右。

### (2) 代换原则

稳压二极管损坏后,如果找不到同型号的稳压二极管,也可采用电参数相同的稳压二极管来更换。

可以用具有相同稳定电压值的高耗散功率稳压二极管代换耗散功率低的稳压二极管,但不能用耗散功率低的稳压二极管代换耗散功率高的稳压二极管。例如,0.5W、6.2V 的稳压二极管可以用 1W、6.2V 的稳压二极管代换。

## 1.1.6 二极管应用电路分析

二极管的应用范围很广,常用于整流、检波、钳位、限幅、开关等电路中。此外,在稳压、变容、温度补偿等方面也有应用。关于整流,我们将在项目 5 中进行讨论,下面介绍其他几种应用电路。

### 1. 钳位

二极管正向导通时,由于正向压降很小,故阳极与阴极的电位基本相等,利用这个特点可对电路中某点进行钳位。以图 1-6 所示电路为例,若 A 点电位  $U_A = 0V$ ,则二极管正向导通,将 F 点电位钳制在 0V 左右,即  $U_F \approx 0V$ 。

### 2. 限幅

利用二极管导通后,两端电压基本不变的特点(硅管约为 0.7V),可组成限幅电路,如图 1-7(a)所示。

设输入电压  $u_i$  为正弦波,其幅值大于 0.7V,  $D_1$ 、 $D_2$  为硅二极管。当  $u_i$  处于正半周,且  $u_i < 0.7V$  时,  $D_1$ 、 $D_2$  均截止,输出电压  $u_o = u_i$ ; 当  $u_i \geq 0.7V$  时,  $D_1$  导通,

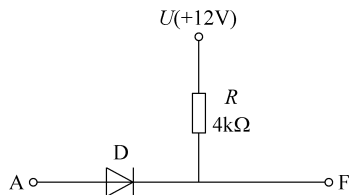


图 1-6 二极管的钳位作用

$u_o = 0.7\text{V}$ 。当  $u_i$  处于负半周,且  $u_i > -0.7\text{V}$  时,  $D_1$ 、 $D_2$  均截止,输出电压  $u_o = u_i$ ; 当  $u_i \leq -0.7\text{V}$  时,  $D_2$  导通,输出电压  $u_o = -0.7\text{V}$ ,其波形如图 1-7(b)所示。

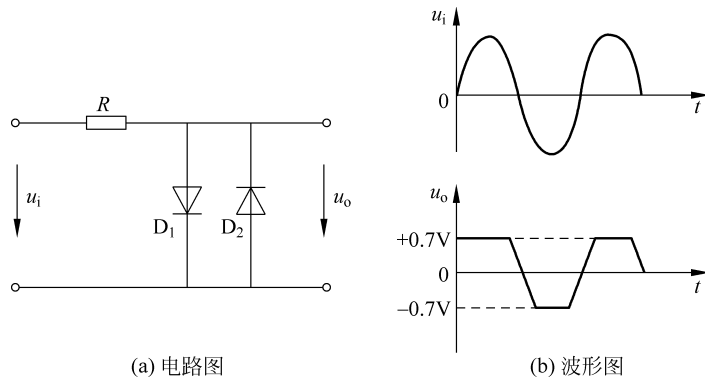


图 1-7 二极管限幅电路

可见,由于二极管  $D_1$ 、 $D_2$  的作用,输出电压正负半周的幅度均受到限制。这种电路常用于某些放大器输入端,对放大器起保护作用。

### 3. 稳压

利用二极管正向导通时,在一定电流范围内,管子两端电压变化不大的特点,可组成正向稳压电路,如图 1-8 所示。

二极管  $D_1$ 、 $D_2$  正向串联后并联于负载两端,因硅管的正向压降为  $0.7\text{V}$  左右,在负载  $R_L$  上可得到约  $1.4\text{V}$  的稳定电压。图中  $R$  为限流电阻。该电路结构简单,适用于负载电压不高,取用不大场合。

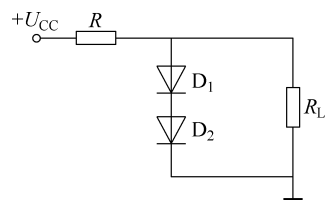


图 1-8 二极管正向稳压电路

## 任务 1.2 三极管的性能与测试

晶体三极管,简称三极管或晶体管,是组成放大、振荡、开关等电路的核心元件。本节首先从三极管结构开始,主要讨论三极管的电流放大作用、电流分配关系和输入、输出特性曲线;然后介绍三极管的主要参数、三极管的识别与质量检测、三极管的选用与代换等知识。

### 1.2.1 三极管的结构与特性

#### 1. 三极管的基本结构

三极管的种类很多,其外形如图 1-9 所示。

三极管有三个区——发射区、基区、集电区;有两个 PN 结——发射结、集电结。发

射结是基区和发射区之间的结,集电结是基区和集电区之间的结;分别引出三个电极——发射极 E、基极 B、集电极 C。根据组合方式的不同,三极管分为 NPN 和 PNP 两类,其结构分别如图 1-10(a)、图 1-10(b)所示。

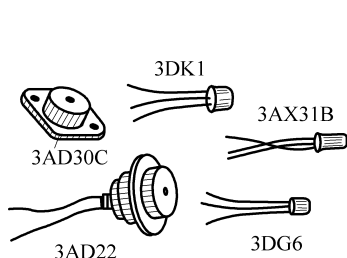


图 1-9 三极管的外形

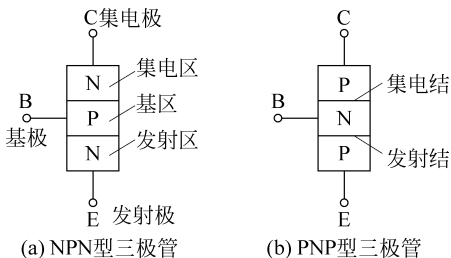


图 1-10 三极管结构示意图

图 1-11 所示为两种不同类型三极管的图形符号,其区别仅在于发射极箭头的方向。图中箭头所指方向表示发射结正向偏置时的电流方向。

实际的三极管,为实现其放大作用,在制造时采取了两个措施:

- (1) 将基区做得很薄,且掺杂浓度很低。
- (2) 发射区掺杂浓度比集电区大,发射结面积比集电

结小。以保证发射区能提供足够数量的载流子和集电区能有效地收集载流子。

国产三极管的硅管多为 NPN 型,锗管多为 PNP 型,其型号及命名方法见附录 A。下面以 NPN 型三极管为例进行分析。

## 2. 三极管的电流放大作用

为了了解三极管的电流放大作用,我们来做一个简单实验,实验电路如图 1-12 所示。

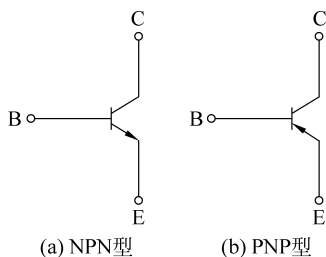


图 1-11 三极管的图形符号

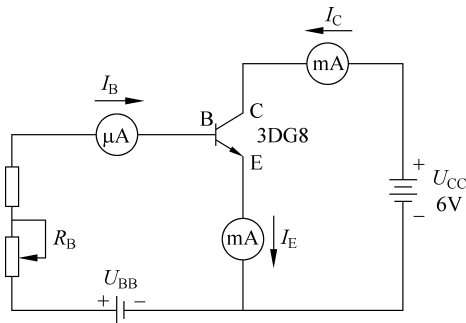


图 1-12 三极管电流放大实验电路

必须注意,要使三极管实现正常放大,发射结必须正向偏置;集电结必须反向偏置。改变可变电阻  $R_B$  的阻值,基极电流  $I_B$ 、集电极电流  $I_C$  和发射极电流  $I_E$  都将发生变化,不同的  $I_B$  值有对应的  $I_C$  和  $I_E$  值,如表 1-2 所示。

表 1-2 三极管 3DG8 各极电流测量值

$I_B/\text{mA}$	0.05	0.10	0.15	0.20
$I_C/\text{mA}$	2.94	5.90	8.95	12.30
$I_E/\text{mA}$	2.99	6.00	9.10	12.50
$I_C/I_B$	58.8	59.0	59.7	61.5

将表 1-2 中数据进行分析比较,可得出如下结论:

(1)  $I_E = I_C + I_B$ ,三个电流之间的关系符合基尔霍夫电流定律。

(2)  $I_C$ 稍小于  $I_E$ ,而远大于  $I_B$ 。 $I_C$ 与  $I_B$ 的比值远大于 1,且在一定范围内基本不变。特别是在基极电流产生微小变化  $\Delta I_B$ 时,集电极电流发生较大变化  $\Delta I_C$ 。从表 1-2 中第一列和第二列的数据,可得出

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{5.9 - 2.94}{0.1 - 0.05} = 59.2$$

这就是三极管的电流放大作用。我们把集电极电流  $I_C$ 与基极电流  $I_B$ 之比称为共发射极直流电流放大系数,用  $\bar{\beta}$ 表示。集电极电流变化量  $\Delta I_C$ 与基极电流变化量  $\Delta I_B$ 之比称为共发射极交流电流放大系数,用  $\beta$ 表示。 $\bar{\beta}$ 与  $\beta$ 在数值上相差很小,在计算时可以认为相等。

三极管各极电流之间的关系可通过三极管内部载流子的运动进行解释。

(1) 发射区向基区扩散电子的过程。

由于发射结加正向偏压,使发射结的内电场减弱。发射区的多数载流子(电子)源源不断地越过发射结进入基区,形成发射极电流  $I_E$ 。与此同时,基区的少数载流子(空穴)也向发射区扩散。由于基区掺杂浓度很低,其空穴浓度比发射区的电子浓度小得多,可略去不计。一般认为发射极电流主要是电子电流。

(2) 基区中电子的扩散和复合过程。

电子到达基区后,发射结一侧的电子浓度势必高于集电结一侧,形成电子浓度差,促使电子继续向集电结扩散。在扩散过程中,一部分电子与基区空穴相遇而复合。空穴不断地与电子复合,同时基极正电源不断地向基区补充空穴,形成基极电流  $I_B$ 。

(3) 集电区收集电子的过程。

在基区中未被复合的电子,扩散到集电结边缘,在集电结反向电压所产生的电场作用下,越过集电结,进入集电区,形成集电极电流  $I_C$ 。显然,集电结两边的少数载流子也会发生漂移运动,形成反向饱和电流  $I_{CBO}$ 。它的数值虽小,但对温度非常敏感。

上述三极管内部载流子的运动过程和电流分配关系描绘在图 1-13 中。

### 3. 三极管的特性曲线

三极管的特性是指各电极电压与电流之间的相互关系的曲线,是分析三极管性能的重要依

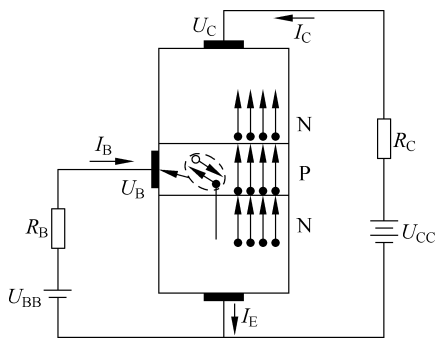


图 1-13 三极管内部载流子的运动