

电工学

电子技术

下册

主 编 艾永乐

副主编 钟南岳 王玉梅 吴 冰



中国矿业大学出版社

DIANGONGXUE

dianzijishu

目 录

第一章 半导体二极管和三极管.....	1
第一节 半导体的导电特性.....	1
第二节 半导体二极管.....	4
第三节 稳压二极管.....	5
第四节 半导体三极管.....	6
习 题	12
第二章 基本放大电路	15
第一节 基本放大电路的组成	15
第二节 静态工作点的稳定	25
第三节 阻容耦合多级放大电路	30
第四节 放大电路中的负反馈	34
第五节 射极输出器	42
第六节 互补对称功率放大电路	46
第七节 场效应管及其放大电路	52
习 题	58
第三章 集成运算放大器	62
第一节 差动放大电路	62
第二节 集成运算放大器	68
第三节 信号运算电路	71
第四节 信号处理电路	77
第五节 信号发生电路	83
第六节 运算放大器应用举例	87
习 题	89
第四章 正弦波振荡电路	93
第一节 自激振荡	93
第二节 LC 振荡电路	94
第三节 RC 振荡电路	96
习 题	97

第五章 直流稳压电源	99
第一节 整流电路	99
第二节 滤波电路	104
第三节 直流稳压电源	107
习 题	111
第六章 晶闸管整流电路	114
第一节 晶闸管	114
第二节 晶闸管整流电路	117
第三节 晶闸管触发电路	122
第四节 晶闸管的保护	124
第五节 应用举例	127
习 题	128
第七章 基本门电路和组合逻辑电路	130
第一节 晶体管的开关特性	130
第二节 逻辑门电路	132
第三节 组合逻辑电路及其应用	147
习 题	162
第八章 时序逻辑电路	166
第一节 双稳态触发器	166
第二节 寄存器	172
第三节 计数器	176
第四节 555 定时器及其应用	183
第五节 时序电路综合应用举例	187
习 题	190
第八章 模—数及数—模转换电路	194
第一节 数—模转换器(D/A)	194
第二节 模—数转换器(A/D)	196
第三节 典型 D/A、A/D 芯片简介	199
习 题	201
附 录	202
附录一 半导体器件型号及命名	202
附录二 常用二极管典型参数	204
附录三 常用稳压二极管典型参数	205
附录四 常用开关二极管典型参数	205

附录五	常用晶体管典型参数.....	206
附录六	常用绝缘栅场效应管典型参数.....	208
附录七	集成电路命名法.....	208
附录八	晶闸管典型参数.....	209
附录九	单结晶体管典型参数.....	209
参考文献		210

第一章 半导体二极管和三极管

二极管和三极管是电子电路中应用非常广泛的电子元件,它们的基本结构、工作原理、特性和参数是学习电子技术和分析电子技术的重要基础,而PN结又是构成各种半导体器件的共同基础。因此,本章从讨论半导体的导电特性和PN结的基本原理入手,然后介绍二极管和三极管的有关知识,为以后的学习打下基础。

第一节 半导体的导电特性

根据物质的导电能力不同可将其分为导体、半导体和绝缘体三大类,顾名思义,半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,硅、锗、硒及大多数金属氧化物和硫化物都是半导体。

多数半导体对环境温度的变化都非常敏感,当环境温度升高时,它的导电能力显著增强,尤其是在纯净的半导体中掺入微量的某种元素(杂质)后,其导电能力将增加几倍至几百万倍,利用这种热敏特性可制成各种热敏元件。有些硫化物半导体(如硫化镉)对光照非常敏感,当它受到光照时,导电能力显著增强,无光照时其导电能力类似绝缘体,利用这种光敏特性可制成光敏元件。

半导体有如此特殊的热敏或光敏特性,其根本原因是它的内部结构和导电机理与其他物质不同。下面简单介绍一下半导体物质的内部结构和导电原理。

一、本征半导体

完全纯净的、不含其他杂质的半导体通称本征半导体。单晶硅和单晶锗都是本征半导体,二者都是四价元素,在原子的最外层轨道上都有四个价电子。在本征半导体中,每个原子的一个价电子与另一原子的一个价电子组成一个电子对,并且为两个原子所共有,因此称为共价键。由共价键结构形成的半导体其原子排列都比较整齐,形成晶体结构,因此半导体又称为晶体,如图1-1所示。

在共价键结构的晶体中,每个原子的最外层都有八个价电子,因此都处于比较稳定的状态。只有当共价键中的电子获得一定能量(环境温度升高或受光照射)后,价电子方可挣脱原子核的束缚成为自由电子,并且在共价键中留下一个空位,称为空穴,如图1-2所示。

显然,在一般情况下,本征半导体中自由电子和空穴的数量都比较少,其导电能力很低。由于本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现,因此在一定温度下,它们的产生和复合将达到动态平衡,使自由电子和空穴维持在一定数目上。温度愈高,自由电子和空穴的数量愈多,导电性能也愈好。所以,温度对半导体的性能影响很大。

当半导体外加电压时,在电场的作用下,半导体中将出现两部分电流:一是自由电子作定向运动形成的电子电流,二是有空穴的原子吸引相邻原子中的价电子填补空穴而在相邻原子的共价键中留下新的空穴形成的空穴电流,因此,我们称自由电子和空穴为载流子。在半导体中,同时存在两种载流子的定向运动是半导体导电方式的最大特点,也是半导体与金

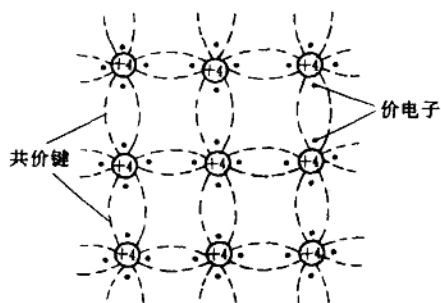


图 1-1 晶体的共价键结构

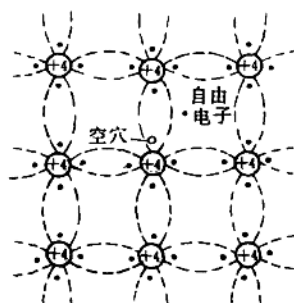


图 1-2 本征半导体中的自由电子与空穴

属在导电原理上的本质差别。

二、杂质半导体

为了增加本征半导体中的自由电子和空穴的数量,提高它的导电能力,通常在本征半导体中掺入微量的杂质(某种元素),称为杂质半导体。根据掺杂元素的不同,杂质半导体可分为 N 型和 P 型两大类。

1. N 型半导体

在硅的单晶体内掺入微量的五价元素(磷或砷)后,磷或砷原子将取代某些硅原子的位置并与相邻的硅原子结成共价键。由于磷或砷是五价元素,与硅原子结成共价键后,多余的一个电子将成为自由电子,因此,称五价元素为施主原子。失去一个电子的磷或砷就成为固定在晶格中不能移动的正离子。

本征半导体掺入五价元素的数量决定着自由电子的数量。由于掺入五价元素的杂质半导体中自由电子的数量比空穴的数量多得多,载流子中自由电子占多数,空穴占少数,因此称这种杂质半导体为 N 型半导体,如图 1-3 所示。

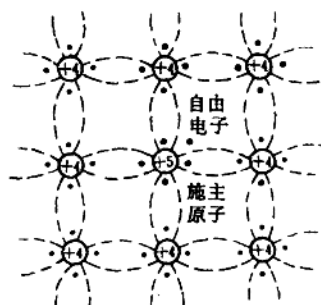


图 1-3 N 型半导体的晶体结构

2. P 型半导体

如果在硅的单晶体中掺入微量的三价元素(硼或铝),掺入的硼或铝原子将取代某些硅原子的位置,并与相邻的硅原子结成共价键,同时在共价键中出现一个空穴。当邻近的价电子填补这个空穴后,使三价元素成为带负电的离子,如图 1-4 所示。由于三价元素接受一个电子,因此称它为受主原子,掺入三价元素的数量决定空穴的数量,而且这种杂质半导体中空穴的数量比自由电子多得多,载流子中空穴占多数,自由电子占少数,因此称这种杂质半导体为 P 型半导体。

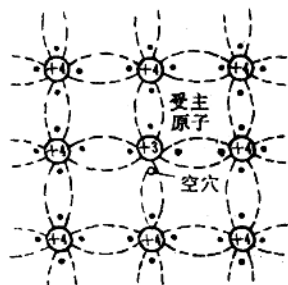


图 1-4 P 型半导体的晶体结构

3. PN 结及单向导电性

(1) PN 结的形成

将 P 型半导体与 N 型半导体通过物理、化学的方法有机地结合为一体,就会在两种半导体的交界处形成一个 PN

结。由于交界处两边的电子和空穴的浓度不同(N 型区自由电子多,P 型区空穴多),因此,N 型区内的电子要向 P 型区扩散,而 P 型区内的空穴也要向 N 型区扩散,使交界面 P 型区一侧出现带负电的离子,而 N 型区一侧出现带正电的离子,因而在交界面两侧形成一个空间电荷区,如图 1-5 所示。

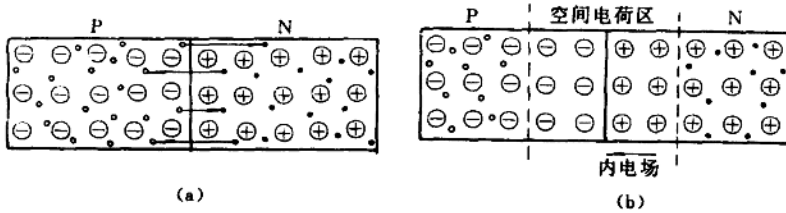


图 1-5 PN 结的形成
(a) 多数载流子的扩散 (b) 空间电荷区

形成空间电荷区之后,半导体内部将出现内电场,其方向从 N 区指向 P 区。内电场将阻碍 N 区的多数载流子(自由电子)和 P 区的多数载流子(空穴)继续向对方扩散,同时又促进 N 区的少数载流子(空穴)和 P 区的少数载流子(自由电子)向对方漂移。在一定条件下,当多数载流子的扩散运动与少数载流子的漂移运动达到动态平衡时,PN 结则处于相对稳定状态。

(2) PN 结的单向导电性

如果在 PN 结上外加正向电压(P 区接电源正端,N 区接电源负端),如图 1-6 所示,外电场与内电场方向相反,内电场被削弱,使多数载流子的扩散运动增强,形成较大的扩散电流(又称正向电流 I_f)。在一定范围内,外电场愈强,正向电流愈大,这时 PN 结的正向电阻很低。

由于 PN 结空间电荷区形成的电位差较小,只有零点几伏,如果外加正向电压过大,将会产生很大的正向电流,使 PN 结损坏。因此,一般都在电路中接入限流电阻 R 。

若给 PN 结加反向电压(P 区接电源负端,N 区接电源正端),如图 1-7 所示,外电场与内电场方向一致,外电场加强内电场,使多数载流子的扩散运动难以进行。但是,在外电场的作用下,P 区的少数载流子(自由电子)和 N 区的少数载流子(空穴)将产生漂移运动,形成很小的反向电流 I_r ,即 PN 结的反向电阻很高。由于少数载流子的数目与环境温度密切相关,因此温度对反向电流的影响很大。

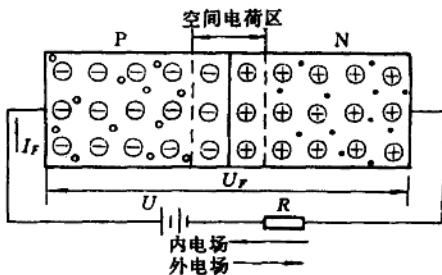


图 1-6 PN 结加正向电压

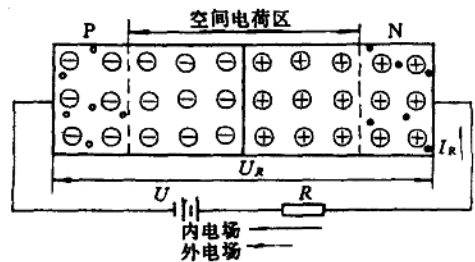


图 1-7 PN 结加反向电压

综上所述,PN 结具有单向导电性能,即 PN 结加正向电压时,PN 结正向电阻很低,正向电流较大,PN 结处于导通状态;当 PN 结加反向电压时,PN 结反向电阻很高,反向电流很小,PN 结处于截止状态。PN 结的特性是构成多种半导体器件的基础。

第二节 半导体二极管

一、半导体二极管的结构

一个 PN 结外封管壳并引出电极,就成为半导体二极管。根据 PN 结的结构,二极管分为点接触型和面接触型两类。点接触型的二极管由于结面积很小,不能通过较大的正向电流,但结电容小,易于在高频小功率条件下使用,如开关二极管就是点接触型的。面接触型二极管的 PN 结面积较大,允许通过较大的正向电流,但结电容大,不能在高频下工作,因此一般都用于整流。半导体二极管的外型及符号如图 1-8 所示。

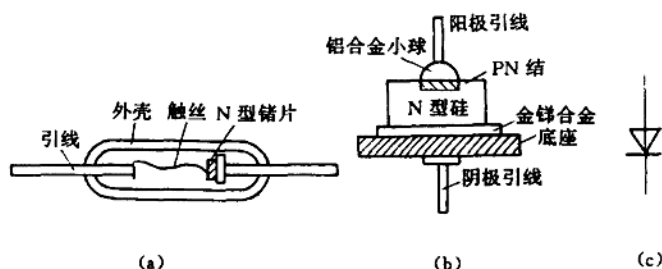


图 1-8 二极管的外型及符号

(a) 点接触型 (b) 面接触型 (c) 表示符号

二、二极管的伏安特性

二极管的电流与外加电压的关系曲线称作伏安特性。图 1-9 所示为典型的硅二极管伏安特性,它由正向特性和反向特性组成。由图可见,当外加正向电压很小时,外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动的阻力,因此正向电流几乎为零。二极管正向电流几乎为零的区域称为死区,对应死区的正向电压称为死区电压,其值与半导体材料和环境温度有关,通常硅管约为 0.5 V,锗管约为 0.2 V。外加正向电压大于死区电压后,二极管导通,其正向电流与正向电压的关系为指数关系。

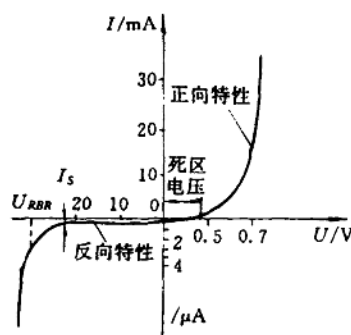


图 1-9 二极管的伏安特性

当二极管加反向电压时,在环境温度不变的条件
下,少数载流子的数目近似为常数,因此当反向电压不超过某一范围时,反向电流的值很小,并且恒定,通常称它为反向饱和电流。当反向电压超过二极管的反向击穿电压 U_{BR} 时,电场力将共价键中的电子拉出,使少数载流子的数量增多,并在强电场下加速,又将晶格中的价电子碰撞出来,这种连锁反应导致载流子的数目愈来愈多,最后使二极管反向击穿,二极管一旦被击穿,一般都不能恢复单向导电性能。

三、二极管的主要参数

二极管的参数是正确选择和使用二极管的依据。半导体二极管的主要参数有：

(1) 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流是指二极管长时间使用时，允许通过二极管的最大平均电流。该值是由二极管的 PN 结温升限定的，使用时不能超过此值，否则可能使二极管过热而损坏。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM}

为了保证二极管在反向电压下工作而不被击穿，制造厂家通常将反向击穿电压 U_{BR} 的一半或三分之二定为最高反向工作电压。例如 2CP10 硅二极管的反向击穿电压为 50 V，而它的最高反向工作电压为 25 V。

(3) 最大反向电流 I_{RM}

它是在最高反向工作电压下二极管的反向电流值，一般在几个微安以下。反向电流愈小，单向导电性能愈好。通常，锗二极管的反向电流比硅二极管大得多。

常用二极管的典型参数见附录二。

第三节 稳压二极管

稳压二极管是一种特殊的面接触型二极管，它的伏安特性与普通二极管类似。图 1-10 所示是它的伏安特性和符号。

由图 1-10(a) 可以看出，稳压二极管被反向击穿后，通过稳压管的电流在很大范围内变化时，稳压管两端的电压变化却很小，基本维持在击穿电压 U_Z 上。因此，利用稳压管被反向击穿后电压稳定的这一特性，可在电路中起稳压作用。通常，简单的稳压电路都是用稳压二极管做成的。

为了保证稳压二极管在反向击穿情况下电流不超过允许值，要在电路中串联限流电阻，然后从稳压管两端输出稳定的电压接在负载电阻 R_L 上。图 1-11 所示是用稳压二极管构成的单稳压电路。由图 1-11 可以看出，当电源电压 U_i 升高时，稳压管所承受的反向电压也随之升高，由反向击穿特性可知，稳压管反向击穿电流 I_Z 增加，于是限流电阻 R 上的压降增大，将 U_Z 的增量降落在限流电阻 R 上，使输出电压基本上保持不变。如果负载电阻 R_L 变化，电路同样可以起到稳压作用。例如，当 R_L

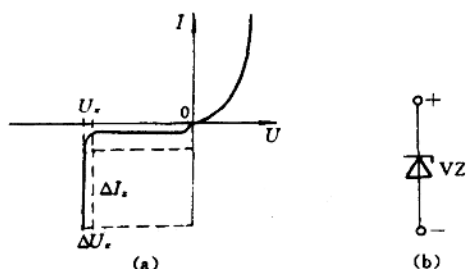


图 1-10 稳压二极管的伏安特性和符号
(a) 伏安特性；(b) 符号

减小时， $R_L \downarrow \rightarrow I_L \uparrow \rightarrow I \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_Z$ 微降 $\rightarrow I_Z \downarrow \rightarrow I \downarrow \rightarrow I \cdot R$ ，维持 U_Z 基本不变。

稳压二极管的主要参数：

(1) 稳定电压 U_Z

稳定电压就是稳压管在反向击穿时的两端电压值，由于工艺和其他方面的原因，同一型号的稳压管其稳定电压值也略有差异。例如，稳压管 2DW7C 的稳

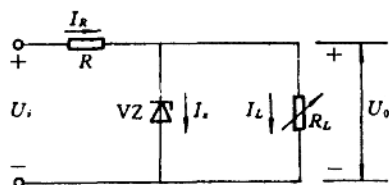


图 1-11 稳压管稳压电路

定电压值在 6.1~6.5 V 范围之内。

(2) 稳定电流 I_Z

稳定电流是指某种稳压管进入反向击穿工作区所必需的电流参考值,通常该电流约为 5 mA。一般来说,稳压管的实际电流大于稳定电流值时,稳压性能更好。

(3) 最大允许耗散功率 P_{ZM}

管子不致因发热而击穿的最大功率损耗,称为最大允许耗散功率,其值为 $P_{ZM} = U_Z I_{Zmax}$ 。根据最大允许耗散功率和稳压值可计算出稳压管的最大稳定电流,即

$$I_{Zmax} = \frac{P_{ZM}}{U_Z}$$

使用稳压管时,应使 $I_Z \leq I_{Zmax}$ 。

(4) 动态内阻 r_z

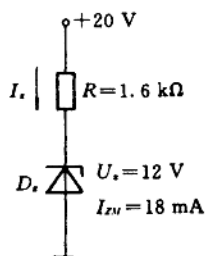
动态内阻是指稳压管电压的变化量 ΔU_Z 与电流的变化量 ΔI_Z 的比值,即

$$r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

显然,反向击穿特性愈陡,动态内阻愈小,稳压性能也愈好。

(5) 电压温度系数 α_u

当稳压管的电流为常数时,环境温度每变化 1℃ 引起稳压值变化的百分数。例如,2CW18 稳压管在 20℃ 时的稳压值为 11 V,其电压温度系数为 0.095%。



一般情况下,高于 6 V 的稳压管具有正的电压温度系数,低于 6 V 的稳压管具有负的电压温度系数,而 6 V 左右的稳压管其电压温度系数最小。因此选用 6 V 左右的稳压管,可得到满意的温度稳定性。

常用稳压管二极管的典型参数见附录三。

例 1-1 在图 1-12 中,通过稳压管的电流 I_Z 等于多少? R 是限流电阻,其值是否合适?

图 1-12 例 1-1 的图

$$\text{解 } I_Z = \frac{20 - 12}{1.6 \times 10^3} \text{ A} = 5 \times 10^{-3} \text{ A} = 5 \text{ mA}$$

$I_Z < I_{ZM}$, 电阻值合适。

第四节 半导体三极管

半导体三极管(简称晶体管或三极管)是重要的半导体器件。它的主要用途是放大作用和开关作用。利用它的放大作用可组成各种放大电路,利用它的开关作用可组成脉冲数字电路。本节简要介绍半导体三极管的基本结构、工作原理及特性参数。

根据三极管工作原理的不同,三极管可分为单极型三极管和双极型三极管两种。场效应管工作时,只有一种载流子(电子或空穴)参与导电,所以称为单极型三极管。双极型三极管工作时,有两种载流子(电子和空穴)参与导电。本节提及的半导体三极管指的是双极型三极管。

一、半导体三极管的基本结构及类型

图 1-13 所示为半导体三极管的结构示意图及符号。由图中可见,半导体三极管是一个

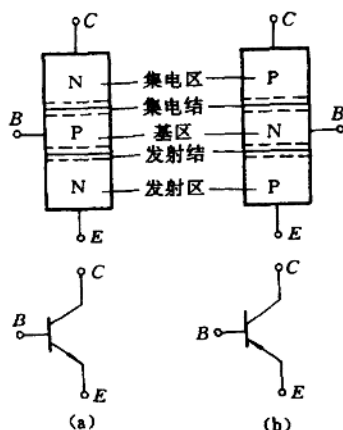


图 1-13 半导体三极管结构示意图及符号

(a) NPN 型; (b) PNP 型

具有三层和两个 PN 结的三端元件。三极管的中间层称为基区,基区的两边分别称为发射区和集电区。从这三个区分别引出基极 B、发射极 E 和集电极 C。图 1-13(a) 所示的三极管称为 NPN 型管,图 1-13(b) 所示的三极管称为 PNP 型管。半导体三极管的发射区与基区之间的 PN 结称为发射结,集电区与基区之间的 PN 结称为集电结。发射区和集电区的半导体类型虽然相同,但前者掺杂浓度比后者大得多,且集电区的尺寸比发射区大,因此作用不同。发射区发射载流子,集电区收集载流子,而基区(一般只有几微米厚)对载流子起控制作用。

按照材料的不同,半导体三极管分为硅管和锗管两类。目前我国生产的硅三极管多为

NPN 型(3D 系列),锗三极管多为 PNP 型(3A 系列)。

二、半导体三极管的电流分配和放大原理

1. 三极管的电流分配关系和放大作用

为了了解半导体三极管的放大原理及电流分配关系,我们先做一个实验,实验电路如图 1-14 所示。把三极管接成两个电路:基极电路和集电极电路。发射极是公共端,因此这种接法称为三极管的共发射极接法。图中三极管的三个电极的电位为 $V_C > V_B > V_E$,使发射结正向偏置,集电结反向偏置。此时改变 RP 的阻值,就可从三只电流表上读出一组对应的电流值,依次改变 RP 的阻值进行测量,即得表 1-1 所示的测试结果。

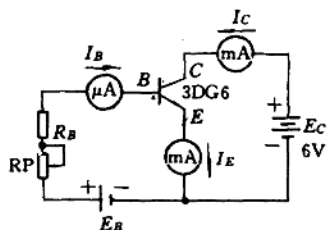


图 1-14 三极管电流分配实验电路

表 1-1 三极管电流测量数据

I_B/mA	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
I_C/mA	0.001	0.50	1.00	1.70	2.50	3.30
I_E/mA	0.001	0.51	1.02	1.73	2.54	3.35

由实验测量的数据可得出如下结论:

① 三个电极的电流符合基尔霍夫定律,即

$$I_E = I_C + I_B$$

② I_C 和 I_E 比 I_B 大得多。 I_C 与 I_B 的比值称为三极管的直流电流放大系数 $\bar{\beta}$,即

$$\bar{\beta} = I_C / I_B$$

例如: $I_B = 0.02 \text{ mA}$, $I_C = 1.0 \text{ mA}$, 则 $\bar{\beta} = 50$ 。

电流放大作用还体现在基极电流少量变化 ΔI_B 可引起集电极电流较大的变化 ΔI_C ,即

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

β 称为三极管的交流电流放大系数。例如: $\Delta I_B = 0.03 - 0.02 = 0.01 \text{ mA}$, $\Delta I_C = 1.9 - 1.0 = 0.9 \text{ mA}$, 则 $\beta = 90$ 。

③ 当 $I_B = 0$ (基极开路时), I_C 很小, 用 I_{CEO} 表示, 称为穿透电流。

④ 要使三极管起放大作用, 外界条件必须保证发射结正向偏置, 集电结反向偏置。

上述实验得出的三极管电流分配关系和电流放大作用, 是由三极管内部载流子的运动规律决定的。

2. 三极管内部载流子的运动规律

(1) 发射区向基区发射电子(多数载流子)

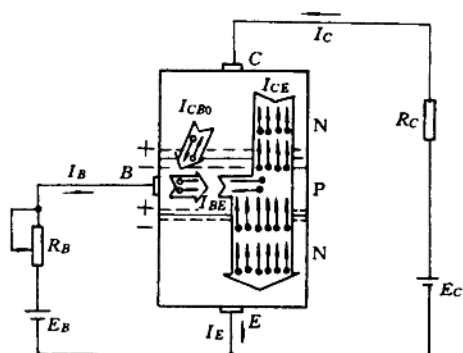


图 1-15 三极管内部载流子运动规律示意图

在图 1-15 中, 由于发射结处于正向偏置状态, 多数载流子的扩散运动加强, 发射区的自由电子(多数载流子)不断扩散到基区, 并不断从电源补充进电子, 形成发射区电流 I_E 。基区的多数载流子(空穴)也要向发射区扩散, 但由于基区的空穴浓度比发射区的自由电子的浓度小得多, 因此空穴电流很小, 可以忽略不计(在图 1-15 中未画出)。

(2) 电子在基区中的扩散与复合

自由电子越过发射结进入基区, 则靠近发射结附近的自由电子浓度比靠近集电结附近的自由电子浓度大, 于是形成了浓度差, 因而自由电子便继续向集电结扩散。在扩散时, 绝大部分自由电子扩散到集电结的边缘, 但有少部分自由电子与基区中的空穴(P 型半导体中的多数载流子)相遇复合。基区中的电子不断被电源 E_B 正极拉走, 相当于不断补充基区中被复合掉的空穴, 形成电流 I_{BE} , 它近似等于基极电流 I_B 。

显然, 减少自由电子在基区中的复合机会, 有利于自由电子在基区的扩散, 从而提高三极管的放大作用。为此, 三极管的基区做得很薄, 且基区掺杂浓度很低(这是三极管具有放大作用的内部条件)。

(3) 电子被集电区收集

由于集电结处于反向偏置状态, 因此集电结内电场增强, 一方面阻挡集电区多数载流子向基区扩散, 同时又将扩散到集电结边缘上的自由电子拉入集电区, 从而形成电流 I_{CE} , 它基本上等于集电极电流 I_C 。

此外, 在集电结内电场的作用下, 集电区的少数载流子(空穴)和基区的少数载流子(电子)也将产生漂移运动, 形成 I_{CBO} , I_{CBO} 很小, 它是集电极电流 I_C 和基极电流 I_B 的一小部分。 I_{CBO} 受温度影响很大, 与外加电压的大小没有多大关系。

可见, 集电极电流是由 I_{CBO} 和 I_{CE} 两部分组成的, I_B 是由 I_{CBO} 和 I_{BE} 两部分组成的, 三极管的放大作用是因 I_{CE} 远大于 I_{BE} , 其比值为

$$\frac{I_{CE}}{I_{BE}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B} = \beta$$

从前面的电流放大实验还知道,不仅三极管有电流放大作用,而且当改变 R_P 使 I_B 有一个微小的变化时,将会引起 I_C 较大的变化,说明三极管是一个电流控制的电流源,即 CCCS 器件。

总之,三极管的电流放大作用是由内部结构和外界条件决定的。内部结构指的是基区做得很薄且掺杂很少(多数载流子浓度低),外界条件指的是外加电源一定要使发射结处于正向偏置,集电结处于反向偏置。对于 NPN 管,三个电极的电位是 $V_C > V_B > V_E$; 对于 PNP 管,电源极性反接,三个电极的电位是 $V_C < V_B < V_E$ 。

三、半导体三极管的特性曲线

三极管的特性曲线是表示三极管各电极的电压和电流之间相互关系的曲线,它反映了三极管的性能,是分析放大电路的重要依据。三极管的特性曲线有输入特性曲线和输出特性曲线两种,它们可用晶体管特性图示仪直观地显示出来,也可以通过实验进行测绘。下面以 NPN 型三极管共发射极接法电路为例,如图 1-16 所示,分析它的特性曲线。

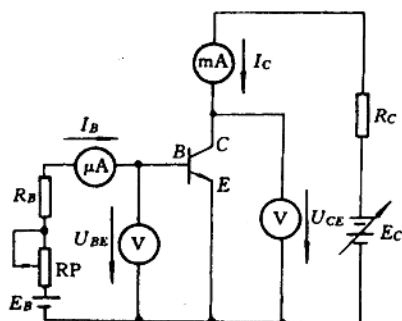


图 1-16 三极管特性测试电路

1. 输入特性曲线

输入特性曲线是指在一定的 U_{CE} 下,加在三极管的基极和发射极之间的电压 U_{BE} 与基极电流 I_B 之间的关系曲线,即

$$I_B = f(U_{BE}) |_{U_{CE}=\text{常数}}$$

当 $U_{CE}=0$ 时,改变 R_P ,可得一条曲线;当 U_{CE} 为另一值时,调节 R_P 又可测得另一条曲线。但是,当 $U_{CE} \geq 1$ 时的输入特性曲线几乎重合,所以通常只画出 $U_{CE} \geq 1$ V 的一条输入特性曲线,由图 1-17 可见:

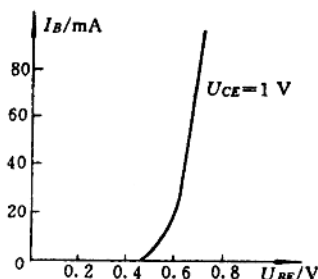


图 1-17 3DG6 硅三极管的输入特性曲线

① 输入特性就是发射结的正向特性,它是一条非线性曲线,与二极管的正向伏安特性曲线相似。

② 同二极管的伏安特性一样,三极管输入特性也有一段死区电压。只有当加在发射结的电压大于死区电压时,三极管才会出现基极电流 I_B 。硅三极管的死区电压约为 0.5 V,锗三极管的死区电压约为 0.2 V。

③ 正常工作时,NPN 型硅管的发射结电压 $U_{BE} = 0.6 \sim 0.7$ V,PNP 型锗管的 $U_{BE} = -0.2 \sim -0.3$ V。这是估算静态值和检查三极管工作是否正常的依据之一。

④ 当 $U_{CE} \geq 1$ V 时,输入特性曲线相近,与 U_{CE} 关系不大。这是因为对硅管来说,当 $U_{CE} \geq 1$ V 时,只要 U_{BE} 保持不变,则从发射区发射到基区的电子数一定,而集电结所加的反向电压大于 1 以后已能把这些电子中的绝大部分拉到集电区。因此这时再增大 U_{CE} , I_B 也就基本保持不变。

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,输出电路中集电极电流 I_C 与集-射极电压 U_{CE} 之间的关系曲线,即

$$I_C = f(U_{CE})|_{I_B = \text{常数}}$$

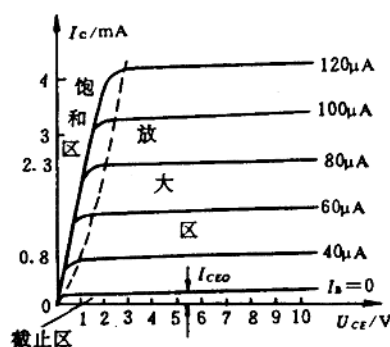


图 1-18 三极管的输出特性曲线

在不同的 I_B 下,可以得到不同的曲线,所以输出特性曲线是一组曲线,如图 1-18 所示。由输出特性曲线可见,当集电极与发射极间电压 U_{CE} 超过一定数值后, U_{CE} 再增加,电流 I_C 几乎不再增大,表现出恒流特性。其原因是,在基极电流一定时,发射区向基区扩散的电子数是一定的,所以 U_{CE} 的值高于一定数值(约 1 V)之后,发射区扩散到基区内的电子大部分已被集电区收集形成集电极电流 I_C ,故电压 U_{CE} 再增加时 I_C 也不再明显增加,出现 I_C 与 U_{CE} 几乎无关的现象。

通常把三极管的输出特性曲线分为三个工作区域,即截止区、饱和区和放大区,如图 1-18 所示。

(1) 截止区

$I_B = 0$ 曲线以下的区域称为截止区。对于 NPN 型硅管,当 $U_{BE} < 0.5$ V 时,已处于截止状态。当 $U_{BE} < 0$ V 时,三极管可靠截止,此时发射结处于零偏置或反向偏置状态。处在截止区下的三极管 $I_B = 0$,但集电极仍然存在一个很小的电流,即 $I_C = I_{CBO}$ 。一般情况下, I_{CBO} 很小,可忽略不计,认为三极管的集-射极间没有电流,因此集-射极间相当于开关断开。

(2) 放大区

输出特性曲线的近似水平部分称为放大区。如前所述,三极管工作于放大区时,发射结正向偏置,集电结反向偏置,三极管处于放大状态。在放大区 I_C 受 I_B 的控制,即 $I_C = \beta I_B$,放大区也称为线性区。

(3) 饱和区

三极管的饱和区是靠近纵轴的一个区域。在饱和区工作时的状态称为饱和状态,其集电结和发射结均处于正向偏置状态,即 $U_{CE} < U_{BE}$ 。在饱和区,基极电流失去了对集电极电流的控制能力,饱和状态下的三极管 U_{CE} 很小,当忽略其大小时,三极管集-射极间相当于开关闭合一样。

四、三极管的主要参数

三极管的特性除用特性曲线表示外,还可用三极管的参数表示,为设计电子电路和选用三极管提供依据。

1. 电流放大系数

(1) 静态(直流)电流放大系数 $\bar{\beta}$

当三极管接成共发射极电路时,在静态(无输入信号)时集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 的比值,称为共发射极静态(直流)电流放大系数。

$$\bar{\beta} = I_C / I_B$$

(2) 动态(交流)电流放大系数

当共发射极电路的三极管在动态(有输入信号)时,基极电流的变化量 ΔI_B 与它引起的集电极电流的变化量 ΔI_C 的比值称为动态(交流)电流放大系数。

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

例 1-2 图 1-19 给出了 3DG6 三极管的输出特性曲线,试计算:(1) Q_1 点处的 $\bar{\beta}$; (2) 由 Q_1 和 Q_2 两点计算 β 。

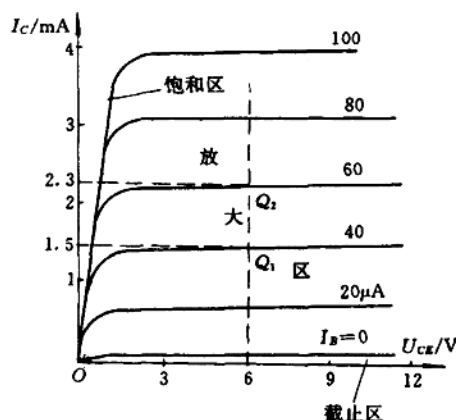


图 1-19 3DG6 三极管的输出特性曲线

解 (1) 在 Q_1 点处, $U_{CE} = 6 \text{ V}$, $I_B = 40 \text{ A} = 0.04 \text{ mA}$, $I_C = 1.5 \text{ mA}$, 故

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.5}{0.04} = 37.5$$

(2) 由 Q_1 和 Q_2 两点 ($U_{CE} = 6 \text{ V}$) 得

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.3 - 1.5}{0.06 - 0.04} = \frac{0.8}{0.02} = 40$$

由上例可见,在输出特性曲线近于等距,且 I_{CEO} 较小的情况下, $\bar{\beta}$ 与 β 接近。所以在估算时常取 $\bar{\beta} \approx \beta$ (在手册中一般用 h_{FE} 代替 $\bar{\beta}$, 用 h_{ie} 代替 β)。

由于制造工艺的分散性,即使同一型号的三极管, β 值也不可能相同。一般三极管

的 β 值在 20~100 之间,大功率三极管的 β 值较低,一般只有 20~30。

2. 极间反向电流

(1) 集-基极间反向饱和电流 I_{CBO}

在发射极开路时的集电极的反向电流就是 I_{CBO} 。 I_{CBO} 受温度的影响很大。在一定温度下, I_{CBO} 为一常数,所以称为反向饱和电流。在室温下,小功率硅管的 I_{CBO} 在 $1 \mu\text{A}$ 以下,小功率锗管的 I_{CBO} 在几微安到几十微安。可见,硅管的温度稳定性比锗管好。

因 I_{CBO} 与发射结无关,所以采用图 1-20 所示的测量电路可测出 I_{CBO} 。

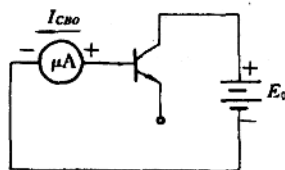


图 1-20 测量 I_{CBO} 的电路

(2) 集-射极穿透电流 I_{CEO}

前面已述,当 $I_B = 0$ (将基极开路)时,集电极与发射极之间的反向电流叫做穿透电流,如图 1-21 所示。

由图 1-21(b)可见,发射到基区的少部分电子与集电区漂移过来的空穴复合数量相等。根据电流分配原则,从发射区扩散到集电区的电子形成的电流应与基区空穴复合的电流的 $\bar{\beta}$ 倍,故

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

而集电极电流

$$\begin{aligned} I_C &= I_{CE} + I_{CBO} = \bar{\beta} I_{BE} + I_{CBO} \\ &= \bar{\beta} (I_B + I_{CBO}) + I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \\ &= \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \end{aligned}$$

可见, I_{CEO} 受温度的影响更大,它的大小与 $\bar{\beta}$ 和 I_{CBO} 有关。因此,在选管子时,尽量要求

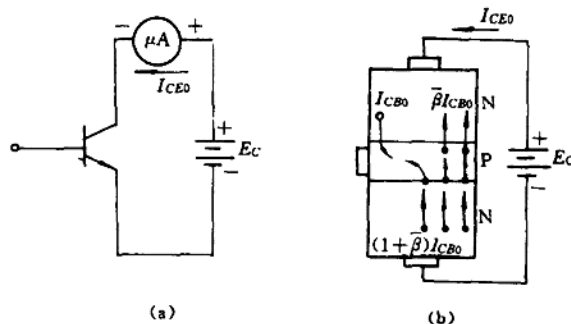


图 1-21 穿透电流 I_{CEO}
(a) 测量电路; (b) 载流子运动

I_{CBO} 小些, 而 β 不超过 100。

显然, β 和 I_{CBO} (I_{CEO}) 是表明三极管优劣的主要指标。

3. 极限参数

(1) 集电极最大允许电流 I_{CM}

使用三极管时, 集电极电流 I_C 过大会损坏三极管, 即使三极管没被烧坏, 三极管的值也会大大降低。当 β 值下降到正常值的 $2/3$ 时的集电极电流, 称为集电极最大允许电流 I_{CM} 。一般小功率管的 I_{CM} 约为几十毫安, 大功率管的 I_{CM} 可达几安以上。

(2) 集-射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$

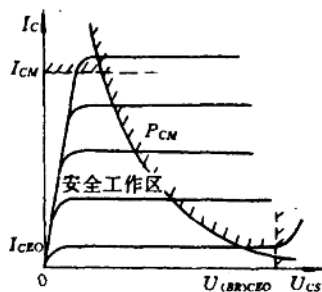


图 1-22 三极管的安全工作区

当三极管的基极开路 ($I_B=0$) 时, 加在集电极与发射极之间的最大允许电压, 称为集-射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。当 $U_{CE} > U_{(BR)CEO}$ 时, I_{CEO} 会突然增加, 这表明三极管已被击穿。手册中给出的 $U_{(BR)CEO}$ 一般是常温 (25°C) 时的值, 若三极管在高温下使用, 其 $U_{(BR)CEO}$ 的值应降低。

(3) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM}

P_{CM} 是指三极管参数不超过规定的允许值时, 集电结允许消耗的最大功率。三极管工作时消耗的功率 $P_C = U_{CE} I_C$ 。 P_{CM} 取决于三极管允许的温升, 消耗功率过大, 温升过高会烧坏三极管。一般硅管最高允许使用的温升约为 150°C , 锗管约为 70°C , 超过这个温升会使管子性能变坏甚至烧坏。

显然, 三极管的安全工作区是由 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 P_{CM} 三个极限参数共同确定的, 如图 1-22 所示。

习 题

1-1 图 1-23 所示是输入电压 u_I 的波形。试画出对应于 u_I 的输出电压 u_O 、电阻 R 上电压 u_R 和二极管 D 上电压 u_D 的波形, 并用基尔霍夫电压定律检验各电压之间的关系。二极管的正向压降可忽略不计。

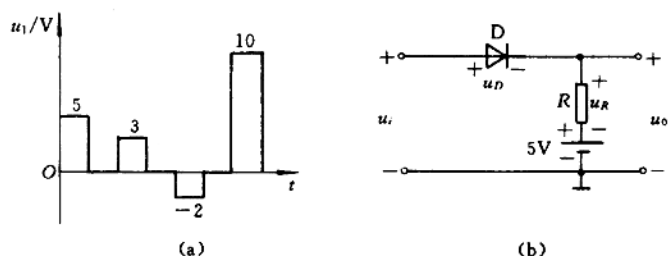


图 1-23 习题 1-1

1-2 在图 1-24 所示的各电路图中, $E=5\text{ V}$, $u_i=10 \sin \omega t \text{ V}$, 二极管的正向压降可忽略不计, 试分别画出输出电压 u_o 的波形。

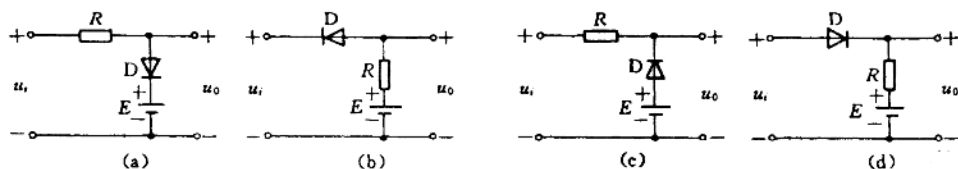


图 1-24 习题 1-2

1-3 在图 1-25 所示的两个电路中, 已知 $u_i=30 \sin \omega t \text{ V}$, 二极管的正向压降可忽略不计, 试分别画出输出电压 u_o 的波形。



图 1-25 习题 1-3

1-4 在图 1-26 所示的电路中, 试求下列几种情况下输出端 Y 的电位 V_Y 及各元件 (R , D_A , D_B) 中通过的电流: (1) $V_A=V_B=0\text{ V}$; (2) $V_A=+3\text{ V}$, $V_B=0\text{ V}$; (3) $V_A=V_B=+3\text{ V}$ 。二极管的正向压降可忽略不计。

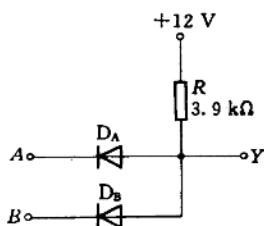


图 1-26 习题 1-4

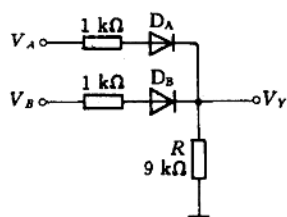


图 1-27 习题 1-5

1-5 在图 1-27 所示电路中, 试求下列几种情况下输出端电位 V_Y 及各元件中通过的电流: (1) $V_A=+10\text{ V}$, $V_B=0\text{ V}$; (2) $V_A=+6\text{ V}$, $V_B=+5.8\text{ V}$; (3) $V_A=V_B=+5\text{ V}$ 。设二极