

建筑电工学

下 册

主编 黄民德 陈伟芬 顾贵芬



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

目 录

第 10 章 二极管和晶体管	(1)
10.1 半导体的导电特性	(1)
10.2 PN 结及其单向导电性	(4)
10.3 二极管	(5)
10.4 稳压二极管	(7)
10.5 晶体管	(9)
10.6 光电器件	(16)
习 题	(17)
第 11 章 基本放大电路	(20)
11.1 共发射极放大电路	(20)
11.2 放大电路的静态分析	(22)
11.3 放大电路的动态分析	(24)
11.4 静态工作点的稳定	(30)
11.5 放大电路的频率特性	(33)
11.6 射极输出器	(35)
11.7 多级放大电路	(38)
11.8 差分放大电路	(40)
11.9 互补对称功率放大电路	(42)
11.10 场效晶体管及其放大电路	(46)
习 题	(53)
第 12 章 集成运算放大器	(57)
12.1 集成运算放大器简介	(57)
12.2 运算放大器在信号运算方面的运用	(61)
12.3 运算放大器在信号处理方面的应用	(67)
12.4 运算放大器在波形产生方面的应用	(72)
12.5 使用运算放大器应注意的几个问题	(74)
习 题	(76)
第 13 章 直流稳压电源	(79)
13.1 整流电路	(79)
13.2 滤波器	(85)
13.3 直流稳压电源	(88)
习 题	(92)
第 14 章 门电路与组合逻辑电路	(95)
14.1 脉冲信号	(95)

14.2	基本门电路及其组合	(96)
14.3	TTL 门电路	(100)
14.4	CMOS 门电路	(106)
14.5	逻辑代数	(109)
14.6	组合逻辑电路的分析与综合	(116)
14.7	加法器	(120)
14.8	编码器	(124)
14.9	译码器和数字显示	(126)
14.10	数据分配器和数据选择器	(131)
14.11	应用举例	(134)
习 题		(136)
第 15 章	触发器和时序逻辑电路	(140)
15.1	双稳态触发器	(140)
15.2	寄存器	(147)
15.3	计数器	(149)
15.4	时序逻辑电路分析	(159)
15.5	由 555 定时器组成的单稳态触发器和无稳态触发器	(162)
15.6	应用举例	(167)
习 题		(169)
第 16 章	模拟量和数字量的转换	(174)
16.1	D/A 转换器	(174)
16.2	A/D 转换器	(177)
习 题		(179)
附 录		(180)

第 10 章 二极管和晶体管

二极管和晶体管是最常用的半导体器件。学好它们的基本结构、工作原理、特性和参数是学习电子技术和分析电子电路的基础。因此,本章从讨论半导体的导电特性和 PN 结的基本原理(特别是它的单向导电性)开始介绍二极管和晶体管。

10.1 半导体的导电特性

所谓半导体,顾名思义,就是它的导电能力介乎导体和绝缘体之间,硅、锗、硒以及大多数金属氧化物和硫化物都是半导体。

很多半导体的导电能力在不同条件下有很大的差别。例如,有些半导体(如钴、锰、镍等的氧化物)对温度的反应特别灵敏,环境温度增高时,它们的导电能力要增强很多。利用这种特性就做成了各种热敏电阻。又如,有些半导体(如镉、铅等的硫化物与硒化物)受到光照时,它们的导电能力变得很强;当无光照时,又变得像绝缘体那样不导电。利用这种特性就做成了各种光敏电阻。

更重要的是,如果在纯净的半导体中掺入微量的某种杂质后,它的导电能力就增加几十万乃至几百万倍。例如,在纯硅中掺入百万分之一的硼后,硅的电阻率就从大约 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 左右。利用这种特性就做成了各种不同用途的半导体器件,如二极管、晶体管、场效晶体管等。

半导体何以有如此悬殊的导电特性呢?根本原因在于内部的特殊性。下面简单介绍半导体物质的内部结构和导电机理。

10.1.1 本征半导体

用得最多的半导体是硅和锗。图 10.1.1 是硅和锗的原子结构图,它们各有四个价电子,都是四价元素。将硅或锗材料提纯(去掉无用的杂质)并形成单晶体后,所有原子便基本上排列整齐,立体结构图与平面示意图分别如图 10.1.2 和图 10.1.3 所示。半导体一般都具有这种晶体结构,所以半导体也称晶体,这就是晶体管名称的由来。

本征半导体就是完全纯净的、具有晶体结构的半导体。

在本征半导体的晶体结构中,每一个原子与相邻的四个原子结合。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。这对价电子是每两个相邻原子共有的,它们把相邻的原子结合在一起,构成所谓共价键的结构。

在共价键结构中,原子最外层虽然具有八个电子而处于较为稳定的状态,但是共价键中的电子还不像在绝缘体中的价电子被束缚得那样紧,在获得一定能量(温度增高或受光照)后,即可挣脱原子核的束缚(电子受到激发),成为自由电子。温度愈高,晶体中产生的自由电子便愈多。

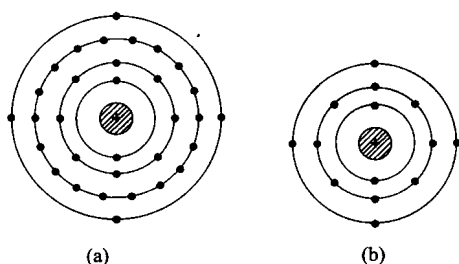


图 10.1.1 锗和硅的原子结构图

(a) 锗 Ge; (b) 硅 Si

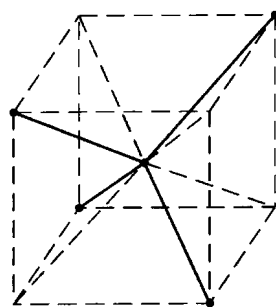


图 10.1.2 晶体中原子的排列立体结构图

在电子挣脱共价键的束缚而成为自由电子后,共价键中就留下一个空位,称为空穴。在一般情况下,原子是中性的。当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后,原子的中性便被破坏,而显出带正电。

在外电场的作用下,有空穴的原子可以吸引相邻原子中的价电子,填补这个空穴。同时在失去一个价电子的相邻原子的共价键中出现了另一个空穴,它也可以由相邻原子中的价电子来递补,而在该原子中又出现一个空穴,如图 10.1.4 所示。如此继续下去,就好像空穴在运动。而空穴运动的方向与价电子运动的方向相反,因此空穴运动相当于正电荷的运动。

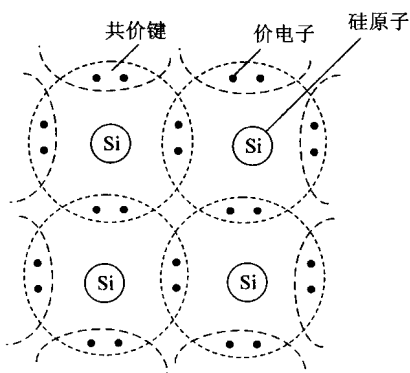


图 10.1.3 平面示意图

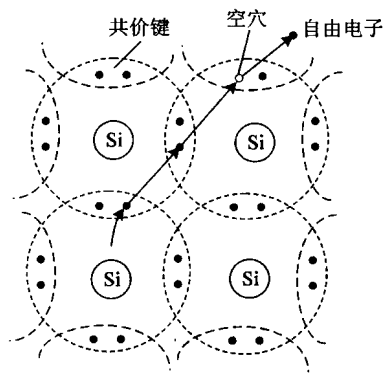


图 10.1.4 空穴和自由电子

因此,当半导体两端加上外电压时,半导体中将出现两部分电流:一是自由电子作定向运动所形成的电子电流;一是仍被原子核束缚的价电子(注意,不是自由电子)递补空穴所形成的空穴电流。在半导体中,同时存在着电子导电和空穴导电,这是半导体导电方式的最大特点,也是半导体和金属在导电原理上的本质区别。

自由电子和空穴都称为载流子。

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现,同时又不断复合。在一定温度下,载流子的产生和复合达到动态平衡,于是半导体中的载流子(自由电子和空穴)便维持一定数目。温度愈高,载流子数目愈多,导电性能也就愈好。所以,温度对半导体器件性能的影响最大。

10.1.2 N 型半导体和 P 型半导体

本征半导体虽然有自由电子和空穴两种载流子,但由于数量极少,导电能力仍然很低。如果在其中掺入微量的杂质(某种元素),这将使掺杂后的半导体(杂质半导体)的导电性能大大增强。

由于掺入的杂质不同,杂质半导体可分为两大类。

一类是在硅或锗的晶体中掺入磷(或其他五价元素)。磷原子的最外层有五个价电子(图 10.1.5)。由于掺入硅晶体的磷原子数比硅原子数少得多,因此整个晶体结构基本上不变,只是某些位置上的硅原子被磷原子取代。磷原子参加共价键结构只需要四个价电子,多余的第五个价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子(图 10.1.6)。于是半导体中的自由电子数目大量增加,自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式,故称它为电子半导体或 N 型半导体。例如在室温 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,每立方厘米纯净的硅晶体中约有自由电子或空穴 1.5×10^{10} 个,掺杂后成为 N 型半导体,自由电子数目可增加几十万倍。由于自由电子增多而增加了复合的机会,空穴数目便减少到每立方厘米 2.3×10^5 个以下。故在 N 型半导体中,自由电子是多数载流子,而空穴则是少数载流子。

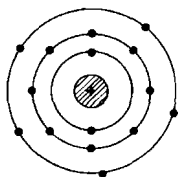


图 10.1.5 磷原子的结构

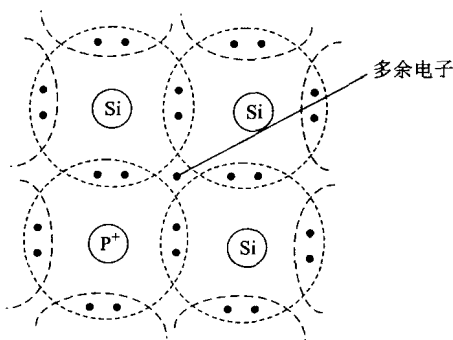


图 10.1.6 硅晶体中掺入磷出现自由电子

另一类是在硅或锗的晶体中掺入硼(或其他三价元素)。每个硼原子只有三个价电子(图 10.1.7),故在构成共价键结构时,将因缺少一个电子而产生一个空位。当相邻原子的价电子受热或受到其他激发获得能量时,就有可能填补这个空位,而在该相邻原子中便出现一个空穴(图 10.1.8)。每个硼原子都能提供一个空穴,于是空穴大量增加。这种以空穴导电作为主要导电方式的半导体称为空穴半导体或 P 型半导体。其中空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子。

应注意,不论是 N 型半导体还是 P 型半导体,虽然它们都有一种载流子占多数,但是整个晶体仍然是不带电的。

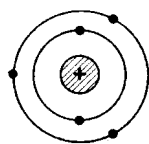


图 10.1.7 硼原子的结构

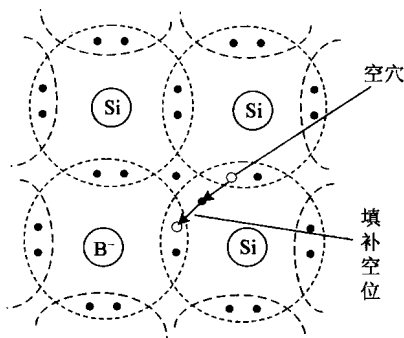


图 10.1.8 硅晶体中掺硼出现空穴

10.2 PN 结及其单向导电性

10.2.1 PN 结的形成

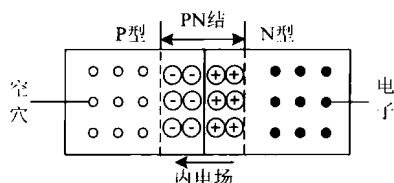


图 10.2.1 PN 结的形成

如图 10.2.1 所示,将一块半导体的两边分别做成 P 型和 N 型。由于 P 型区内空穴的浓度大, N 型区内自由电子的浓度大,它们将越过交界面向对方区域扩散。这种多数载流子因浓度上的差异而形成的运动称为扩散运动。多数载流子扩散到对方区域后被复合而消失,但在交界面的两侧分别留下了不能移动的正负离子,呈现出一个空间电荷区。这个空间电荷区就称为 PN 结。由

于 PN 结内的载流子因扩散和复合而消耗殆尽,故又称耗尽层。同时正负离子将产生一个方向由 N 型区指向 P 型区的电场,称为内电场。内电场反过来对多数载流子的扩散运动又起着阻碍作用,同时,那些作杂乱无章运动的少数载流子在进入 PN 结内时,在内电场作用下,必然会越过交界面向对方区域运动。这种少数载流子在内电场作用下的运动称为漂移运动。在无外加电压的情况下,最终扩散运动和漂移运动达到了平衡,PN 结的宽度保持一定而处于稳定状态。

PN 结两边带有正、负电荷,与极板带电的电容器情况相似。PN 结的这种电容称为结电容。结电容的数值不大,只有几个皮法。工作频率不高时,容抗很大,可视为开路。

10.2.2 PN 结的特性

PN 结的特性主要是单向导电性。如果在 PN 结两端加上不同极性的电压,PN 结便会呈现出不同的导电性能。PN 结上外加电压的方式通常称为偏置方式,所加电压称为偏置电压。

当在 PN 结上加正向电压(或称正向偏置),即电源正极接 P 区、负极接 N 区(图 10.2.2 (a))时,由于外加电压在 PN 结上所形成的外电场与内电场方向相反,破坏了原来的平衡,使扩散运动强于漂移运动,外电场驱使 P 型区的空穴和 N 型区的自内电子分别由两侧进入空间电荷区,从而抵消了部分空间电荷的作用。

P 区的多数载流子空穴和 N 区的多数载流子自由电子在电场作用下通过 PN 结进入对方,两者形成较大的正向电流。此时 PN 结呈现低电阻,处于导通状态。这使空间电荷区变窄,内电场被削弱,有利于不断地进行扩散运动。这样,多数载流子的扩散运动大为增强,从而形成较大的扩散电流。由于外部电源不断地向半导体提供电荷,使该电流得以维持。这时 PN 结所处的状态称为正向导通,简称导通。正向导通时,通过 PN 结的电流(正向电流)大,而 PN 结呈现的电阻(正向电阻)小。

当在 PN 结上加反向电压(或称反向偏置)(图 10.2.2(b))时,外部电源的正极接 N 端,负极接 P 端。P 区和 N 区的多数载流子受阻难于通过 PN 结。这时,由于外电场与内电场方向相同,同样也破坏了原来的平衡,使得 PN 结变厚,扩散运动几乎难以进行,漂移运动却被加强,从而形成反向漂移电流。由于少数载流子的浓度很小,故反向电流很微弱。PN 结这时所处的状态称为反向截止,简称截止。反向截止时,通过 PN 结的电流(反向电流)小,而 PN 结呈现的电阻(反向电阻)大。

但 P 区的少数载流子自由电子和 N 区的少数载流子空穴在电场作用下却能通过 PN 结进入对方,形成反向电流。由于少数载流子数量很少,因此反向电流极小。此时 PN 结呈现高电阻,处于截止状态。

此即为 PN 结的单向导电性,PN 结是各种半导体器件的共同基础。

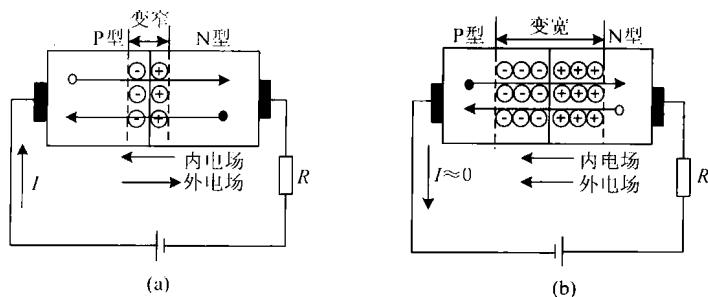


图 10.2.2 PN 结及其单向导电性

(a)加正向电压;(b)加反向电压

10.3 二极管

10.3.1 基本结构

将 PN 结加上相应的电极引线和管壳,就成为二极管。按结构分,二极管有点接触型、面接触型和平面型三类。点接触型二极管(一般为锗管)如图 10.3.1(a)所示。它的 PN 结结面积很小(结电容小),因此不能通过较大电流,但高频性能好,故一般适用于高频和小功率的工作,也用作数字电路中的开关元件。面接触型二极管(一般为硅管)如图 10.3.1(b)所示。它的 PN 结结面积大(结电容大),故可通过较大电流,但工作频率较低,一般用作整流。平面型二极管如图 10.3.1(c)所示,可用于大功率整流管和数字电路中的开关管。图 10.3.1(d)是二极管的表示符号。

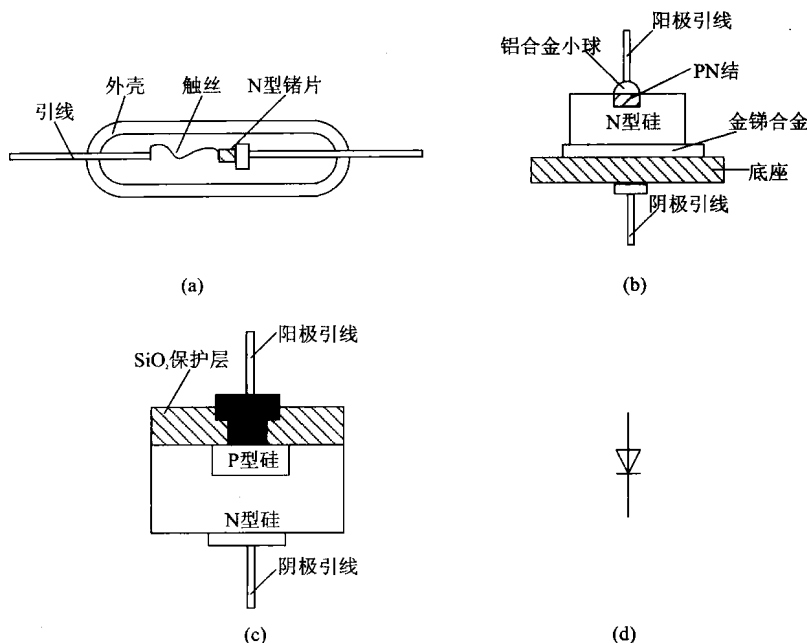


图 10.3.1 二极管

(a)点接触型;(b)面接触型;(c)平面型;(d)符号

10.3.2 伏安特性

二极管既然是一个 PN 结,当然具有单向导电性,其伏安特性曲线如图 10.3.2 所示。由图可见,当外加正向电压很低时,正向电流很小,几乎为零。当正向电压超过一定数值后,电流增长很快。这个一定数值的正向电压称为死区电压,其大小与材料及环境温度有关。通常,硅管的死区电压约为 0.5 V,锗管约为 0.1 V。硅管导通时的正向压降约为 0.6~0.8 V,锗管约为 0.2~0.3 V。

在二极管上加反向电压时,形成很小的反向电流。反向电流有两个特点:一是随温度的上升增长很快;二是在反向电压不超过某一范围时,反向电流的大小基本恒定,而与反向电压的高低无关,故通常称为反向饱和电流。当外加反向电压过高时,反向电流将突然增大,二极管失去单向导电性,这种现象称为击穿。二极管被击穿后,一般不能恢复原来的性能,便失效了。发生击穿时加在二极管上的反向电压称为反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 。

10.3.3 主要参数

二极管的特性除用伏安特性曲线表示外,还可用一些数据说明,这些数据就是二极管的参数。二极管的主要参数有下面几个。

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流过二极管的最大正向平均电流。点接触型二极管的最大整流电流在几十毫安以下。面接触型二极管的最大整流电流较大,如 2CZ52A 型硅二极管的最大整流电流为 100 mA。当电流超过允许值时,将因 PN 结过热而使管子损坏。

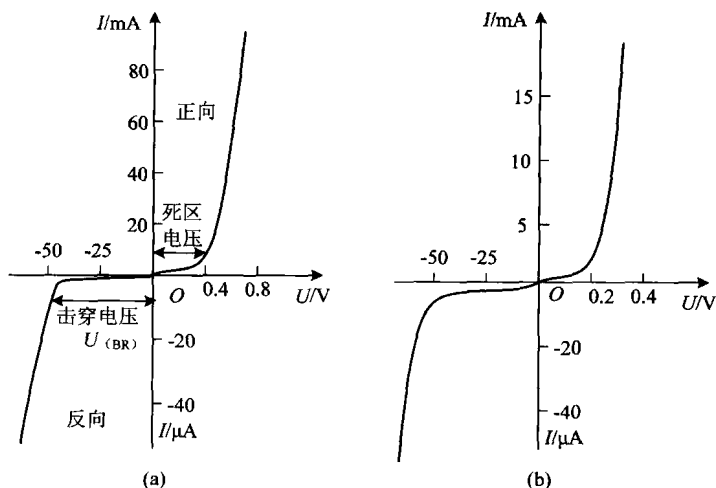


图 10.3.2 二极管的伏安特性曲线

(a) 2CZ52 硅二极管; (b) 2AP2 锗二极管

2. 反向工作峰值电压 U_{RWM}

它是保证二极管不被击穿而给出的反向峰值电压,一般是反向击穿电压的一半或三分之二,如 2CZ52A 硅二极管的反向工作峰值电压为 25 V,而反向击穿电压约为 50 V(图 10.3.2)。点接触型二极管的反向工作峰值电压一般是数十伏,面接触型二极管可达数百伏。

3. 反向峰值电流 I_{RM}

它是指在二极管上加反向工作峰值电压时的反向电流值。反向电流大,说明二极管的单向导电性能差,并且受温度的影响大。硅管的反向电流较小,一般在几个微安以下。锗管的反向电流较大,为硅管的几十到几百倍。

二极管的应用范围很广,主要都是利用它的单向导电性。它可用于整流、检波、限幅、元件保护以及在数字电路中作为开关元件等。

【例 10.3.1】在图 10.3.3 中,输入端 A 的电位 $V_A = +3\text{ V}$, B 的电位 $V_B = 0\text{ V}$,求输出端 Y 的电位 V_Y 。电阻 R 接负电源 -12 V 。

【解】因为 A 端电位高于 B 端,所以 D_A 优先导通。如果二极管的正向压降是 0.3 V,则 $V_Y = +2.7\text{ V}$ 。当 D_A 导通后, D_B 上加的是反向电压,因而截止。

在这里, D_A 起钳位作用,把 Y 端的电位钳住在 $+2.7\text{ V}$; D_B 起隔离作用,把输入端 B 和输出端 Y 隔离开来。

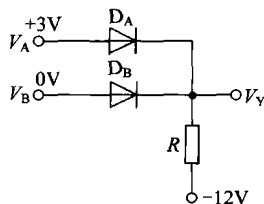


图 10.3.3 例 10.3.1 图

10.4 稳压二极管

稳压二极管是一种特殊的面接触型半导体硅二极管。由于它在电路中与适当数值的电阻配合后能起稳定电压的作用,故称稳压二极管(简称稳压管)。其表示符号如图 10.4.1 所示。

稳压二极管的伏安特性曲线与普通二极管类似,如图 10.4.2 所示,差异是稳压二极管的



图 10.4.1 稳压
二极管符号

反向特性曲线比较陡。

稳压二极管工作于反向击穿区。从反向特性曲线上可以看出,反向电压在一定范围内变化时,反向电流很小。当反向电压增高到击穿电压时,反向电流突然剧增(图 10.4.2),稳压二极管反向击穿。此后,电流虽然在很大范围内变化,但稳压二极管两端的电压变化很小。利用这一特性,稳压二极管在电路中能起稳压作用。与一般二极管不同,稳压二极管的反向击穿是可逆的。当去掉反向电压之后,稳压二极管又恢复正常。但是,如果反向电流超过允许范围,稳压二极管将会发生热击穿而损坏。

稳压二极管的主要参数如下。

1. 稳定电压 U_z

稳定电压是稳压二极管正常工作时管子两端的电压。手册中所列的都是在一定条件(工作电流、温度)下的数值,即使是同一型号的稳压二极管,由于工艺方面和其他原因,稳压值也不一定相同。例如,2CW59 稳压二极管的稳压值为 10~11.8 V。这就是说,如果把一个 2CW59 稳压二极管接到电路中,它可能稳压在 10.5 V,再换一个 2CW59 稳压二极管,则可能稳压在 11.8 V。

2. 电压温度系数 α_U

这是说明稳压值受温度变化影响的系数。例如,2CW59 稳压二极管的电压温度系数是 0.095%/℃,就是说温度每增加 1℃,它的稳压值将升高 0.095%。假如在 20℃时的稳压值是 11 V,那么在 50℃时的稳压值将是

$$\left[11 + \frac{0.095}{100} (50 - 20) \times 11 \right] \text{V} \approx 11.3 \text{ V}$$

3. 动态电阻 r_z

动态电阻是指稳压二极管端电压变化量与相应电流变化量的比值,即

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} \quad (10.4.1)$$

稳压二极管的反向伏安特性曲线愈陡,动态电阻愈小,稳压性能愈好。

4. 稳定电流 I_z

稳压二极管的稳定电流只是一个作为依据的参考数值,设计时要根据具体情况(例如工作电流的变化范围)选用。但对每一种型号的稳压二极管都规定有一个最大稳定电流 I_{ZM} 。

5. 最大允许耗散功率 P_{ZM}

最大允许耗散功率是管子不致发生热击穿的最大功率损耗。其值为

$$P_{ZM} = U_z I_{ZM}$$

【例 10.4.1】在图 10.4.3 中,通过稳压二极管的电流 I_z 等于多少? R 是限流电阻,其值是否合适?

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

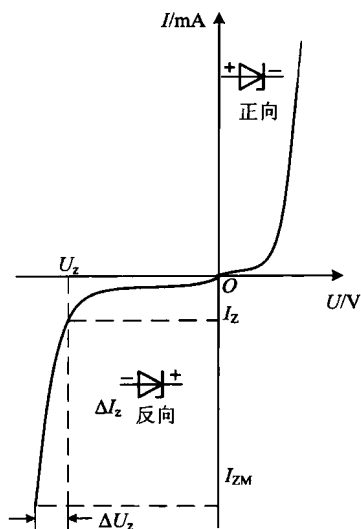


图 10.4.2 稳压二极管的
伏安特性曲线

$I_Z < I_{ZM}$, 电阻值合适。

10.5 晶体管

晶体管又称半导体三极管,是最重要的一种半导体器件。它的放大作用和开关作用促使电子技术飞跃发展。晶体管的特性是通过特性曲线和工作参数分析的。但是为了更好地理解和熟悉管子的外部特性,首先要简单介绍管子内部的结构和载流子的运动规律。

10.5.1 基本结构

目前最常见的晶体管结构有平面型和合金型两类(图 10.5.1)。硅管主要是平面型,锗管都是合金型。

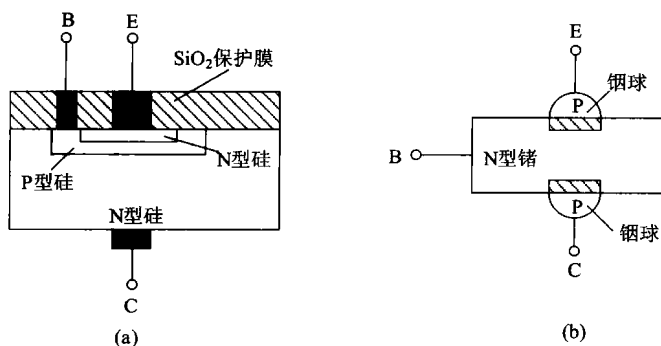


图 10.5.1 晶体管的结构

(a)平面型;(b)合金型

不论平面型或合金型,都分成 NPN 或 PNP 三层,因此又把晶体管分为 NPN 型和 PNP 型两类,结构示意图和表示符号如图 10.5.2 所示。当前国内生产的硅晶体管多为 NPN 型(3D 系

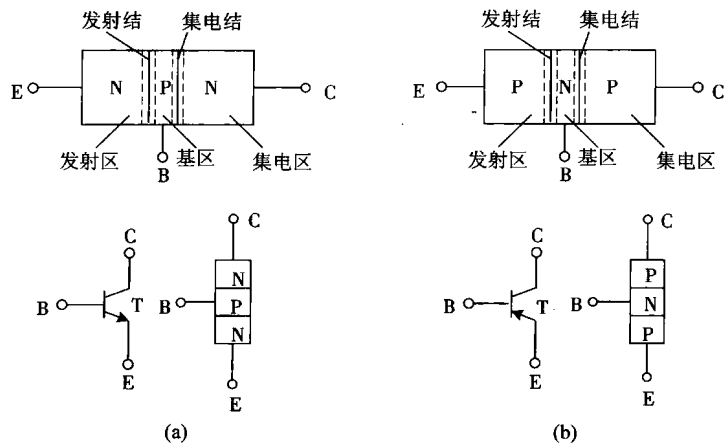


图 10.5.2 结构示意图和表示符号

(a)NPN 型晶体管;(b)PNP 型晶体管

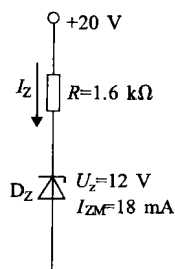


图 10.4.3 例
10.4.1 的图

列),锗晶体管多为 PNP 型(3A 系列)。

每一类晶体管都分成基区、发射区和集电区,分别引出基极 B、发射极 E 和集电极 C。每一类都有两个 PN 结。基区和发射区之间的结称为发射结,基区和集电区之间的结称为集电结。

NPN 型和 PNP 型晶体管的工作原理类似,仅在使用时电源极性连接不同而已。下面以 NPN 型晶体管为例讨论。

10.5.2 电流分配和放大原理

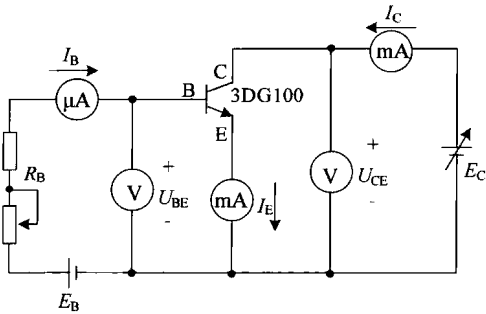


图 10.5.3 晶体管的实验电路

为了了解晶体管的放大原理和其中电流的分配,可以通过实验说明。实验电路如图 10.5.3 所示。把晶体管接成两个电路:基极电路和集电极电路。发射极是公共端,因此这种接法称为晶体管的共发射极接法。如果用的是 NPN 型硅管,电源 E_B 和 E_C 的极性必须照图中那样接法,使发射结上加正向电压(正向偏置),同时使 E_C 大于 E_B ,集电结加的是反向电压(反向偏置),晶体管才能起到放大作用。

设 $E_C = 6\text{ V}$,改变可变电阻 R_B ,则基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都发生变化。电流方向如图中所示。测量结果列于表 10.5.1 中。

表 10.5.1 晶体管电流测量数据

$I_B(\text{mA})$	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
$I_C(\text{mA})$	< 0.001	0.70	1.50	2.30	3.10	3.95
$I_E(\text{mA})$	< 0.001	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

由此实验及测量结果可得出如下结论:

①观察实验数据中的每一列,可得

$$I_E = I_B + I_C$$

此结果符合基尔霍夫电流定律。

② I_C 和 I_E 比 I_B 大很多。从第三列和第四列的数据可知, I_C 与 I_B 的比值分别为

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.50}{0.04} = 37.5, \bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.30}{0.06} = 38.3$$

这就是晶体管的电流放大作用。 $\bar{\beta}$ 称为共发射极静态电流(直流)放大系数。电流放大作用还体现在基极电流的少量变化 ΔI_B 可以引起集电极电流较大的变化 ΔI_C 。比较第三列和第四列数据可得出

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.30 - 1.50}{0.06 - 0.04} = \frac{0.08}{0.02} = 40$$

式中, β 称为动态电流(交流)放大系数。

③当 $I_B = 0$ (将基极开路) 时, $I_C = I_{CE0}$, 表中 $I_{CE0} < 0.001 \text{ mA} = 1 \mu\text{A}$ 。

④要使晶体管起放大作用, 发射结必须正向偏置, 发射区才可向基区发射电子; 而集电结必须反向偏置, 集电区才可收集从发射区发射过来的电子。

下面用载流子在晶体管内部的运动规律解释上述结论。

1. 发射区向基区扩散电子

对 NPN 型管而言, 因为发射区自由电子(多数载流子)的浓度大, 而基区自由电子(少数载流子)的浓度小, 所以自由电子要从浓度大的发射区(N型)向浓度小的基区(P型)扩散。由于发射结处于正向偏置, 发射区自由电子的扩散运动加强, 不断扩散到基区, 并不断从电源补充进电子, 形成发射极电流 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 10.5.4 中未画出)。

2. 电子在基区扩散和复合

从发射区扩散到基区的自由电子起初都聚集在发射结附近, 靠近集电结的自由电子很少, 形成了浓度上的差别, 因而自由电子将向集电结方向继续扩散。在扩散过程中, 自由电子不断与空穴(P型基区中的多数载流子)相遇而复合。由于基区接电源 E_B 的正极, 基区中受激发的价电子不断被电源拉走, 这相当于不断补充基区中被复合掉的空穴, 形成电流 I_{BE} (图 10.5.4), 它基本等于基极电流 I_B 。

在中途被复合掉的电子越多, 扩散到集电结的电子就越少, 这不利于晶体管的放大作用。为此, 基区就要做得很薄, 基区掺杂浓度要很小(这是放大的内部条件), 这样才可以大大减少电子与基区空穴复合的机会, 使绝大部分自由电子都能扩散到集电结边缘。

3. 集电区收集从发射区扩散过来的电子

集电结反向偏置阻挡了集电区(N型)的自由电子向基区扩散, 但可将从发射区扩散到基区并到达集电区边缘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 。

除此以外, 由于集电结反向偏置, 集电区的少数载流子(空穴)和基区的少数载流子(电子)将向对方运动, 形成 I_{CBO} 。这个电流数值很小, 构成集电极电流 I_C 和基极电流 I_B 的一小部分, 但受温度影响很大, 并与外加电压的大小关系不大。

上述的晶体管中的载流子运动和电流分配描述见图 10.5.4。

如上所述, 从发射区扩散到基区的电子只有很小一部分在基区复合, 绝大部分到达集电区。也就是说, 构成发射极电流 I_E 的两部分中, I_{BE} 部分是很小的, 而 I_{CE} 部分所占的百分比是很大的。这个比值用 β 表示, 即

$$\beta = \frac{I_{CE}}{I_{BE}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B} \quad (10.5.1)$$

从前面的电流放大实验还知道, 在晶体管中, 不仅 I_C 比 I_B 大得多, 而且当调节可变电阻 R_B 使 I_B 有一个微小的变化时, 将会引起 I_C 大得多的变化。

此外, 从晶体管内部载流子的运动规律也就理解了要使晶体管起电流放大作用, 为什么发射结必须正向偏置, 集电结必须反向偏置(这是放大的外部条件)。图 10.5.5 是起放大作用时

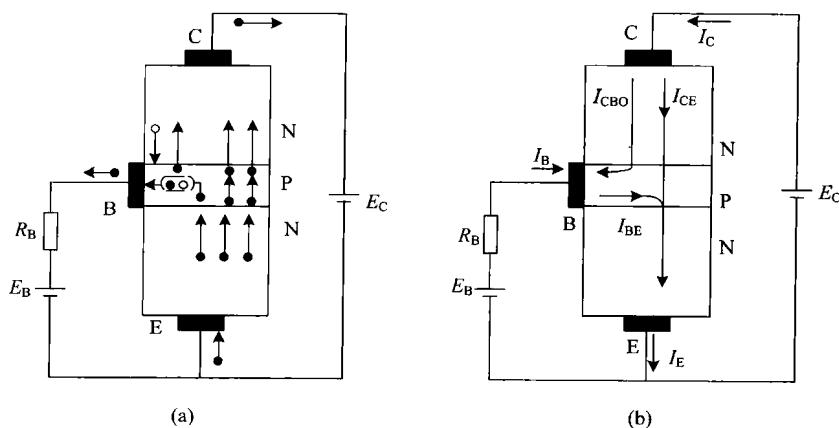


图 10.5.4 晶体管的电流

(a)载流子运动;(b)电流分配

NPN 型晶体管和 PNP 型晶体管中电流实际方向和发射结与集电结的实际极性(图 10.5.3 中如换用 PNP 型管,则电源 E_C 和 E_B 要反接)。发射结上加的是正向电压。要使晶体管起放大作用时, $|U_{CE}| > |U_{BE}|$, 集电结上加的就是反向电压。此外还可看到:对 NPN 型管而言, U_{CE} 和 U_{BE} 都是正值;而对 PNP 型管而言,它们都是负值。

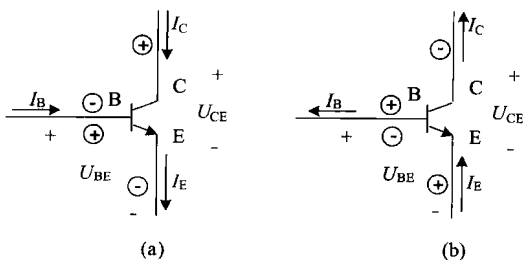


图 10.5.5 电流方向和发射结与集电结的极性

(a)NPN 型晶体管;(b)PNP 型晶体管

10.5.3 特性曲线

晶体管的特性曲线是用来表示该晶体管各极电压和电流之间相互关系的。它反映晶体管的性能,是分析放大电路的重要依据。最常用的是共发射极接法时的输入特性曲线和输出特性曲线。这些特性曲线可用晶体管特性图示仪直观地显示出来,也可以通过图 10.5.3 的实验电路进行测绘。实验电路中,用的是 NPN 型硅管 3DG100。

1. 输入特性曲线

输入特性曲线是指当集-射极电压 U_{CE} 为常数时,输入电路(基极电路)中基极电流 I_B 与基-射极电压 U_{BE} 之间的关系曲线 $I_B = f(U_{BE})$,如图 10.5.6 所示。

对硅管而言,当 $U_{CE} \geq 1\text{ V}$ 时,集电结已反向偏置,并且内电场已足够大,而基区又很薄,可以把从发射区扩散到基区的电子中的绝大部分拉入集电区。此后, U_{CE} 对 I_B 就不再有明显的影响。就是说 $U_{CE} > 1\text{ V}$ 后的输入特性曲线基本上是重合的。所以,通常只画出 $U_{CE} \geq 1\text{ V}$ 的

一条输入特性曲线。

由图 10.5.6 可见,和二极管的伏安特性一样,晶体管输入特性也有一段死区。只有在发射结外加电压大于死区电压时,晶体管才会出现 I_B 。硅管的死区电压约为 0.5 V,锗管的死区电压约为 0.1 V。在正常工作情况下,NPN 型硅管的发射结电压 $U_{BE} = (0.6 \sim 0.7) \text{ V}$,PNP 型锗管的 $U_{BE} = (-0.2 \sim -0.3) \text{ V}$ 。

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(集电极电路)中集电极电流 I_C 与集-射极电压 U_{CE} 之间的关系曲线 $I_C = f(U_{CE})$ 。在不同的 I_B 下可得出不同的曲线,所以晶体管的输出特性曲线是一组曲线,如图 10.5.7 所示。

通常把晶体管的输出特性曲线组分为三个工作区(图 10.5.7),就是晶体管有三种工作状态,今结合图 10.5.8 的电路分析(集电极电路中接有电阻 R_C)。

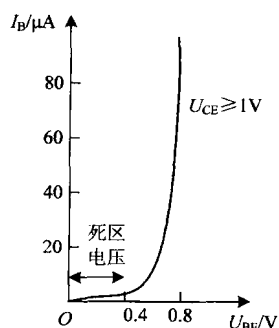


图 10.5.6 3DG100 晶体管的输入特性曲线

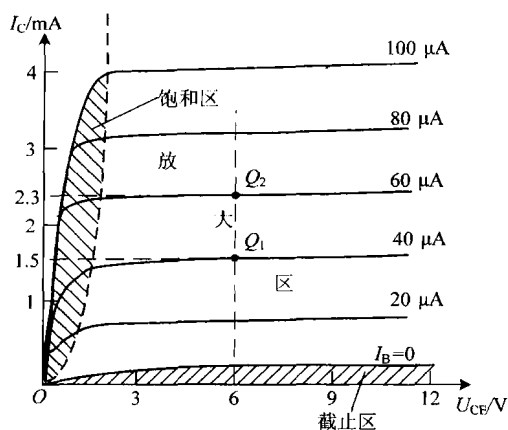


图 10.5.7 3DG100 晶体管的输出特性曲线

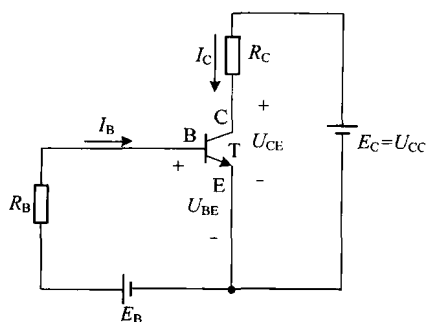


图 10.5.8 共发射极电路

(1) 放大区

输出特性曲线的近于水平部分是放大区。在放大区, $I_C = \beta I_B$ 。放大区也称为线性区, 因为 I_B 和 I_C 成正比关系。如前所述, 晶体管工作于放大状态时, 发射结处于正向偏置, 集电结处于反向偏置。即对 NPN 型管而言, 应使 $U_{BE} > 0$, $U_{BC} < 0$ 。此时 $U_{CE} > U_{BE}$ 。

(2) 截止区

$I_B = 0$ 曲线以下的区域称为截止区。 $I_B = 0$ 时, $I_C = I_{CEO}$ (在表 10.5.1 中, $I_{CEO} < 0.001 \text{ mA}$)。对 NPN 型硅管而言, 当 $U_{BE} < 0.5 \text{ V}$ 时即已开始截止, 但是为了截止可靠, 常使 $U_{BE} \leq 0$ 。截止时集电结也处于反向偏置 ($U_{BC} < 0$)。此时 $I_C \approx 0$, $U_{CE} \approx U_{CC}$ 。

(3) 饱和区

当 $U_{CE} < U_{BE}$ 时, 集电结处于正向偏置 ($U_{BC} > 0$), 晶体管工作于饱和状态。在饱和区, I_B 的

变化对 I_c 的影响较小,两者不成正比,放大区的 $\bar{\beta}$ 不能适用于饱和区。饱和时,发射结也处于正向偏置。此时, $U_{CE} \approx 0, I_c \approx \frac{U_{CC}}{R_C}$ 。

由上可知,当晶体管饱和时, $U_{CE} \approx 0$,发射极与集电极之间如同一个开关的接通,其间电阻很小;当晶体管截止时, $I_c \approx 0$,发射极与集电极之间如同一个开关的断开,其间电阻很大。可见,晶体管除了有放大作用外,还有开关作用。

图 10.5.9 所示是晶体管的三种工作状态的电压和电流。

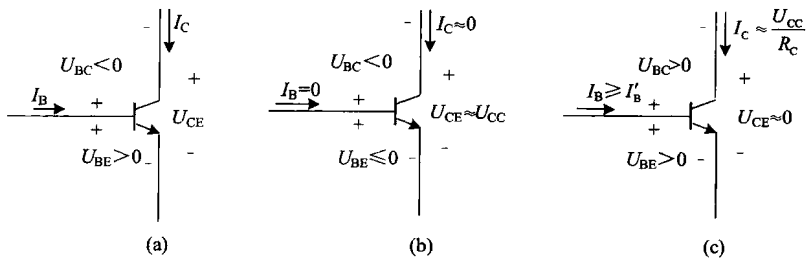


图 10.5.9 晶体管的三种工作状态的电压和电流
(a)放大;(b)截止;(c)饱和

表 10.5.2 是晶体管结电压三种工作状态的典型值。

表 10.5.2 晶体管结电压的典型数据

管 型	工作状态				
	饱和		放大	截止	
	U_{BE}/V	U_{CE}/V	U_{BE}/V	U_{BE}/V	
				开始截止	可靠截止
硅管(NPN)	0.7	0.3	0.6~0.7	0.5	≤ 0
锗管(PNP)	-0.3	-0.1	-0.2~-0.3	-0.1	0.1

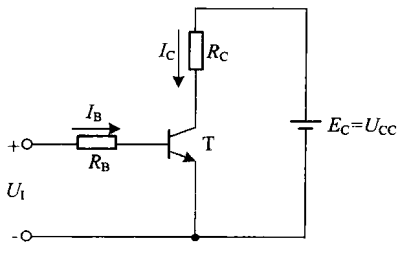


图 10.5.10 例 10.5.1 的图

【例 10.5.1】 在图 10.5.10 的电路中, $U_{CC} = 6\text{ V}$, $R_C = 3\text{ k}\Omega$, $R_B = 10\text{ k}\Omega$, $\bar{\beta} = 25$, 当输入电压 U_I 分别为 3 V 、 1 V 和 -1 V 时,试问晶体管处于何种工作状态?

【解】 由图 10.5.9(c)可知,晶体管饱和时集电极电流近似为

$$I_c \approx \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{6}{3 \times 10^3} \text{ A} = 2 \times 10^{-3} \text{ A} = 2 \text{ mA}$$

晶体管刚饱和时的基极电流为

$$I'_B \approx \frac{I_c}{\bar{\beta}} = \frac{2}{25} \text{ mA} = 0.8 \text{ mA} = 80 \text{ }\mu\text{A}$$

①当 $U_I = 3\text{ V}$ 时,有