

第 2 章 电子电路的构成



任何电子电路，不论是模拟电子电路还是数字电子电路，都是由无源元件和有源器件构成的。前者包括电阻、电容、电感等，已在先行课程（如电工学等）中作过介绍；后者包括半导体二极管、三极管及集成电路等，将在本章予以阐述。本章从理解电子电路工作原理的角度出发，对这些器件的内部工作原理，将不作过分细究，而把注意力放在它们的外特性方面。

2.1 半导体的基本知识

2.1.1 导体、绝缘体和半导体

我们周围的一切物质，按照导电能力的大小可分为导体、半导体和绝缘体三大类。能导电的叫做导体；不能导电的叫做绝缘体；导电能力介于导体和绝缘体之间的，就叫做半导体。半导体的电导率 σ 在 $10^3 \sim 10^{-9} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间（即其电阻率 ρ 在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间）。图 2.1 表示出了若干种典型材料的电导率 σ 。

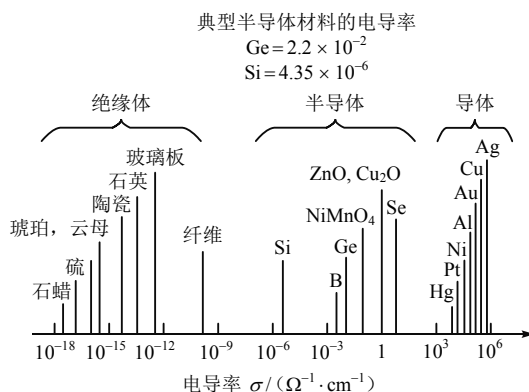


图 2.1 若干种典型材料的电导率（20°C时）

半导体之所以有广泛的用途，就在于其导电性能具有如下两个显著特点。

(1) 掺杂性

半导体材料的电阻率受杂质含量的影响极大。例如在硅（Si）中只要含有亿分之一的硼（B），电阻率就会下降到原来的万分之一，而且，如果所含杂质类型不同，导电类型也不同。这就是为什么半导体材料必须首先加以提纯，然后通过严格控制的掺杂，才能制备成合格材料的原因。

(2) 敏感性

半导体材料的电阻率受外界条件（如温度、光线等）的影响很大。温度升高或受光照射均可使电阻率迅速下降。这正是半导体可以制成各种热电器件和光电器件的直接原因。



小 知 识

电阻、电阻率和电导率 根据物理学中的有关知识，电阻是物体（特别是导体）的重要电学参数之一。一段导体的电阻是和该导体的材料、大小与形状有关系的。假定一段导体是均匀、等截面的，其横截面积为 S ，长度为 l ，则其电阻等于： $R = \rho \frac{l}{S}$ ，式中 ρ 是一个仅与导体材料有关的量，叫做材料的电阻率。所以，导体的电阻 R 和它的长度 l 成正比，而和它的横截面积 S 成反比。由此得出： $\rho = R \frac{S}{l}$ ，根据此式可以确定电阻率的单位： R 的单位为欧姆（ Ω ），横截面积 S 的单位为平方厘米（ cm^2 ），长度 l 的单位为厘米（ cm ），所以电阻率 ρ 的单位自然就应为“欧姆·厘米”（ $\Omega \cdot \text{cm}$ ）。这就是说，我们取这样的材料的电阻率作为电阻率的单位，该材料被制成边长为 1 厘米（ cm ）的立方体，当电流从该立方体的一面流向对面时，该立方体的电阻为 1 欧姆。

除了电阻率之外，在工程上还常使用电阻率的倒数 $\sigma = \frac{1}{\rho}$ ，该物理量叫做电导率。显然，电导率 σ 的单位为“欧姆⁻¹·厘米⁻¹”（ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ）。电阻率或电导率反映一种物体导电本领大小：电阻率越低（或者说电导率越高），那么，物体的导电本领就越强。

应该指出，电阻率 ρ 与导体的温度有关。在通常温度下，几乎所有的金属的电阻率都随温度的变化而呈线性变化（缓慢增高）。但是，对于半导体材料来说，其电阻率随着温度和材料的纯度变化而迅速变化。温度越高，电阻率越低（这一点，正好与金属材料相反）；而材料越纯，电阻率则越高（这一点，也正好与金属材料相反）。控制单晶前的材料，总希望电阻率越高越好，因为这有利于控制单晶过程中的准确掺杂。

下面列出的是某些常见材料（主要是金属）的电阻率和电导率（当温度为 20℃ 时），其他材料（例如绝缘体和半导体）的电导率请参见图 2.1。

材料	ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$) $\times 10^{-6}$	σ ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) $\times 10^6$
Ag (银)	1.62	0.62
Cu (铜)	1.72	0.58
Au (金)	2.42	0.41
Al (铝)	2.82	0.35
黄铜 (或磷青铜)	8	0.125
Ni (镍)	7.24	0.138
Fe (铁)	9.8	0.102
Pt (铂)	10.5	0.095
Hg (汞)	95.77	0.0104
石墨	39.2	0.0255

2.1.2 半导体的类型及导电特点

1. 半导体的类型

半导体的材料种类很多，按其化学组成，可分为元素半导体（如锗 Ge、硅 Si 等）和化合物半导体（如砷化镓 GaAs、锑化铟 InSb）；按其是否含有杂质，可分为本征半导体和杂质



半导体；按其导电类型可分为N型半导体和P型半导体；按其载流子的种类，还可分为电子型半导体和离子型半导体等。

2. 单晶体和多晶体

世界上的物质，从其内部原子（也可以是分子或离子）的排列情形来看，可以分为晶体和非晶体两大类。晶体的原子排列比较规则，而非晶体的原子排列则完全没有规则，杂乱无章。

晶体又可分为单晶体和多晶体两种。如果整块晶体内的原子按照一定规则排列到底，这样的晶体就称为单晶体；如果整块晶体内的原子虽然也按一定的规则排列，然而却排列不到底（即局部的排列规则整齐，而一个局部和另一个局部之间却没有一定规律），整块晶体实质上是由许多块小的单晶体（晶粒）组成的，这样的晶体就称为多晶体。

单晶体一般都有一定的外形，其物理性质在各个方向上都不相同（即各向异性）；而多晶体和非晶体则相反，一般都没有一定的外形，其物理性质在各个方向上都相同（即各向同性）。

大多数半导体材料都是晶体。但是，只有单晶结构的半导体才适合制作半导体器件。

3. 本征半导体

纯净的单晶半导体，既不含有任何杂质，也没有结构上的缺陷，材料呈现它本身固有的特征，因而称为本征半导体。经过严格提纯的半导体（其纯度可以达到“6个9”，即99.9999%，甚至更高）就可认为是本征半导体。

带有一定电量且能在电场力作用下自由运动的粒子称为载流子。物体的导电能力取决于该物体内载流子的浓度和运动速度。半导体中除了自由电子作为载流子之外，还有另一种被称为“空穴”的载流子。自由电子和空穴同时参加导电，这是半导体的重要特点。

在本征半导体中，通过某种方式（热、光、电场、辐射等）激发出一个自由电子，同时便会产生一个空穴，电子和空穴总是成对地产生的，称其为电子空穴对。半导体中产生电子空穴对的过程叫做本征激发。空穴像电子一样也能够运动，不过它的运动方式与自由电子的运动方式完全不同。空穴的运动实质上是填补空位运动的结果。

半导体由于激发而不断产生电子空穴对，那么，电子空穴对是否会越来越多，其浓度是否会越来越大呢？实验表明，在一定的温度下，电子和空穴的浓度都分别保持一个定值。这是因为，半导体中一方面存在着载流子的产生过程，同时还存在着另一个过程，即自由电子在运动中释放能量而填入空穴，使电子空穴对消失的过程。这个过程称为载流子的复合过程。当产生率等于复合率时，载流子的浓度达到动态平衡。载流子的平衡浓度与温度有关。室温下，本征半导体中电子和空穴的平衡浓度很小，所以电导率很低。当温度升高时，载流子浓度迅速增大，电导率也随之增大。

4. N型半导体和P型半导体

本征半导体的导电能力差，用途不广。在实际半导体器件制造中，一般不直接利用本征半导体，而是利用掺杂工艺，在本征半导体中有意加入一定量的杂质，获得一定的导电类型和一定电阻率的半导体。这种人为地掺入了杂质的半导体，称为杂质半导体。

(1) N型半导体

在本征半导体中加入微量的五价元素（如砷As、磷P、锑Sb等），可使本征半导体中自由电子的浓度大大增加，形成N型半导体。这些杂质叫做施主杂质。



在N型半导体中，自由电子的数量比空穴多几个数量级。自由电子称为多数载流子，空穴称为少数载流子。而杂质原子电离后产生的正离子均匀地分布在晶格中，不能自由运动，不是载流子。

N型半导体加上电压后，产生的电流主要是电子流，如图2.2（a）所示。

（2）P型半导体

在本征半导体中加入微量的三价元素（如硼B、铝Al、镓Ga、铟In等），可使半导体中的空穴浓度大为增加，形成P型半导体。这些杂质叫做受主杂质。

P型半导体中，空穴是多数载流子，电子是少数载流子。如果外部加上电压，那么载流子的移动主要是带正电荷的空穴运动，形成空穴电流，如图2.2（b）所示。

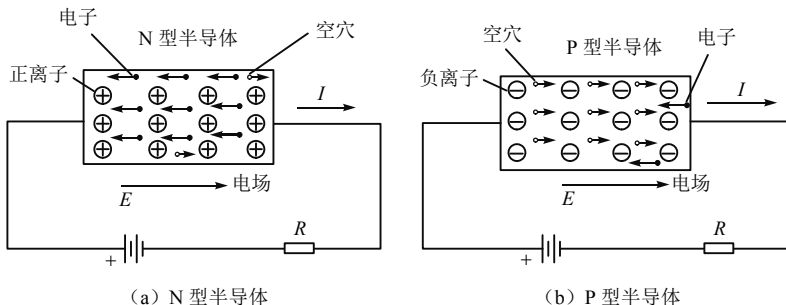


图 2.2 N 型、P 型半导体的导电情况

2.1.3 PN 结及其单向导电性

1. PN 结的形成

如果在一块半导体单晶基片上面，经过一些专门的工艺操作（如扩散进去一些杂质），使得这块半导体的一部分呈P型导电，另一部分呈N型导电，那么，在两个导电区的交界面附近，就会形成一个特殊的区域——PN结。

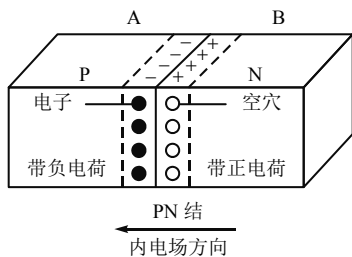


图 2.3 PN 结示意图

在N型导电区，电子很多，空穴很少；而在P型导电区则正相反，空穴很多，电子很少。因此，由于这两个区域存在着电子和空穴浓度的差别，N区的电子就会向P区渗透扩散，而P区的空穴则向N区渗透扩散。扩散结果使N区中邻近P区一边的薄层B缺少电子而带正电，P区中邻近N区一边的薄层A缺少空穴而带负电，从而形成了一个由N区指向P区的电场。这两个带电的薄层A、B所构成的区域形成“空间电荷区”，该区域就叫做PN结（阻挡层），如图2.3所示。

扩散开始时，扩散运动占优势。随着扩散的进行，空间电荷区内两侧的正负电荷逐渐增加，因而空间电荷逐渐增多，空间电荷区逐渐加宽，空间电荷形成的内电场逐渐增强。当内电场加强到一定程度时，N区、P区中少数载流子在该电场力作用下的定向运动（即载流子的漂移运动）有明显的增强，同时，这两个区域中多数载流子的扩散运动明显减弱。最后，当扩散运动和漂移运动达到平衡时，扩散的载流子数目等于漂移的载流子数目，这时，空间电荷区的宽度不再增加，达到动平衡状态，此时，PN结就处于相对稳定状态。



2. PN 结的单向导电性

当 PN 结两端加上不同极性的直流电压时，其导电性能将产生很大差异，这就是 PN 结的单向导电性。

当 PN 结两端加上正向电压时，PN 结处于导通状态。如图 2.4 (a) 所示，外加电源正极接 P 型区，负极接 N 型区，这种接法称做正向连接。此时外加电压的电场方向与 PN 结内电场方向相反，故削弱了内电场，从而导致空间电荷区变窄，这有利于扩散运动（多数载流子），而不利于漂移运动（少数载流子）。这样，P 区及 N 区的多数载流子就能顺利地通过 PN 结，同时，外部电源不断地向半导体提供空穴和电子，形成较大的电流，此电流称做正向电流，此时，PN 结呈导通状态。PN 结接正向电压时所呈现的电阻（正向电阻）阻值很小。

当 PN 结两端加上反向电压时，PN 结处于截止状态。如图 2.4 (b) 所示，外加电源正极接 N 区，负极接 P 区，这种接法称做反向连接。这时，外加电场与内电场方向一致，使内电场加强，阻挡层加宽，阻止多数载流子扩散运动的进行，而有利于少数载流子漂移运动的进行。此时，少数载流子穿过 PN 结而形成的电流称做反向电流，其值远远小于正向电流，此时 PN 结呈截止状态。可见，PN 结接反向电压时呈现新的电阻（称做反向电阻），阻值极大，它远远大于正向电阻。

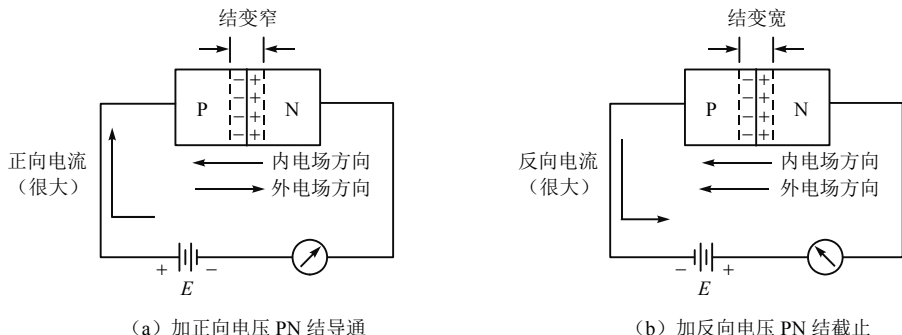


图 2.4 PN 结外加不同方向电压时的情况

PN 结是晶体二极管的基本结构，也是一般半导体器件的核心，许多半导体现象就是在这里发生的。

按材料划分，PN 结可分为单质结和异质结；按工艺划分，PN 结可分为生长结、合金结、扩散结、外延结等；按杂质划分，又可分为突变结、缓变结等，这里就不再详述了。

2.2 晶体二极管

晶体二极管是电子电路中最简单的器件，它虽然没有放大作用，但广泛应用于整流电路、检波电路、限幅电路和逻辑电路中。

2.2.1 晶体二极管的结构和分类

在形成 PN 结的 P 型半导体和 N 型半导体上，分别引出电极引线，并用金属、塑料或玻璃封装后，即构成一个晶体二极管，其外形如图 2.5 所示。它具有两个电极：由 P 型半导体上引出的电极叫正极或阳极，用符号“+”表示；由 N 型半导体上引出的电极叫负极或阴极，用符号“-”表示。总之，二极管是具有单向导电性的两极器件。

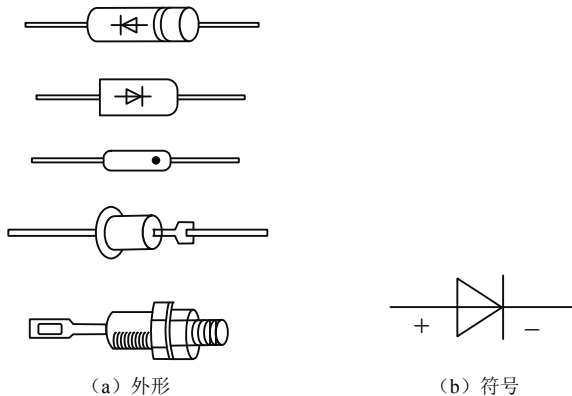
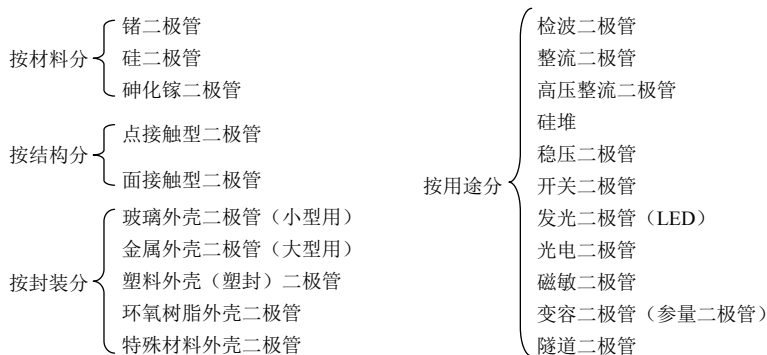


图 2.5 晶体二极管的外形和符号

二极管有多种类型，如下所示。



因此，一个具体的管子，在不同的场合往往具有不同的名称，这正是一管多名的原因。

点接触型二极管由于 PN 结的面积很小，所以不能承受高的反向电压和大电流，但由于极间电容很小，故适用于高频信号的检波、微小电流的整流及脉冲电路。

面接触型二极管由于 PN 结面积大，能承受较大的电流，故适用于整流。但因极间电容较大，故不适用于高频电路。

不同类型的晶体二极管均按国家标准命名，其命名法如表 2.1 所示。例如，2AP11：2 表示二极管，A 表示以 N 型锗为基础材料制成，P 为普通管，11 为序号。又如 2CZ11：表示以 N 型硅为基础材料制成，用于整流的二极管。

表 2.1 晶体二极管的型号名称和含义

第一部分 (数字)		第二部分 (字母)		第三部分 (拼音)		第四部分 (数字、字母)
电极数目		材料和特性		二极管类型		同类管子的序号
符号	含义	符号	含义			
2	二极管	A	N 型锗	P	普通管	表示在同类型管子中，其性能和参数有区别
		B	P 型锗	Z	整流管	
				L	整流堆	
		C	N 型硅	W	稳压管	
		D	P 型硅	K	开关管	
				C	参量管	



2.2.2 晶体二极管的伏安特性

二极管的伏安特性，是指加到二极管两端的电压与流过二极管的电流之间的关系曲线。根据实验结果可以分别做出锗和硅二极管的伏安特性曲线，如图 2.6 所示。

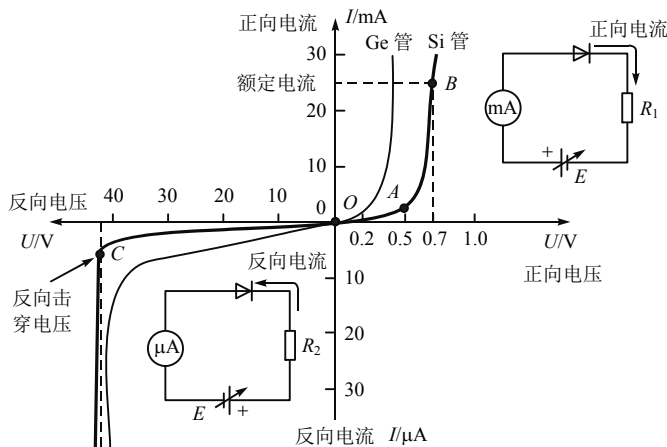


图 2.6 晶体二极管的伏安特性曲线

1. 正向特性

当二极管两端的电压为零时，流过管子的电流也为零，伏安特性曲线从坐标原点开始。这是因为此时只有内电场的作用，扩散和漂移两种运动相等，达到相对平衡。

当二极管接上正向电压时，随着正向电压逐渐增加，电流也逐渐增大。但是，当外加正向电压很小时，由于外电场还不能够克服内电场对扩散运动所造成的阻力，这时正向电流很小，二极管表现出有较大的电阻（特性曲线上的 OA 段），我们把这个基本上处于截止状态的区域称为“死区”。

当加在二极管两端的电压超过一定的数值 U_0 以后（ U_0 称为死区电压，其大小与管子的材料及环境温度有关，硅管约为 0.5V ，锗管约为 0.2V ），内电场被大大削弱，二极管的电阻变得很小，正向电流开始显著增加（图中的曲线 AB 段）。二极管处于正向导通时，其正向压降变化不大，硅管为 $0.6\sim 0.7\text{V}$ ，锗管为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。

2. 反向特性

当二极管两端加上反向电压时，半导体材料中的少数载流子在反向电压的作用下，形成很小的反向电流。反向电流随温度的上升增长很快（呈指数关系）。在同样的温度下，硅管的反向电流比锗管小得多。



注意

图 2.6 中的正向电流坐标是以毫安（ mA ）为单位，而反向电流的坐标则是以微安（ μA ）为单位的。

在特性曲线的 OC 段，外加电压在一定范围内变化，反向电流基本上维持不变，且和反向电压的数值无关。这是因为在一定温度下，一方面，只能产生数量很少的载流子；另一方面，反向电流是由于外加反向电压的作用，通过漂移方式将少数载流子全部吸引过来。这样，



在形成反向电流之后，即使反向电压再增大（在一定范围内），内电场再增强，也不能使反向电流增加。因此，反向电流也称为反向饱和电流，它的大小是衡量二极管质量好坏的一个重要标志。反向电流越大，说明二极管单向导电性能越差。硅管的反向电流一般为1微安~几十微安，锗管可达几百微安。

3. 反向击穿现象

当反向电压继续增大到一定数值后，反向电流会突然增大，这时二极管失去了单向导电性，这种现象称为反向击穿，如图2.6所示的C点。发生击穿现象的原因是，当外加电场足够强时，它能够强制地把原子外层的价电子从共价键拉出来，使载流子数量急剧增加。发生击穿时的电压称为反向击穿电压。二极管反向击穿后，反向电流很大，会导致PN结烧坏。

通过以上讨论可以看出，二极管的电阻不是一个常数，它随着外加电压的极性和大小不同而有明显的变化，所以二极管的伏安特性曲线不是一条直线。从这个意义上说，二极管是一个非线性电阻器件。

2.2.3 晶体二极管的主要参数

参数是反映器件性能的质量指标。二极管的参数不仅能表征它的性能，而且也决定了它的用途。各种管子的参数是由制造厂家给出的，使用时可参考有关手册。二极管的主要参数如下所述。

1. 最大整流电流 I_F

最大整流电流是指二极管允许通过的最大正向平均电流，是为保证二极管的温升不超过允许值而规定的限制。使用时必须注意，通过二极管的平均电流不能超过这个值，否则将损坏二极管。

2. 最高反向工作电压 U_R

二极管反向电压过高时会引起二极管反向击穿，因此要限制反向工作的电压。为确保安全，一般规定最高反向工作电压为反向击穿电压值的一半。

3. 反向饱和电流 I_R

反向饱和电流是指管子未击穿时的反向电流值。通常，它是在规定的反向电压值和环境温度下测得的。 I_R 越小，说明管子的单向导电性能越好。实际上，二极管反向电流的大小与反向电压多少有些关系，通常半导体器件手册上给出的 I_R ，是在最高反向工作电压下的反向电流值。因为反向电流的大小与少数载流子的浓度有关，所以受温度影响很大，大约温度每升高 10°C ，反向电流增加一倍，使用时应加以注意。

4. 最高工作频率 f_{max}

二极管在高频工作时，由于PN结的电容效应，单向导电作用退化。最高工作频率就是指二极管的单向导电作用明显退化时的交流信号的频率。

二极管还有一些非主要参数，在此就不一一做介绍了。

2.2.4 晶体二极管的主要用途

1. 整流

利用二极管的单向导电性，可将交流变换成直流，这是二极管的整流作用（参见第6章）。



2. 制作恒定的电压源

由晶体二极管的伏安特性曲线可知,二极管的正向电压与流过的电流大小无关(硅管约为0.7V,锗管约为0.3V),利用此特性,可以将二极管做成电压值变化较小的直流电压源。图2.7示出了利用多个二极管串联组成的简易电压源(电源电压不太高时)的情况,如果用电阻串联分压(用电阻代替二极管)以形成相应的电压的话,则该电压将受与其所连接的负载电流变化的影响,即此电压不稳定。

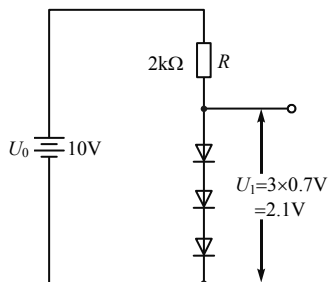


图2.7 用二极管的正向伏安特性产生电压较低的直流电压源

3. 其他用途

二极管的用途还有很多,如在无线电接收设备中用作检波(如收音机、电视机中),在电源电路中用作稳压(齐纳二极管),在脉冲电路中用作限幅和钳位,在数字电路中,用作各种逻辑元件等,这里就不一一列举了。

2.2.5 晶体二极管使用时的注意事项

1. 普通二极管

- (1) 在电路中应按所标明的极性进行连接,切勿颠倒极性使用。
- (2) 正确地选择型号。在整流电路中,只有同一型号的整流二极管才可串联、并联使用。此时,应视实际情况决定是否需要加入均衡电阻(串联均压、并联均流)。
- (3) 在电路板中,二极管应避免靠近发热元件,并保证散热良好。
- (4) 对于整流二极管,为保证其可靠工作,建议其反向电压降低20%使用。应防止瞬间或长时间过电压。对于大功率整流二极管,在使用中应结合实际情况加装保护装置(如快速熔断熔断器)。
- (5) 切勿超过手册中所规定的最大允许电流和电压值。
- (6) 根据二极管的工作条件,还应考虑其他特性,如截止频率、结电压、开关速度等。
- (7) 二极管的替换:硅管与锗管不能互相代用。替换上去的二极管,其最高反向工作电压及最大整流电流不应小于被替换管。

2. 稳压二极管

- (1) 可以将任意稳压值的稳压管串联使用,但不得并联使用。
- (2) 在工作过程中,所用稳压管的电流和功率不得超过极限值。
- (3) 在电路中,稳压管应工作在反向击穿状态,即工作于稳压区。
- (4) 稳压管的替换:被替换上去的稳压管的稳压电压额定值,必须与原稳压管的值相同,而最大工作电流则要相等或更大些。

2.3 双极型晶体三极管

晶体三极管是电子电路的关键器件。在模拟电子电路中,它起放大作用,是各种放大器、振荡器的核心器件;在脉冲和数字电路中,它起开关作用,是各种脉冲振荡器、放大器、逻



辑门电路和触发器的核心器件。

晶体三极管是一种三端器件，根据其构造的不同，大体上可分为双极型晶体管（Bipolar Junction Transistor, BJT）和场效应晶体管（Field-Effect Transistor, FET）。当只说晶体管时，常常指双极型晶体管。晶体管的分类如图 2.8 所示。

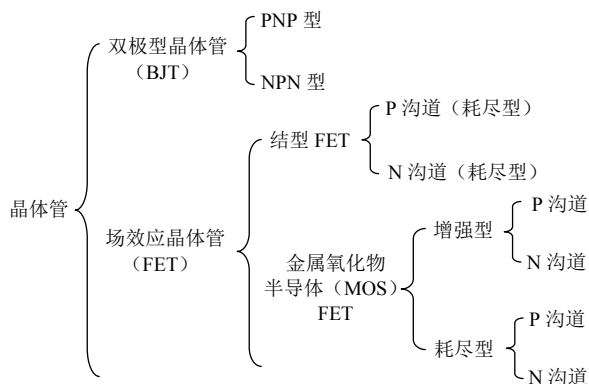


图 2.8 晶体管的分类

2.3.1 双极型晶体三极管的结构和分类

双极型晶体三极管（以下简称晶体管）是由两个相距很近的 PN 结经过一定的工艺制成的一种半导体器件。其中一个 PN 结叫做发射结，另一个叫做集电结。晶体管有三个区：发射区、基区和集电区，它们各自引出一个电极，分别称为发射极（E）、基极（B）和集电极（C）。双极型晶体管的外形如图 2.9 所示。

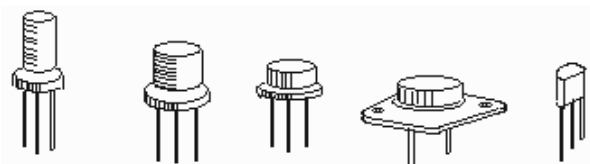


图 2.9 双极型晶体管的外形

晶体管的结构有两种形式：一种是 PNP 型，另一种是 NPN 型。PNP 型是两层 P 型半导体中间夹着 N 型半导体，结构上“好像”是两个二极管的阴极相连（这里讲的是“好像”，实际上并不是），NPN 型是两层 N 型半导体中间夹着 P 型半导体，结构上“好像”是两个二极管阳极相连（见图 2.10）。

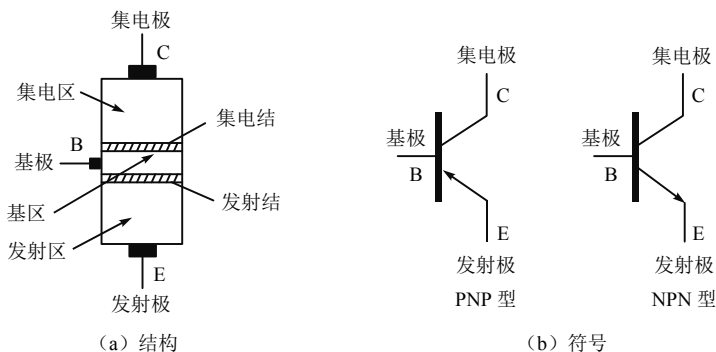


图 2.10 双极型晶体管的结构和符号



在三极管的制造过程中，对其内部的三个区域都有一定的要求，简单归纳起来，晶体管具有如下的结构特点：

(1) 发射区掺杂浓度高而面积较小，这有利于发射载流子；

(2) 集电区掺杂浓度低而面积大，这有利于收集载流子；

(3) 基区掺杂浓度极低，厚度极薄，以使载流子在此区域的复合率极低，这有利于获得放大作用。

基于以上特点，可知三极管并不是两个 PN 结的简单组合，它不能用两个二极管代替，一般也不可以将发射极和集电极互换使用。

双极型晶体管有多种分类法，参见图 2.11。

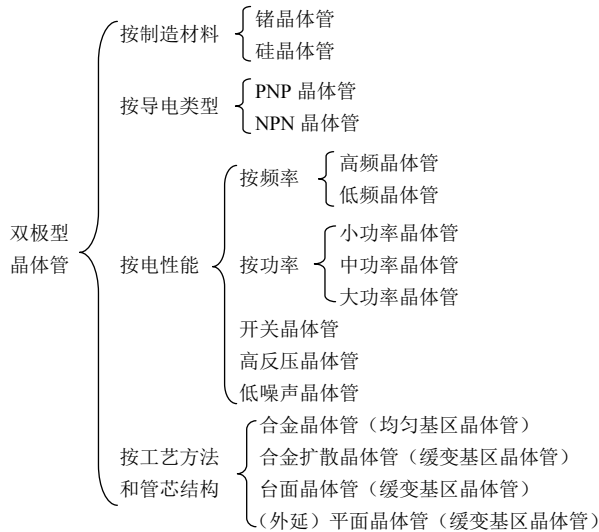


图 2.11 双极型晶体管的分类法

目前国产晶体三极管硅管多为 NPN 型平面管，锗管多为 PNP 型合金管。两种形式的三极管符号的区别是发射极的箭头指向不同，见图 2.10 (b)。图中发射极的箭头指向表示发射结在正向接法下的电流的真实方向。NPN 型和 PNP 型三极管的工作原理完全一样，只是使用时电源极性连接不同而已。

国产晶体三极管的命名法如表 2.2 所示。

表 2.2 晶体三极管的型号名称和含义

第一部分 (数字)		第二部分 (字母)		第三部分 (拼音)		第四部分 (数字及字母)
电极数目		材料和特性		三极管类型		同类管子的序号
符号	含义	符号	含义	符号	含义	
3	晶体三极管	A	PNP 锗	G	高频小功率管	表示在同类型管子中，其性能和参数有区别
		B	NPN 锗	X	低频小功率管	
		C	PNP 硅	A	高频大功率管	
		D	NPN 硅	D	低频大功率管	
				K	开关管	
				T	晶闸管 (可控硅整流管)	

注 1. 小功率是指集电极耗散功率 $P_C < 1W$ ，大功率是指 $P_C \geq 1W$ ；

2. 低频是指工作频率小于 3MHz，高频是指工作频率大于或等于 3 MHz；

3. 场效应器件、特殊器件、复合管等的型号命名无第一、第二部分。



例如：

- 3AX21——低频 PNP 型锗小功率三极管；
- 3DG6——高频 NPN 型硅小功率三极管；
- 3DD8——低频 NPN 型硅大功率三极管；
- 3AK8——锗 PNP 型（小功率）开关三极管；
- 3AD18——低频 PNP 型锗大功率三极管。

2.3.2 晶体三极管的放大原理

1. 三极管放大的外部条件

要使三极管能正常工作，必须在三极管的两个 PN 结上施加适当的直流电压（称为直流偏置）。

(1) 要使发射区向基区发射载流子，就必须给发射结施加一个正向偏置电压 E_B 。硅管一般为 $0.6\sim 0.8\text{V}$ ，锗管一般为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。

(2) 要保证基区传输的载流子能穿过集电区，还应给集电结施加一个反向偏置电压 E_C ，通常为几伏到几十伏。

图 2.12 示出了共射极接法^①的外加偏置电压 E_B 、 E_C 。

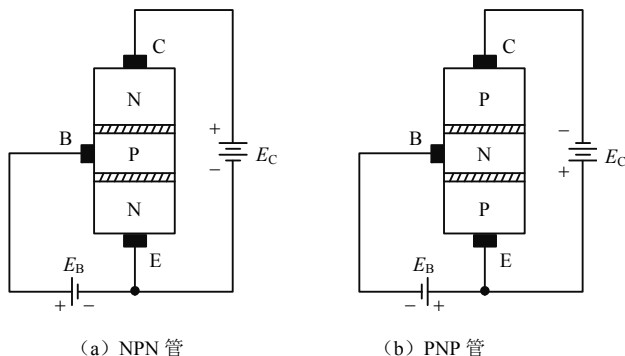


图 2.12 三极管具有放大作用的外部条件

2. 三极管的电流分配关系与放大作用

当三极管处于放大状态时，多数载流子有如下的运动规律。

- (1) 发射区向基区发射载流子，形成发射极电流 I_E 。
- (2) 载流子在基区中的扩散和复合形成基极电流 I_B 。
- (3) 载流子被集电极收集形成集电极电流 I_C 。

三极管内部载流子的运动情况如图 2.13 所示。

图 2.14 所示电路为三极管的电流分配与放大作用的实验电路。在该实验电路中，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。电流的真实方向标于该图中，测得的电流数据列于表 2.3 中。

^① 三极管共有三种接法：共射极接法、共基极接法和共集电极接法，这将在后面介绍。共射极接法是最常用的一种接法。

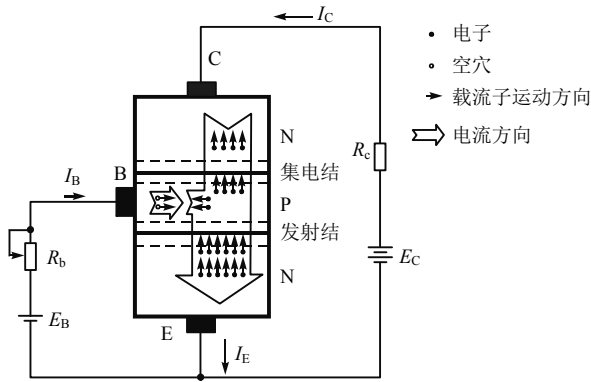


图 2.13 三极管内部载流子运动示意图

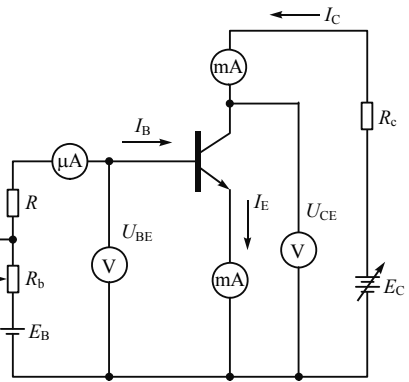


图 2.14 三极管特性实验电路

表 2.3 三极管电流分配实测数据

实验次数	1	2	3	4	5	6
基极电流 I_B (mA)	0	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08
集电极电流 I_C (mA)	0.005	3.20	4.76	6.41	8.90	11.35
发射极电流 I_E (mA)	0.005	3.22	4.79	6.45	8.96	11.43

由表 2.3 的数据可以得到以下几点结论:

(1) 三极管三个电极中的电流分配关系为

$$I_E = I_C + I_B \quad (2.1)$$

(2) I_B 比 I_C 和 I_E 小得多, 因此 $I_E \approx I_C$ 。

直流电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{U_{CE}=\text{常数}} \quad (2.2)$$

因此, 式 (2.1) 可改写为

$$I_E = (\bar{\beta} + 1) I_B \quad (2.3)$$

在不同的 I_C 值时, $\bar{\beta}$ 值也不同。

(3) 三极管的共射极交流电流放大系数为

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \Big|_{U_{CE}=\text{常数}} \quad (2.4)$$

在不同的 I_C 值时, β 值也不同。

必须指出, β 与 $\bar{\beta}$ 在意义上虽然不同, 但数值较接近, 所以, 有时可以通过测量 $\bar{\beta}$ 来估计 β 值的大小。

(4) 当 $I_B = 0$ (基极开路) 时, $I_C = I_E = I_{CEO}$, 这里 I_{CEO} 称为穿透电流。表 2.3 中, $I_{CEO} = 0.005\text{mA} = 5\mu\text{A}$ 。

在考虑到穿透电流 I_{CEO} 的情况下, 常用的关系式为

$$I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \quad (2.5)$$



(5) 三极管具有电流放大作用。由表 2.3 可见, 一个小的 I_B 的变化, 可以换来一个大的 I_C 的变化, 从而实现“以小控制大”的目的。电流放大特性是晶体三极管最基本和最重要的特性。

2.3.3 晶体三极管的特性曲线

三极管内部载流子的运动规律反映到外部电路, 就是各极电压和电流之间的相互关系, 人们常用图形来表示这种关系, 这就是三极管的特性曲线。在介绍三极管的特性曲线之前, 首先介绍三极管作为放大器使用时的三种连接方式。

1. 晶体三极管的连接方式

三极管是个三端器件, 有三个引出端 E、B、C, 当它用于电路中时, 必然有一端作为输入, 一端作为输出, 剩下的一端作为输入、输出的公共端。根据公共端的不同选择, 三极管可以有三种连接方式, 或称做三种组态。

(1) 共射极连接。基极为输入端, 集电极为输出端, 发射极为公共端, 如图 2.15 (a) 所示。这是一种最常用的组态。

(2) 共基极连接。发射极为输入端, 集电极为输出端, 基极为公共端, 如图 2.15 (b) 所示。

(3) 共集电极连接。基极为输入端, 发射极为输出端, 集电极为公共端, 如图 2.15 (c) 所示。

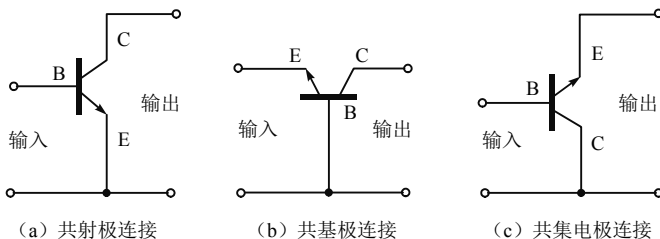


图 2.15 三极管的三种连接方式

三极管无论按哪一种方式连接, 为了保证管子具有放大作用, 电路必须满足发射结正偏、集电结反偏的偏置条件。三种接法的三极管电路在实际电路中都有应用, 且各有其特点, 其中以共射极接法的电路应用最为广泛。并且, 晶体管手册上所给出的参数大部分是指共射极连接时的, 因此, 下面着重介绍共射极电路的输入输出特性曲线。

2. 晶体三极管的特性曲线分析

三极管的特性曲线是用来表示三极管各个电极上的电压和电流之间关系的曲线, 它反映出三极管的基本性能, 是分析放大电路的基本依据。三极管在工作时, 有三个电流 I_E 、 I_C 、 I_B 和三个电压 U_{CE} 、 U_{CB} 、 U_{BE} 。但这六个量并非完全独立。考虑到 $I_E = I_B + I_C$, $U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$, 所以, 实际上只要了解四个量之间的关系就行了。通常把 I_C 、 I_B 、 U_{CE} 和 U_{BE} 四个量的关系曲线, 称为共射极特性曲线^①。

① 在以后的各章、节中 I 、 U 分别表示直流电流、电压值 (含下角标为英文大写时), 正弦电流、电压有效值, 直流电流、电压增量值; 当下角标为英文小写时, 分别表示正弦电流、电压有效值。 i 、 u 分别表示含有直流成分的电流和电压的瞬时值 (即总量)。当 i 、 u 的下角标为英文大写时表示电流、电压的总瞬时值; 其下角标为英文小写时表示电流、电压交流分量的瞬时值。



三极管特性曲线可以用晶体管图示仪直接描绘出来,也可以用图 2.14 所示的电路逐点进行测试。

(1) 共射极连接时的输入特性曲线

$$I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{CE}=\text{常数}} \quad (2.6)$$

这是 I_B 与 B、E 极间电压 U_{BE} 的关系曲线(见图 2.16),此时, C、E 极之间的电压 U_{CE} 为参量。

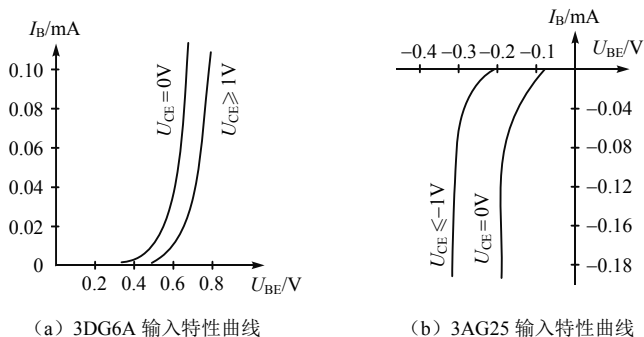


图 2.16 三极管的输入特性曲线

输入特性曲线有如下特点。

① 当 $U_{CE} = 0V$ 时,输入曲线与二极管伏安特性曲线形状一样。当 $U_{CE} \geq 1V$ ($\leq -1V$) 时,特性曲线向右(向左)移动了一段距离。这是由于集电极加了反向电压后对基极电流产生影响的结果。

② 存在死区。当 U_{BE} 达到或超过三极管的导通电压时,才会产生基极电流 I_B 。

③ 特性曲线是非线性的, U_{BE} 的微小变化将导致 I_B 的大幅度变化(这就意味着,应当通过直接控制 I_B 的变化来影响 I_C 的变化,而不应当先控制 U_{BE} 的变化,然后再使 I_B 变化,从而影响 I_C 的变化)。

④ I_B 在很宽范围内变动时, U_{BE} 变化很小,可近似认为是定值。一般地,硅管的 $U_{BE} = 0.7V$,锗管的 $U_{BE} = 0.3V$ 。

(2) 共射极连接时的输出特性曲线

$$I_C = f(U_{CE}) \Big|_{I_B=\text{常数}} \quad (2.7)$$

这是集电极电流 I_C 和 C、E 极间电压 U_{CE} 之间的关系曲线。此时,基极电流 I_B 为参量。

输出特性曲线有如下的特点。

① 当 $U_{CE} = 0V$ 时, $I_C = 0$,即曲线通过坐标原点。

② 当外加电压为某一数值 U_{CE} 时,若 $I_B = 0$,则 $I_C = I_{CEO} \approx 0$,即在集电极电路中只有很小的穿透电流 I_{CEO} 通过。

③ 若 $I_B = \text{常数}$,将 U_{CE} 从零开始增加。开始时, I_C 随 U_{CE} 迅速增加;当 U_{CE} 超过一定值(约 $1V$)后, I_C 不再随 U_{CE} 的增高而明显地增加,曲线趋于平坦。这说明,三极管具有恒流特性。

④ 当基极电流 I_B 增加时,相应的 I_C 也增大,即曲线平坦部分向上移动,而且电流 I_C 比



I_B 增大的幅度大得多，这正是三极管的电流放大作用。

⑤ 根据输出特性曲线，可把三极管的工作状态分为三个区域，如图 2.17 所示。

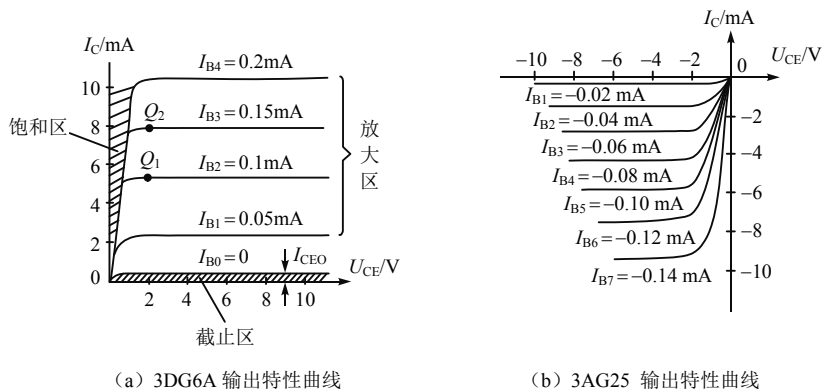


图 2.17 三极管输出特性曲线

- 截止区。在 $I_B = 0$ 这条曲线以下的区域，称其为截止区。截止区的特点是，晶体管的发射结与集电结都处于零偏置或反向偏置状态。这相当于集电极与发射极之间断路，电流无放大作用。
- 饱和区。在图 2.14 中集电极接有电阻 R_C ，如果 $I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_C R_C \uparrow \rightarrow U_{CE} \downarrow$ ，当 U_{CE} 下降到 $U_{CE} < U_{BE}$ 时，则集电结处于正向偏置（基极电位高于集电极电位）。此后，如果 I_B 再增大， I_C 将增加很小，甚至不再增加。 $I_C = \beta I_B$ 的关系不再存在，出现了饱和现象，三极管失去放大作用。在特性曲线中， U_{CE} 很小， I_C 随 U_{CE} 增大接近直线上升部分的左侧（含该上升直线的邻近区）称为饱和区。一般规定，当 $U_{CE} < U_{BE}$ 时，认为三极管已经饱和，这时的 U_{CE} 称为饱和压降，记为 U_{CES} 。
- 放大区。介于截止区与饱和区之间的区域称为放大区。该区内三极管具有电流放大作用，发射结正向偏置，集电结反向偏置，电流 I_B 对 I_C 有控制作用，满足 $\Delta I_C = \beta \cdot \Delta I_B$ 的关系。

晶体三极管在三种工作状态时，发射结与集电结的偏置情况及在电路中的等效作用，列于表 2.4 中，其具体分析及工作点的设置参见后面的有关章节。

表 2.4 晶体三极管的三种工作状态对比

工作区域	放大区	饱和区	截止区
比较项目			
发射结	正偏	正偏	反偏
集电结	反偏	正偏	反偏
在电路中的等效作用	电阻（阻值随工作点而变）	开关（导通状态）	开关（关断状态）
应用范围	放大器	脉冲和数字电路	脉冲和数字电路

2.3.4 晶体三极管的主要参数

三极管的参数是用来表征管子各种性能和适用范围的物理量，是评价三极管优劣、合理选用三极管和设计、调整晶体管电路的基本依据。三极管有如下主要参数。



1. 电流放大系数

共射极直流电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{U_{CE}=\text{常数}} \quad (\text{无信号输入}) \quad (2.8)$$

共射极交流电流放大系数

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \Big|_{U_{CE}=\text{常数}} \quad (\text{有信号输入}) \quad (2.9)$$

$\bar{\beta}$ 与 β 的定义是不同的, 但当三极管工作频率不太高时, 二者数值近似相等, 因此常用 $\bar{\beta}$ 来代替 β 。

交流电流放大系数是衡量三极管放大能力的重要指标。 β 值太小, 则电流放大能力差; β 值太大, 则稳定性差。一般 β 值在 20~200 之间为宜。由于制造工艺上的困难, 即使是同批生产的三极管, β 值也有很大差异, 这也正是为什么晶体管名称的最后一位 (即第五位) 往往带有 A、B、C、D、E 等的原因。要想准确知道工作时的 β 值, 只能通过仪器来测量。

2. 极间反向电流

三极管的反向电流直接影响着晶体管电路的工作稳定性和高温下的工作性能, 反向电流的大小反映了三极管的质量指标。在应用中需要考虑的反向电流有两个。

(1) 集电极-基极反向饱和电流 I_{CBO}

当发射结开路时, 集电结的反向电流就是 I_{CBO} 。在一定的温度下, I_{CBO} 基本上是个常数, 因此又称做反向饱和电流。

I_{CBO} 的大小是在发射极开路时测定的。

I_{CBO} 受温度的影响很大, 在室温下, 小功率硅管的 I_{CBO} 值在 $1\mu\text{A}$ 以下; 小功率锗管的 I_{CBO} 值在几微安 (μA) 至几十微安 (μA) 之间。

(2) 集电极-发射极穿透电流 I_{CEO}

当基极开路时, 集电极与发射极之间的反向电流, 称做穿透电流 I_{CEO} 。 I_{CEO} 与 I_{CBO} 之间的关系为

$$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \quad (2.10)$$

由于 I_{CBO} 受温度影响大, 所以穿透电流 I_{CEO} 受温度的影响更大。显然 I_{CEO} 、 I_{CBO} 越小的管子其性能越稳定, 硅管的温度稳定性比锗管好。

3. 极限参数

极限参数表征使用时不宜超过的限度。

(1) 集电极最大允许电流 I_{CM}

当三极管的 I_C 增加到一定数值时, 放大系数 β 值将显著下降, 一般把 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} 。在使用中, I_C 超过 I_{CM} 并不一定会使管子损坏, 但超过太多, 则极可能烧坏管子。一般小功率管的 I_{CM} 约数十毫安, 大功率管的 I_{CM} 则在数安以上。

(2) 集电极-基极击穿电压 BU_{CBO}

这是指发射极开路时, 集电极与基极间所能承受的最大反向电压。一般地, $BU_{CBO} >$



BU_{CEO} 。

(3) 集电极 - 发射极击穿电压 BU_{CEO}

这是指基极开路时, 集电极与发射极间所能承受的最大反向电压。在实际工作中, 一定要保证集电极电压 $U_{\text{CE}} < BU_{\text{CEO}}$, 否则电路将无法工作, 甚至烧坏管子。

(4) 集电极最大允许功率损耗 P_{CM}

集电极功率损耗是指集电极电压 U_{CE} 和流经集电极的电流 I_{C} 的乘积, 即

$$P_{\text{C}} = U_{\text{CE}} \cdot I_{\text{C}} \quad (2.11)$$

它是三极管内部电力消耗的表征。

功率损耗将引起管子发热、结温上升, 最终将烧坏管子。我们将保证管子不被烧坏所能允许的功率损耗称为最大功率损耗 P_{CM} 。在实际工作中, 要求 $P_{\text{C}} \leq P_{\text{CM}}$ 。我国规定 $P_{\text{CM}} < 1\text{W}$ 的管子为小功率管, $P_{\text{CM}} \geq 1\text{W}$ 的管子为大功率管。

(5) 特征频率 f_{T}

特征频率是指当晶体管在共射极运用时, 其电流放大系数 β 下降为 1 时的频率。它表征晶体管具备电流放大能力的频率极限。

【例 2.1】 图 2.17 (a) 所示是 3DG6A 的输出特性曲线。

(1) 从曲线上求 Q_1 点、 Q_2 点的 $\bar{\beta}$ 值;

(2) 由曲线上的 Q_1 点和 Q_2 点计算 β 值。

解: (1) 在 Q_1 点处, $I_{\text{B}} = 0.1\text{mA}$ 、 $I_{\text{C}} = 5.4\text{mA}$ (近似); 在 Q_2 点处, $I_{\text{B}} = 0.15\text{mA}$ 、 $I_{\text{C}} = 8\text{mA}$ 。由式 (2.8) 得

$$\bar{\beta} \Big|_{Q_1} = \frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{B}}} = \frac{5.4}{0.1} = 54$$

$$\bar{\beta} \Big|_{Q_2} = \frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{B}}} = \frac{8}{0.15} \approx 53$$

(2) 由 Q_1 和 Q_2 两点得

$$\Delta I_{\text{C}} = 8\text{mA} - 5.4\text{mA} = 2.6\text{mA}$$

$$\Delta I_{\text{B}} = 0.15\text{mA} - 0.1\text{mA} = 0.05\text{mA}$$

由式 (2.9) 得

$$\beta = \frac{\Delta I_{\text{C}}}{\Delta I_{\text{B}}} = \frac{2.6}{0.05} = 52$$

【例 2.2】 在晶体管放大电路中, 当 $I_{\text{B}} = 10\mu\text{A}$ 时, 测得 $I_{\text{C}} = 1.1\text{mA}$; 当 $I_{\text{B}} = 20\mu\text{A}$ 时, 测得 $I_{\text{C}} = 2.0\text{mA}$ 。试求晶体管的电流放大系数 β 、穿透电流 I_{CEO} 及集电结反向电流 I_{CBO} 。

解: 由式 (2.5) 知, $I_{\text{C}} = \bar{\beta} I_{\text{B1}} + I_{\text{CEO}}$, 由此可列出方程组

$$\begin{cases} I_{\text{C1}} = \bar{\beta} I_{\text{B1}} + I_{\text{CEO}} & 1100 = 10\bar{\beta} + I_{\text{CEO}} \\ I_{\text{C2}} = \bar{\beta} I_{\text{B2}} + I_{\text{CEO}} & 2000 = 20\bar{\beta} + I_{\text{CEO}} \end{cases} \Rightarrow$$

解方程组得

$$\bar{\beta} = 90, \quad I_{\text{CEO}} = 200\mu\text{A}$$