第1章

半导体器件基础及稳压电路

现在，大部分电子产品，如计算机、移动电话等的核心单元都与半导体有着极为密切的关联。常见的半导体材料有硅、锗、砷化镓等，而硅更是各种半导体材料中，在商业应用上最具有影响力的一种。本章主要讨论半导体材料的基本知识及常用的半导体器件结构、工作原理及使用方法，此外，也对由二极管及稳压管等构成的稳压电源进行分析和讨论。

1.1 PN 结

PN 结是分析半导体器件的基础，要想了解 PN 节的相关特性必须从掌握半导体的基本知识开始。

1.1.1 半导体基本知识

半导体材料是导电能力介于导体和绝缘体之间的一种材料，其常见的材料为硅(Si)、锗(Ge)等。用半导体材料制作半导体电子元器件，不是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而是由于其导电能力会随着温度的变化、光照或掺入杂质的多少发生显著的变化，这就是半导体不同于导体的特殊性质。

1. 本征半导体

将纯净的半导体经过一定的工艺过程制成单晶体，即成为本征半导体，其结构如图 1.1.1 所示。

图 1.1.1 中，+4 代表组成本征半导体的硅原子(或锗原子)最外层价电子数为 4，与邻近的硅原子最外层电子一一结合形成共价键结构。在绝对零度(即 $T=0$K)且没有外界激发时，每一个硅原子的最外层电子都被共价键束缚，没有载流子(运载电荷的粒子)，半导体不导电。但是在室温下(或光照下)，被共价键束缚的价电子有可能获得足够的随机热振动能量而脱离共价键的束缚，成为自由电子。自由电子脱离共价键束缚后，其留下来的空的位置被称为空穴。显然，自由电子和空穴是成对出现的。本征半导体在热或光照作用下，产生自由电子和空穴对的现象称为本征激发，如图 1.1.2 所示。

图 1.1.2 中，本征半导体在本征激发作用下，共价键中产生了空穴。若此时在本征半导体两侧施加一外加电场，则此时自由电子将产生定向移动，形成电子电流。由于自由电子与

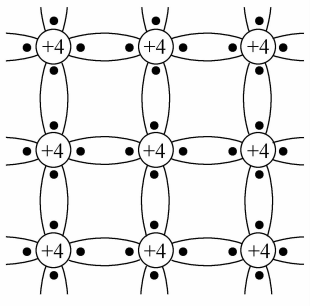

图 1.1.1 本征半导体结构示意图

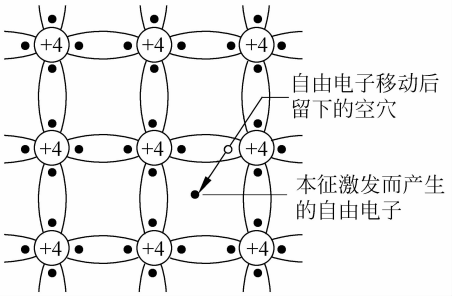

图 1.1.2 本征激发产生的自由电子-空穴对

空穴成对出现，在自由电子定向移动的同时，空穴也会按照一定的方向产生定向移动，形成空穴电流。这样一来，本征半导体中参与导电的载流子就有两种，即自由电子和空穴，本征半导体的电流也是这两种载流子的电流之和。

需要注意的是，自由电子和空穴在运动的过程中如果相遇，两者就会同时消失，这种现象称为复合。在一定温度作用下，由本征激发所产生的自由电子和空穴对的产生率，与复合的自由电子与空穴的复合率相等，达到动态平衡。当温度增加时，自由电子的浓度会上升，但同时空穴浓度也会上升，晶体导电能力增强，反之亦然。但应指出的是，本征半导体的导电性能很差，要想用半导体材料制作电子元件，需要通过扩散工艺，在本征半导体中掺入适量杂质元素才可以。

2. 杂质半导体

根据掺入杂质元素的不同，可形成 N(电子)型半导体和 P(空穴)型半导体。

(1) N 型半导体

在纯净的硅晶体内掺入五价杂质元素，如磷等，因磷原子周围有 5 个价电子，除了 4 个电子与周围相邻的硅原子最外层电子一一结合形成共价键外，还多出 1 个电子，如图 1.1.3 所示。多余的电子不受共价键束缚，只需要较低的能量就能够成为自由电子并使磷原子成为不能移动的正离子。这里要注意，掺入杂质元素形成自由电子的同时，并不产生新的空穴，但原来的本征激发依然会产生成对的自由电子-空穴对，只不过由于掺杂的原因，半导体中总的自由电子和空穴的数目已经不再相等，但整个半导体仍呈中性。掺入的杂质元素越多，自由电子的数目就越多，在这种杂质半导体中，自由电子占多数，为多数载流子(空穴为少数载流子)，对应的这种半导体就称为 N(电子)型半导体。

(2) P 型半导体

仿照 N 型半导体，在纯净的硅晶体内掺入三价杂质元素，如硼等，因硼原子周围有 3 个价电子，这 3 个价电子在与周围相邻的硅原子最外层电子一一结合形成共价键时，少了一个电子，形成空穴，如图 1.1.4 所示。当相邻共价键上的电子受到热激发或其他激发作用下填补这个空位时，掺入的杂质原子就变成不能移动的负离子。因掺入的杂质原子中空位吸收电子，因此也称其为受主杂质。而原来的硅原子的共价键则缺少一个电子，形成空穴，这样半导体中总的自由电子和空穴的数目已经不再相等，掺入的杂质元素越多，空穴的数目就越多，但整个半导体依然保持中性。在这种杂质半导体中，空穴占多数，为多数载流子(自由电子为少数载流子)，对应的这种半导体就称为 P(空穴)型半导体。

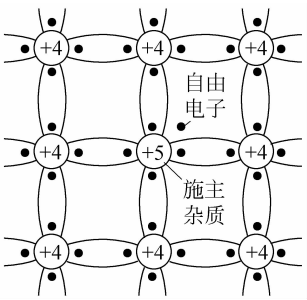

图 1.1.3　N 型半导体

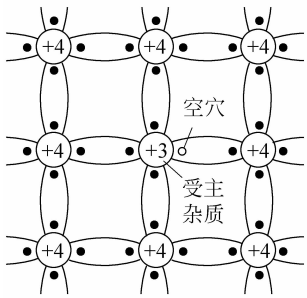

图 1.1.4　P 型半导体

1.1.2　PN 结

在一块完整的半导体中，一侧掺杂成 P 型半导体，另一侧掺杂成 N 型半导体，中间二者相连的接触面称为 PN 结(PN junction)。PN 结是电子技术中许多半导体元件，例如半导体二极管、双极性晶体管的物质基础。

1. PN 节的形成

由 1.1.1 节中半导体的基本知识可以看出，N 型半导体中含施主杂质，在室温下，施主杂质电离为带正电的施主离子和带负电的自由电子。同样，P 型半导体中含受主杂质，在室温下，受主杂质电离为带负电的受主离子和带正电的空穴。

若在本征半导体的两个相邻的不同区域分别掺入三价或五价杂质元素，就会分别形成 P 型区和 N 型区。不同的区域，载流子的浓度不同，在交界面处就会出现物质从浓度高的地方向浓度低的地方扩散的现象。P 区空穴向 N 区扩散，N 区自由电子向 P 区扩散，如图 1.1.5 所示。

扩散运动使交界面附近的自由电子与空穴首先发生复合，并使 P 区靠近交界面一侧只剩负离子，N 区靠近交界面一侧只剩正离子，如图 1.1.6 所示。

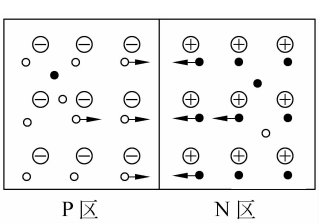

图 1.1.5　载流子的扩散示意图

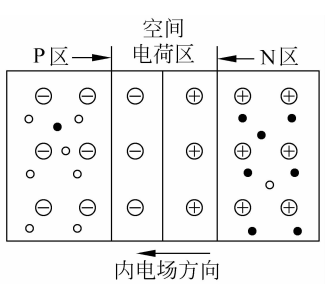

图 1.1.6　PN 结的形成

图 1.1.6 中，P 区出现的负离子带电区以及 N 区出现的正离子带电区是不能移动的，从而形成从正离子区域指向负离子区域的内电场，这个区域称为空间电荷区。在空间电荷区，多数载流子都已扩散到对方并被复合，因此空间电荷区也被称为耗尽区。随着扩散运动的进行，空间电荷区有变宽的趋势，其产生的内电场场强也会随之增强，增加的场强会阻碍空间电荷区两侧多子扩散运动的进行(左边多子——自由电子及右边多子——空穴所受到

内电场力方向均与扩散运动方向相反)。与此同时,空间电荷区产生的内电场将使 N 区的少子——空穴加速向 P 区漂移,P 区的电子加速向 N 区漂移,漂移的少子刚好补充了交界面由于扩散运动产生复合而失去的载流子,从而使得空间电荷区有变窄的趋势。扩散运动越强,内电场也越强,阻碍多子运动也越强,对少子漂移越有利,反之亦然。最终这两种运动会达到动态平衡,使空间电荷区的宽度趋于稳定,这个稳定的空间电荷区就是 PN 结。

2. PN 结的单向导电性

在 PN 节的两端外加电压时,就会破坏 PN 结原来的平衡状态。PN 结的单向导电性也在外加电压时显现出来。

(1) 外加正向电压

在 PN 结外施加正向电压,即 P 区接电源的正极,N 区接负极,称为 PN 结的正向接法,通常也称为正向偏置,如图 1.1.7(a)所示。此时 PN 结外电场与内电场方向相反,但由于内电场较为微弱,PN 结内的多数载流子的扩散运动将强于少数载流子的漂移运动,从而产生从 P 型半导体指向 N 型半导体的扩散电流,也称为正向电流 I_F。在外加电压升高时,正向电流随之增加,这时 PN 结表现为一个阻值很小的电阻,PN 结导通,其导通时的压降只有零点几伏。因此在正向接法时,电路的回路中必须要串联一个电阻,以防止 PN 结因正向电流过大而损坏。

(2) 外加反向电压

当在 PN 结外施加反向电压,即 N 区接电源的正极,P 区接负极,称为 PN 结的反向接法,通常也称为反向偏置,如图 1.1.7(b)所示。此时外加电场方向与内电场方向一致,阻碍多子的扩散运动,使空间电荷区变得更宽。虽然,此时外加的反向电场使少子的漂移运动更强,但由于少子的浓度仅由本征激发产生,当半导体器件制成后,其数值取决于温度,与外加反向电压基本无关。因此,在一定温度下,外加反向电压时,其反向的漂移运动所形成的反向电流 I_R 基本是定值,而且其值很小,基本可忽略不计。这时,PN 呈现出很大的阻值,可以认为其基本是不导电的,工作于截止状态。

(3) PN 结的伏安特性

现以硅材料 PN 结为例,来说明它的电压-电流(U-I)关系。当正向电压达到一定值时,PN 结产生很大的正向电流,PN 结被导通;当反向电压在一定范围内时,PN 结产生微弱的反向饱和电流;当反向电压超过一定值时,PN 结被击穿,如图 1.1.8 所示。

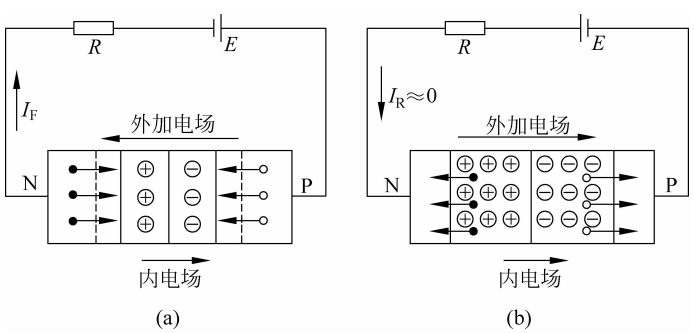

图 1.1.7 PN 结的单向导电性

(a) PN 结加正向电压;(b) PN 结加反向电压

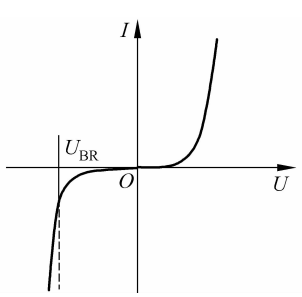

图 1.1.8 PN 结的伏安特性

1.2　半导体二极管

把PN结用外壳封装起来，并加上电极引线就构成了二极管，这是最简单也是最基本的半导体器件。为了更好地理解二极管，下面先介绍二极管的结构。

1.2.1　二极管的结构

半导体二极管根据其结构，可以分为面接触型、点接触型及平面型等。其中，面接触型的结构如图1.2.1(a)所示，其PN结采用合金法扩散而成，结面积较大，能够通过较大的电流。这类器件适用于整流，不适用于高频电路中。二极管的符号如图1.2.1(b)所示。

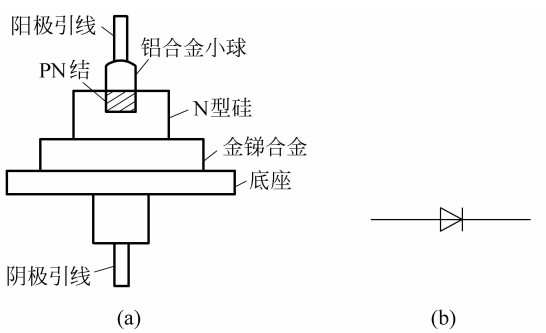

图1.2.1　二极管结构及表示符号

(a) 面接触型二极管结构；(b) 二极管符号

1.2.2　二极管的特性

二极管是在PN结的基础上通过加封装和引线制作而成，因此二极管与PN结的特性基本一致，也具有单向导电性。但是由于二极管存在半导体体电阻及引线电阻，所以在其正向导通时，流过同样电流的情况下，二极管的电压降稍高于PN结。

二极管实测的伏安特性如图1.2.2所示。由图可以看出，只有当二极管的正向电压足够大时，正向电流才开始增加。使二极管开始导通的电压称为开启电压或门槛电压，不同型号、不同材料二极管的门槛电压是不相同的。此外，二极管的伏安特性对温度很敏感，温度升高时，正向特性曲线向左移，如图1.2.2所示，这说明，对应同样大小的正向电流，正向压降随温升而减小。研究表明，温度每升高1℃，正向压降约减小2mV。

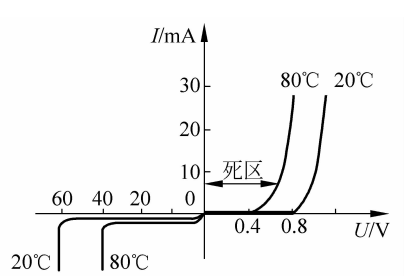

图1.2.2　二极管的伏安特性

在二极管两端施加反向电压时，将形成很小的反向电流，数值的大小主要取决于温度。当反向电压在一定范围内增大时，反向电流的大小基本恒定，而与反向电压大小无关，故称为反向饱和电流。当温度升高时，少数载流子数目增加，使反向电流增大，特性曲线下移。

研究表明，温度每升高 10℃，反向电流近似增大一倍。

当二极管的外加反向电压大于一定数值（反向击穿电压）时，反向电流突然急剧增加，称为二极管反向击穿。反向击穿电压一般在几十伏以上。

由图 1.2.2 可以看出，二极管是非线性器件，其工作特性如下：

（1）当外加正向电压，且正向电压大于某一值时，二极管工作于导通状态；

（2）当外加反向电压时，二极管中流过电流近似为零，这时其工作于截止状态。

根据这两条性质，为了电路分析的方便，本书把二极管的工作状态用两个简单有效的模型来描述，如图 1.2.3 所示。

图 1.2.3(a)为二极管理想伏安特性及模型，图 1.2.3(b)为二极管恒压降模型。在理想模型中，二极管正向电压大于零时，其处于导通状态，导通压降为零。在恒压降模型中，二极管正向电压大于或等于 0.7V 时，处于导通状态，导通压降一般定义为 0.7V（硅材料、锗材料一般为 0.2V）。这两个模型可以用来近似模拟二极管的特性，并用之取代电路中的二极管。用这两种模型分析二极管电路是非常简单有效的工程近似分析方法。此外，二极管还有折线模型及小信号模型，有兴趣的读者可自行查阅相关资料进行自学。

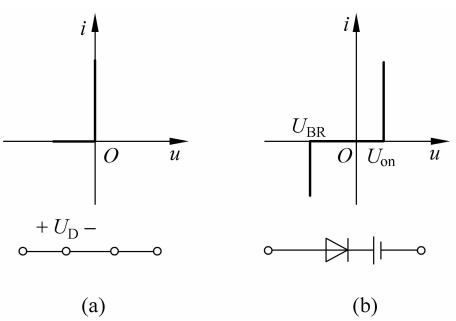

图 1.2.3　二极管电路模型

（a）理想伏安特性及模型；（b）恒压降伏安特性及模型

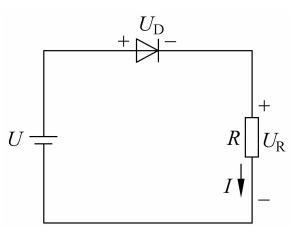

图 1.2.4　例 1.1 电路图

例 1.1　如图 1.2.4 所示，直流电源电压 $U=10\text{V}$，$R=10\Omega$。试求流过 10Ω 电阻的电流 I。

解　（1）二极管外加电压 U 的方向与二极管导通方向一致，由二极管理想模型知，二极管处于导通状态，其压降为 0，故电阻两端的压降 $U_R=10\text{V}$，流过 10Ω 电阻的电流为 $I=\dfrac{U-U_R}{R}=1\text{A}$。

（2）二极管外加电压 U 的方向与二极管导通方向一致，且外界电压为 10V，大于 0.7V，由二极管恒压降模型知，二极管处于导通状态，其压降为 0.7V，由 KVL 得电阻两端的压降 $U_R=10\text{V}$，因此流过 10Ω 电阻的电流为 $I=\dfrac{U-U_R}{R}=0.93\text{A}$。

例 1.2　图 1.2.5 中，假设各图中二极管导通压降 $U_D=0.7\text{V}$。求各电路输出电压。

解　（1）假设二极管截止，则二极管的阳极电位为 2V，阴极电位为 0V，二极管阳极、阴极间的电位差为 2V，大于 0.7V，二极管导通，与假设相矛盾。因此，二极管必然导通，其导通压降 $U_D=0.7\text{V}$，则输出电压 $U_{o1}=1.3\text{V}$。

（2）假设二极管截止，则二极管的阴极电位为 2V，阳极电位为 0V，二极管阳极、阴极间

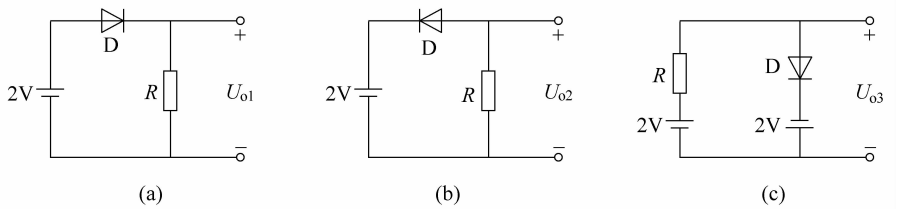

图 1.2.5　例 1.2 电路图

的电位差为－2V，小于 0.7V，工作于截止状态，与假设一致。因此，二极管工作于截止状态，则输出电压 $U_{o2}=0$V。

(3) 假设二极管截止，则二极管的阳极电位为 2V，阴极电位为－2V，二极管阳极、阴极间的电位差为 4V，大于 0.7V，工作于导通状态，与假设相矛盾。因此，二极管必然导通，其导通压降 $U_D=0.7$V，由 KVL 可得电路的输出电压 $U_{o3}=-1.3$V。

1.2.3　二极管的参数

选择二极管主要考虑两个参数：正向导通时能够承受多大电流，反向截止时能够承受多大电压而不被击穿。二极管的参数描述了二极管的性能，为选择使用二极管提供了依据。

(1) 额定电流

额定电流是指二极管正常连续工作时，能通过的最大正向电流值。在使用时电路的最大电流不能超过此值，否则二极管就会因过热而烧毁。

(2) 反向击穿电压

在二极管上加反向电压时，反向电流会很小。当反向电压增大到某一数值时，反向电流将突然增大，这种现象称为击穿。二极管反向击穿时，反向电流会剧增，此时二极管就失去了单向导电性。二极管产生击穿时的电压称为反向击穿电压。

(3) 额定电压

二极管的额定电压是指二极管在工作过程中不被击穿所能承受的反向重复施加的最大峰值电压。其值一般为反向击穿电压的一半。

(4) 最高工作频率

二极管在正常工作条件下允许的最高频率。如果加给二极管的信号频率高于该频率，二极管将不能很好地体现单向导电性，影响正常工作。

通常，还要标出二极管的最高工作温度。二极管的参数是在一定的测试条件下得出的，当使用条件与测试条件不同时，参数也会发生一定变化。

1.2.4　二极管的应用

二极管主要应用于整流、限幅、检波及各种类型的电力开关电路中。在分析含有二极管的电路时，要把握的一个基本原则是：首先要判断二极管的工作状态，即二极管是工作于导通状态还是截止状态，采用的具体方法是假设分析法。即先假设二极管断开，然后分析计算二极管阳极和阴极间是承受正向电压还是反向电压。承受正向电压时二极管导通，反之二极管截止。

(1) 整流

我们所使用的最广泛的电源就是 220V 的交流电，如何将电网所供应的交流电变为直流电？方法很多，但其基本思想是将正负相间的双向电流转换为单一方向，可以理解为把交流变为直流，这个过程称为整流。整流的应用将会在 1.6 节中详细讨论。

(2) 限幅电路

在电子电路中，经常会对信号的范围进行限制，使输出信号有选择地传输。在图 1.2.6(a)中，直流电源电压 $U_1=U_2$，交流信号 u_i 为正弦信号，其幅值大于直流电源电压。二极管为理想二极管。

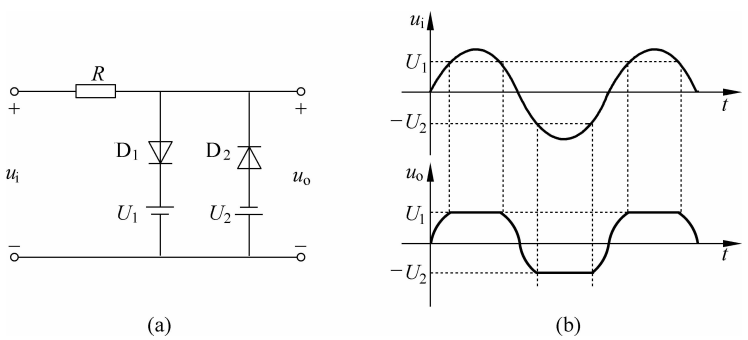

图 1.2.6 限幅电路

(a) 电路图；(b) 输出电压波形图

根据电路分析方法，对于图 1.2.6(a)所示电路，其输出电压 u_o 的表达式可能为 $u_o=u_i-u_R=U_{D_1}+U_1=U_{D_2}-U_2$。

当 $u_i\geqslant U_1$ 时，二极管 D_1 承受正向电压导通，二极管 D_2 承受反向电压截止，$U_{D_1}=0$，$u_o=U_1$。

当 $u_i\leqslant -U_2$ 时，二极管 D_2 承受正向电压导通，二极管 D_1 承受反向电压截止，$U_{D_2}=0$，$u_o=-U_2$。

综合以上情况，其输出电压波形如图 1.2.6(b)所示。

1.3 特殊二极管

除前面所讨论的普通二极管外，还有一些特殊二极管，如稳压二极管、发光二极管和光电二极管等，下面将分别介绍。

1.3.1 稳压二极管

大部分二极管在使用时要避免出现反向电压过大而导致电击穿，但稳压管是例外。稳压管是一种特殊工艺制造的面接触型硅半导体二极管，正常工作时基本都是处于反向击穿区，其伏安特性及表示符号如图 1.3.1 所示。

由图 1.3.1 可以看出，稳压管处于反向击穿区时，若流过的电流没有超出其最大允许电流，则其两端的电压基本保持不变。这样，当把稳压管接入电路以后，若由于电源电压发生

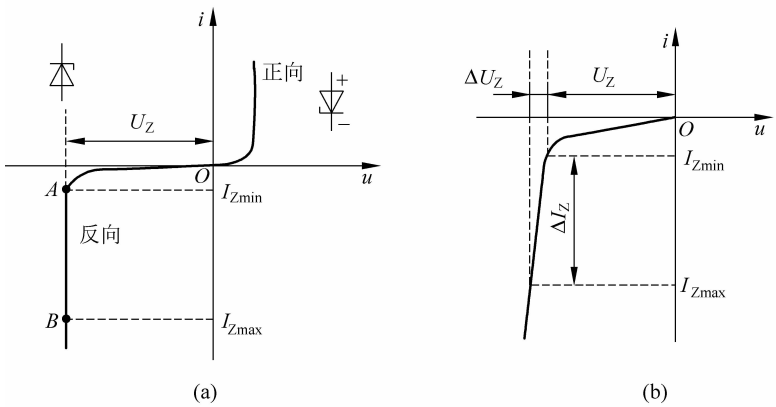

图 1.3.1　稳压管伏安特性及符号

(a) 稳压管的伏安特性及符号；(b) 稳压管动态电阻

波动，或其他原因造成电路中各点电压变动时，负载两端的电压将基本保持不变，起到稳压功能。

稳压管在直流稳压电源中得到广泛应用，其应用时应注意的主要参数如下。

(1) 稳定电压 U_Z：稳压管 PN 结的反向击穿电压，它随工作电流和温度的不同而略有变化。

(2) 稳定电流 I_Z：稳压管能够正常工作时的参考电流值。它通常有一定的范围，即 $I_{Zmin}\sim I_{Zmax}$。在稳压管正常工作时，电流越大，稳压效果越好。

(3) 动态电阻 r_Z：稳压管两端电压变化与电流变化的比值，如图 1.3.1 所示。通常动态电阻越小，稳压性能越好。

$$r_Z=\frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \tag{1.1}$$

(4) 温度系数：用来说明稳定电压值受温度变化影响的系数。不同型号的稳压管有不同的稳定电压的温度系数，且有正负之分。稳压值低于 4V 的稳压管，稳定电压的温度系数为负值；稳压值高于 7V 的稳压管，其稳定电压的温度系数为正值；介于 4～7V 的，可能为正，也可能为负。

(5) 额定功耗 P_{ZM}：稳压管额定功耗等于其额定工作电压与最大稳定工作电流的乘积，使用时要保证稳压管的工作功耗低于此值。

选择稳压管时应注意：流过稳压管的电流 I_Z 不能过大，应使 $I_Z\leqslant I_{Zmax}$，否则会超过稳压管的允许功耗；I_Z 也不能太小，应使 $I_Z\geqslant I_{Zmin}$，否则不能稳定输出电压，这样使输入电压和负载电流的变化范围都受到一定限制。

例 1.3　在图 1.3.2 所示的稳压电路中，已知稳压管的稳定电压 $U_Z=6$V，最小稳定电流 $I_{Zmin}=5$mA，最大稳定电流 $I_{Zmax}=40$mA，输入电压 $U_i=15$V，波动范围为 $\pm10\%$，限流电阻 R 为 200Ω。

(1) 电路是否能空载？为什么？

(2) 作为稳压电路的指标，负载电流 I_L 的范围为

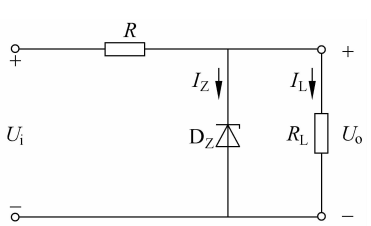

图 1.3.2　例 1.3 电路图

多少？

解 (1) 在电路空载时，若能够正常工作，则流过稳压管的电流为

$$I_{D_Z\max} = I_{R\max} = \frac{U_{i\max} - U_Z}{R} = 52.5\text{mA} > I_{Z\max} = 40\text{mA}$$

流过稳压管的电流超出其最大允许值，所以电路不能空载。

(2) 在稳压管正常工作时，其工作电流必然介于最小值与最大值之间，由此可以计算出稳压电路正常工作情况下负载电流的范围：

$$I_{D_Z\min} = \frac{U_{i\min} - U_Z}{R} - I_{L\max}, \quad I_{D_Z\max} = \frac{U_{i\max} - U_Z}{R} - I_{L\min}$$

整理得

$$I_{L\max} = \frac{U_{i\min} - U_Z}{R} - I_{D_Z\min} = 32.5\text{mA}, \quad I_{L\min} = \frac{U_{i\max} - U_Z}{R} - I_{D_Z\max} = 12.5\text{mA}$$

因此，在稳压电路正常工作情况下，负载允许的工作电流范围为 12.5～32.5mA。

1.3.2 发光二极管

发光二极管(light-emitting diode，LED)是日常生活中常见的一种二极管，广泛应用于各种电子产品、设备的状态指示灯和交通、道路的指示灯等方面，其元件符号和外观如图 1.3.3 所示。发光二极管与普通二极管的相似之处是：正向导通，反向截止，同样具有单向导电性。不同之处是：普通二极管发热，发光二极管发光。此外，发光二极管的正向导通压降远高于普通二极管，以蓝光为例，其正向导通压降约为 3.5V。根据半导体中掺入的杂质，发光二极管可以发出红、橙、黄、绿、蓝、紫可见光，也可以发出红外、紫外不可见光。蓝色与其他颜色组合后可以发出各种颜色的光线，组成全彩 LED 显示屏。

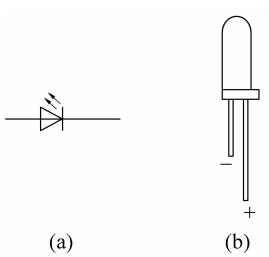

图 1.3.3 发光二极管符号及外观

(a) 元件符号；(b) 外观

在使用发光二极管时，要注意不要超过最大功耗、最大正向电流和反向击穿电压等极限参数。

1.3.3 光电二极管

光电二极管(photo-diode)是与发光二极管互补的一种电子元件，是光能与电能进行转换的器件。光电二极管和普通二极管一样，是由一个 PN 结组成的半导体器件，在没有光照条件下，具有单向导电特性。它与 LED 的不同之处在于，在光线照射条件下，光电二极管即使承受反向电压，也能够有一定的反向电流通过，照度越大，流过的反向电流越大。光电二极管的元件符号及电路模型如图 1.3.4 所示。

光电二极管作为光控元件可用于各种物体检测、光电控制、自动报警等方面。当制成大面积的光电二极管时，可当作一种能源而称为光电池。此时它不需要外加电源，能够直接把光能变成电能。在机电一体化时代，它成为一种非常重要的元件。在图 1.3.5 中，控制电路与驱动电路间用光耦合器件传递信号，控制电路与主电路没有导线相连接，完全绝缘，这样对控制电路中的电路元件不会产生干扰。此外，如果主电路发生短路或接触不良，对控制电路也不会产生任何破坏。因此，当主电路功率较高时，光耦是不可或缺的保护元件。

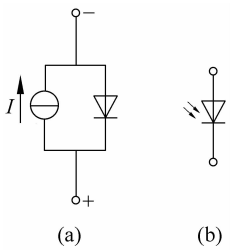

图 1.3.4　光电二极管

(a) 电路模型；(b) 元件符号

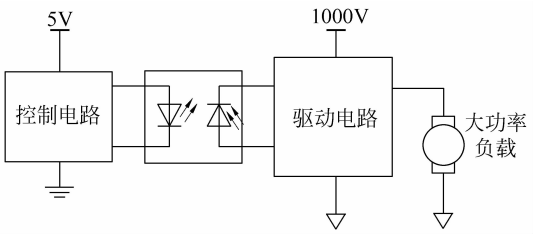

图 1.3.5　光耦隔离控制与驱动电路

1.4　双极型三极管

1947 年 12 月，贝尔实验室的约翰·巴丁、沃尔特·布喇顿在肖克利的指导下共同发明了点接触形式的双极性晶体管(bipolar junction transistor，BJT)。1948 年，肖克利发明了采用结型构造的双极性晶体管。在其后的大约 30 年时间内，这种器件是制造分立元件电路和集成电路的不二选择。1956 年，约翰·巴丁、沃尔特·布拉顿和威廉·肖克利共同荣获诺贝尔物理学奖。三极管是一种电流控制器件，可以用于产生、控制及放大电的信号。双极型晶体管具有体积小、质量轻、耗电少、寿命长等特点，广泛用于广播、电视、通信、雷达、计算机、自控装置、电子仪器、家用电器等领域。

1.4.1　三极管的结构

BJT 具有 3 个电极端子(三极管)，电流流入端、电流流出端、电流大小控制端，其电路结构、符号及实物图片如图 1.4.1 所示。

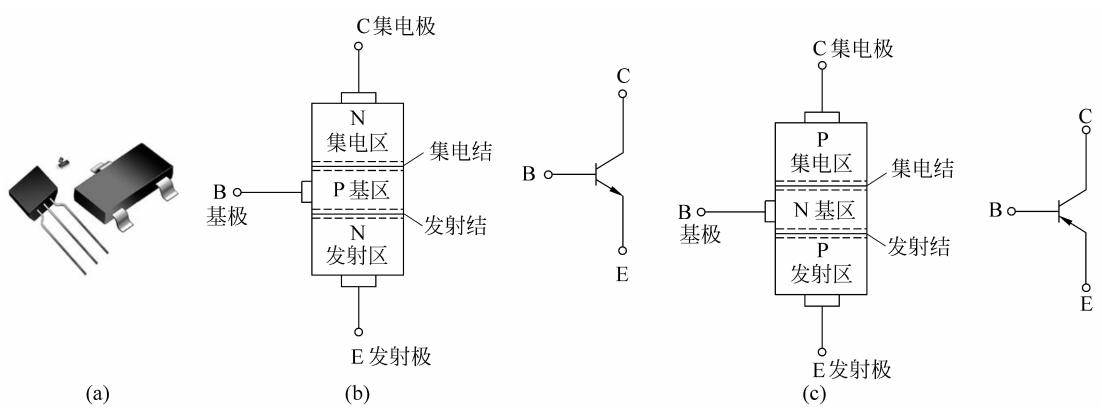

图 1.4.1　三极管实物、结构及符号

(a) 三极管实物；(b) NPN 型三极管结构及符号；(c) PNP 型三极管结构及符号

下面以 NPN 型三极管为例进行讨论。NPN 型三极管结构中位于下层的 N 区为发射区，面积不大，但掺杂浓度较高；中间为 P 型区，也称为基区，基区很薄，且掺杂浓度较低；位

于上层的 N 区是集电区，收集电子，面积很大。由此 3 个区域引出的 3 个电极分别称为发射极(emitter，E 极)、基极(base，B 极)、集电极(collector，C 极)，形成的两个 PN 结分别称为发射结和集电结，发射结中箭头的方向代表了晶体管正常工作过程中工作电流的流向。

1.4.2 三极管的特性

三极管共有 3 种工作状态，分别是放大、截止、饱和。要实现三极管的放大功能还必须使其满足一定的外部条件：给三极管的发射结加上正向电压，集电结加上反向电压。如图 1.4.2 所示，V_{BB} 为基极电源，与基极电阻 R_B 及三极管的基极 B、发射极 E 组成基极-发射极回路(称做输入回路)；V_{BB} 使发射结正偏，V_{CC} 为集电极电源，集电极电阻 R_C 及三极管的集电极 C、发射极 E 组成集电极-发射极回路(称做输出回路)，V_{CC} 使集电结反偏。电路图 1.4.2 中两个回路共用了发射极 E，因此称其为共发射极(common emitter，CE)放大电路。同理，还有共基极(CB)放大电路和共集电极(CC)放大电路。

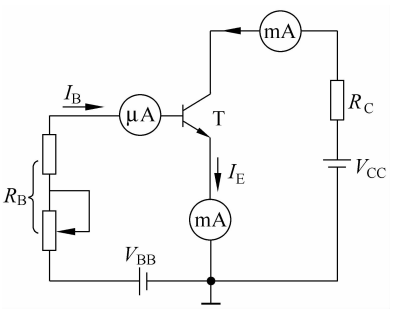

图 1.4.2 CE 放大实验电路

对于图 1.4.2 所示电路，通过改变可变电阻 R_B，可以测得基极电流 I_B、集电极电流 I_C 和发射结电流 I_E，如表 1.4.1 所示。

表 1.4.1 三极管电流测试数据

$I_B/\mu A$	0	20	40	60	80	100
I_C/mA	0.005	0.99	2.08	3.17	4.26	5.40
I_E/mA	0.005	10.01	2.12	3.23	4.34	5.50

对三极管应用 KCL，则 3 个电极之间的电流关系应满足：

$$I_E = I_B + I_C \tag{1.2}$$

由表 1.4.1 的测试数据验证可以看出，其满足式(1.2)。由表 1.4.1 发现，实际工作过程中 I_B 一般都很小，这就使得 $I_E \approx I_C$，这在分析三极管电路中是一个非常有效的近似。

此外，在一定条件下($U_B - U_E \geqslant 0.7V$)，发射结相当于一个普通二极管，其压降约为 0.7V(硅材料)，基极电流 $I_B > 0$ 时，三极管的集电极电流与基极的电流遵循一定的对应关系，由表 1.4.1 第三列和第四列的实验数据可知 I_C 与 I_B 的比值分别为

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.08}{0.04} = 52, \quad \bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{3.17}{0.06} = 52.8$$

I_B 的微小变化会引起 I_C 较大的变化，计算可得

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_{C4} - I_{C3}}{I_{B4} - I_{B3}} = \frac{3.17 - 2.08}{0.06 - 0.04} = \frac{1.09}{0.02} = 54.5$$

计算结果表明，微小的基极电流变化，可以控制比之大数十倍至数百倍的集电极电流的变化，这就是三极管的电流放大作用。$\bar{\beta}$、β 称为电流放大系数，二者近似相等。

假若将一个信号叠加到基极，引起基极电流的变化，就可以从集电极得到 β 倍的输出信号。这是三极管放大的关键，利用较小的基极电流 I_B 得到数十倍甚至数百倍的集电极电流

I_C。此外，通过三极管内部载流子的微观运动分析，也可以得到晶体管外在宏观电流的放大原理，但限于篇幅，不再进行深入讨论，有兴趣的同学可以自行查阅相关资料。

由表 1.4.1 可知，在三极管发射结已经正偏时，其工作特性可由以下 4 条规则来说明：

(1) 当 $U_C > U_E$ 时，三极管工作于放大状态，$I_C = \beta I_B$（β 一般为 30～300）；

(2) 若 $U_C < U_E$ 时，则晶体管截止；

(3) 当 $U_C \approx U_E$ 时，晶体管工作于饱和状态；

(4) 在 $U_C > U_E$ 时，发射结相当于一个普通二极管，其压降约为 0.7V（硅材料）。

根据这 4 条规则，就可以对三极管进行初步的定性分析，但要对其进行定量的计算，还必须要了解三极管的特性曲线。三极管的特性曲线用来表示各电极间电压和电流之间的关系，它反映出三极管的性能，是分析放大电路的重要依据。特性曲线可由实验测得，也可在晶体管图示仪上直观地显示出来。

1. 输入特性曲线

三极管的输入特性曲线描述的是，在 U_{CE} 为定值时 I_B 和 U_{BE} 的关系，即

$$I_B = f(U_{BE})\Big|_{U_{CE}=常数} \tag{1.3}$$

图 1.4.3 是三极管的输入特性曲线。

由图 1.4.3 可见，输入特性有以下几个特点。

(1) 输入特性也有一个“死区”。在“死区”内，U_{BE} 虽已大于零，但 I_B 几乎仍为零。当 U_{BE} 大于某一值后，I_B 才随 U_{BE} 增加而明显增大。和二极管一样，硅晶体管的死区电压 U_T（或称为门槛电压）约为 0.5V，发射结导通电压 U_{BE} = 0.6～0.7V；锗晶体管的死区电压 U_T 约为 0.2V，导通电压约为 0.2～0.3V。

(2) 当 $U_{CE} > 1$V 以后，输入特性几乎与 $U_{CE} = 1$V 时的特性重合，因为 $U_{CE} > 1$V 后，I_B 无明显改变了。晶体管工作在放大状态时，U_{CE} 总是大于 1V 的（集电结反偏），因此常用 $U_{CE} \geqslant 1$V 的一条曲线来代表所有输入特性曲线。

2. 输出特性曲线

晶体管的输出特性曲线描述的是，在基极电流 I_B 为定值时 I_C 和 U_{CE} 的关系，即

$$I_C = f(U_{CE})\Big|_{I_B=常数} \tag{1.4}$$

图 1.4.4 是三极管的输出特性曲线，当 I_B 改变时，可得一组曲线族。由图可以看出，输出特性曲线可分饱和、放大和截止 3 个区域。

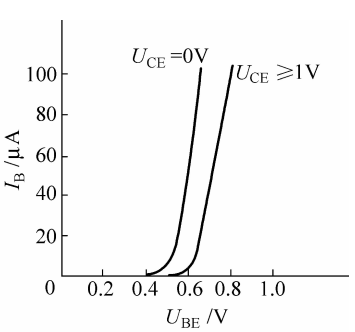

图 1.4.3　三极管的输入特性曲线

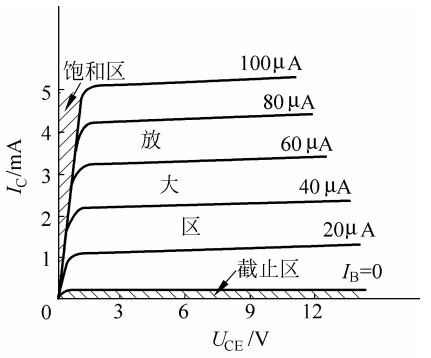

图 1.4.4　三极管输出特性曲线

(1) 截止区

$I_B=0$ 的特性曲线以下区域称为截止区。其基本特征是发射结电压小于死区电压。在这个区域中,集电结处于反偏,发射结反偏或零偏,即 $U_C>U_E\geqslant U_B$。电流 I_C 很小,近似为 0(等于反向穿透电流 I_{CEO})。工作在截止区时,三极管在电路中犹如一个断开的开关。

(2) 饱和区

特性曲线靠近纵轴的区域是饱和区,其基本特征是:发射结、集电结均处于正偏,即 $U_B>U_C>U_E$。在饱和区,I_B 增大,I_C 几乎不再增大,三极管失去放大作用。规定 $U_{CE}=U_{BE}$ 时的状态称为临界饱和状态,此时,三极管的集电极与发射极之间的压降基本为某一定值,用 U_{CES} 表示(一般情况下为 0.2～0.3V,理想情况下认为其值为 0),此时集电极临界饱和电流为

$$I_{CS}=\frac{V_{CC}-U_{CES}}{R_C}\approx\frac{V_{CC}}{R_C} \tag{1.5}$$

基极临界饱和电流为

$$I_{BS}=\frac{I_{CS}}{\beta} \tag{1.6}$$

当集电极电流 $I_C>I_{CS}$ 时,认为管子已处于饱和状态。$I_C<I_{CS}$ 时,管子处于放大状态。

三极管工作在饱和状态时,可以认为其在电路中犹如一个闭合的开关。

(3) 放大区

特性曲线近似水平直线的区域为放大区。其基本特征是:发射结正偏,集电结反偏,即 $U_C>U_B>U_E$。三极管工作在这一区域时,集电极-发射极电流与基极电流近似呈线性关系,即 I_C 的大小受 I_B 的控制,$\Delta I_C=\beta\Delta I_B$。由于电流增益的缘故,当基极电流发生微小的扰动时,集电极-发射极电流将产生较为显著的变化。由于 I_C 只受 I_B 的控制,几乎与 U_{CE} 的大小无关。特性曲线反映出恒流源的特点,即三极管可看作受基极电流控制的受控恒流源。

1.4.3 三极管的参数

在实际电路设计中,必须要根据一些条件要求选择三极管,这些条件要求对应的就是三极管的参数,这是合理选择和正确使用三极管的依据。

(1) 共发射极电流放大系数 β

β 参数分为直流和交流两种共射极电流放大系数,直流模式下有

$$\beta_{dc}=\frac{I_C}{I_B} \tag{1.7}$$

对于实际器件,β 的典型值一般在 30～300 之间,其反映了基极电流与集电极电流之间的大小关系。在器件规格说明书中,β_{dc} 通常含在参数 h_{FE} 中,其中 h_{FE} 参数是由交流混合等效模型确定的。

在交流模式下,β 的定义为

$$\beta_{ac}=\left.\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right|_{U_{CE}=常数} \tag{1.8}$$

β_{ac} 反映的是三极管交流状态时的电流放大特性,与 β_{dc} 是有区别的,且它们的数值也不完全相等,但是它们通常足够接近,因此经常相互使用。在本书中,如无专门指出,可以认为 $\beta_{ac}=\beta_{dc}=\beta$。

(2) 共基极交流电流放大系数 α

α 参数分为直流和交流两种共射极电流放大系数，直流模式下有

$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E} \tag{1.9}$$

对于实际器件，α 的典型值一般在 0.90～0.998 之间，其反映了基极电流与集电极电流之间的大小关系，反映了集电极收集电子的能力。

在交流模式下，α 的定义为

$$\alpha_{ac} = \left.\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}\right|_{U_{CB}=常数} \tag{1.10}$$

α_{ac} 表示当集电极与基极之间电压 U_{CB} 保持为常数时，集电极电流的变化量与发射极电流的变化量的对应关系。在大多数情况下，交流参数 α_{ac} 和直流参数 α_{dc} 是非常接近的，可以相互使用。在本书中，如无专门指出，可以认为 $\alpha_{ac}=\alpha_{dc}=\alpha$。

(3) 集电极最大允许电流 I_{CM}

在三极管使用过程中，当集电极电流增大时，会导致晶体管的电流放大倍数 β 下降，当 β 降至低频电流放大倍数 β 的额定倍数(通常规定为 1/2 或 1/3)时，此时的集电极电流称为集电极最大允许电流 I_{CM}。当晶体管的集电极电流达到 I_{CM} 时，晶体管虽不致损坏，但电流放大倍数已大幅度下降，放大能力会变得很差。

(4) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM}

三极管工作时，集电结上将承受较大的电流与电压的乘积，即耗散功率。耗散功率在集电结上以发热的形式表现出来。当其温度超过最高规定值时，三极管的工作性能将下降，甚至烧毁。为此，在三极管实际工作过程中，其集电结功耗不得超过 P_{CM}。

需要注意的是，大功率三极管给出的最大允许耗散功率都是在配有一定规格散热器情况下的参数。

(5) 反向击穿电压

反向击穿电压是指三极管的两个 PN 结承受的反向电压超过规定时，会发生电击，其击穿机理与二极管类似。

例 1.4　电路如图 1.4.5 所示，晶体管导通时 $U_{BE}=0.7V$，$\beta=50$。试分析 u_i 为 12V 时，BJT 的工作状态及输出电压 u_o 的值。

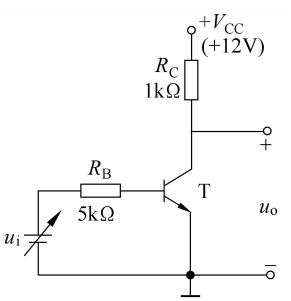

图 1.4.5　例 1.4 电路图

解　$u_i=12V>0.7V$，BJT 发射极必然导通，则 $U_{BE}=0.7V$。假设 BJT 工作于放大状态，则

$$I_B = \frac{u_i - U_{BE}}{R_B} = \frac{12-0.7}{5} = 2.26(mA)$$

$$I_C = \beta I_B = 1.13(A)$$

$$u_o = U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C < 0$$

这与假设 BJT 处于放大状态条件不符，因此 BJT 处于饱和状态，$u_o=U_{CE}\approx 0$。

$$I_C = \frac{V_{CC}-U_{CES}}{R_C} \approx \frac{V_{CC}}{R_C} = 1.2(mA)$$

例 1.5　图 1.4.6 所示的电路中，BJT 均为硅管，$\beta=30$，试判断各 BJT 的工作状态。

解　(1) 因为基极偏置电源为 +6V，大于管子的导通电压 0.7V，故管子的发射结正

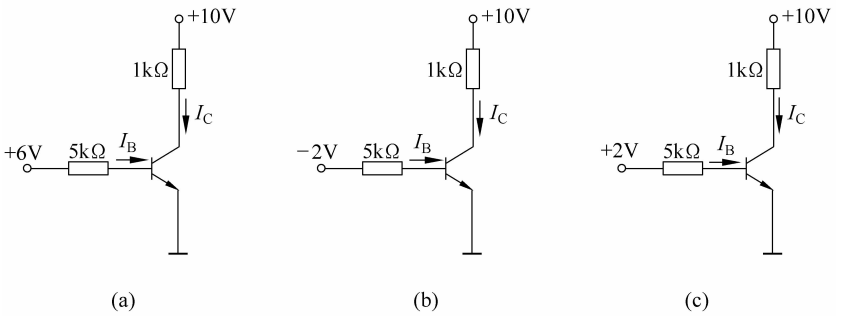

图 1.4.6　例 1.5 电路图

偏，管子导通，基极电流为

$$I_B = \frac{6-0.7}{5} = \frac{5.3}{5} = 1.06(\text{mA})$$

假设三极管工作于放大状态，则

$$I_C = \beta I_B = 30 \times 1.06 = 31.8(\text{mA})$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 10 - 31.8 \times 1 = -21.8(\text{V})$$

显然，这与假设条件不一致。因此，三极管工作于饱和状态。

(2) 因为基极偏置电源为−2V，小于管子的导通电压，管子的发射结反偏，管子截止，所以管子工作在截止区。

(3) 因为基极偏置电源为+2V，大于管子的导通电压，故管子的发射结正偏，管子导通，基极电流为

$$I_B = \frac{2-0.7}{5} = \frac{0.3}{5} = 0.26(\text{mA})$$

$$I_C = \beta I_B = 30 \times 0.26 = 7.8(\text{mA})$$

临界饱和电流为

$$I_{CS} = \frac{10 - U_{CES}}{1} \times 10 - 0.7 = 9.3(\text{mA})$$

因为 $I_C < I_{CS}$，所以管子工作在放大区。

1.5　场效应管

场效应管(field effect transistor，FET)是一种通过电场效应控制电流的电子元件。它依靠电场去控制导电沟道形状，进而控制半导体材料中某种类型载流子的沟道的导电性。场效应晶体管只依靠多子参与导电，因此一般也被称为单极型器件。场效应晶体管由 Julius Edgar Lilienfeld 于 1925 年和 Oskar Heil 于 1934 年分别发明，但是实用的器件一直到 1952 年才被制造出来(结型场效应管)。1960 年 Dawan Kahng 发明了金属氧化物半导体场效应晶体管，从而大部分代替了结型场效应管，对电子行业的发展有着深远的意义。

场效应管的种类很多，按结构可分为两大类：结型场效应管(JFET)和绝缘栅型场效应管

(IGFET)。结型场效应管又分为N沟道和P沟道两种。绝缘栅型场效应管主要指金属-氧化物-半导体场效应(metal oxide semiconductor,MOS)管。同结型场效应管一样,MOS管也分为N沟道和P沟道,但每一类又分为耗尽型和增强型两种。本书着重对MOS管进行讨论。

1.5.1　场效应管的结构与特性

绝缘栅型场效应管共有4种结构:N沟道增强型管、N沟道耗尽型管、P沟道增强型管和P沟道耗尽型管。本节重点讨论N沟道增强型MOS管。

1. N沟道增强型MOS管的结构

图1.5.1是N沟道增强型MOS管的示意图。该管以一块掺杂浓度较低的P型硅片做衬底,在衬底上通过扩散工艺形成两个高掺杂的N型区,并引出两个极作为源极S和漏极D;在P型硅表面制作一层很薄的二氧化硅(SiO_2)绝缘层,在二氧化硅表面再喷上一层金属铝,引出栅极G。这种场效应管栅极、源极、漏极之间都是绝缘的,所以称为绝缘栅型场效应管。衬底b的箭头方向是区别N沟道和P沟道的标志,当箭头指向内侧时代表为N沟道,反之为P沟道,如图1.5.1(b)、(c)所示。

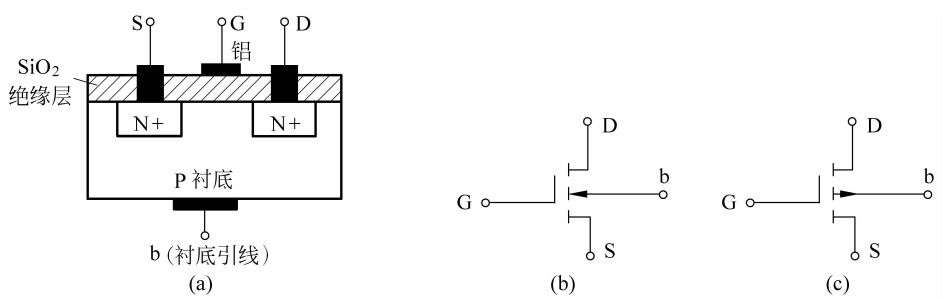

图1.5.1　N沟道增强型MOS管的结构和符号

(a) N沟道增强型MOS管结构示意图;(b) N沟道增强型MOS管符号;(c) P沟道增强型MOS管符号

图1.5.2是N沟道增强型MOS管的相应的工作电路图。工作时栅源之间加正向电源电压U_{GS},漏源之间加正向电源电压U_{DS},并且源极与衬底连接,衬底是电路中最低的电位点。

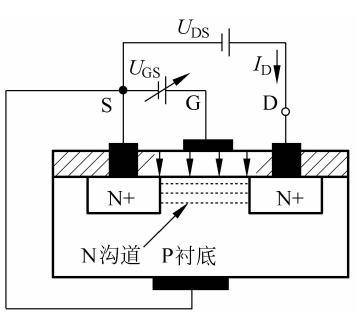

图1.5.2　N沟道增强型MOS管的工作电路图

当$U_{GS}=0$时,漏极和衬底以及源极之间形成了两个反向串联的PN结,且漏极与源极之间没有原始的导电沟道,漏极电流$I_D=0$。当U_{DS}为正向电压时,漏极与源极之间依然没有导电沟道形成,漏极电流依然为0,管子工作于截止状态。

当$U_{GS}>0$时,栅极与衬底之间产生了一个垂直于半导体表面、由栅极G指向衬底的电场。这个电场的作用是排斥P型衬底中的空穴而吸引电子到SiO_2绝缘层下表面。当U_{GS}增大到一定程度时,绝缘体和P型衬底的交界面附近积累了较多的电子,形成了N型薄层,称为N型反型层。反型层使漏极与源极之间有了一条由多子(电子)构成的导电沟道,当加上漏源电压U_{DS}之后,就会有电流I_D流过导电沟道。通常将刚刚出现漏极电

流 I_D 时所对应的栅源电压称为开启电压，用 $U_{GS(th)}$ 表示。

当 $U_{GS}>U_{GS(th)}$ 时，U_{GS} 增大，电场增强，沟道变宽，沟道电阻减小，I_D 增大；反之，U_{GS} 减小，沟道变窄，沟道电阻增大，I_D 减小。可见改变 U_{GS} 的大小，就可以控制沟道电阻的大小，从而达到控制电流 I_D 的大小。随着 U_{GS} 的增加，导电性能也跟着增强，故称为增强型。

这里应该注意的是，当 $U_{GS}<U_{GS(th)}$ 时，反型层（导电沟道）消失，$I_D=0$。只有当 $U_{GS}\geqslant U_{GS(th)}$ 时，才能形成导电沟道，并产生漏极电流 I_D。

如图 1.5.3 所示，当 $U_{GS}>U_{GS(th)}$ 且为一确定值时，漏-源电压 U_{DS} 对导电沟道产生的电压降使沟道内各点与栅极间的电压不再相等，靠近源极一端的电压最大，因此这里沟道最宽；而漏极一端电压最小，其值为 $U_{GD}=U_{GS}-U_{DS}$，因而这里沟道最薄；整个导电沟道成楔形。但当 U_{DS} 较小（$U_{GD}=U_{GS}-U_{DS}>U_{GS(th)}$）时，它对沟道的影响不大，这时只要 U_{GS} 一定，沟道电阻几乎也是一定的，所以 I_D 随 U_{DS} 增加而增加。随着 U_{DS} 的增大，靠近漏极的沟道越来越薄，当 U_{DS} 增加到使 $U_{GD}=U_{GS}-U_{DS}\leqslant U_{GS(th)}$ 时，沟道在漏极一端出现预夹断。再继续增大 U_{DS}，夹断点将向源极方向延伸。此时，U_{DS} 的增加部分几乎全部降落在夹断区，电流 I_D 不再随 U_{DS} 增大而增加，管子进入饱和区，I_D 几乎仅由 U_{GS} 决定。

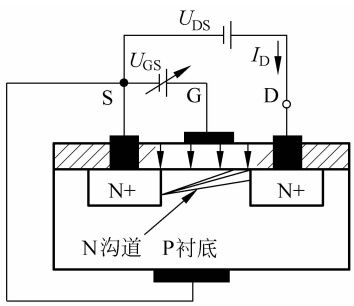

图 1.5.3 U_{GS} 对导电沟道的影响

2. N 沟道增强型 MOS 管的特性

图 1.5.4 为某一型号的 N 沟道增强型场效应管的输出特性和转移特性曲线。与三极管一样，MOS 管输出特性可分为 3 个区：可变电阻区、恒流区和截止区。

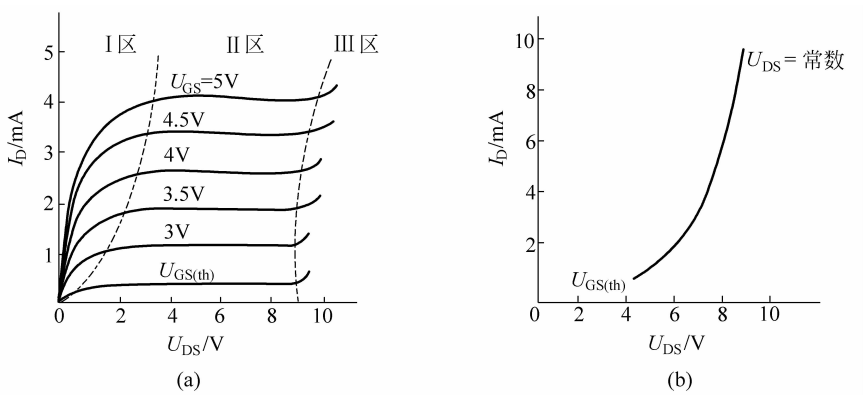

图 1.5.4 N 沟道增强型 MOS 管的特性曲线

（a）输出特性；（b）转移特性

（1）可变电阻区

图 1.5.4(a)中的Ⅰ区为可变电阻区。该区对应 $U_{GS}>U_{GS(th)}$，U_{DS} 很小，$U_{GD}=U_{GS}-U_{DS}>U_{GS(th)}$ 的情况。其基本特点是：若 U_{GS} 固定，I_D 随着 U_{DS} 的增大而线性增加，可以看成是一个电阻，对应不同的 U_{GS} 值，各条特性曲线直线部分的斜率不同，即阻值发生改变。因此该区是一个受 U_{GS} 控制的可变电阻区，工作在这个区的场效应管相当于一个压控电阻。

(2) 恒流区(亦称饱和区,放大区)

图 1.5.4(a)中的Ⅱ区为恒流区。该区对应 $U_{GS}>U_{GS(th)}$,U_{DS}较大,$U_{GD}=U_{GS}-U_{DS}<U_{GS(th)}$的情况。其基本特点是:若 U_{GS}为某一定值时,随着 U_{DS}的增大,I_D 不变,特性曲线近似为水平线,因此称为恒流区,对应于三极管放大区。

在恒流区,I_D 与 U_{GS}的关系可以近似地表示为

$$I_D = I_{DO}\left(1-\frac{U_{GS}}{U_{GS(th)}}\right)^2, \quad U_{GS}>U_{GS(th)} \tag{1.11}$$

式中,I_{DO}是 $U_{GS}=2U_{GS(th)}$时的 I_D 值。

(3) 截止区(夹断区)

截止区对应 $U_{GS}<U_{GS(th)}$的情况,如图 1.5.4(a)中的Ⅲ区。其基本特点是:由于没有产生沟道,电流 $I_D=0$,管子工作于截止状态。

此外,当 U_{DS}增大到某一值时,漏极电流 I_D 急剧增加,管子将被击穿。

1.5.2　场效应管的参数

1. 直流参数

(1) 开启电压 $U_{GS(th)}$

$U_{GS(th)}$为增强型 MOS 管参数,是指在某一固定值U_{DS}情况下,使产生漏极电流所需要的最小栅源电压值。

(2) 夹断电压 $U_{GS(off)}$

$U_{GS(off)}$为耗尽型 MOS 及结型场效应管参数,指在某一固定值 U_{DS}情况下,漏极电流为规定的微小电流(如 5μA)时栅源之间电压值。

(3) 饱和漏极电流 I_{DSS}

I_{DSS}为耗尽型 MOS 及结型场效应管参数,指在 $U_{GS}=0$ 且$|U_{DS}|>|U_P|$情况下的漏极电流。一般令$|U_{DS}|=10V$、$U_{GS}=0$ 时测出的电流就是 I_{DSS}。

2. 交流参数

(1) 低频跨导 g_m

低频跨导 g_m 反映了 U_{GS}对 I_D 控制的强弱,g_m 定义为

$$g_m = \left.\frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}\right|_{U_{DS}=常数} \tag{1.12}$$

(2) 极间电容

场效应管 3 个电极之间的等效电容为极间电容,包括栅、源间电容 C_{GS},栅、漏间电容 C_{GD}和漏源电容 C_{DS},这些电容一般为几 pF,结电容小的管子,高频性能好。极间电容的存在决定了管子的最高工作频率和工作速度。

3. 极限参数

(1) 最大漏极电流 I_{DM}

I_{DM}是指在管子正常工作时允许的漏极电流最大值。

(2) 最大耗散功率 P_{DM}

最大耗散功率 $P_{DM}=U_{DS}I_D$,耗散功率在工作中以热的形式表现出来,使管子的温度迅速上

升，如果不加以限制，很容易导致管子发生热击穿，P_{DM}的值显然受管子最高工作温度的限制。

（3）栅源击穿电压 $U_{(BR)GS}$

栅源击穿电压是指栅源间所能承受的最大反向电压。U_{GS}值超过此值时，栅源间发生雪崩击穿，漏极电流 I_D 由零开始急剧增加，造成管子损坏。

（4）漏源击穿电压 $U_{(BR)DS}$

漏源击穿电压是指漏源间能承受的最大电压。当 U_{DS}值超过 $U_{(BR)DS}$时，栅漏间发生雪崩击穿，漏极电流 I_D 开始急剧增加，造成管子损坏。

4. 其他注意事项

（1）使用场效应管时，要注意漏源电压 U_{DS}、漏源电流 I_D、栅源电压 U_{GS}及耗散功率等不能超过最大允许值。

（2）各类型场效应管在使用时，都要严格按要求接入偏置电路，要遵守场效应管偏置的极性。如结型场效应管栅源漏之间是 PN 结，N 沟道管栅极不能加正偏压，P 沟道管栅极不能加负偏压等。

（3）MOS 场效应管由于输入阻抗极高，所以在运输、储藏中必须将引出脚短路，要用金属屏蔽包装，以防止外来感应电压将栅极绝缘层击穿。尤其要注意，不能将 MOS 场效应管放入塑料盒子内，保存时最好放在金属盒内，同时用金属导线将 3 个电极短接起来。

（4）在测试焊接过程中，要求一切测试仪器、工作台、电烙铁、线路本身都必须有良好的接地，并在烙铁断开电源后再焊接栅极，以避免交流感应将栅极击穿，并按 S、D、G 极的顺序焊好之后，再去掉各极的金属短接线。

（5）从结构上看，场效应管的漏源两极是对称的，可以互相调用，但有些产品制作时已将衬底和源极在内部连在一起，因此漏源两极一般不能对换使用。

（6）注意各极电压的极性不能接错。

5. 各种场效应管特性的比较

表 1.5.1 总结列举了 6 种类型场效应管在电路中的符号、偏置电压的极性和特性曲线，读者可以通过比较予以区别。

表 1.5.1　各种场效应管的符号、转移特性及输出特性

结构类型		工作方式	图形符号	工作时所需电压极性		转移特性	输出特性
				U_{DS}	U_{GS}		
结型	N 沟道		D G S	+	−	I_D I_{DSS} $U_{GS(off)}$ O U_{GS}	I_D $U_{GS}=0$ $U_{GS}<0$ O U_{DS}
	P 沟道		D G S	−	+	$-I_D$ I_{DSS} U_{GS} O $U_{GS(off)}$	$-I_D$ $U_{GS}=0$ $U_{GS}>0$ O $-U_{DS}$