

第 1 章 半导体器件



- 了解半导体二极管、三极管的结构。
- 理解二极管的工作原理、伏安特性和主要参数。
- 理解双极型三极管的放大作用、输入和输出特性曲线及主要参数。
- 了解 MOS 场效应管的伏安特性、主要参数及其与双极型三极管的性能比较。

半导体器件是用半导体材料制成的电子器件，是构成各种电子电路最基本的核心元件。电子技术就是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。

半导体器件具有体积小、重量轻、功耗低、使用寿命长等优点，在现代工业、农业、科学技术、国防等各个领域得到了广泛的应用。

半导体二极管和三极管是最常用的半导体器件。它们的基本结构、工作原理、伏安特性和主要参数是学习电子技术和分析电子电路必不可少的基础，而 PN 结又是构成各种半导体器件的共同基础。因此，本章首先介绍半导体的导电特性、PN 结及其单向导电性，然后介绍半导体二极管、双极型三极管和绝缘栅型场效应管的基本结构、工作原理、伏安特性和主要参数，为以后的学习打下基础。

1.1 PN 结

自然界中存在着各种物质，按导电能力的强弱可分为导体、绝缘体和半导体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，主要有硅、锗、硒、砷化镓和氧化物、硫化物等。

半导体之所以被重视，是因为很多半导体的导电能力在不同的条件下有着显著的差异。例如，有些半导体如钴、锰、硒等的氧化物对温度的反应特别灵敏，环境温度升高时，它们的导电能力会明显增强。利用这种热敏特性可制成各种热敏元件。又如，有些半导体如镉、铝的硫化物和硒化物受到光照时，它们的导电

能力会变得很强；当无光照射时，又变得像绝缘体那样不导电。利用这种光敏特性可制成各种光敏元件。

更重要的是，如果在纯净的半导体中掺入微量的杂质元素，其导电能力会猛增到几千、几万甚至上百万倍。利用半导体的这种掺杂特性，可制成种类繁多的具有不同用途的半导体器件，如二极管、双极型三极管、场效应管等。

1.1.1 半导体的导电特征

常用的半导体材料是硅和锗，它们都是四价元素。纯净的半导体具有晶体结构，所以半导体又称为晶体。在这种晶体结构中，原子与原子之间构成共价键结构。纯净半导体材料在热力学温度为零度的情况下，电子被共价键束缚得很紧，没有导电能力。当温度升高时，由于热激发，一些电子获得一定能量后会挣脱束缚成为自由电子，使半导体材料具有一定的导电能力。同时在这些自由电子原来的位置上留下空位，称为空穴。空穴因失掉一个电子而带正电。由于正负电的相互吸引，空穴附近的电子会填补这个空位，于是又会产生新的空穴，又会有相邻的电子来递补，如此进行下去就形成空穴运动。由热激发产生的自由电子和空穴是成对出现的，称为电子空穴对。自由电子和空穴都称为载流子。

由此可见，半导体材料在外加电压作用下出现的电流是由自由电子和空穴两种载流子的运动形成的。这是半导体导电与金属导体导电机理上的本质区别。

在常温下，纯净半导体中自由电子和空穴的数量有限，导电能力并不很强。如果在纯净半导体中掺入某些微量杂质，其导电能力将大大增强。

在纯净半导体硅或锗中掺入磷、砷等五价元素，这类元素的原子最外层有 5 个价电子，故在构成的共价键结构中，由于存在多余的价电子而产生大量自由电子。这种半导体主要靠自由电子导电，称为电子半导体或 N 型半导体，其中自由电子为多数载流子，热激发形成的空穴为少数载流子。

在纯净半导体硅或锗中掺入硼、铝等三价元素，这类元素的原子最外层只有 3 个价电子，故在构成的共价键结构中，由于缺少价电子而形成大量空穴。这类掺杂后的半导体其导电作用主要靠空穴运动，称为空穴半导体或 P 型半导体，其中空穴为多数载流子，热激发形成的自由电子是少数载流子。

图 1-1 所示为 N 型半导体和 P 型半导体中载流子和杂质离子的示意图。图中 \oplus 表示杂质原子因提供了一个价电子而形成的正离子， \ominus 表示杂质原子因提供了一个空穴而形成的负离子。这些正、负离子不能移动，不能参与导电。

值得注意的是，无论是 P 型半导体还是 N 型半导体都是中性的，对外不显电性。



图 1-1 N 型半导体和 P 型半导体

1.1.2 PN 结及其单向导电性

采用适当工艺把 P 型半导体和 N 型半导体制作在同一基片上, 使得 P 型半导体与 N 型半导体之间形成一个交界面。由于两种半导体中载流子种类和浓度的差异, 将产生载流子的相对扩散运动, 如图 1-2 (a) 所示。多数载流子在交界面处被中和而形成空间电荷区, 这就是 PN 结。空间电荷区在 N 区一侧是正电荷区, 在 P 区一侧是负电荷区, 因此在 PN 结内存在一个内电场, 其方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区, 如图 1-2 (b) 所示。

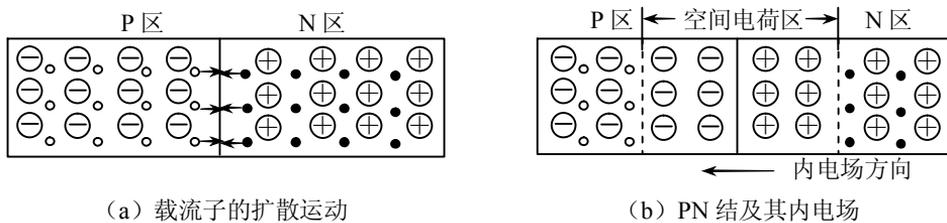


图 1-2 PN 结的形成

内电场对多数载流子的进一步扩散起阻挡作用, 但对少数载流子的运动却起到推动作用。少数载流子在电场力作用下的定向运动称为漂移运动。显然, 多子的扩散和少子的漂移是两类方向相反的运动。在一定的条件下, 漂移运动和扩散运动达到动态平衡, PN 结处于相对稳定的状态。

如果给 PN 结施加正向电压, 如图 1-3 (a) 所示, 则外电场与内电场的方向相反, 当外电场大于内电场时, 内电场的作用被抵消, PN 结变薄, 多数载流子的扩散运动增强, 形成正向电流。外加电场越强, 正向电流就越大, 这意味着 PN 结的正向电阻变小。PN 结的这种工作状态称为导通状态。

如果给 PN 结施加反向电压, 如图 1-3 (b) 所示, 则外电场与内电场的方向一致, 使内电场的作用增强, PN 结变厚, 多数载流子的扩散运动难于进行。但内电场的增强有助于少数载流子的漂移运动, 形成反向电流。由于常温下少数载流子数量很少, 因此一般情况下反向电流很小, 即 PN 结的反向电阻很大。PN 结的这种工作状态称为截止状态。

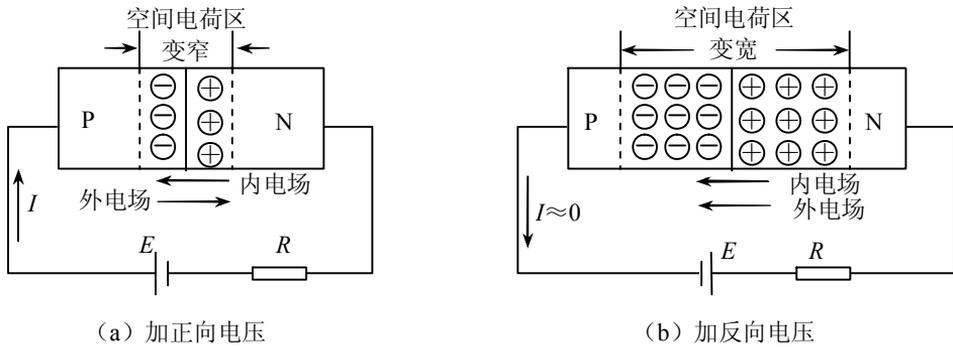


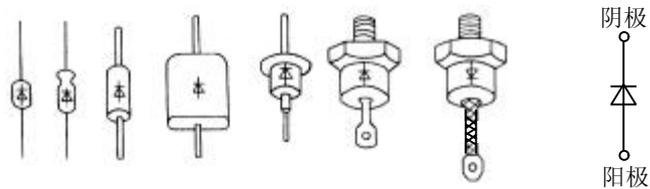
图 1-3 PN 结的单向导电性

综上所述，PN 结具有单向导电性，即 PN 结加正向电压时，正向电阻很小，PN 结导通，可以形成较大的正向电流；PN 结加反向电压时，反向电阻很大，PN 结截止，反向电流基本为零。二极管、三极管等半导体器件的工作特性都是以 PN 结的单向导电性为基础的。

1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的结构

在 PN 结两端各引出一个电极，再封装在管壳里就构成半导体二极管。从 P 区引出的电极称为阳极或正极，从 N 区引出的电极称为阴极或负极。图 1-4 (a) 所示为几种二极管的外形。二极管的符号如图 1-4 (b) 所示。



(a) 二极管的外形

(b) 二极管的符号

图 1-4 二极管的外形和符号

按结构分，二极管有点接触型和面接触型两类，如图 1-5 所示。点接触型二极管 PN 结的结面积较小，因而结电容很小，且不能通过较大电流，但其高频性能好，故一般适用于高频和小功率电路的工作，也可用于数字电路中作开关元件。

面接触型二极管的结面积较大，允许通过较大电流，但结电容较大，工作频率较低，适用于整流电路。

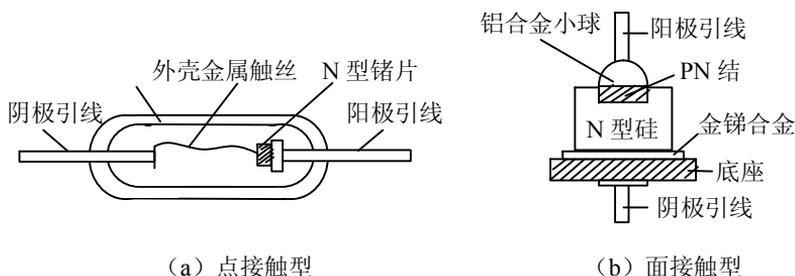


图 1-5 二极管的结构类型

1.2.2 半导体二极管的伏安特性

由于二极管内部是一个 PN 结，因此也具有单向导电性。实际二极管的伏安特性如图 1-6 所示。

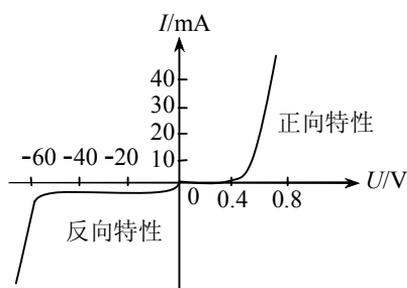


图 1-6 二极管的伏安特性

1. 正向特性

当二极管承受的正向电压（又称正向偏置）很低时，还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子运动的阻挡作用，二极管的正向电流非常小。这一区域称为死区。通常硅二极管的死区电压约为 0.5V ，锗二极管的死区电压约为 0.2V 。

当二极管的正向电压超过死区电压后，PN 结内电场被抵消，正向电流明显增加。并且随着正向电压增大，电流迅速增大，二极管的正向电阻变得很小。当二极管充分导通后，二极管的正向压降基本维持不变，称为正向导通电压。硅二极管的正向导通电压约为 $0.6\sim 0.8\text{V}$ ，锗二极管的正向导通电压约为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。这一区域称为正向导通区。

2. 反向特性

当二极管承受反向电压（又称反向偏置）时，由于只有少数载流子的漂移运动，因此，形成的反向电流极小。正常情况下，硅二极管的反向电流一般在几微安以下，锗二极管的反向电流较大，一般在几十至几百微安。这一区域称为反向截止区。

当反向电压增加到某一数值时，在强大的外电场力作用下，获得足够能量的载流子高速运动将其他被束缚的电子撞击出来。这种撞击的连锁反应，使二极管中的电子与空穴数目急剧增加，造成反向电流突然增大，这种现象称为反向击穿。击穿时对应的电压称为反向击穿电压。这一区域称为反向击穿区。由于二极管发生反向击穿时，反向电流会急剧增大，如不加以限制，将造成二极管永久性损坏，失去单向导电性。

1.2.3 半导体二极管的主要参数

在使用各种半导体器件时，要根据它们的实际工作条件确定它们的参数，然后从相应的半导体器件手册中查找出合适的半导体器件型号。

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期工作时允许通过的最大正向平均电流。点接触型二极管的最大整流电流一般在几十毫安以下，面接触型二极管的最大整流电流较大，可达上百毫安。实际工作时，管子通过的电流不应超过这个数值，否则将导致管子过热而损坏。

2. 最高反向工作电压 U_{DRM}

最高反向工作电压是保证二极管不被击穿所允许的最高反向电压。为安全起见，一般最高反向工作电压为反向击穿电压的 $1/2 \sim 2/3$ 。点接触型二极管的最高反向工作电压为几十伏特，面接触型二极管的最高反向工作电压可达数百伏特。

3. 最大反向电流 I_{RM}

最大反向电流是指二极管在常温下承受最高反向工作电压时的反向电流。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，利用它的单向导电性，可组成整流、检波、限幅、钳位等电路，还可用它构成其他元件或电路的保护电路，以及在脉冲与数字电路中作为开关元件等。

在进行电路分析时，一般可将二极管视为理想元件，即认为其正向电阻为零，正向导通时为短路特性，正向压降忽略不计；反向电阻为无穷大，反向截止时为

开路特性，反向漏电流忽略不计。理想二极管的电路模型如图 1-7 所示。



图 1-7 理想二极管的电路模型

例 1-1 在图 1-8 所示的电路中，已知输入端 A 的电位 $U_A = 3\text{V}$ ， B 的电位 $U_B = 0\text{V}$ ，电阻 R 接 -12V 电源，求输出端 F 的电位 U_F 。

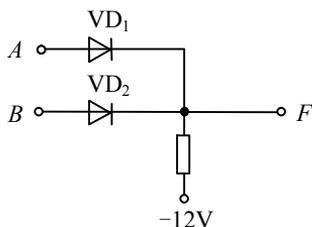
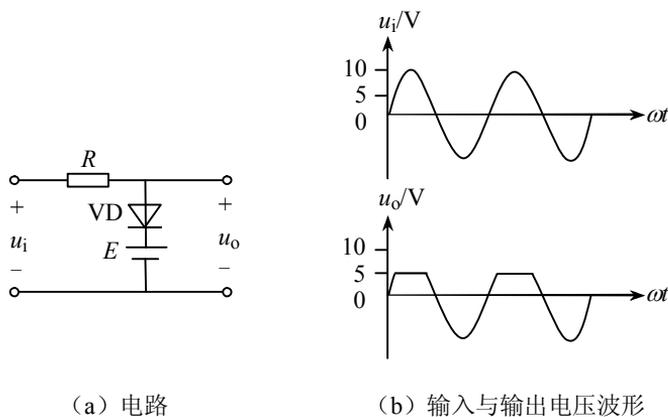


图 1-8 例 1-1 的电路

解 因为 $U_A > U_B$ ，所以二极管 VD_1 优先导通，设二极管为理想元件，则输出端 F 的电位为 $U_F = U_A = 3\text{V}$ 。当 VD_1 导通后， VD_2 上加的是反向电压， VD_2 因而截止。

在这里，二极管 VD_1 起钳位作用，把 F 端的电位钳在 3V ； VD_2 起隔离作用，把输入端 B 和输出端 F 隔离开来。

例 1-2 在图 1-9 (a) 所示的电路中，已知输入电压 $u_i = 10\sin(\omega t)\text{V}$ ，电源电动势 $E = 5\text{V}$ ，二极管为理想元件，试画出输出电压 u_o 的波形。



(a) 电路

(b) 输入与输出电压波形

图 1-9 例 1-2 的图

解 根据二极管的单向导电特性可知，当 $u_i \leq 5\text{V}$ 时，二极管 VD 截止，相当于开路，因电阻 R 中无电流流过，故输出电压与输入电压相等，即 $u_o = u_i$ ；当 $u_i > 5\text{V}$ 时，二极管 VD 导通，相当于短路，故输出电压等于电源电动势，即 $u_o = E = 5\text{V}$ 。所以，在输出电压 u_o 的波形中，5V 以上的波形均被削去，输出电压被限制在 5V 以内，波形如图 1-9 (b) 所示。在这里，二极管组成了限幅电路。

1.3 特殊二极管

除了上述普通二极管外，还有一些特殊二极管，如稳压二极管、发光二极管、光电二极管等。

1.3.1 稳压管

1. 稳压管的稳压作用

稳压管是一种特殊工艺制成的面接触型硅二极管。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，故称为稳压管。

稳压管的伏安特性和普通二极管的伏安特性基本相似，主要区别是稳压管的反向击穿区特性曲线比普通二极管更陡。稳压管的伏安特性曲线及电路符号如图 1-10 所示。

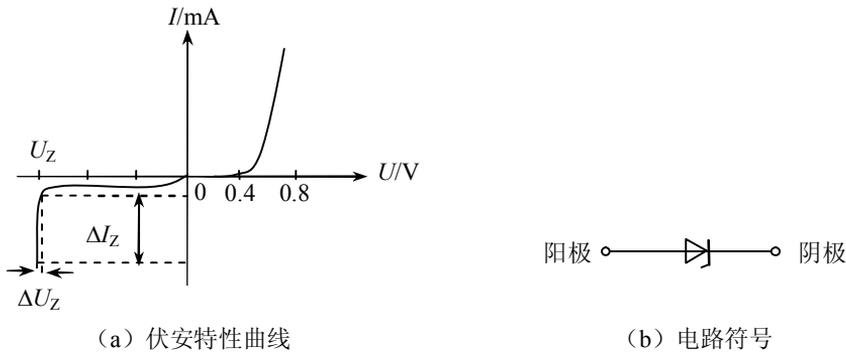


图 1-10 稳压管的伏安特性曲线及电路符号

稳压管工作于反向击穿区。从稳压管的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，稳压管反向击穿。此后，电流虽然在很大范围内变化，但稳压管两端的电压变化很小。利用这一特性，稳压管在电路中能起到稳压作用。

稳压管与一般二极管不一样，它的反向击穿是可逆的。当去掉反向电压之后，

稳压管又恢复正常。

值得注意的是，如果稳压管的反向电流超过允许范围，稳压管会因过热而损坏。所以，与稳压管配合的电阻要适当，才能起稳压作用。

2. 稳压管的主要参数

稳压管的主要参数如下：

(1) 稳定电压 U_Z 。稳定电压就是稳压管在正常工作下管子两端的电压。通常，各种手册中所列的数据都是在一定条件（工作电流、温度）下的数值，即使是同一型号的稳压管，由于工艺方面和其他原因，稳压值也有一定的分散性。例如 2CW18 稳压管的稳压值为 10~12V。

(2) 稳定电流 I_Z 。就是指在稳压管两端加稳定电压时通过的电流值。稳压管的稳定电流只是一个作为依据的参考数值，设计选用时要根据具体情况（例如工作电流的变化范围）来考虑。但对各种型号的稳压管，都规定有一个最大稳定电流 I_{ZM} 。

(3) 动态电阻 r_Z 。指稳压管在稳定工作范围内，管子两端电压的变化量与相应电流的变化量之比。即：

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

由图 1-10 可见，稳压管的 r_Z 越小，稳压性能越好。

(4) 额定功率 P_Z 和最大稳定电流 I_{ZM} 。额定功率 P_Z 是在稳压管允许结温下的最大功率损耗。最大稳定电流 I_{ZM} 是指稳压管允许通过的最大反向电流。它们之间的关系是：

$$P_Z = U_Z I_{ZM}$$

稳压管在电路中的主要作用是稳压和限幅，也可和其他电路配合构成欠压或过压保护、报警环节等。

例 1-3 在图 1-11 所示的电路中，已知稳压管 VD_Z 的参数为： $U_Z = 12\text{V}$ ， $I_Z = 5\text{mA}$ ， $I_{ZM} = 18\text{mA}$ ，负载电阻 $R_L = 2\text{k}\Omega$ ，要求当输入电压 U_i 由正常值发生 $\pm 20\%$ 的波动时，输出电压 U_o 基本不变。试确定电阻 R 和输入电压 U_i 的正常值。

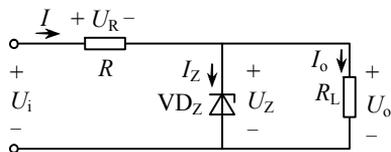


图 1-11 例 1-3 的图

解 负载电阻 R_L 两端的电压 U_o 就是稳压管两端的电压 U_Z 。当 U_i 发生波动时，必然使限流电阻 R 上的压降和 U_o 发生变动，从而使通过稳压管的电流变动。但只要通过稳压管的电流在 $I_Z \sim I_{ZM}$ 范围内变动，即可认为 U_Z 即 U_o 基本上不变。

当输入电压达到上限时，流过稳压管的电流为最大值 I_{ZM} ，因此有：

$$I = I_{ZM} + I_o = I_{ZM} + \frac{U_Z}{R_L} = 18 + \frac{12}{2} = 24 \quad (\text{mA})$$

$$U_i + 0.2U_i = U_R + U_Z = IR + U_Z = 24R + 12$$

$$1.2U_i = 24R + 12 \quad \text{①}$$

当输入电压降为下限时，流过稳压管的电流应为 I_Z ，于是有：

$$I = I_Z + I_o = I_Z + \frac{U_Z}{R_L} = 5 + \frac{12}{2} = 11 \quad (\text{mA})$$

$$U_i - 0.2U_i = U_R + U_Z = IR + U_Z = 11R + 12$$

$$0.8U_i = 11R + 12 \quad \text{②}$$

联立①、②两式解得：

$$U_i = 26 \text{ V}$$

$$R = 0.8 \text{ k}\Omega$$

1.3.2 发光二极管

发光二极管的结构与普通二极管相似，但发光二极管不是由硅和锗材料构成，而是用半导体砷化镓、磷化镓等材料制成的 PN 结构成。

当发光二极管的 PN 结加上正向电压时，电子与空穴复合过程以光的形式放出能量。不同材料制成的发光二极管会发出不同颜色的光。图 1-12 (a) 所示为发光二极管的电路符号。图 1-12 (b) 所示为发光二极管正向导通发光的电路。

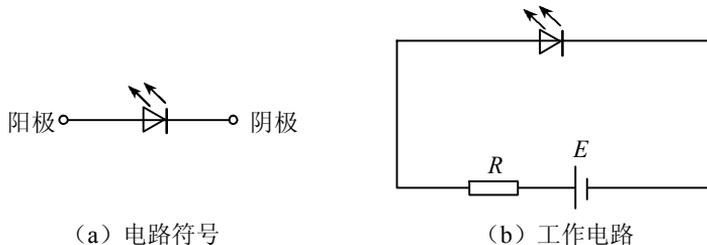


图 1-12 发光二极管的电路符号及其工作电路

发光二极管具有亮度高、清晰度高、电压低（1.5~3V）、反应快、体积小、可靠性高、寿命长等特点，是一种很有用的半导体器件，常用于信号指示、数字和字符显示。

1.3.3 光电二极管

光电二极管又称为光敏二极管。光电二极管的符号如图 1-13 所示，其工作原理恰好与发光二极管相反。当光线照射到光电二极管的 PN 结时，能激发更多的电子，使之产生更多的电子空穴对，从而提高了少数载流子的浓度。在 PN 结两端加反向电压时反向电流会增加，反向电流的大小与光的照度成正比，所以光电二极管正常工作时所加的电压为反向电压。为使光线能照射到 PN 结上，在光电二极管的管壳上设有一个小的通光窗口。



图 1-13 光电二极管的电路符号

光电二极管应用广泛，如冲床安全保护装置就是光电二极管应用的具体例子。把光电二极管安装在冲床工件的前面。正常时有光照射到光电二极管上，光电二极管有光电流，冲床可以启动，当操作人员的手未离开工件而将光路挡住时，光电二极管无光电流，发出禁止启动冲床的信号，起到安全保护作用。

光电二极管可用于光的测量。当制成大面积光电二极管时，能将光能直接转换成电能，可当作一种电源，称为光电池。

1.4 双极型三极管

双极型三极管又称为半导体三极管或晶体三极管，常简称为晶体管或三极管，是一种重要的半导体器件，是放大电路和开关电路的基本元件之一。

1.4.1 三极管的结构及类型

三极管有 3 个管脚，图 1-14 所示是常见的三极管封装外形。三极管的种类很多，按工作频率分有高频管和低频管；按耗散功率分有大、中、小功率管；按半导体材料分有硅管和锗管等。耗散功率不同的三极管，体积及封装形式也不同。近年来生产的小、中功率管多采用硅酮塑料封装；大功率管采用金属封装，通常制成扁平形状，并有螺钉安装孔。有的大功率管制成螺栓形状，这样能使其外壳和散热器连成一体，便于散热。

三极管的结构是由两个 PN 结构成。目前最常见的有平面型和合金型两类，如图 1-15 所示。硅管主要是平面型，锗管都是合金型。

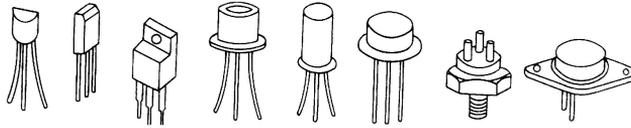


图 1-14 常见三极管的外形

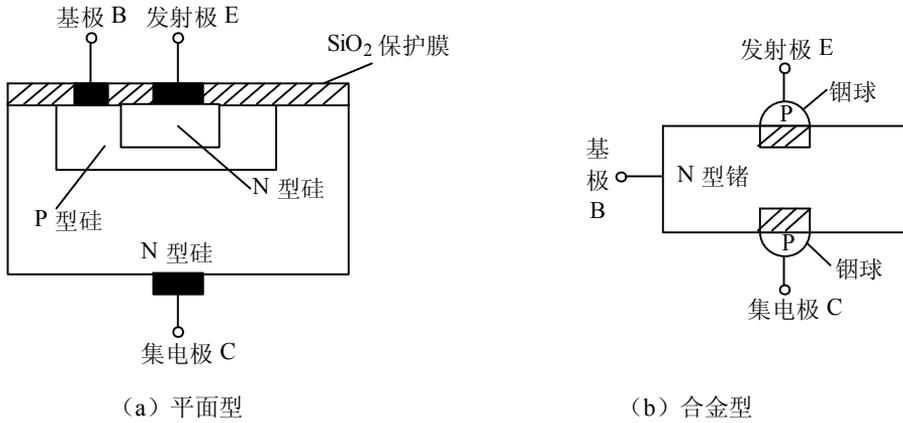


图 1-15 三极管的结构

不论平面型或合金型，都分成 NPN 或 PNP 三层，因此又把三极管分为 NPN 型和 PNP 型两种类型。当前国内生产的硅晶体管多为 NPN 型（3D 系列），锗晶体管多为 PNP 型（3A 系列）。图 1-16 所示分别为两种三极管的结构示意图和电路符号。两种三极管符号的区别是发射极的箭头方向不同，该箭头方向表示发射结加正向电压时的电流方向。

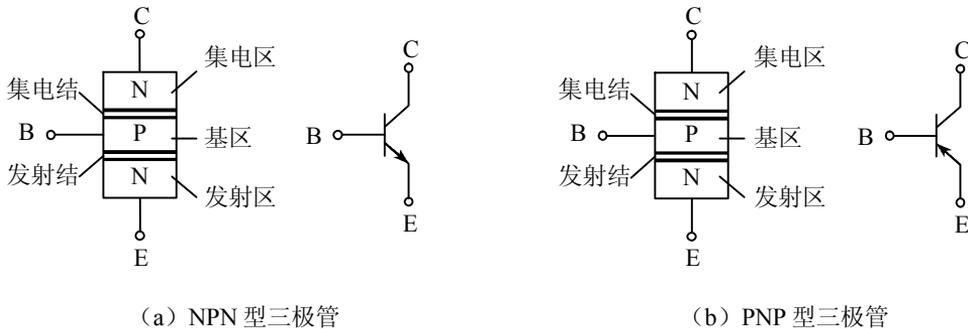


图 1-16 三极管的结构示意图和电路符号

不论何种类型的三极管，其内部均有发射区、基区和集电区 3 个区，其中基

区较另两个区要薄得多，且掺杂浓度也低得多。这三个区分别引出发射极 E、基极 B 和集电极 C 这 3 个电极。两个 PN 结分别为发射区与基区之间的发射结和集电区与基区之间的集电结，集电结面积较发射结面积要大。

NPN 型和 PNP 型三极管工作原理相似，不同之处仅在于使用时工作电源极性相反而已。由于应用中采用 NPN 型三极管较多，所以下面以 NPN 型三极管为例进行分析讨论，所得结论对于 PNP 型管同样适用。

1.4.2 三极管的电流分配和电流放大作用

三极管在电路中工作时，两个 PN 结上的电压可能是正向电压，也可能是反向电压。根据两个 PN 结上电压正反向的不同，管内电流的流动与分配便有很大的不同，由此而导致其性能上有显著的差别。为了使三极管具有放大作用，必须使发射结加正向电压，集电结加反向电压，如图 1-17 所示。

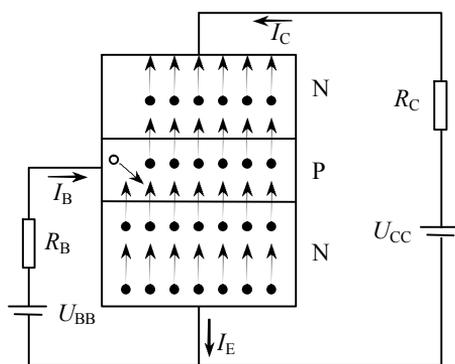


图 1-17 三极管中载流子的运动情况

由于发射结承受的正向电压抵消了发射结内电场，发射区的多数载流子（自由电子）不断向基区扩散，形成发射极电流 I_E 。因基区很薄，掺杂浓度很低，且 $U_{CC} > U_{BB}$ ，在强大的外电场作用下，扩散到基区的自由电子绝大部分穿过集电结流向集电极，形成集电极电流 I_C ，只有极少部分电子与基区的空穴复合形成基极电流 I_B 。3 个电极的电流满足如下关系式：

$$I_E = I_C + I_B$$

且 I_B 与 I_E 、 I_C 相比小得很多，实验表明 I_C 比 I_B 大数十至数百倍，因而有：

$$I_C \approx I_E \gg I_B$$

I_B 虽然很小，但对 I_C 有控制作用， I_C 随 I_B 的改变而改变，即基极电流较小的变化可以引起集电极电流较大的变化，表明基极电流对集电极具有小量控制大量的作用，这就是三极管的电流放大作用。

综上所述，三极管 3 个电极的电流分配关系和电流放大作用是由其内在特性所决定的。三极管能够起电流放大作用的外部条件是发射结正向偏置，集电结反向偏置，即：

$$|U_{CE}| > |U_{BE}|$$

由于三极管内部自由电子和空穴都参与导电，属双极型电流控制器件，故亦称为双极型三极管。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， U_{CE} 和 U_{BE} 都是负值。

1.4.3 三极管的特性曲线

三极管的特性曲线是用来表示三极管各电极电压与电流之间相互关系的，是分析三极管各种电路的重要依据。各种三极管的特性曲线形状相似，但由于种类不同，数据差异很大，使用时可查阅有关半导体器件手册或用晶体管特性图示仪直接观察，也可用图 1-18 所示的实验电路测量得到。

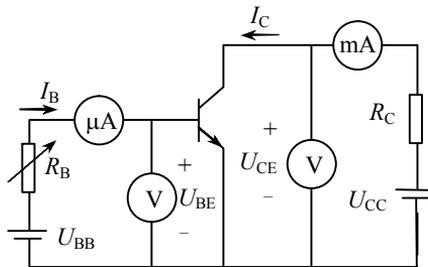


图 1-18 测量三极管特性曲线的实验电路

1. 输入特性曲线

输入特性曲线是指当三极管的集电极与发射极间所加的电压 U_{CE} 为常数时，基极和发射极间电压 U_{BE} 与基极电流 I_B 之间的关系曲线，即：

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

一般情况下，当 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 时，就能保证集电结处于反向偏置，可以把发射区扩散到基区的电子中的绝大部分拉入集电区。此时，再增大 U_{CE} 对 I_B 影响甚微，也即 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 的输入特性曲线基本上是重合的。所以，半导体器件手册中通常只给出一条 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 时三极管的输入特性曲线，如图 1-19 所示。

由图可见，三极管的输入特性曲线与二极管的伏安特性曲线很相似，也存在一段死区。硅管的死区电压约为 0.5V ，锗管的死区电压约为 0.2V 。在正常导通时，硅管的 U_{BE} 约在 $0.6\sim 0.8\text{V}$ 之间，而锗管的 U_{BE} 约在 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 之间。

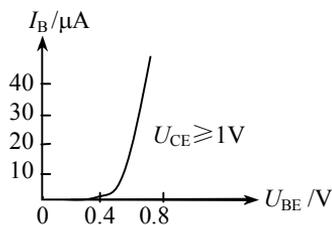


图 1-19 三极管的输入特性曲线

2. 输出特性曲线

输出特性曲线是指当三极管基极电流 I_B 为常数时，集电极电流 I_C 与集电极和发射极间电压 U_{CE} 之间的关系曲线，即：

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

I_B 的取值不同，得到的输出特性曲线也不同。所以，三极管的输出特性曲线是一族曲线，如图 1-20 所示。根据三极管的工作状态不同，可将输出特性曲线分为三个区域：

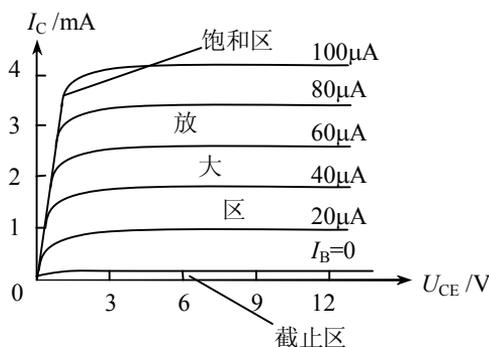


图 1-20 三极管的输出特性曲线

(1) 放大区。放大区是输出特性曲线中近似平行于横轴的曲线族部分。当 U_{CE} 超过一定数值后 (1V 左右)， I_C 的大小基本上与 U_{CE} 无关，呈现恒流特性。在放大区， I_C 与 I_B 成正比，即 $I_C = \beta I_B$ ，随 I_B 增加 I_C 也增加，三极管具有电流放大作用。如前所述，三极管在放大状态下，发射结处于正向偏置，集电结处于反向偏置。

(2) 截止区。 $I_B = 0$ 这条曲线及以下的区域称为截止区。在此区域内， $I_C = I_{CEO} \approx 0$ ，集电极和发射极间只有微小的反向电流，近似于断开状态。对 NPN 硅管， $U_{BE} < 0.5 \text{ V}$ 时即已开始截止。为了使三极管可靠截止，通常给发射结加上

反向偏置电压，即 $U_{BE} < 0V$ 。这样，发射结和集电结都处于反向偏置，三极管处于截止状态。

(3) 饱和区。靠近输出特性曲线纵坐标轴曲线上升部分所对应的区域称为饱和区。在饱和区， I_C 不再随 I_B 的增大而成比例地增大，三极管失去线性放大作用。饱和时的 I_C 称为集电极饱和电流，用 I_{CS} 表示，饱和时的集电极和发射极间电压称为集电极和发射极间饱和电压，用 U_{CES} 表示。 U_{CES} 很小，约为 $0.3V$ 。一般认为 $U_{CES} = 0V$ ，集电极和发射极间相当于接通状态。在饱和状态下， $|U_{BE}| > |U_{CE}|$ ，即发射结和集电结均为正向偏置。

1.4.4 三极管的主要参数

1. 电流放大系数

(1) 动态（交流）电流放大系数 β 。指 U_{CE} 为定值时，集电极电流变化量 ΔI_C 与基极电流变化量 ΔI_B 之比，即：

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

(2) 静态（直流）电流放大系数 $\bar{\beta}$ 。表示在无交流信号输入时，集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 的比值，即：

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

β 与 $\bar{\beta}$ 虽含义不同，但在常用的工作范围内两者数值差别很小，一般不作严格区分。常用小功率三极管的 β 值在 $50 \sim 200$ 之间，大功率管的 β 值一般较小。选用三极管时应注意， β 太小的管子放大能力差，而 β 太大则管子的热稳定性较差。

2. 极间反向电流

(1) 集电极与基极间反向饱和电流 I_{CBO} 。指发射极开路时，集电结在反向偏置作用下，集电极与基极间的反向电流。它是由少数载流子漂移形成的。三极管的 I_{CBO} 越小越好。在室温下，小功率硅管的 I_{CBO} 小于 $1\mu A$ ，而小功率锗管的 I_{CBO} 则在 $10\mu A$ 左右。

(2) 穿透电流 I_{CEO} 。指在基极开路时，集电结处于反向偏置、发射结处于正向偏置的情况下，集电极与发射极间的反向电流。 I_{CEO} 中除含有由集电区的少数载流子（空穴）漂移形成的 I_{CBO} 外，还有从发射区的多数载流子（电子）扩散形成的电流 $\bar{\beta} I_{CBO}$ ，即：

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

I_{CBO} 、 I_{CEO} 受温度影响很大，它们均随温度升高而增大，造成三极管工作不稳

定。 I_{CEO} 是 I_{CBO} 的 $(1 + \bar{\beta})$ 倍, 且 $\bar{\beta}$ 值也随温度升高而增大, 因此 I_{CEO} 对三极管的影响更大。 I_{CEO} 的大小是判别三极管质量好坏的重要参数, 一般希望 I_{CEO} 越小越好。

3. 极限参数

(1) 集电极最大允许电流 I_{CM} 。三极管的集电极电流超过一定数值时, 其 β 值会下降, 规定 β 值下降至正常值的 $2/3$ 时的集电极电流为集电极最大允许电流 I_{CM} 。使用时如果 $I_C > I_{CM}$, 除了使 β 值显著下降外, 还有可能使管子损耗过大导致三极管损坏。

(2) 反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。基极开路时, 集电极与发射极之间的最大允许电压, 称为集电极与发射极间的反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。当三极管的 U_{CE} 大于 $U_{(BR)CEO}$ 时, 管子的电流由很小的 I_{CEO} 突然剧增, 表示管子已被反向击穿, 造成管子损坏。 $U_{(BR)CEO}$ 常称为管子的耐压, 使用时, 应根据电源电压 U_{CC} 选取 $U_{(BR)CEO}$, 一般应使 $U_{(BR)CEO} \geq (2 \sim 3)U_{CC}$ 。

(3) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 。集电极电流流经集电结时, 要产生功率损耗, 使集电结发热, 当结温超过一定数值后, 将导致管子性能变坏, 甚至烧毁。为了使管子结温不超过允许值, 规定了集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 。 P_{CM} 与 I_C 、 U_{CE} 的关系为:

$$P_{CM} = I_C U_{CE}$$

1.5 场效应晶体管

场效应晶体管是一种电压控制型半导体器件, 它具有输入电阻高 (可达 $10^9 \sim 10^{14} \Omega$, 而晶体管的输入电阻仅有 $10^2 \sim 10^4 \Omega$)、噪声低、热稳定性好、抗辐射能力强、耗电省等优点。目前场效应晶体管已广泛地应用于各种电子电路中。

场效应管按其结构的不同分为结型和绝缘栅型两种。其中绝缘栅型由于制造工艺简单, 便于实现集成电路, 因此发展很快。本书仅介绍绝缘栅型场效应管。

1.5.1 绝缘栅型场效应管的结构

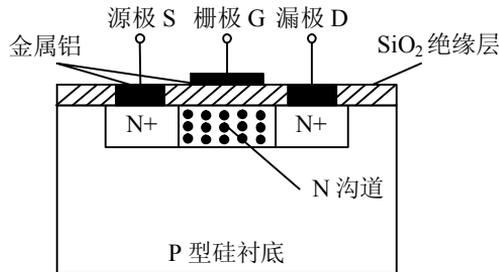
根据导电沟道的不同, 绝缘栅型场效应管可分为 N 型沟道和 P 型沟道两类。图 1-21 (a) 所示为 N 沟道绝缘栅型场效应管的结构示意图。它是用一块杂质浓度较低的 P 型薄硅片作衬底, 在上面扩散两个杂质浓度很高的 N+ 区, 分别用金属铝各引出一个电极, 称为源极 S 和漏极 D。在半导体表面覆盖一层二氧化硅 (SiO_2) 绝缘层, 在漏极和源极之间的绝缘层上也引出一个电极, 称为栅极 G。

因为栅极和其他电极及硅片之间是绝缘的, 所以称为绝缘栅场效应管。又由

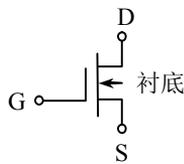
于它是由金属、氧化物和半导体所构成，所以又称为金属—氧化物—半导体场效应管（MOSFET），简称 MOS 管。正因为栅极是绝缘的，所以 MOS 管的栅极电流几乎为零，输入电阻 R_{GS} 很高，可达 $10^{14}\Omega$ 。

如果在制造 MOS 管时，在 SiO_2 绝缘层中掺入大量的正离子产生足够强的内电场，使得 P 型衬底的硅表层的多数载流子空穴被排斥开，从而感应出很多的负电荷，使漏极与源极之间形成 N 型导电沟道，如图 1-21 (a) 所示。这样，即使栅极和源极之间不加电压 ($U_{GS} = 0$)，漏极和源极之间已经存在原始导电沟道，这种场效应管称为耗尽型场效应管。N 沟道耗尽型场效应管的电路符号如图 1-21 (b) 所示。

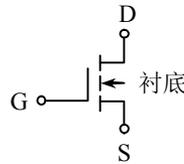
如果在 SiO_2 绝缘层中没有掺入正离子，或掺入的正离子数量较少而不足以形成原始导电沟道，只有在栅极和源极之间加一个正电压，即 $U_{GS} > 0$ 时，才能形成导电沟道。这种场效应管称为增强型场效应管。N 沟道增强型场效应管的电路符号如图 1-21 (c) 所示。



(a) N 沟道绝缘栅型场效应管的结构



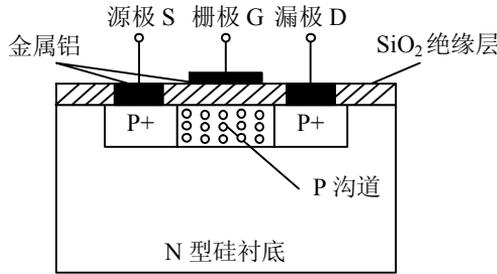
(b) N 沟道耗尽型场效应管的符号



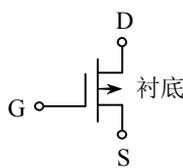
(c) N 沟道增强型场效应管的符号

图 1-21 N 沟道绝缘栅型场效应管的结构和电路符号

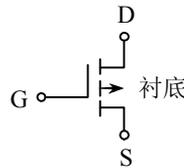
如果在制作场效应管时采用 N 型硅片作衬底，漏极和源极为 P+型，则导电沟道为 P 型，如图 1-22 (a) 所示。P 沟道耗尽型场效应管和 P 沟道增强型场效应管的电路符号分别如图 1-22 (b) 和 (c) 所示。



(a) P 沟道绝缘栅型场效应管的结构



(b) P 沟道耗尽型场效应管的符号



(c) P 沟道增强型场效应管的符号

图 1-22 P 沟道绝缘栅型场效应管的结构和电路符号

N 沟道场效应管与 P 沟道场效应管的工作原理是一样的，只是两者电源极性
及电流方向相反而已。这和 NPN 型与 PNP 型晶体管的电源极性及电流方向相反
的道理是相同的。

无论是 N 沟道场效应管还是 P 沟道场效应管，都只有一种载流子导电，均为
单极型电压控制器件。

1.5.2 绝缘栅型场效应管的工作原理和特性曲线

下面以 N 沟道场效应管为例说明场效应管的工作原理。

在 U_{DS} 为常数的条件下，漏极电流 I_D 与栅极和源极间的电压 U_{GS} 之间的关
系曲线，称为场效应管的转移特性。在 U_{GS} 为常数的条件下，漏极电流 I_D 与漏极
和源极间的电压 U_{DS} 之间的关系曲线，称为场效应管的漏极（输出）特性。

1. 耗尽型场效应管

图 1-23 (a) 是 N 沟道耗尽型场效应管的转移特性曲线。耗尽型场效应管存
在原始导电沟道，在 $U_{GS} = 0$ 时漏极和源极之间就可以导电。这时在外加漏、源
电压 U_{DS} 的作用下，流过场效应管的漏极电流称为漏极饱和电流 I_{DSS} 。当 $U_{GS} > 0$
时，沟道内感应出的负电荷增多，使导电沟道加宽，沟道电阻减小， I_D 增大；当
 $U_{GS} < 0$ 时，会在沟道内产生出正电荷与原始负电荷复合，使沟道变窄，沟道电
阻增大， I_D 减小；当 U_{GS} 达到一定负值时，导电沟道内的载流子全部复合耗尽，

沟道被夹断, $I_D = 0$, 这时的 U_{GS} 称为夹断电压 $U_{GS(off)}$ 。

图 1-23 (b) 为 N 沟道耗尽型场效应管的漏极特性曲线。按场效应管的工作情况可将漏极特性曲线分为两个区域。在虚线左边的区域内, 漏、源电压 U_{DS} 相对较小, 漏极电流 I_D 随 U_{DS} 的增加而增加, 输出电阻 $r_o = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D}$ 较小, 且可以通过改变栅、源电压 U_{GS} 的大小来改变输出电阻 r_o 的阻值, 所以这一区域称为可变电阻区。在虚线右边的区域内, 当栅、源电压 U_{GS} 为常数时, 漏极电流 I_D 几乎不随漏、源电压 U_{DS} 的变化而变化, 特性曲线趋于与横轴平行, 输出电阻 r_o 很大, 在栅、源电压 U_{GS} 增大时, 漏极电流 I_D 随 U_{GS} 线性增大, 所以这一区域称为放大区。

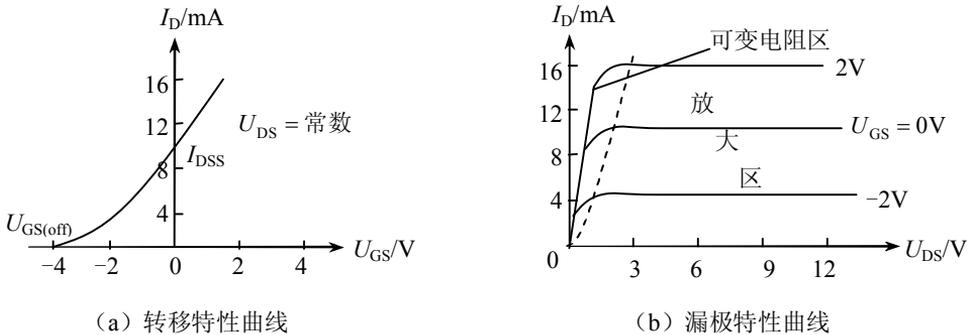


图 1-23 N 沟道耗尽型场效应管的特性曲线

2. 增强型场效应管

图 1-24 (a) 是 N 沟道增强型场效应管的转移特性。增强型场效应管不存在原始导电沟道, 在 $U_{GS} = 0$ 时场效应管不能导通, $I_D = 0$ 。如果在栅极和源极之间加一正向电压 U_{GS} , 在 U_{GS} 的作用下, 会产生垂直于衬底表面的电场。P 型衬底与 SiO_2 绝缘层的界面将感应出负电荷层, 随着 U_{GS} 的增加, 负电荷的数量也增多, 当积累的负电荷足够多时, 使两个 N+ 区沟通, 形成导电沟道, 漏、源极之间便有 I_D 出现。在一定的漏、源电压 U_{DS} 下, 使管子由不导通转为导通的临界栅、源电压称为开启电压, 用 $U_{GS(th)}$ 表示。当 $U_{GS} < U_{GS(th)}$ 时, $I_D = 0$; 当 $U_{GS} > U_{GS(th)}$ 时, 随 U_{GS} 的增加 I_D 也随之增大。

图 1-24 (b) 为 N 沟道增强型场效应管的漏极特性曲线, 它与耗尽型场效应管的漏极特性曲线相似。

综上所述, 场效应管的漏极电流 I_D 受栅、源电压 U_{GS} 的控制, 即 I_D 随 U_{GS} 的变化而变化, 所以场效应管是一种电压控制器件。

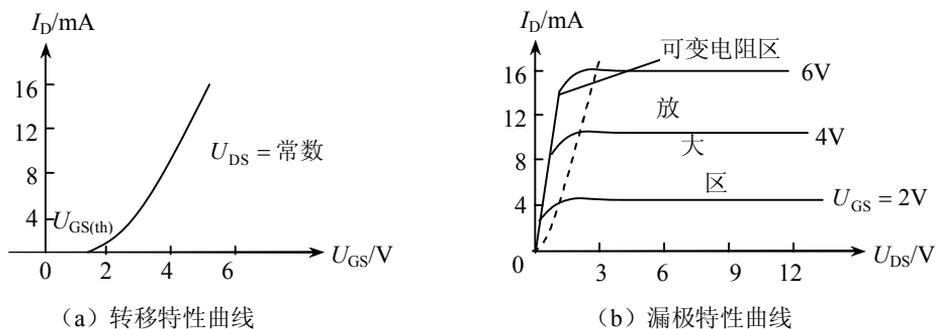


图 1-24 N 沟道增强型场效应管的特性曲线

1.5.3 场效应管的主要参数

场效应管的主要参数除前面提到的输入电阻 R_{GS} 、漏极饱和电流 I_{DSS} 、夹断电压 $U_{GS(off)}$ 和开启电压 $U_{GS(th)}$ 外, 还有以下重要参数:

(1) 跨导 g_m 。在 U_{DS} 为定值时, 漏极电流 I_D 的变化量 ΔI_D 与引起这个变化的栅、源电压 U_{GS} 的变化量 ΔU_{GS} 的比值称为跨导, 即:

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

g_m 表示场效应管栅、源电压 U_{GS} 对漏极 I_D 控制作用的大小, 单位是 $\mu\text{A/V}$ 或 mA/V 。

(2) 通态电阻。在确定的栅、源电压 U_{GS} 下, 场效应管进入饱和导通时, 漏极和源极之间的电阻称为通态电阻。通态电阻的大小决定了管子的开通损耗。

(3) 最大漏、源击穿电压 $U_{DS(BR)}$ 。指漏极与源极之间的反向击穿电压。

(4) 漏极最大耗散功率 P_{DM} 。漏极耗散功率 $P_D = U_{DS} I_D$ 的最大允许值, 是从发热角度对管子提出的限制条件。

绝缘栅场效应管的输入电阻很高, 栅极上很容易积累较高的静电电压将绝缘层击穿。为了避免这种损坏, 在保存场效应管时应将它的 3 个电极短接起来。在电路中, 栅、源极间应有固定电阻或稳压管并联, 以保证有一定的直流通路。在焊接时, 应使电烙铁外壳良好接地。



本章小结

(1) PN 结是构成一切半导体器件的基础。PN 结具有单向导电性, 加正向电压时导通, 其电阻很小; 加反向电压时截止, 其电阻很大。

(2) 二极管和稳压管都是由一个 PN 结构成，它们的正向特性很相似，主要区别是二极管不允许反向击穿，一旦击穿会造成永久性损坏；而稳压管正常工作时必须处于反向击穿状态，且反向击穿时动态电阻很小，即电流在允许范围内变化时，稳定电压 U_Z 基本不变。

(3) 三极管具有两个 PN 结，有 NPN 和 PNP 两种管型。三极管的主要功能是可以较小的基极电流控制较大的集电极电流，控制能力用电流放大系数 β 表示。三极管有 3 种工作状态。工作在放大状态时发射结正偏、集电结反偏，集电极电流随基极电流成比例变化。工作在截止状态时发射结和集电结均反偏，集电极与发射极之间基本上无电流通过。工作在饱和状态时发射结和集电结均正偏，集电极与发射极之间有较大的电流通过，两极之间的电压降很小。后两种情况集电极电流均不受基极电流控制。

(4) 场效应管是一种单极型半导体器件。场效应管的基本功能是用栅、源极间电压控制漏极电流。场效应管具有输入电阻高、噪声低、热稳定性好、耗电省等优点。场效应管的源极、漏极和栅极分别相当于双极型晶体管的发射极、集电极和基极。



1-1 在图 1-25 所示各电路中，已知直流电压 $U_i = 3\text{ V}$ ，电阻 $R = 1\text{ k}\Omega$ ，二极管的正向压降为 0.7 V ，求 U_o 。

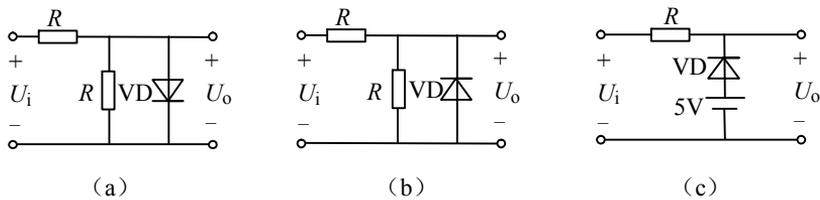


图 1-25 习题 1-1 的图

1-2 在图 1-26 所示各电路中， $u_i = 10\sin(\omega t)\text{ V}$ ，二极管的正向压降可忽略不计，试分别画出各电路的输入、输出电压 u_o 的波形。

1-3 在图 1-27 所示电路中，试求下列几种情况下输出端 F 的电位 U_F 及各元件 (R 、 VD_A 、 VD_B) 中的电流，图中的二极管为理想元件。

- (1) $U_A = U_B = 0\text{ V}$ ；
- (2) $U_A = 3\text{ V}$ ， $U_B = 0\text{ V}$ ；
- (3) $U_A = U_B = 3\text{ V}$ 。

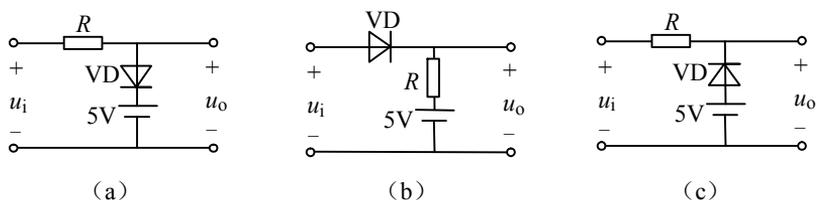


图 1-26 习题 1-2 的图

1-4 在图 1-28 所示电路中, 试求下列几种情况下输出端 F 的电位 U_F 及各元件 (R 、 VD_A 、 VD_B) 中的电流, 图中的二极管为理想元件。

- (1) $U_A = U_B = 0\text{ V}$;
- (2) $U_A = 3\text{ V}$, $U_B = 0\text{ V}$;
- (3) $U_A = U_B = 3\text{ V}$.

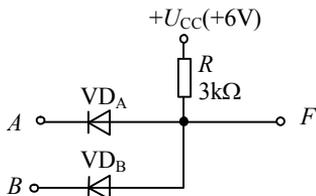


图 1-27 习题 1-3 的图

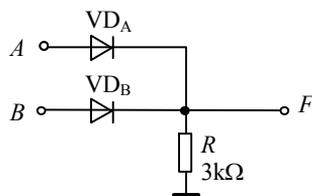


图 1-28 习题 1-4 的图

1-5 在图 1-29 所示电路中, 已知 $E = 10\text{ V}$, $e = 30\sin(\omega t)\text{ V}$ 。试用波形图表示二极管上的电压 u_D 。

1-6 在图 1-30 所示电路中, 已知 $E = 20\text{ V}$, $R_1 = 900\ \Omega$, $R_2 = 1100\ \Omega$ 。稳压管 VD_Z 的稳定电压 $U_Z = 10\text{ V}$, 最大稳定电流 $I_{ZM} = 8\text{ mA}$ 。试求稳压管中通过的电流 I_Z , 是否超过 I_{ZM} ? 如果超过, 怎么办?

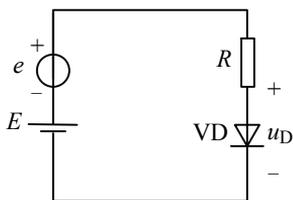


图 1-29 习题 1-5 的图

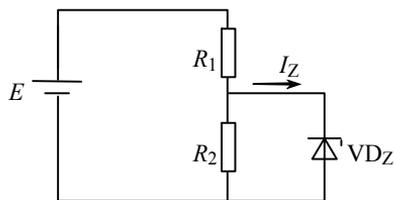


图 1-30 习题 1-6 的图

1-7 有两个稳压管 VD_{Z1} 和 VD_{Z2} , 其稳定电压分别为 5.5 V 和 8.5 V , 正向压降都是 0.5 V , 如果要得到 0.5 V 、 3 V 、 6 V 、 9 V 和 14 V 几种稳定电压, 这两个稳压管 (还有限流电阻) 应该如何连接, 画出各个电路。

1-8 在一放大电路中，测得某三极管 3 个电极的对地电位分别为 -6V 、 -3V 、 -3.2V ，试判断该三极管是 NPN 型还是 PNP 型？锗管还是硅管？并确定 3 个电极。

1-9 有一三极管的 $P_{\text{CM}} = 100 \text{ mW}$ ， $I_{\text{CM}} = 20 \text{ mA}$ ， $U_{(\text{BR})\text{CEO}} = 15 \text{ V}$ ，试问在下列几种情况下，哪种为正常工作状态？

(1) $U_{\text{CE}} = 3 \text{ V}$ ， $I_{\text{C}} = 10 \text{ mA}$ ；

(2) $U_{\text{CE}} = 2 \text{ V}$ ， $I_{\text{C}} = 40 \text{ mA}$ ；

(3) $U_{\text{CE}} = 8 \text{ V}$ ， $I_{\text{C}} = 18 \text{ mA}$ 。

1-10 某场效应管漏极特性曲线如图 1-31 所示，试判断：

(1) 该管属哪种类型？画出其符号。

(2) 该管的夹断电压 $U_{\text{GS}(\text{off})}$ 约为多少？

(3) 该管的漏极饱和电流 I_{DSS} 约为多少？

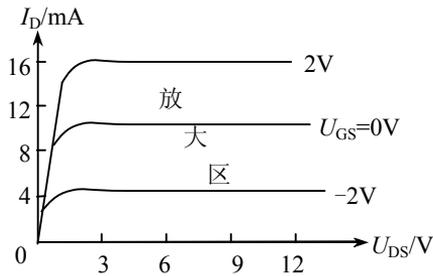


图 1-31 习题 1-10 的图