

第1章 常用半导体器件

半导体器件是电子电路中重要的组成部分，其基本结构、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。本章从介绍半导体的导电特性及 PN 结单向导电性入手，分别介绍二极管、双极型晶体管和场效应晶体管的有关知识，为后续学习打下基础。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 半导体及其导电特性

自然界的物质根据导电能力的不同可分为导体、绝缘体和半导体。导体如金属，其导电能力很强；绝缘体如陶瓷、塑料、橡胶、木材等，几乎不导电。而半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，如锗（Ge）、硅（Si）、硒（Se）以及大多数金属氧化物和硫化物等。

半导体的导电能力在不同条件下差别很大，主要特性表现在以下几方面。

（1）热敏性，即半导体对温度的反应特别敏感。如钴、锰、镍等的氧化物，当环境温度升高时，导电能力显著增强。据此可制成各种温度敏感元件，如热敏电阻，用于温度测量、温度控制等电路中。

（2）光敏性，即半导体对光照强度的反应特别敏感。如镉、铅的硫化物，当受光照射时，导电能力显著增强。据此可制成各种光电元件，如光敏电阻、光电二极管、光电晶体管、光电池等，用于光测量、光控制和光电耦合等电路中。

（3）掺杂性，即在纯净半导体中掺入微量的杂质可使其导电能力显著增强。如在纯净硅中掺入百万分之一的硼元素后，电阻率就由 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 减小到 $0.4 \Omega \cdot \text{cm}$ ，导电能力增加了数十万倍。据此可制成各种不同类型的半导体元器件，如二极管、晶体管、场效应晶体管、晶闸管等，用于各种电子电路中。

半导体的这些导电特性与其内部结构和导电机理有关。

1. 本征半导体

完全纯净、不含杂质且具有晶体结构的半导体称为本征半导体。使用最多的本征半导体是单晶硅和单晶锗。它们都是四价元素，其原子最外层电子轨道上有 4 个价电子。每个原子都与相邻的其他 4 个原子结合，使每个原子的 1 个价电子与另一原子的 1 个价电子组成以共价键结合的公用电子对。单晶体中原子排列方式与单晶硅共价键结构平面示意图分别如图 1-1 和图 1-2 所示。

在绝对零度（ $T = -273^\circ\text{C}$ ）时，晶体中的电子被共价键束缚很紧，不能移动。当受到一定能量的外界激发（如受热或光照）时，价电子即可挣脱原子核的束缚，成为自由电子。同时在共价键中留下了一个空位，称为空穴。因原子是电中性的，所以失去电子的原子带正电，就可以吸引附近的价电子来填补这个空穴，从而使相邻的原子产生新的空穴。新的空穴又会吸引它相邻的价电子再进行填补，如图 1-3 所示。如此进行下去，价电子的逐次递补如同空

穴的反向运动，形成所谓带正电荷的空穴运动。因此，当半导体两端加上外电压时，自由电子和空穴都将参与导电，形成两部分电流：自由电子定向移动而形成的电子电流和价电子填补空穴而形成的空穴电流。所以自由电子（带负电）和空穴（带正电）都是导电粒子，统称为载流子。空穴的出现和参与导电是半导体区别于导体的一个重要特点。

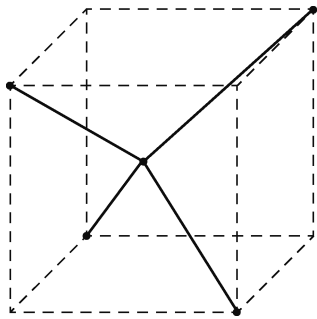


图 1-1 单晶体中原子排列方式

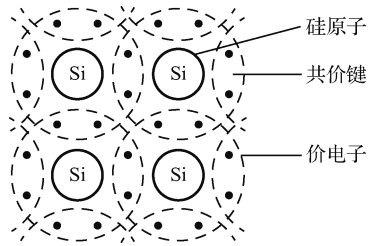


图 1-2 单晶硅共价键结构平面示意图

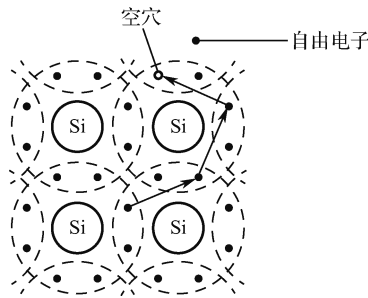


图 1-3 本征半导体中的空穴和自由电子

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现的，同时又不断成对复合成为不能移动的价电子。在一定温度下，载流子的产生和复合达到动态平衡，使载流子浓度一定，且自由电子数和空穴数相等。如果温度升高，载流子数目将会增多，导电能力亦将增强。所以温度对半导体器件性能影响很大。

2. 杂质半导体

本征半导体虽然有两种载流子，但由于数量少，导电能力仍很低。掺入微量杂质（某种元素）的杂质半导体维持原来本征半导体的晶体结构，原子只在少量位置上被杂质取代，可使导电能力大大增强。根据掺入杂质的不同，杂质半导体有两类。

N 型半导体也称为电子型半导体。此类半导体是在单晶硅或单晶锗中掺入磷（P）等五价元素。磷原子最外层 5 个价电子中只能有 4 个参与共价键结构，而剩下的一个价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子。于是半导体中自由电子数目大量增加，成为此类半导体的主要载流子，如图 1-4 所示。所以在 N 型半导体中，自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

P 型半导体也称为空穴型半导体。此类半导体是在单晶硅或单晶锗中掺入硼（B）等三价元素。硼原子最外层只有 3 个价电子，在构成共价键结构时因缺少 1 个价电子而产生 1 个空穴。于是半导体中空穴数目大量增加，成为此类半导体的主要载流子，如图 1-5 所示。所以在 P 型半导体中，空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。

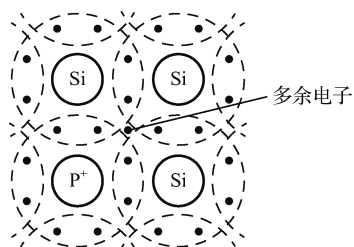


图 1-4 硅晶体中掺磷出现自由电子

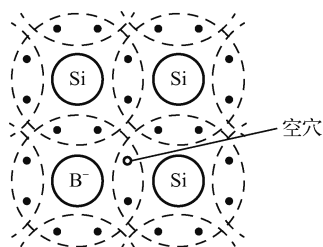


图 1-5 硅晶体中掺硼出现空穴

需要注意的是，无论 N 型半导体还是 P 型半导体，虽然都有一种载流子占多数，但整个晶体仍然是电中性的。

1.1.2 PN 结及其单向导电性

N 型半导体和 P 型半导体导电能力虽然比本征半导体大大增强，但相比导体仍是不可比拟的。可奇妙的是，将不同掺杂类型和浓度的 N 型半导体和 P 型半导体通过各种方式结合到一起时，却能制作出功能各异、品种繁多的半导体器件。制作这些半导体器件的基础是 PN 结。

1. PN 结的形成

在一块半导体基片的两边，采用一定的工艺制成 N 型半导体和 P 型半导体，其交界面附近形成的空间电荷区，被称作 PN 结。

由于交界面两边的自由电子和空穴浓度不同（N 区自由电子多，P 区空穴多），N 区的自由电子要向 P 区扩散，P 区的空穴要向 N 区扩散。在扩散过程中，自由电子和空穴不断复合，使得交界面 P 区一侧留下一些带负电的不能移动的离子，而 N 区一侧留下一些带正电的不能移动的离子，形成一个空间电荷区，如图 1-6 (a) 所示。

这个空间电荷区在半导体内部产生内电场，其方向从 N 区指向 P 区，如图 1-6 (b) 所示。内电场将阻碍多数载流子的扩散运动，同时又促进两侧少数载流子向对侧定向运动（称为漂移运动）。开始时扩散运动占优势，但随着空间电荷区的逐渐加宽，内电场逐步增强，扩散运动逐渐减弱，漂移运动逐渐增强。于是在一定条件下，多数载流子的扩散运动与少数载流子的漂移运动达到动态平衡，空间电荷区的宽度稳定下来，PN 结即形成。

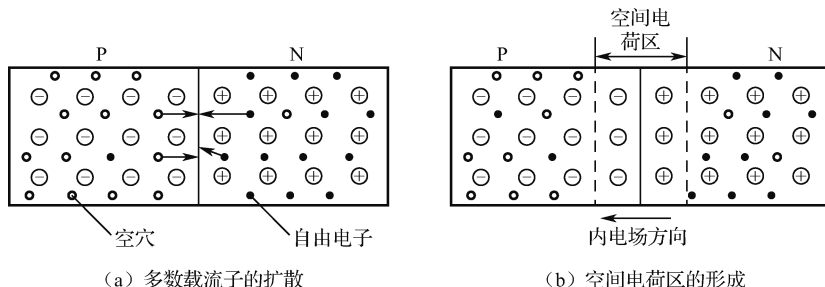


图 1-6 PN 结的形成

2. PN 结的单向导电性

在 PN 结上加正向电压（也称为正向偏置），即 P 区接电源正极，N 区接电源负极，如图 1-7 所示。则外加电场削弱内电场，使空间电荷区变窄，多数载流子的扩散运动增强，形成较大的正向扩散电流，PN 结呈现很小的正向电阻。此时 PN 结正向导通。

在 PN 结上加反向电压（也称为反向偏置），即 N 区接电源正极，P 区接电源负极，如图 1-8 所示，则外加电场加强内电场，使空间电荷区变宽，少数载流子的漂移运动增强，形成较小的反向漂移电流，PN 结呈现很大的反向电阻。此时 PN 结反向截止。

温度越高，少数载流子数量越多，反向电流也就越大，所以温度对反向电流的影响很大。

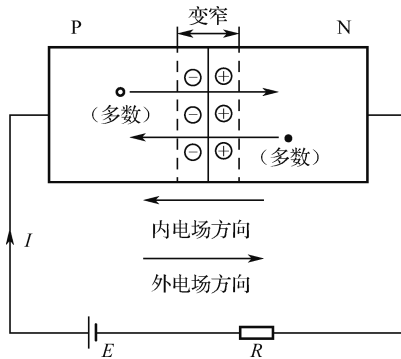


图 1-7 PN 结加正向电压

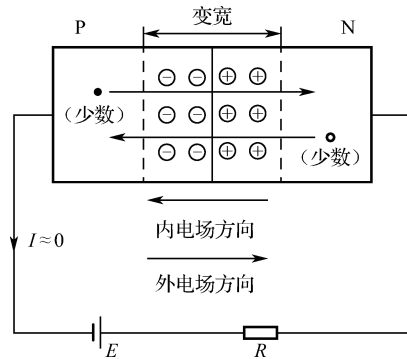


图 1-8 PN 结加反向电压

综上所述，正向导通、反向截止即为 PN 结的单向导电性。

练习与思考

- 1.1.1 杂质半导体中的多数载流子数量取决于什么因素？少数载流子数量取决于什么因素？
- 1.1.2 N 型半导体与 P 型半导体内部载流子的数量有何不同？
- 1.1.3 PN 结的主要特性是什么？

1.2 半导体二极管

1.2.1 基本结构和伏安特性

1. 基本结构

在 PN 结的两端加上相应的电极引线并用管壳封装起来，即成为半导体二极管，也称为晶体二极管，简称二极管。P 区的引线称为阳极，N 区的引线称为阴极。其文字符号为 VD，图形符号如图 1-9 (a) 所示。

二极管按照材料可分为硅管和锗管；按照用途可分为普通二极管、整流二极管、发光二极管、光电二极管、检波二极管、稳压二极管等；按照 PN 结的结构可分为点接触型和面接触型等。点接触型二极管（一般为锗管）如图 1-9 (b) 所示，PN 结面积很小，不能承受高的反向电压和大电流，但其高频性能好，因而适合用作小电流的整流管、高频检波和脉冲数

字电路的开关元件等。面接触型二极管（一般为硅管）如图 1-9（c）所示，PN 结面积大，可承受较大的电流，但其工作频率较低，一般用作整流。

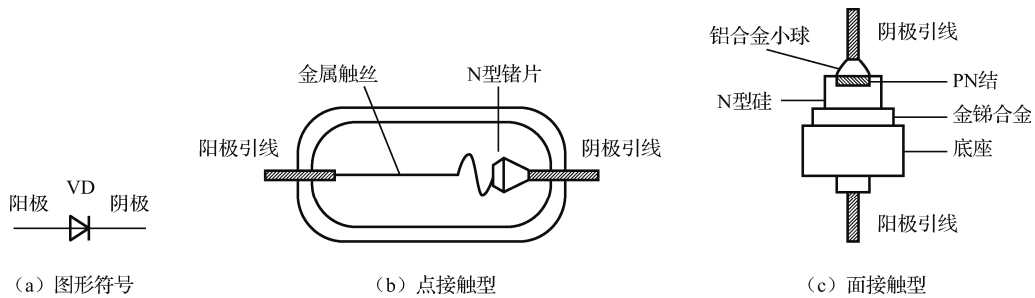


图 1-9 二极管图形符号及结构

2. 伏安特性

因二极管内部只有一个 PN 结，所以具有单向导电性。其电流与外加电压的关系特性称为伏安特性。典型的硅型二极管伏安特性曲线如图 1-10 所示，由正向特性和反向特性组成。

正向特性分为死区（OA 段）和正向导通区（AC 段）。当二极管外加正向电压很低时，由于外电场不足以克服内电场对多数载流子扩散运动的阻力，因此正向电流几乎为零。在特性曲线上对应的这部分区域就称为“死区”。对应死区的最大正向电压称为死区电压，其值与半导体材料及环境温度有关。通常硅管的死区电压约为 0.5V，锗管的死区电压约为 0.1V。

当外加正向电压超过死区电压后，外电场完全抵消了内电场对扩散运动的阻力，正向电流迅速上升，即二极管正向导通。二极管导通后，管子上的压降不大，且当正向电流在较大范围内变化时，压降也变化很小，硅管约为 0.6~0.8V，锗管约为 0.2~0.3V。因此在使用二极管时，若外加正向电压较大，一般要串接限流电阻，以免产生过大的电流烧坏二极管。

反向特性分为反向截止区（OB 段）和反向击穿区（BD 段）。当二极管外加反向电压时，少数载流子的漂移运动形成很小的反向电流，即二极管反向截止。此反向电流受温度影响较大，随温度的上升增长很快，而当温度一定，反向电压不超过某一范围时，其值基本恒定，故称其为反向饱和电流。

当反向电压过高时，反向电流将突然增大，此现象即为击穿，此时的反向电压称为反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 。二极管被击穿后，一般会失去单向导电性，此时如果不对反向电流的数值加以限制将烧坏二极管。所以普通二极管不允许工作在反向击穿区。

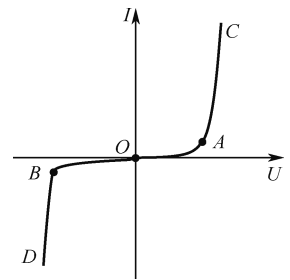


图 1-10 典型的硅型二极管的伏安特性曲线

1.2.2 主要参数

电子器件的参数是其特性的定量描述，也是实际工作中根据要求选用器件的主要依据。二极管有以下主要参数。

1. 最大整流电流 I_{FM}

它是指二极管长时间正常工作时，允许通过的最大正向平均电流。其值由二极管允许的温升所限定。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。在实际使用时，流过二极管的平均电流不能超过此值，否则可能会使二极管过热而损坏。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

它也称为反向工作峰值电压，是指在保证二极管不被反向击穿的情况下所允许施加的最高反向电压，一般为反向击穿电压的 1/2 或 2/3。点接触型二极管的最高反向工作电压一般是数十伏，面接触型二极管的可达数百伏。在使用时，二极管实际所承受的最高反向电压不能超过此值。

3. 最大反向电流 I_{RM}

它是指二极管的电压为最高反向工作电压 U_{RM} 时的反向电流。该电流值大，说明管子的单向导电性能差，并受温度的影响也大。硅管的最大反向电流较小，一般在几个微安以下；锗管的最大反向电流较大，为硅管的几十到几百倍。

1.2.3 等效模型

由二极管的伏安特性可知，二极管是一个非线性元件。为了简化电路的分析与计算，可将二极管用其等效模型代替。在近似计算中，二极管常用到以下两种模型。

1. 理想模型

二极管的理想模型如图 1-11 (a) 所示，当正向偏置时，其管压降为零，相当于开关闭合；当反向偏置时，其电流为零，电阻为无穷大，相当于开关断开。具有这种理想特性的二极管也被称为理想二极管。在实际电路中，当外加电源电压远大于二极管的管压降时，可采用此模型。

2. 恒压源模型

二极管的恒压源模型如图 1-11 (b) 所示，在二极管正向导通时，其管压降为恒定值，即硅管约为 0.7V，锗管约为 0.3V；当反向偏置时，其电流为零，电阻为无穷大。

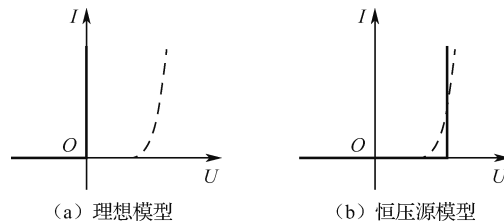


图 1-11 二极管的等效模型

1.2.4 应用电路

二极管利用其单向导电性，可进行整流、检波、限幅、钳位、元件保护以及在数字电路中作开关元件等，应用非常广泛。

分析与计算含有二极管的电路时，首先要判断二极管的工作状态，即导通或截止。方法是先假定把二极管断开，分别计算二极管的阳极与阴极电位，或计算阳极与阴极间的电压。若阳极电位高于阴极电位，或阳极与阴极间的电压值大于零，则二极管正向导通，反之则二极管反向截止。

例 1.2.1 电路如图 1-12 所示，试分别分析二极管为硅管和锗管时，二极管两端的电压和通过二极管的电流。

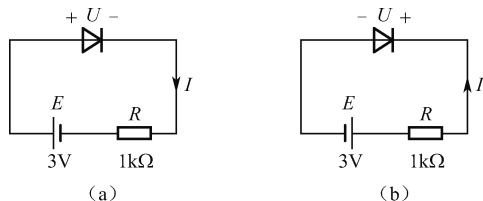


图 1-12 例 1.2.1 的图

答：图 1-12 (a) 为二极管的正向接法，若为硅管，则二极管两端的电压为 0.7V，通过的电流为 2.3mA；若为锗管，则二极管两端的电压为 0.3V，通过的电流为 2.7mA。

图 1-12 (b) 为二极管的反向接法，不论硅管和锗管，二极管两端的电压均为 3V，通过的电流均为 0mA。

例 1.2.2 已知图 1-13 (a) 中输入信号 $u_i = U_m \sin \omega t$ ， $U_m > U_S$ ，试画出输出电压 u_o 的波形。假设二极管 VD 为理想二极管。

解：当 $u_i > U_S$ 时，二极管 VD 因阳极电位高于阴极电位而导通，此时 $u_o = U_S$ 。

当 $u_i < U_S$ 时，二极管 VD 因阳极电位低于阴极电位而截止，此时 $u_o = u_i$ 。

根据以上分析可画出输出电压 u_o 的波形，如图 1-13 (b) 所示。二极管在此电路中起限幅的作用。

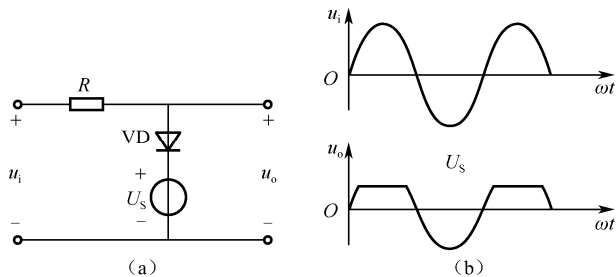


图 1-13 例 1.2.2 的图

例 1.2.3 在图 1-14 中，输入端的电位分别为 $V_A = +3V$ ， $V_B = 0V$ ，求输出端 Y 的电位 V_Y 。假设二极管 VD1、VD2 均为硅管。

解：虽然二极管 VD1、VD2 均为阳极电位高于阴极电位，但因为 A 端电位比 B 端电位高，所以 VD1 优先导通，则 $V_Y = V_A - 0.7V = +3V - 0.7V = 2.3V$ 。

VD1 导通后，VD2 将承受反向电压，故而截止。

在此电路中，VD1 起钳位的作用，将 Y 端电位钳制在 2.3V；

VD2 起隔离的作用，把输入端 B 与输出端 Y 隔离开来。

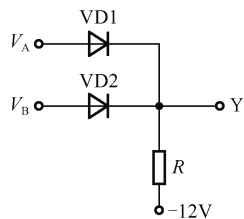


图 1-14 例 1.2.3 的图

1.2.5 特殊二极管

除上述普通二极管外，还有一些具有特殊用途的特殊二极管，常用的有以下几种。

1. 稳压二极管

稳压二极管是一种用特殊工艺制造的面接触型硅二极管。其外形和内部结构与普通二极管相似，在电路中与适当阻值的电阻配合后能起稳定电压的作用，故称为稳压二极管。

稳压二极管的图形符号和伏安特性曲线如图 1-15 所示。从特性曲线可知，其正向特性与普通二极管一样，而反向特性曲线很陡，即反向击穿后，虽然电流在很大范围内变化，但稳压二极管两端的电压变化很小。因此，稳压二极管在实际应用中主要利用这一特性进行稳压。稳压二极管由于制造工艺的特殊性，在一定范围内其反向击穿是可逆的。当反向击穿电压去掉后，稳压二极管可恢复正常。但如果反向电流过大，超过了其允许值，稳压二极管也会发生热击穿而损坏。所以稳压二极管在使用时必须串联一个适当大小的限流电阻。

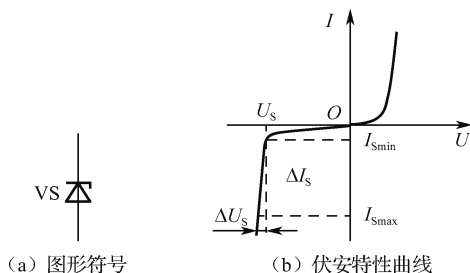


图 1-15 稳压二极管的图形符号和伏安特性曲线

稳压二极管的主要参数有以下几个。

(1) 稳定电压 U_s 。即稳压二极管反向击穿后稳定工作的电压。此数值随工作电流和温度的不同而略有改变，即使同一型号的稳压二极管，稳定电压值也有一定的分散性。例如 2CW14 硅稳压二极管的稳定电压为 6~7.5V。

(2) 稳定电流 I_s 。指稳压二极管进入反向击穿区所必需的电流参考值。一般当稳压二极管的实际电流大于稳定电流值时，稳压性能较好。为了预防热击穿，对每种型号的稳压二极管，都规定有一个最大稳定电流 I_{SM} 。

(3) 最大允许耗散功率 P_{SM} 。指管子不致发生热击穿的最大功率损耗，其值为 $P_{SM} = U_s I_{SM}$ 。

(4) 动态电阻 r_s 。指稳压二极管端电压的变化量与相应的电流变化量的比值，即

$$r_s = \frac{\Delta U_s}{\Delta I_s} \quad (1-1)$$

显然，稳压二极管的反向特性曲线越陡，则动态电阻越小，稳压性能越好。

(5) 电压温度系数 α_U 。指当稳压二极管的电流为常数时，环境温度每变化 1℃ 引起稳压值变化的百分数。通常，当 $U_s > 7V$ 时，稳压二极管具有正的电压温度系数；当 $U_s < 4V$ 时，具有负的电压温度系数；而当 $4V < U_s < 7V$ 时，电压温度系数接近零。因此选用 4~7V 的稳压二极管可得到较满意的温度稳定性。

2. 发光二极管

发光二极管（LED）是一种能将电能转换成光能的半导体器件，由磷砷化镓（GaAsP）、磷化镓（GaP）等半导体材料制成。其图形符号如图 1-16（a）所示。

当给发光二极管外加正向电压时，多数载流子在扩散过程中相遇复合，过剩的能量以光子的形式释放出来，从而产生一定波长的光。光的颜色与所采用的半导体材料及浓度有关，常用的有红、绿、黄、蓝和紫等颜色的发光二极管。

发光二极管的正向工作电压比普通二极管高，约为 1~2V；反向击穿电压比普通二极管低，约为 5V。发光亮度与工作电流有关，一般为几至十几毫安。

由于发光二极管具有体积小、工作电压低、工作电流小、发光均匀稳定、响应速度快和寿命长等优点，是一种优良的光源，目前在各种电子设备、家用电器以及显示装置中得到了广泛的应用。

3. 光电二极管

光电二极管又称光敏二极管，是一种将光信号转换成电信号的特殊二极管。它的 P 区比 N 区薄得多，其管壳上嵌有一个玻璃窗口，以便于光线射入。其图形符号如图 1-16（b）所示。



图 1-16 发光二极管和光电二极管的图形符号

光电二极管工作在反向偏置状态下。当无光照时，与普通二极管一样，其反向电流很小（一般小于 $0.2\mu\text{A}$ ）；当有光照时，其反向电流明显增大，且光照度越强，反向电流越大。所以光电二极管可用来测量光的强度，并可用于需要光电转换的自动探测、计数、控制等装置中。

[练习与思考]

- 1.2.1 温度如何影响二极管的反向电流？为什么？
- 1.2.2 能否将 1.5V 的干电池以正向接法接到二极管两端？为什么？
- 1.2.3 利用稳压管或二极管的正向导通区是否也可以进行稳压？

1.3 双极型晶体管

双极型晶体管，简称晶体管或三极管，是最重要的一种半导体器件，是组成各种电子电路的核心器件，比如利用其放大特性组成各种放大电路，利用其开关特性组成逻辑电路等。晶体管的广泛使用促进了电子技术的飞跃发展。

1.3.1 基本结构

晶体管的种类很多。按工作频率分，有高频管、中频管和低频管；按功率分，有小功率管、中功率管和大功率管；按使用材料分，有硅管和锗管；按制造工艺分，有平面型和合金

型。硅管主要是平面型，锗管多是合金型。

晶体管的内部由三层不同类型的半导体构成，即 N、P、N 或 P、N、P 三层，因此有 NPN 型和 PNP 型两类管子，其结构和图形符号如图 1-17 所示，文字符号用 VT 表示。我国生产的硅管多为 NPN 型，锗管多为 PNP 型。

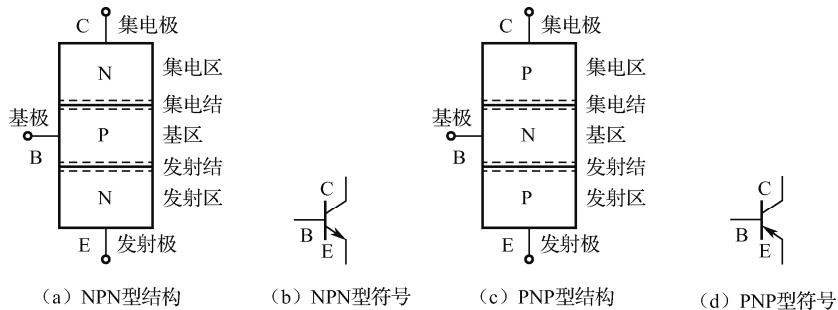


图 1-17 晶体管的结构示意图和图形符号

晶体管中的三个半导体区域分别称为基区、发射区和集电区，分别引出基极 B、发射极 E 和集电极 C。由此，晶体管中有两个 PN 结，即基区和发射区之间的发射结、基区和集电区之间的集电结。晶体管不是两个 PN 结的简单组合，它是在一块半导体基片上制造出三个不同浓度的掺杂区，形成两个有内在联系的 PN 结。其中发射区的掺杂浓度最高，有利于向基区发射载流子；基区掺杂浓度最低，且很薄，有利于传输载流子；集电区掺杂浓度较大，且集电结面积大，有利于收集载流子和散热。

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。因实际应用中采用 NPN 型晶体管较多，故下面以 NPN 型晶体管为例进行分析，所得结论同样适用于 PNP 型晶体管。

1.3.2 电流分配与放大作用

1. 晶体管放大的外部条件

晶体管在实现电流放大作用时，外加电压必须满足让其“发射结正向偏置，集电结反向偏置”的外部条件，即 NPN 型晶体管各个极的电位满足 $V_C > V_B > V_E$ ，PNP 型晶体管各个极的电位满足 $V_E > V_B > V_C$ ，因此晶体管的电流分配与放大可采用如图 1-18 所示的实验电路。图中的晶体管接成两个回路：基极回路和集电极回路，发射极是公共端，故此接法称为晶体管的共发射极接法。

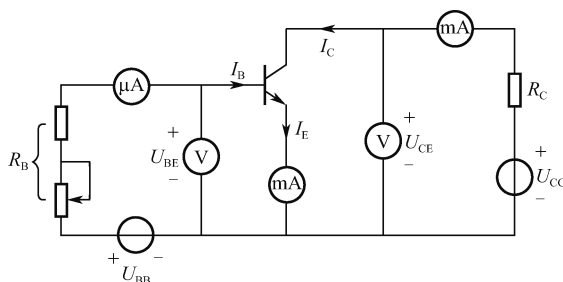


图 1-18 晶体管电流分配与放大的实验电路

2. 电流分配与放大作用

改变可变电阻 R_B 的大小，则基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都随之发生变化，表 1-1 列出了一组实验数据。

表 1-1 晶体管电流测量数据

I_B/mA	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
I_C/mA	<0.001	0.70	1.50	2.30	3.10	3.95
I_E/mA	<0.001	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

根据表中数据可得出如下结论。

(1) 三个电极的电流符合基尔霍夫电流定律，即

$$I_E = I_C + I_B \quad (1-2)$$

式 (1-2) 反映了晶体管的电流分配关系。

(2) 不仅 I_C 、 I_E 比 I_B 大得多，而且 I_C 随 I_B 的变化而变化，即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 。以第三、第四列数据为例， I_C 与 I_B 的比值 $\bar{\beta}$ （称为直流电流放大系数）及 ΔI_C 与 ΔI_B 的比值 β （称为交流电流放大系数）分别为

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.50\text{mA}}{0.04\text{mA}} = 37.5, \quad \bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.30\text{mA}}{0.06\text{mA}} = 38.3, \quad \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{(2.30 - 1.50)\text{mA}}{(0.06 - 0.04)\text{mA}} = 40$$

也就是说，基极电流 I_B 虽然很小，但对集电极电流 I_C 有控制作用。正是这种小电流对大电流的控制能力，反映了晶体管的电流放大作用。

(3) 当 $I_B = 0$ （基极开路）时， I_C 很小，用 I_{CE0} 表示，称为穿透电流。

上述结论是由于载流子在晶体管内部的运动规律而造成的，如图 1-19 所示。首先，发射区掺杂浓度较高，且发射结又处于正向偏置，使发射区的多数载流子即自由电子源源不断地扩散到基区，形成发射极电流 I_E ；扩散到基区的电子中仅有很少的一部分可以与空穴复合，而接至基区的电源正极不断从基区拉走电子，即好像不断补充基区中被复合掉的空穴，形成较小的基极电流 I_B ；大量没有被基区空穴复合掉的自由电子在集电结反向偏置电压的作用下，穿过基区，进入集电区，被集电极电源收集，从而形成较大的集电极电流 I_C 。这就是晶体管的电流放大原理。

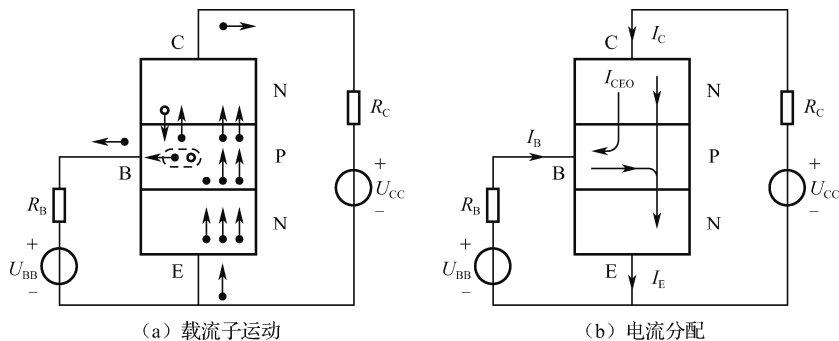


图 1-19 晶体管内部载流子的运动形成电流

此外，在集电结内电场作用下，集电区的少数载流子（空穴）和基区的少数载流子（自由电子）将向对方进行漂移运动，形成电流 I_{CE0} 。此电流数值很小，构成集电极电流 I_C 和基

极电流 I_B 的一小部分，一般情况下可以忽略不计。但 I_{CEO} 受温度影响较大，当温度改变时，会对晶体管基极电流 I_B ，尤其是集电极电流 I_C 造成一定影响。

1.3.3 伏安特性曲线

晶体管的伏安特性曲线是表示晶体管各极电压和电流之间相互关系的曲线，反映了晶体管的特性，是分析和设计放大电路的重要依据。最常用的是共发射极接法的输入特性曲线和输出特性曲线。由于晶体管特性的分散性，半导体器件手册中给出的特性曲线只能作为参考，在实际中可用晶体管特性图示仪直观地显示出来，也可以通过实验测得，实验电路如图 1-18 所示。

1. 输入特性曲线

晶体管的输入特性曲线是指当集-射极电压 U_{CE} 为常数时，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 1-20 所示。

一般情况下，当 $U_{CE} \geq 1V$ 时，集电结已反偏，此时 U_{CE} 再增大对特性曲线的影响很小，即 $U_{CE} > 1V$ 后的输入特性曲线基本上是重合的。所以，通常只画出 $U_{CE} \geq 1V$ 的一条输入特性曲线。

由图 1-20 可知，晶体管的输入特性曲线与二极管的正向伏安特性曲线很相似，也有一段死区。硅管的死区电压约为 $0.5V$ ，锗管的死区电压约为 $0.1V$ 。导通后，NPN 型硅管的发射结电压 U_{BE} 约为 $0.6 \sim 0.8V$ ，PNP 型锗管的 U_{BE} 约为 $-0.2 \sim -0.3V$ 。

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，集电极电流 i_C 与集-射极电压 u_{CE} 之间的关系曲线 $i_C = f(u_{CE})$ ，如图 1-21 所示。

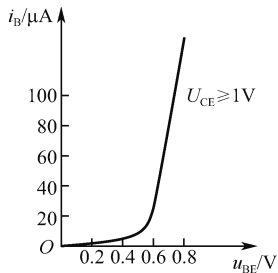


图 1-20 晶体管输入特性曲线

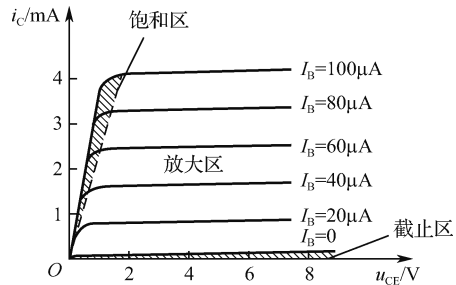


图 1-21 晶体管输出特性曲线

对于不同的 I_B ，所得到的输出特性曲线不同。所以晶体管的输出特性曲线是一族曲线。通常把晶体管的输出特性曲线族划分为三个工作区，分别对应晶体管的三种工作状态。

(1) 放大区。即特性曲线中近似水平直线的区域。该区域里发射结正向偏置，集电结反向偏置。其特点是 I_C 的大小受 I_B 控制， $I_C = \beta I_B$ ， β 约等于常数，故放大区也称为线性区。由于 i_C 的大小几乎与 u_{CE} 无关，呈现恒流特性，晶体管工作在放大状态时可看作受基极电流控制的受控恒流源。

(2) 截止区。对应 $I_B = 0$ 以下的区域。在该区域， $I_C = I_{CEO} \approx 0$ ，根据图 1-18，有 $U_{CE} \approx U_{CC}$ 。为使晶体管可靠截止，发射结和集电结都处于反向偏置。

(3) 饱和区。即特性曲线靠近纵轴的区域。该区域里发射结、集电结均正向偏置。 I_C 的大小不受 I_B 的控制, 无电流放大作用。此时, $U_{CE} \approx 0$, 根据图 1-18, 有 $I_C \approx \frac{U_{CC}}{R_C}$ 。

由上述分析可知, 晶体管饱和时, $U_{CE} \approx 0$, 发射极与集电极之间相当于一个接通的开关; 当晶体管截止时, $I_C \approx 0$, 发射极与集电极之间相当于一个断开的开关。所以, 晶体管除了具有放大作用, 还具有开关作用。

晶体管工作于不同的区域, 相应的工作状态分别称为放大状态、截止状态和饱和状态。在电路分析中, 常根据晶体管两个 PN 结的偏置电压大小和管子的电流关系判断其工作状态。而在实际电路测试中, 则常通过测定各个极的电位判断其工作状态。

1.3.4 主要参数

晶体管的参数用来表示晶体的性能优劣和适用范围, 是设计电路和选用管子的依据。主要参数有以下几个。

1. 电流放大系数 $\bar{\beta}$, β

在共发射极放大电路中, 根据工作状态的不同, 分别用静态电流(直流)放大系数 $\bar{\beta}$ 和动态电流(交流)放大系数 β 来表示静态(无输入信号状态)和动态(有输入信号状态)时晶体管的电流放大能力。分别用式(1-3)、式(1-4)表示:

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1-3)$$

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (1-4)$$

显然, $\bar{\beta}$ 和 β 的含义是不同的, 但在输出特性曲线族线性比较好(平行、等间距)且 I_{CEO} 较小的情况下, 两者的数值差别很小。在一般工程估算中, 可认为 $\bar{\beta} \approx \beta$ 。

由于制造工艺的分散性, 即使同型号的管子, β 值也有差异, 常用晶体管的 β 值通常为 20~100。 β 值太小, 放大作用差; β 值太大, 管子性能不稳定。一般放大电路采用 β 值为 30~80 的晶体管为宜。

2. 极间反向电流

(1) 集-基极间反向饱和电流 I_{CBO} 。指发射结开路, 集电结反向偏置时, 集电区和基区中少数载流子向对方运动所形成的电流。它跟单个 PN 结的反向饱和电流一样, 受温度的影响大, 会影响晶体管工作的稳定性, 所以 I_{CBO} 越小越好。小功率锗管的 I_{CBO} 约为几微安至几十微安, 小功率硅管的 I_{CBO} 在 $1\mu A$ 以下。

(2) 集-射极间穿透电流 I_{CEO} 。指基极开路, 集电结反向偏置、发射结正向偏置时的集电极电流。由于这个电流由集电极穿过基区流到发射极, 故称为穿透电流。根据晶体管的电流分配关系可知, $I_{CEO} = (1+\beta)I_{CBO}$, 所以 I_{CEO} 较 I_{CBO} 受温度的影响更大。小功率锗管的 I_{CEO} 约为几十微安, 小功率硅管的 I_{CEO} 约为几微安。在温度变化范围大的工作环境, 放大电路晶体管应选用硅管。

3. 极限参数

晶体管的极限参数限定了使用时不允许超过的限度。

(1) 集电极最大允许电流 I_{CM} 。晶体管集电极电流 I_C 超过一定值时, β 值就要显著下降, 甚至可能损坏晶体管。 I_{CM} 表示 β 值下降到正常值的三分之二时的集电极电流。

(2) 集-射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。指基极开路时, 加在集电极与发射极间的最大允许电压。当 $U_{CE} > U_{(BR)CEO}$ 时, I_{CEO} 急剧增大, 表示晶体管已被反向击穿, 造成晶体管损坏。使用时应根据电源电压 U_{CC} 选取 $U_{(BR)CEO}$, 一般使 $U_{(BR)CEO} > (2\sim 3)U_{CC}$ 。

(3) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 。由于集电极电流在流经集电结时将产生热量, 使结温升高, 从而引起参数的变化, 甚至烧坏晶体管, 所以晶体管的结温有一定限度。一般硅管的最高结温约为 150°C , 锗管为 $70^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$ 。根据管子的允许结温定出了集电极最大允许耗散功率 P_{CM} , 工作时管子消耗的功率必须小于 P_{CM} 。由 $P_{CM} = I_C U_{CE}$, 可在晶体管的输出特性曲线族上作出 P_{CM} 曲线。

由 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 和 P_{CM} 三个极限参数共同确定了晶体管的安全工作区, 如图 1-22 所示。

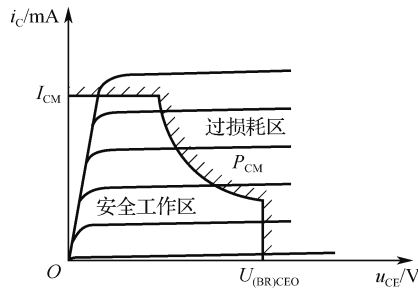


图 1-22 晶体管的安全工作区

1.3.5 特殊三极管

1. 光电三极管

光电三极管也称为光敏三极管, 是将光信号转换成电流信号的半导体器件, 并且还能把光电流放大 β 倍。其等效电路和图形符号如图 1-23 所示。

将一个发光二极管和一个光电三极管封装在一起, 可制造出光电耦合器, 其图形符号如图 1-24 所示。在光电耦合器的输入端加电信号时, 发光二极管发光, 光电三极管收到光照后产生光电流, 由输出端引出, 便可实现电-光-电的传输和转换。

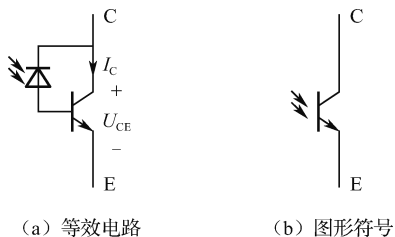


图 1-23 光电三极管

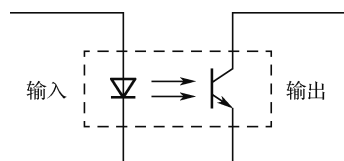


图 1-24 光电耦合器

光电耦合器以光为媒介实现电信号的传输，但输入端与输出端在电气上是绝缘的，因此能有效地抗干扰、隔噪声。另外它还具有响应速度快、工作稳定可靠、寿命长、传输信号失真小、工作频率高等优点，以及具有完成电平转换、实现电位隔离等功能。因此，它在电子技术中得到越来越广泛的应用。

2. 达林顿三极管

达林顿三极管又称为复合管。它由两只输出功率大小不等的晶体管按一定接线规律复合而成。根据内部两种类型晶体管复合的情况不同，有 4 种形式的达林顿三极管。复合管的极性取决于第一只晶体管，图 1-25 (a) 可等效为一个 NPN 型晶体管，图 1-25 (b) 可等效为一个 PNP 型晶体管。复合管的电流放大系数近似为两管电流放大系数的乘积。达林顿三极管主要作为功率放大管和电源调整管使用。

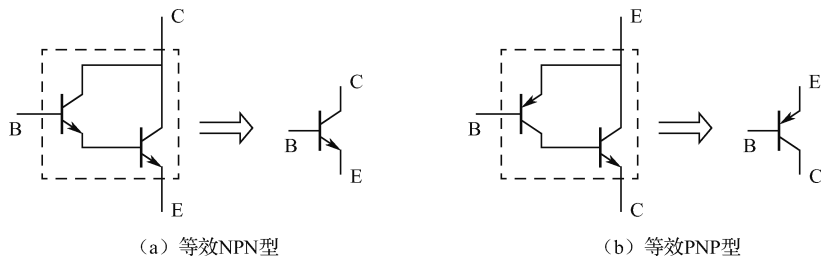


图 1-25 达林顿三极管

练习与思考

1.3.1 晶体管的发射极和集电极是否可以调换使用，为什么？

1.3.2 如何用万用表判断出一个晶体管是 NPN 型还是 PNP 型？如何判断管子的三个引脚？又如何判断管子是硅管还是锗管？

1.3.3 有两个晶体管，其中一个晶体管的 $\bar{\beta} = 50$, $I_{CBO} = 0.5\mu\text{A}$ ；另一个晶体管的 $\bar{\beta} = 150$, $I_{CBO} = 2\text{mA}$ ，如果其他参数一样，选用哪个晶体管较好？为什么？

1.3.4 温度升高后，晶体管的集电极电流有无变化，为什么？

1.3.5 将一个 PNP 型晶体管接成共发射极的电路，要使它具有电流放大作用，试画出电路。

1.4 场效应晶体管*

场效应晶体管简称场效晶体管或场效应管，其外形与普通晶体管相似，但二者的工作机理和控制特性却截然不同。普通晶体管中参与导电的有两种载流子（也称为双极型晶体管），是一种电流控制元件，即通过控制基极电流达到控制集电极电流或发射极电流的目的，所以信号源必须提供一定的电流才能工作。晶体管的输入电阻较低，仅有 $10^2 \sim 10^4 \Omega$ 。而场效应晶体管只有一种载流子参与导电（也称为单极型晶体管），是一种电压控制元件，其输出电流决定于输入端电压的大小，故不需要信号源提供电流。场效应晶体管的输入电阻很高，可达 $10^9 \sim 10^{14} \Omega$ 。此外，场效应晶体管还具有稳定性好、噪声低、制造工艺简单、便于集成等优点，所以已被广泛应用于放大电路和数字电路中。

场效应晶体管按参与导电的载流子，可分为 N 沟道器件（载流子为自由电子）和 P 沟道器件（载流子为空穴）；按工作状态，可分为增强型与耗尽型两类；按结构，可分为结型和绝缘栅型。本书中只简单介绍绝缘栅型场效应晶体管。

1.4.1 绝缘栅型场效应晶体管

绝缘栅型场效应晶体管通常由金属、氧化物和半导体制成，所以称为金属-氧化物-半导体场效应晶体管，或简称为 MOS 管。

1. 结构与工作原理

图 1-26 (a) 所示为 N 沟道绝缘栅型场效应晶体管的结构示意图。它是以 P 型硅作衬底，用扩散的方法在硅中做成两个高掺杂的 N^+ 区，然后分别用金属铝引出两个电极，称为漏极 D 和源极 S。再在两个 N^+ 扩散区之间的 P 型硅表面上生成一薄层二氧化硅 (SiO_2) 绝缘体，在它上面再生成一层金属铝，并引出一个电极，称为栅极 G。

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，从而感应出很多电子使漏极和源极之间形成 N 型导电沟道（电子沟道）。即使栅-源极之间不加电压，即 $U_{GS} = 0$ ，漏-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晶体管。N 沟道耗尽型场效应管的图形符号如图 1-26 (b) 所示。

如果在 SiO_2 绝缘层中掺入的正离子数量少或不掺入正离子，不能产生原始导电沟道，只有在栅-源极之间加正向电压，即 $U_{GS} > 0$ 时，漏-源极之间才能形成导电沟道，这种场效应管称为增强型场效应晶体管。N 沟道增强型场效应管的图形符号如图 1-26 (c) 所示。

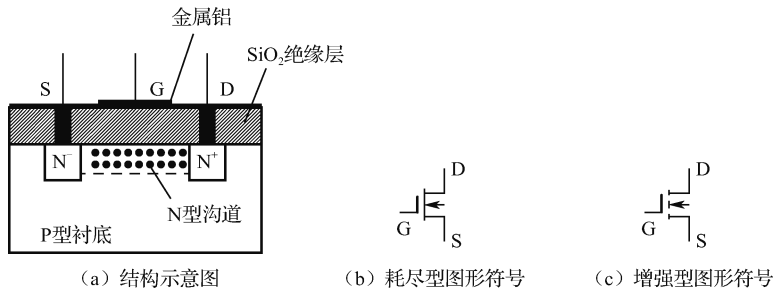


图 1-26 N 沟道绝缘栅型场效应晶体管

场效应管的工作主要表现在栅-源极之间电压 U_{GS} 对漏-源极之间电流 I_D 的控制作用。以 N 沟道场效应管为例，若漏-源极之间电压 U_{DS} 为常数，当栅-源极之间电压 U_{GS} 增大时，栅极与衬底之间的电场增强，导电沟道变宽，等效电阻变小，漏极电流 I_D 增大；当栅-源极之间电压 U_{GS} 减小时，漏极电流 I_D 减小。

图 1-27 所示为 P 沟道绝缘栅型场效应晶体管的结构示意图和图形符号。它与 N 沟道绝缘栅型场效应晶体管的工作原理是一样的，只是两者电源极性、电流方向相反而已。这和 NPN 型晶体管与 PNP 型晶体管的电源极性、电流方向相反的情况是相同的。

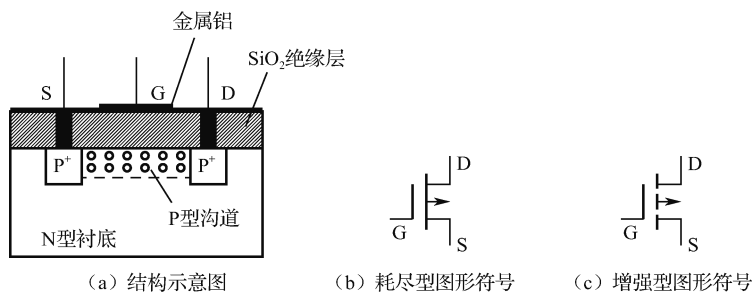


图 1-27 P 沟道绝缘栅型场效应晶体管

2. 特性曲线

(1) 转移特性曲线

转移特性是指在漏-源极电压 U_{DS} 一定的条件下，漏极电流 i_D 与栅-源极电压 u_{GS} 之间的关系。图 1-28 (a) 是 N 沟道耗尽型场效应晶体管的转移特性曲线。当 $U_{GS} = 0$ 时，漏-源极之间已经有原始导电沟道可以导电，这时流过场效应管的电流称为漏极饱和电流 I_{DSS} 。当 $U_{GS} > 0$ 时，在 N 沟道内感应出更多的电子，使沟道变宽， i_D 增大；当 $U_{GS} < 0$ 时，在 N 沟道内感应出一些正电荷与电子复合，使 N 沟道变窄， i_D 减小。当 U_{GS} 达到一定负值时，导电沟道内的载流子（电子）因复合而耗尽，沟道被夹断， $i_D \approx 0$ ，此时的 U_{GS} 称为夹断电压 $U_{GS(off)}$ 。

实验表明，在 $U_{GS(off)} \leq U_{GS} \leq 0$ 范围内，耗尽型场效应晶体管的转移特性可近似用式 (1-5) 表示：

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \quad (1-5)$$

(2) 输出特性曲线

输出特性是指在栅-源极电压 U_{GS} 一定的条件下，漏极电流 i_D 与漏-源极电压 u_{DS} 之间的关系。图 1-28 (b) 是 N 沟道耗尽型场效应晶体管的输出特性曲线，它可以分为两个区域。

可变电阻区 (I 区)： i_D 基本与 u_{DS} 成线性关系，场效应管可被看作一个受栅-源极电压 U_{GS} 控制的可变电阻区。

线性放大区 (II 区)：当 U_{GS} 为某个常数时， i_D 几乎不随 u_{DS} 的变化而变化， i_D 趋于饱和，特性曲线近似平行于横轴。实际上，在该区域 i_D 随 U_{GS} 线性变化。

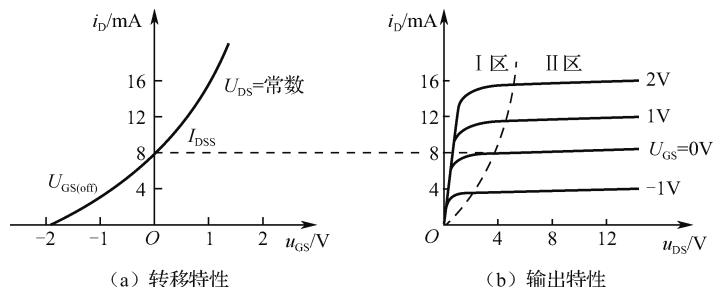


图 1-28 N 沟道耗尽型场效应晶体管的特性曲线

图 1-29 (a) 是 N 沟道增强型场效应晶体管的转移特性曲线，该曲线可用式 (1-6) 表示为

$$i_D = I_{D0} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 \quad (1-6)$$

式中, I_{D0} 是 $u_{GS} = 2U_{GS(th)}$ 时对应的漏极电流值; $U_{GS(th)}$ 称为开启电压, 是当 U_{DS} 一定时, 可将漏-源极间沟道连通的最小栅-源极之间的电压。由于 N 沟道增强型场效应管无原始导电沟道, 必须使栅-源极电压 U_{GS} 大于开启电压 $U_{GS(th)}$ 后才形成导电沟道。

图 1-29 (b) 是 N 沟道增强型场效应晶体管的输出特性曲线。与 N 沟道耗尽型场效应晶体管不同的是, 增强型场效应晶体管在栅-源极电压 u_{GS} 为正时, 才能控制漏极电流 i_D , 而耗尽型场效应晶体管不论栅-源极电压 u_{GS} 为正为负或是零, 都能控制漏极电流 i_D , 其应用更具灵活性。一般情况下, N 沟道耗尽型场效应晶体管工作在负栅-源极电压状态。

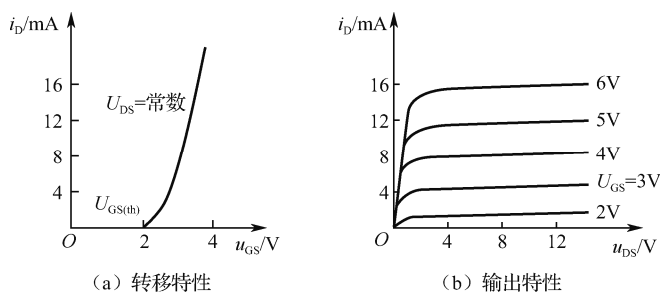


图 1-29 N 沟道增强型场效应晶体管的特性曲线

1.4.2 主要参数

1. 直流参数

除了饱和漏极电流 I_{DSS} 、夹断电压 $U_{GS(off)}$ 、开启电压 $U_{GS(th)}$, 场效应晶体管的直流参数还有栅-源极直流输入电阻 R_{GS} 。它是栅-源极之间所加电压与产生的栅极电流之比。由于绝缘栅型场效应管栅极电流几乎为零, 故其输入电阻大于 $10^9 \Omega$ 。这一参数有时以栅极电流 I_G 表示。

2. 交流参数

跨导 g_m , 指在漏-源极之间的电压 U_{DS} 为某个固定值时, 栅极输入电压每变化 1V 所引起的漏极电流 I_D 的变化量, 用式 (1-7) 表示。它是衡量场效应晶体管放大能力的一个重要参数 (相当于晶体管的 β)。

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \right|_{U_{DS}=\text{常数}} \quad (1-7)$$

跨导 g_m 的单位为 mA/V, 其大小是转移特性曲线在工作点的斜率, 所以可从转移特性曲线上求得。显然, g_m 的大小与场效应管工作点的位置有关。

3. 极限参数

最大漏-源极击穿电压 $U_{(BR)DS}$, 指漏极、源极之间的反向击穿电压, 即漏极电流 I_D 开始急剧上升时的 U_{DS} 值。

使用绝缘栅型场效应管时, 除了注意不要超过它的额定漏-源极电压 U_{DS} 、栅-源极电压

U_{GS} 、最大耗散功率 P_{DSM} 和饱和漏极电流 I_{DSS} ，还要注意可能出现栅极感应电压过高而造成绝缘层的击穿问题。因此，在保存场效应管时须将三个电极短接；使用时栅-源极间要有直流通路；焊接时外壳应事先接地，并按源极-漏极-栅极的顺序焊接。

表 1-2 中将场效应晶体管与双极型晶体管进行了比较。

表 1-2 双极型晶体管与场效应晶体管的比较

器件名称 项目	双极型晶体管	场效应晶体管
载流子	两种载流子（电子与空穴）同时参与导电	一种载流子（电子或空穴）参与导电
控制方式	电流控制	电压控制
类型	NPN 型与 PNP 型	N 沟道与 P 沟道
放大参数	$\beta = 20 \sim 100$	$g_m = 1 \sim 5 \text{mA/V}$
输入电阻	$10^2 \sim 10^4 \Omega$	$10^9 \sim 10^{14} \Omega$
输出电阻	r_{ce} 很高	r_{ds} 很高
热稳定性	差	好
制造工艺	较复杂	简单，成本低
对应极	基极-栅极，发射极-源极，集电极-漏极	

练习与思考

- 1.4.1 为什么说双极型晶体管是电流控制器件，而场效应晶体管是电压控制器件？
- 1.4.2 耗尽型 MOS 管与增强型 MOS 管有何主要区别？
- 1.4.3 为什么绝缘栅型场效应晶体管的栅极不能开路？

1.5 Multisim 14 仿真实验 二极管单向导电特性

1. 实验内容

二极管的单向导电特性实验电路如图 1-30 所示。电路中两个电源 V1、V2 串联相加，接到二极管两端。加正向电压时，二极管导通；加反向电压时，二极管截止。用示波器观测 u_o 的波形。通过该实验，验证所学电路的理论知识，并进一步熟悉示波器的使用。

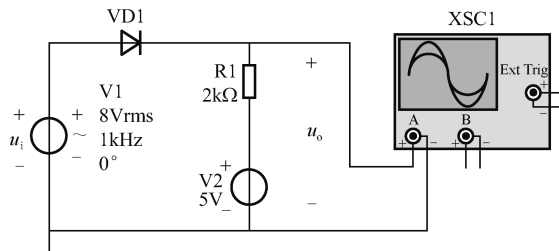


图 1-30 二极管单向导电特性的实验电路

2. 实验步骤

(1) 构建电路

选取并放置交流电压源 V1（类型为 POWER_SOURCE, AC_POWER），设置其电压有效值为 8V，频率为 1kHz（双击电压源，通过属性 Value 设置）。

选取并放置直流电压源 V2（类型为 POWER_SOURCE, DC_POWER），设置其电压值为 5V（双击电压源，通过属性 Value 设置）。

选取并放置接地符号 GROUND。

选取并放置电阻 R1，选择电阻值为 2k Ω 。

选取并放置理想二极管 VD1（类型为 Diodes/DIODES_VIRTUAL/DIODE）。

通过菜单 Place/Text，在电路中放置文字标记 u_i 和 u_o 。

放置示波器，用于观测 u_o 的波形。

(2) 运行电路，观测 u_o 的波形

运行电路，调整示波器的设置，观测 u_o 的波形。示波器的设置及 u_o 的波形如图 1-31 所示。



图 1-31 示波器的设置及 u_o 的波形

(3) 扩展实验内容

在图 1-30 所示的电路中，通过交换二极管 VD1 和电阻 R1 位置，或改变二极管 VD1 的方向，输出电压 u_o 的波形会发生变化，试观测之。

练习与思考

构建图 1-32 所示的电路，进行稳压管导电特性的实验，观测稳压管两端电压的波形。图中的 VD1 为理想稳压管（类型为 Diodes/DIODES_VIRTUAL/ZENER），其稳压值为 5V。