

第1章 半导体器件基础

【内容提要】本章首先介绍半导体的导电特性，PN 结构的形成及其单向导电特性 然后介绍在电子技术领域中广泛应用的半导体二极管、三极管和场效应管的工作原理、特性曲线及主要参数。这些内容是学习电子电路的基础，也是学习的重点。

1.1 PN 结

1.1.1 本征半导体的导电特性

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质叫做半导体。自然界中有些物质如硅 (Si)、锗 (Ge) 是半导体 而且硅和锗都是四价元素 原子核最外层有 4 个价电子。

纯净不掺杂质的半导体称为本征半导体。以硅晶体为例，它们的原子排列很有规律，并且每两个相邻原子共有一对价电子 这样的组合叫做共价键结构 如图 1-1 所示。

共价键中的价电子受相邻两个原子核的制约，如果没有足够的能量就无法挣脱共价键的束缚。因此 在热力学零度 (-273.16°C) 时 本征半导体无自由电子 与绝缘体一样不导电。在光照或其他能量激发下 将有少数价电子获得足够的能量 挣脱共价键束缚 跳到键外 成为自由电子。这里应该注意，当价电子挣脱共价键成为自由电子后，在共价键中就留下一个空位，此空位被称为空穴。有了这样一个空位，在外电场能量激发下，邻近的价电子就会填补到这个空位上，这个价电子原来的位置又留下新的空位。然后，其他价电子又会移至这个新的空位上 其效果如同带正电荷的空位 空穴 在移动 这种运动叫做空穴运动 如图 1-2 所示。

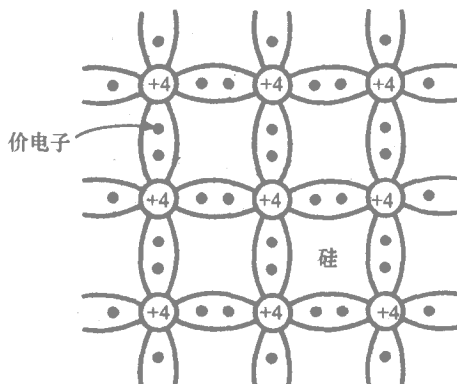


图 1-1 硅晶体共价键结构

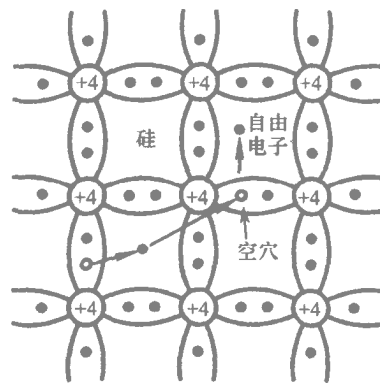


图 1-2 本征半导体中的电子空穴对

当半导体加上电压时 其电流由两部分组成，一是自由电子定向运动形成的电流 二是价电子递补空位形成的电流 两者流动方向相反 它们总是同时出现 这是本征半导体的重要特征。

在外电场或其他能量激发下，一方面本征半导体不断产生自由电子，同时也出现相同数量的空穴 另一方面 自由电子在运动中又会与空穴重新结合 (称为复合) 这是一个相反过程 在一定温度下，电子—空穴既产生又复合，达到了相对的动力平衡。

1.1.2 杂质半导体的导电特性

掺入杂质元素的半导体称为杂质半导体。本征半导体的导电能力很低，但如果掺入微量的杂质（某种元素），导电性能就会发生明显变化。根据掺入杂质的不同，杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体两种。

1. N 型半导体

在本征半导体硅中掺入微量的五价元素磷 (P)，硅晶体中某些原子的位置被磷原子代替，由于磷原子中多余的一个价电子不受共价键束缚，一旦获得很少能量，这个多余价电子就能挣脱磷原子核的吸引而成为自由电子。通常，几乎所有多余价电子都能成为自由电子，如图 1-3 所示。

上述杂质半导体除了杂质给出的多余自由电子外，原晶体本身也产生少量的电子—空穴对。这种杂质半导体中，自由电子是多数载流子（简称多子），空穴是少数载流子（简称少子），这种杂质半导体叫做 N 型半导体。

2. P 型半导体

在本征半导体硅中掺入微量的三价元素硼 (B)，硅晶体中某些原子的位置被硼原子代替，但由于硼原子缺少了一个价电子而产生一个空穴，这样每个硼原子都会提供一个空穴，从而使空穴载流子的数目显著增加成为多子，自由电子因浓度降低而成为少子。这种杂质半导体叫做 P 型半导体，如图 1-4 所示。

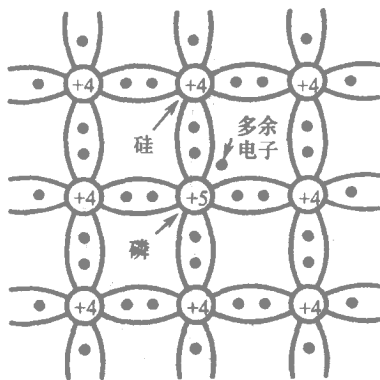


图 1-3 N 型半导体

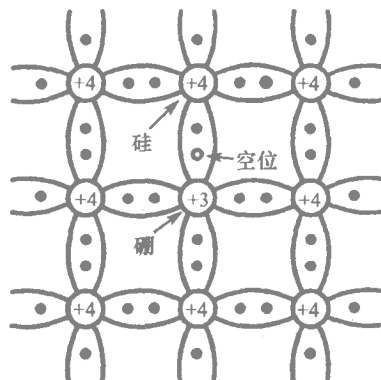


图 1-4 P 型半导体

总之，杂质半导体中，多子与掺杂量有关，与半导体温度无关，而少子是由外电场或其他能量激发产生的，与半导体温度有着密切关系。

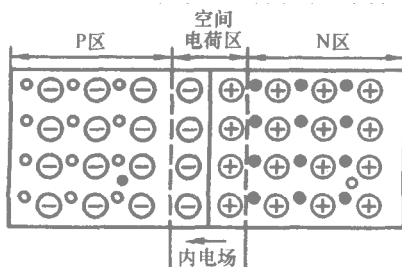


图 1-5 PN 结的形成

1.1.3 PN 结及其单向导电性

杂质半导体在没加外电场或其他能量的情况下，从宏观上看，仍然呈电中性。如果在一块本征半导体上，通过掺入杂质，使一侧形成 N 型半导体，另一侧形成 P 型半导体，则在两种半导体交界面上形成一个薄层（空间电荷区）叫做 PN 结，如图 1-5 所示。

PN 结是构成各种半导体器件的基础，二极管、三极管分别由一个、两个 PN 结组成。了解 PN 结的性质对掌握半导体器件的原理是非常重要的。

1. PN 结的形成

P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时，在交界处，由于电子与空穴数量不同而产生浓度差，从而引起多数载流子从浓度高的区域向浓度低的区域扩散，这种运动叫做扩散运动。扩散到 P 区的电子与空穴复合 扩散到 N 区的空穴与电子复合。随着扩散的进行，在交界面附近的 P 型区中空穴大量减少 出现了带负电的离子区 而在 N 型区一侧因缺少电子 显露出一带正电的离子区。这些离子虽然带电，但不能移动，它们形成了一个由 N 区指向 P 区的电场（内电场）这个电场空间区就是 PN 结，由于在空间电荷区中载流子被消耗尽了，故又叫做耗尽层。

内电场对多子的扩散不利，却有利于少子向对方区域运动。少数载流子在内电场作用下的定向运动叫做漂移运动。在内电场作用下，从 N 区漂移到 P 区的空穴 填补了 P 区失去的空穴 从 P 区漂移到 N 区的电子 填补了 N 区失去的电子，从而使空间电荷减少，内电场削弱，耗尽层变窄，这又有利于多子的扩散而不利于少子的漂移。

因为多数载流子的扩散与少数载流子的漂移在动态平衡时，大小相等、方向相反，相互抵消，所以外部宏观上仍然呈电中性，也就是说，在没有外加电场或其他能量的激发作用下，PN 结是没有电流通过的。

2. PN 结的单向导电性

PN 结在外加直流电压作用下，呈现什么特性呢？通过实验不难回答这个问题。

外加正向电压外加正向电压是将 P 型区与电源正极相连 N 型区经电阻与电源负极相连 这种接法也称正向偏置（简称正偏）如图 1-6 所示。此时，内电场因与外电场方向相反而受到削弱，这有利于多子的扩散而不利于少子的漂移。多子的扩散通过外电路形成正向电流 I_F 。因此 加上不大的正向电压 就会产生相当大的电流 在电路中串入电阻 R 限制过大的电流以避免烧坏 PN 结。

外加反向电压外加反向电压是将 P 型区与电源负极相连 N 型区经电阻 R 与电源正极相连，这种接法也称反向偏置（简称反偏）如图 1-7 所示。此时，内电场因与外电场方向相同而得到加强，这有利于少子的漂移而不利于多子的扩散。少子的漂移形成反向电流 I_R 。由于少子数量有限，因此，反向电流不仅很小，而且基本上不随外加电压变化而发生变化，故反向电流又叫做反向饱和电流。

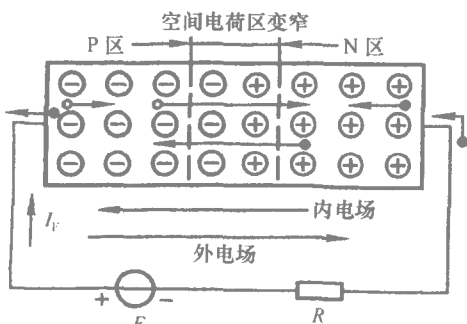


图 1-6 外加正向电压 PN 结导通

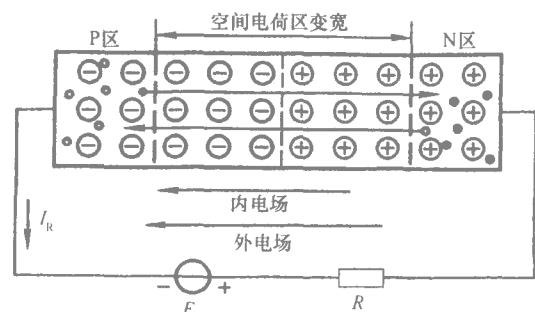


图 1-7 外加反向电压 PN 结截止

由此可知,PN 结正向偏置时,正向电阻很小,可形成较大的正向电流;PN 结反向偏置时,呈现较大的反向电阻,反向电流很小。这就是 PN 结的单向导电性。

1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的结构和特性

1. 二极管的结构

把一个 PN 结的两端接上电极引线,外面用金属或玻璃、塑料管壳封闭起来,便构成了二极管。其结构示意图和图形符号如图 1-8 所示。

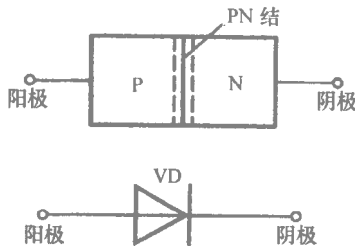


图 1-8 二极管的结构示意图和图形符号

二极管按照主要制造材料的不同可分为硅二极管、锗二极管等;按用途的不同可分为整流二极管、稳压二极管、开关二极管和检波二极管等;按结构的不同又可分为点接触型和面接触型两类。

点接触型二极管是将一根很细的硅铝触丝和一块 N 型半导体接触在一起,然后在金属触丝与半导体之间通过瞬时的大电流,使接触处产生大量的热量,把金属丝中微量金属原子扩散到 N 型半导体中形成一个 PN 结。点接触型二极管 PN 结面积小,不允许通过较大的电流,高频特性好,因此适合于使用在小电流整流、高频检波、混频电路中。

面接触型二极管的 PN 结是用合金法或扩散法制成的,PN 结面积较大,故允许通过较大的电流,适合于使用在低频整流等电路中。

半导体二极管结构示意图如图 1-9 所示。

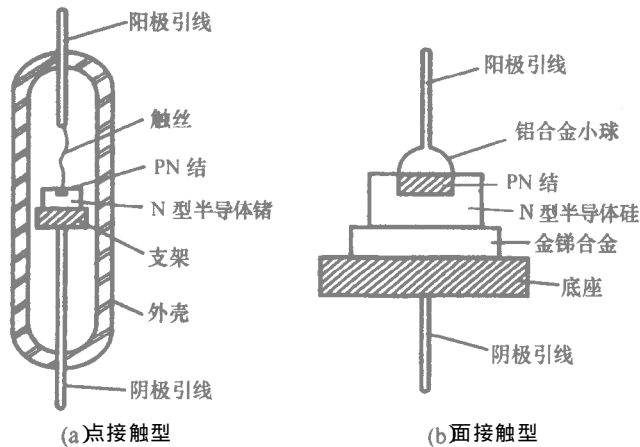


图 1-9 半导体二极管结构图

2. 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性如图 1-10 所示。横坐标表示加在二极管两端的电压,纵坐标表示流过二极管的电流。

(1) 正向特性

当二极管两端所加正向电压小于某一数值 U_{th} 时,由于外电场强度还不足以克服内电场,

因而扩散运动难以进行,正向电流很小(几乎为零),二极管呈现较大电阻,这段区域称为死区。 U_{th} 叫做门槛电压或死区电压。硅管 $U_{th}=0.5V$ 锗管 $U_{th}=0.1V$ 。当正向电压超过 U_{th} 后,内电场大大削弱,有利于多子扩散,正向电阻较小,正向电流按指数曲线规律增长,二极管处于导通状态。此时,硅管的导通电压降为 $0.6\sim 0.8V$,锗管的导通电压降为 $0.2\sim 0.3V$ 。

(2) 反向特性

当二极管两端加反向电压时,内电场加强,阻碍扩散而有利于漂移。由于漂移过程少数载流子数量有限,仅形成很小的反向饱和电流 I_s 。硅管 I_s 为 nA 数量级,锗管为 μA 数量级。

(3) 反向击穿特性

当反向电压的数值增加到 U_R 时,反向电流将急剧增大,这种现象称为反向击穿。 U_R 叫做反向击穿电压。使用二极管时,应避免反向电压超过击穿电压,以防损坏二极管。

(4) 二极管伏安方程

二极管两端电压与通过的电流用方程表示的关系称为二极管伏安方程,可表示为

$$I = I_s(e^{U/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中, I_s 为反向饱和电流, $U_T = kT/q$ 为温度的电压当量,其中 k 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子的电量。在常温 $300K$ 时, $U_T = 26mV$ 。

由伏安方程可知,正向偏置时,只要 $U \gg U_T$ 则

$$I \approx I_s e^{U/U_T} \quad (1-2)$$

即二极管电流随正向电压按指数上升规律变化。反向偏置时,只要 $|U| \gg U_T$ 有 $e^{U/U_T} \approx 0$ 则

$$I \approx -I_s \quad (1-3)$$

即二极管反向电流为一常数,不随两端电压变化而变化,此即反向饱和电流。

1.2.2 半导体二极管的主要参数

除伏安特性外,二极管的性能还可用一些参数来表示,主要参数有以下四个。

(1) 最大整流电流 I_F

它是指二极管长期运行时,允许通过的最大正向平均电流。实际使用时,通过二极管的工作电流应小于 I_F 。如果超过此值,将引起 PN 结过热而烧坏。

(2) 反向电流 I_R

它是指二极管承受反向工作电压而未被反向击穿时的反向电流值。它的数值越小,表明二极管的单向导电特性越好。

(3) 最高反向工作电压 U_{RM}

它是指二极管工作时两端所允许加的最大反向电压。通常 U_{RM} 约为反向击穿电压 U_R 的一半,以保证管子安全工作,避免击穿。

(4) 最高工作频率 f_M

PN 结具有电容效应,它的存在限制了二极管的工作频率。如果通过二极管的信号频率

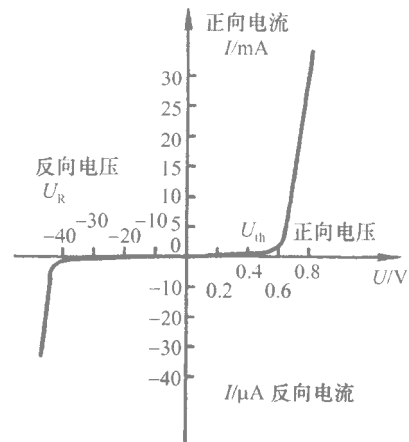


图 1-10 二极管伏安特性

超过管子的最高工作频率 f_M 则结电容的容抗变小 高频电流将直接从结电容上通过 管子的单向导电性变差。

1.2.3 半导体二极管的应用

利用二极管的单向导电性 可以组成整流、限幅、钳位、检波及续流等应用电路。

单相半波整流电路

将交流电变成脉动直流电的过程叫做整流。图 1-11 所示为单相半波整流电路，T 为电源变压器，二极管 VD 与负载电阻 R_L 串联后接变压器副边绕组。

在交流电压 u_2 的正半周，二极管 VD 上作用着正向电压，二极管导通，若忽略二极管电压降，则负载 R_L 上的电压 u_o 与交流电压 u_2 的正半周相等。

在交流电压 u_2 的负半周，二极管 VD 上作用着反向电压，二极管不导通，电路中没有电流，负载 R_L 上没有电压降，交流电压 u_2 的负半周全部作用在二极管上。

电路中电压和电流的波形如图 1-12 所示。可见，变压器副边的正弦交流电压被变换成了负载两端的单向脉动直流电压，达到了整流的目的是。由于这种电路在交流电的半周内才有电流流过负载，所以叫做单相半波整流电路。

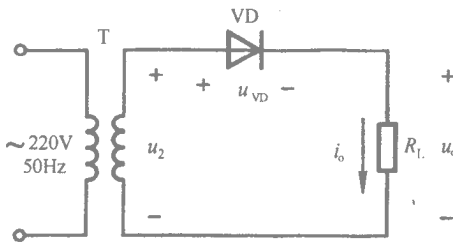


图 1-11 单相半波整流电路

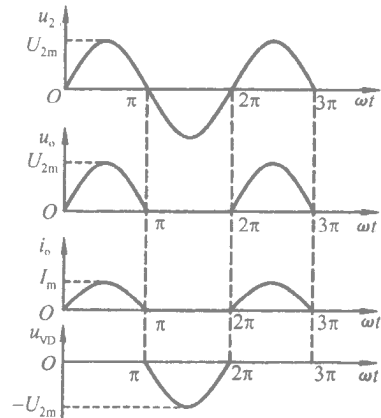


图 1-12 单相半波整流波形

单相半波整流电路特点是电路结构简单，缺点是输出电压的脉动大，变压器的利用率低。

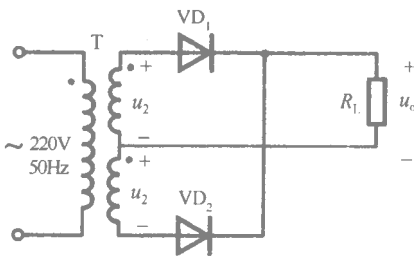


图 1-13 单相全波整流电路

2. 单相全波整流电路

为了克服单相半波整流的不足，可采用单相全波整流电路，如图 1-13 所示。

在交流电压 u_2 的正半周， VD_1 导通， VD_2 承受反向电压而截止；在 u_2 的负半周， VD_2 导通， VD_1 承受反向电压而截止。即一个周期内两个二极管轮流导通，从而正、负半周具有同一方向的电流流过负载 R_L ，故叫做全波整流

电路，其电流、电压波形如图 1-14 所示。

单相全波整流输出电压平均值大，脉动较小，但是变压器结构较复杂，利用率低，进一步的

改进电路见第 12 章。

3. 半导体二极管限幅电路

限制输出信号幅度的电路叫做限幅电路。当输入信号幅度变化较大时，为了使信号幅度能够限制在一定范围内，可将输入信号接入限幅电路。图 1-15 所示为限幅电路及其输入和输出波形。

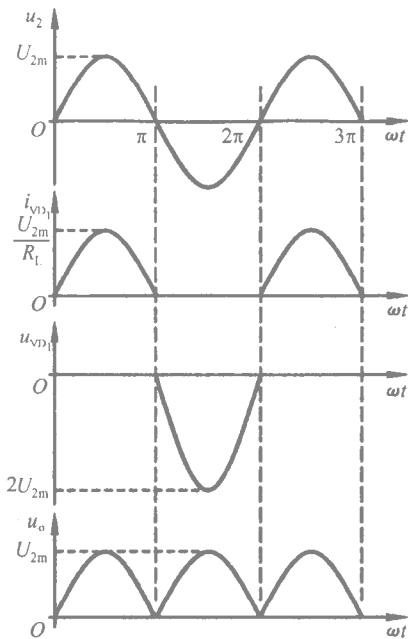
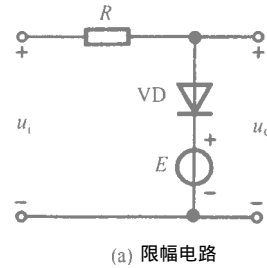
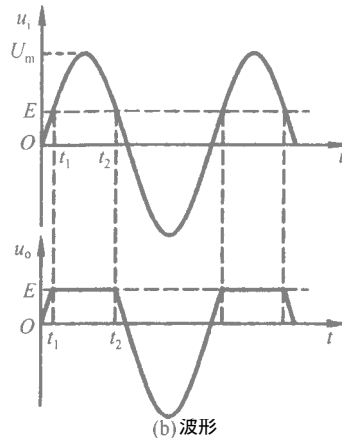


图 1-14 单相全波整流波形



(a) 限幅电路



(b) 波形

图 1-15 半导体二极管限幅电路及波形

为分析方便起见，设 VD 为理想二极管，即忽略二极管正向电压降和反向电流。当 $u_i > E$ 时，二极管导通，由于其正向电压降为零，所以 $u_o = E$ ，即输出电压正半周幅度被限制为 E 值。输入电压超出 E 的那部分 $u_i - E$ 电压降在电阻 R 上；当 $u_i < E$ 时，二极管截止，电路中电流为零， $u_R = 0$ ，所以 $u_o = u_i$ 。

4. 钳位电路

将电路中的某点电位值钳制在选定的数值上而不受负荷变动影响的电路叫做钳位电路，如图 1-16 所示。

只要二极管 VD 处于导通状态，不论负载 R_L 改变多少，电路的输出端电压 u_o 始终等于 $U_G + U_{VD}$ ，其中 U_{VD} 为二极管的导通电压。

【例 1-1】判断图 1-17 所示电路中的二极管是导通状态，还是截止状态。

解：本例题涉及二极管单向导电的重要概念。在解题时，首先要确定二极管两端的电位或电位差，从而确定二极管两端加的是正向电压还是反向电压，如果加的是正向电压，则二极管导通，否则截止。

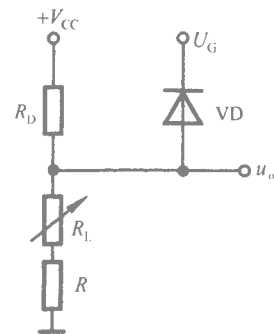


图 1-16 钳位电路

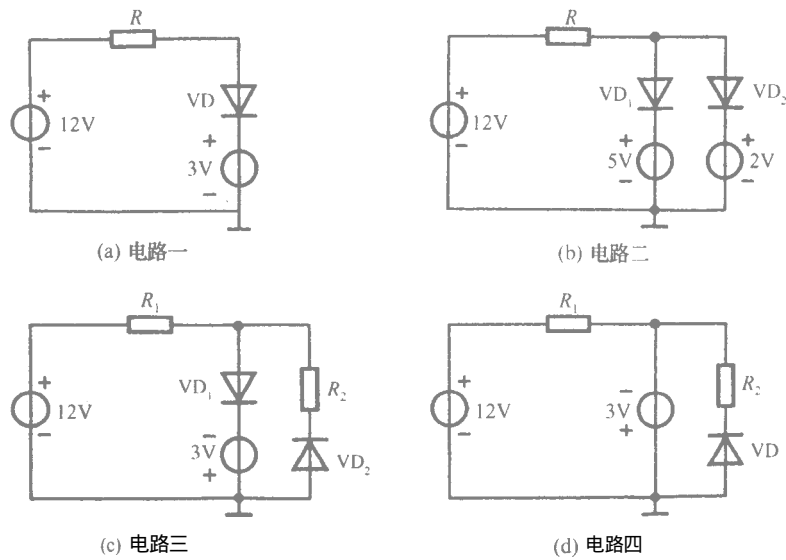


图 1-17 二极管工作状态分析

(a) 二极管 VD 阳极所处电位高于阴极所处电位 处于正向偏置 所以二极管 VD 工作在导通状态。

(b) 二极管 VD_2 因受正向电压而导通, 设其导通时管压降为 $0.7V$ 则二极管 VD_2 的阳极对地电位为 $0.7V$ 此电位低于二极管 VD_1 的阴极电位 $5V$, VD_1 处于反向偏置 所以 VD_1 工作在截止状态。

(c) 考虑 $12V$ 电源和二极管 VD_1 支路, VD_1 正偏, 工作在导通状态, 其阳极对地电位为 $U_{VD1} + (-3V) = -2.3V$ 此电位加于 R_2 二极管 VD_2 支路, VD_2 正偏 所以其工作在导通状态。

(d) $-3V$ 恒压源加在 R_2 二极管 VD 支路中 由于 VD 阳极接正, 所以其工作在导通状态。

5. 二极管检波电路

将低频信号从已调制信号 (高频信号) 中取出的电路叫做检波电路。图 1-18 所示为检波电路。

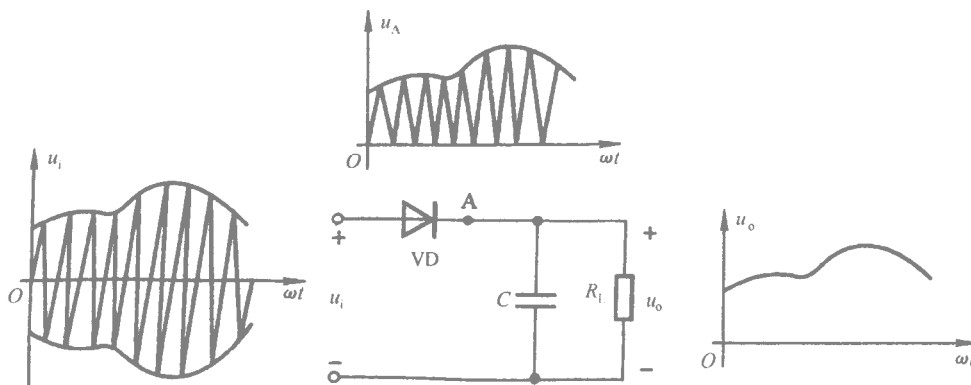


图 1-18 二极管检波电路

在电视、广播及通信中，为了使图像、声音能远距离传送，需要将这一低频电信号装载到高频信号（叫做载波信号）上，以便从天线上发射出去。其中高频信号的振幅、频率或相位随低频信号变化，这个过程叫做调制。

检波就是将低频信号从已调制信号（高频信号）中取出。在图 1-18 中 输入信号为已调信号 由电视机、收音机电路接收后 首先由检波二极管 VD 将已调幅信号的负半周去掉 然后利用电容器将高频信号滤去，留下低频信号，可以再放大这一低频信号，送给负载扬声器或显像管，还原成声音或图像。

6. 续流二极管电路

为防止电感元件换路出现过电压而并接一个二极管的电路叫做续流二极管电路。图 1-19 所示为续流二极管电路。

为防止含电感元件电路在换路时出现高电压，损坏元器件，可以采用续流二极管电路。正常工作时，续流二极管不导通，在电感与电压断开瞬间，电感电流仍维持原大小并按原方向继续流动，此时续流二极管为电感提供了放电通路。放电时电感两端电压始终等于续流二极管的正向电压，避免了电感上出现高电压。

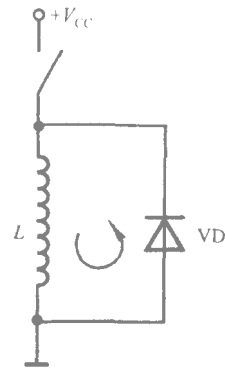


图 1-19 续流二极管电路

1.2.4 特殊二极管

除了普通二极管外 还有专供特殊用途的二极管 如稳压管、变容二极管、光电二极管、发光二极管。

1. 稳压管

稳压管是一种用特殊工艺制造而成的面接触型二极管，它与电阻配合构成的电路可使输出电压稳定。

(1) 稳压管伏安特性

通过实验可测得稳压管伏安特性如图 1-20 所示。

从伏安特性曲线可知 稳压管正向偏压时 其特性和普通二极管一样 反向偏压时 开始一段和二极管一样，当反向电压大到一定数值时，反向电流突然上升，比普通二极管陡直。这一特性叫做反向击穿特性。利用反向击穿区内电流在很大范围内变化，而管子两端的电压却变化很小的特性可进行稳压。

(2) 稳压管主要参数

稳定电压 U_Z 。 稳定电压是指稳压管正常工作时管子的端电压。过去由于制造工艺的分散 同一型号稳压管的稳定电压有差别 因而手册给出的是一个范围 例如 ICW59 型稳压管 $U_Z = 10 \sim 11.8V$ 。但现在因制造技术的进步，稳压值可做得较准确。 U_Z 的值已按 E_{24} 标准值制造。

稳定电流 I_Z 。 稳定电流是指保证稳压管正常稳压性能的最小工作电流。当工作电流低于 I_Z 时 稳压效果变差。

动态电阻 r_Z 。 动态电阻指稳压管在正常反向击穿区内，电压变化量与电流变化量的比值 即

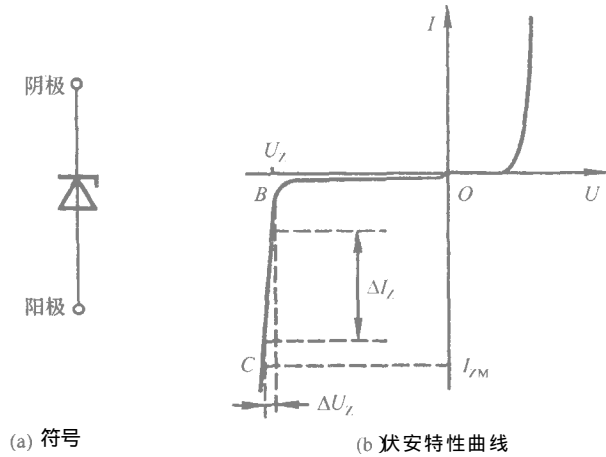


图 1-20 稳压管符号和伏安特性曲线

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

其中 r_z 是衡量稳压性能好坏的指标 击穿区特性愈陡 则 r_z 愈小 稳压性能愈好。

额定功耗 P_Z 。额定功耗是指稳定电压 U_Z 与最大稳定电流 I_{ZM} 的乘积 即 $P_Z = U_Z \cdot I_{ZM}$ 。它是由稳压管允许温升所决定的参数，工作时的功率若超过此值，稳压管将出现热击穿而被烧坏。

(3) 稳压管应用

稳压管稳定电路如图 1-21 所示。

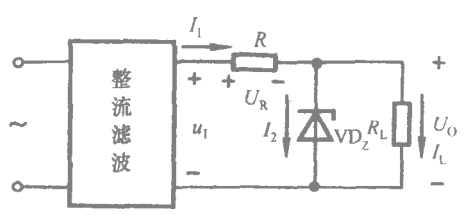


图 1-21 稳压管稳压电路

当负载电阻 R_L 不变时 假设输入电压 u_1 由于电网电压波动而升高，这将引起 VD_Z 两端电压 也就是输出电压 U_O 升高 根据稳压管特性可知 VD_Z 电压少许增加将导致流经 VD_Z 的电流 I_2 剧烈增加，这将使总电流 I_1 大大增加 这样 R 上的电压降 U_R 也有较大的增加 即 u_1 的升高大部分降在 R 上 使 $U_O = u_1 - U_R$ 增加得很少 基本

保持不变。同样 当输入电压 u_1 由于波动下降， U_O 下降得也很少 也能基本保持不变。

【例 1-2】 在图 1-22 中 已知稳压管 VD_{Z1} 的稳定电压 $U_{Z1} = 5.3V$ ， VD_{Z2} 的稳定电压 $U_{Z2} = 11.3V$ ，它们正向导通电压 U_{VD} 为 $0.7V$ ，各电路限流电阻取值合适。试求 $U_{O1} \sim U_{O4}$ 各为多少伏？

解：本题综合练习稳压管在电路中各种不同接法时的工作情况。

(a) 稳压管 VD_{Z1} 、 VD_{Z2} 反向串联， VD_{Z1} 阳极加正电压， VD_{Z2} 阳极接负电压 所以 VD_{Z1} 正向导通， VD_{Z2} 正常工作 则

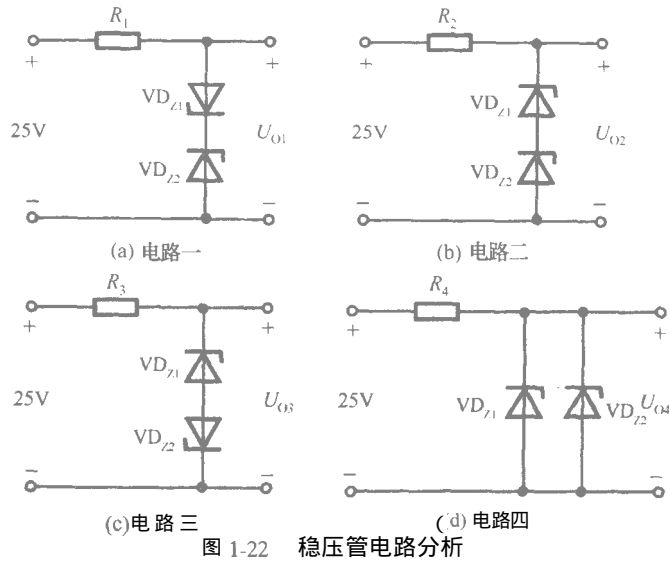
$$U_{O1} = U_{VD} + U_{Z2} = 0.7V + 11.3V = 12V$$

(b) 稳压管 VD_{Z1} 、 VD_{Z2} 同向串联 阳极接电源负端， VD_{Z1} 、 VD_{Z2} 均处于正常工作状态 则

$$U_{O2} = U_{Z1} + U_{Z2} = 5.3V + 11.3V = 16.6V$$

(c) 稳压管 VD_{Z1} 正常工作， VD_{Z2} 正向导通 则

$$U_{O3} = U_{Z1} + U_{VD} = 5.3V + 0.7V = 6V$$



(d) VD_{Z1}, VD_{Z2} 同向并联 均处于反向偏置 由于 $U_{Z1} < U_{Z2}$ 则 VD_{Z1} 处于正常工作状态, 此时, VD_{Z2} 所加电压为 U_{Z1} 小于工作电压 U_{Z2} 所以 VD_{Z2} 处于反向电压未击穿状态, 则

$$U_{O4} = U_{Z1} = 5.3V$$

2. 变容二极管

对 PN 结来讲, 当外加反向电压增大时, 耗尽层加宽, 相当于平板电容两极板之间距离加大 电容减小 反之 当外加反向电压减小时 耗尽层变窄 等效平板电容两极板之间距离变小, 电容增加。变容二极管就是利用 PN 结的这个特性制成的。其符号及特性如图 1-23 所示。

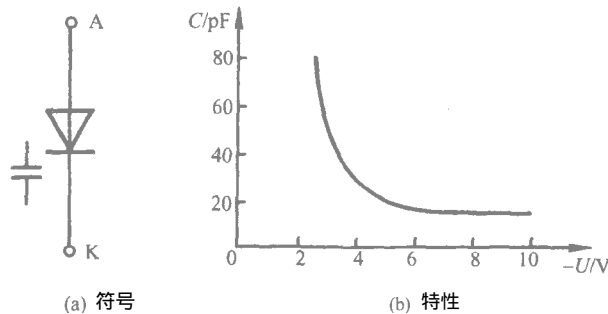


图 1-23 变容二极管

由于变容二极管容量较小, 所以主要用于高频场合下, 例如作为电视机调谐回路的压控可变电容器, 以实现用电压来改变频道。

3. 光电二极管 (光敏二极管)

当光线照射在 PN 结时, 半导体共价键中的电子将获得能量, 产生的电子空穴对会增多, 在外加反向电压作用下 内电场增强 反向电流增加 其大小与光的照度成正比 利用这个特性可制成光电二极管。光电二极管的结构外形如图 1-24 所示 其符号及特性曲线如图 1-25 所示。

利用光电二极管制成光电传感器, 可以把非电信号转变为电信号, 以便控制其他电子器

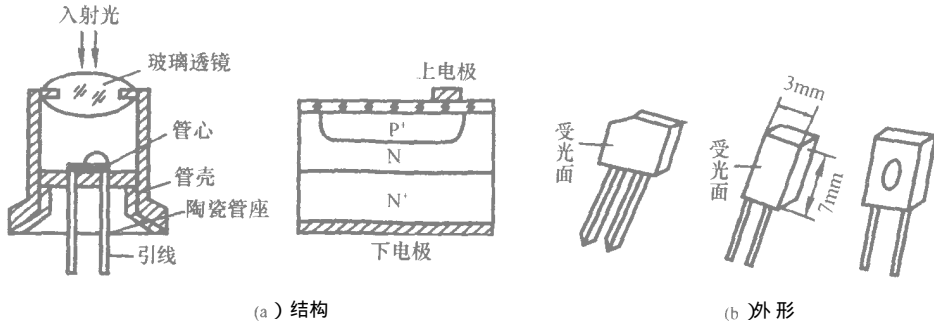


图 1-24 光电二极管的结构外形图

件。图 1-26 所示是利用光电二极管的光通开关电路。

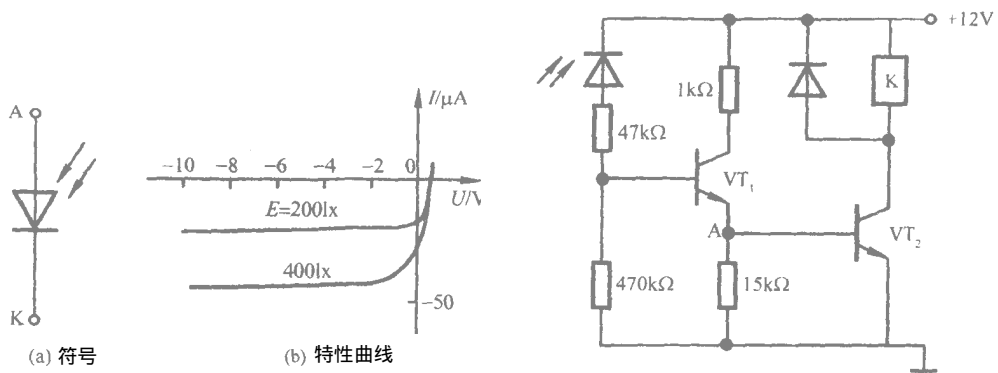


图 1-25 光电二极管符号及特性曲线

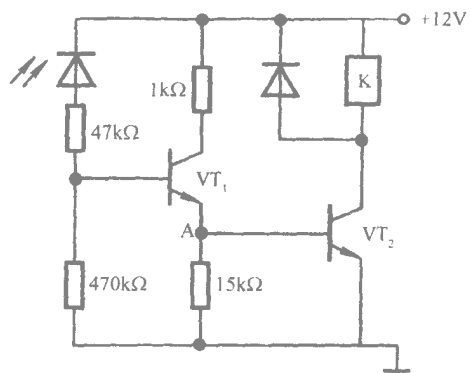


图 1-26 光通开关电路

当无光照时, VT_1 基极无光电流注入, VT_1 截止, VT_2 也截止, 继电器 K 线圈中无电流流过, 其触点不动作。当有光照射时, 光电二极管产生的光电流注入三极管 VT_1 , VT_1 导通, 光电流经 VT_1 放大后在 A 点产生较高电位, 使 VT_2 饱和导通, 电流通过继电器线圈 K, 使其触点动作, 完成控制任务。

4. 发光二极管

发光二极管, 简称 LED, 是采用镓 (Ga)、磷 (P)、砷 (As) 合成的二极管, 内部基本单元仍是一个 PN 结。当外加正向电压时, 电子与空穴复合过程中, 以光子的形式释放能量, 其亮度随注入电流的增大而提高。发光二极管的外形图及符号如图 1-27 所示。

发光二极管主要用来做显示器件, 除单个使用外, 还可用多个按分段式制成数码管或做成矩形阵列显示器。另外还有不可见光红外线发光二极管, 主要用在遥控装置中。

图 1-28 所示是稳压电源指示电路。当稳压电源工作时, 发光二极管点亮。

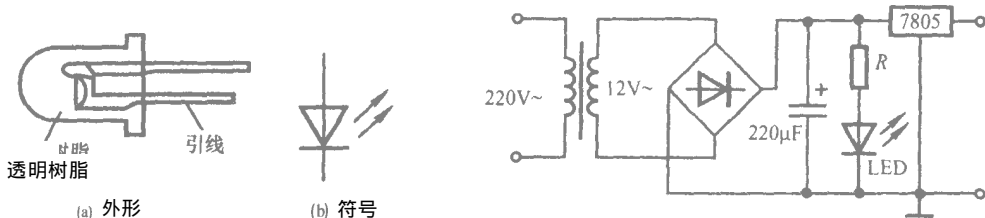


图 1-27 发光二极管外形及符号

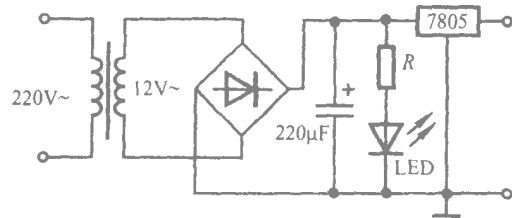


图 1-28 稳压、电源指示电路

图 1-29 所示是红外线发射器及光电接收控制器。其中红外线发射器采用调制脉冲技术，调制发射可以大大提高瞬时的发射功率，脉冲发射可以提高发射器的抗干扰能力。光电接收控制器包括红外接收器和信号处理放大电路，接收到的信号经处理和放大后去驱动继电器等执行机构。

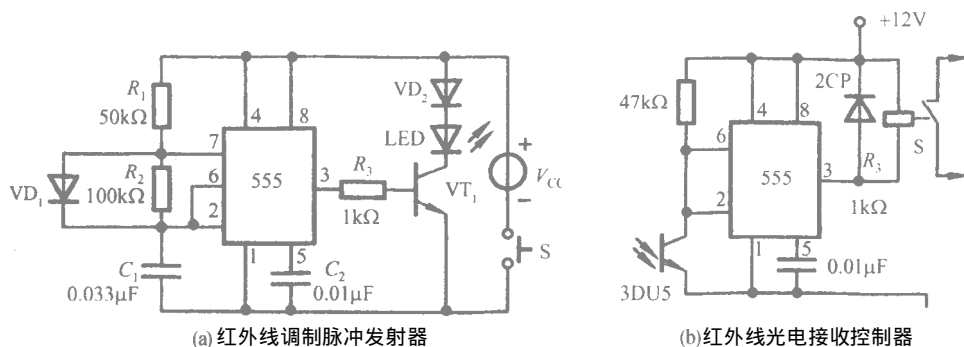


图 1-29 红外线发射器及光电接收控制器

5. 光电耦合器件

将发光二极管和光电二极管组合起来可以构成光电耦合器件，如图 1-30 所示。它以光为媒介实现电信号的传递。光电耦合器件中，发光器件和光电器件相互电气绝缘，分别处于输入和输出回路，可实现信号的单方向传递。

光电耦合器件常用在数字和模拟电路或计算机控制系统中做接口电路，它具有抗干扰性强、噪声低、信号传输速度快、耗电省、寿命长等优点。

光电耦合器件可以组成隔离放大器，可以不失真地传输交流信号，同时可用于电平转换。隔离放大器电路如图 1-31 所示。

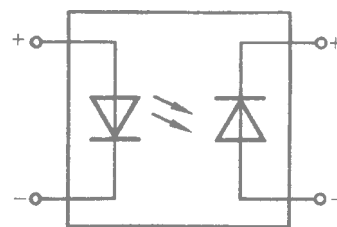


图 1-30 光电耦合器件

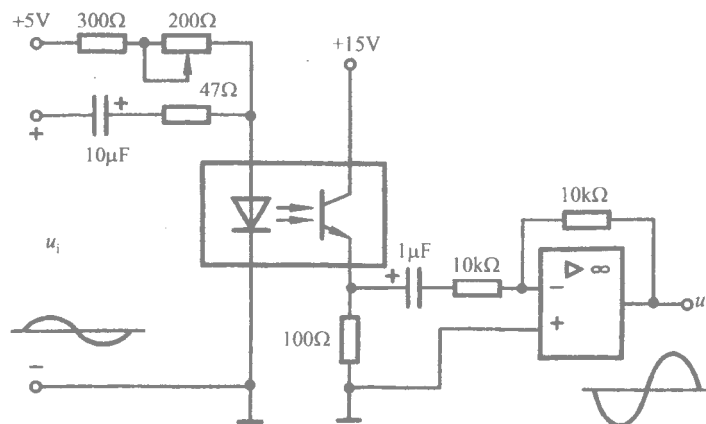


图 1-31 光电耦合隔离放大器

1.3 半导体三极管

半导体三极管也称为晶体三极管。它由两个相距很近的 PN 结组成，由于这两个 PN 结

的相互作用使其表现出不同于单个 PN 结的特性而具有电流放大功能，具有了极其广泛的用途。半导体三极管的研制成功，是电子技术早期发展中的一个质的飞跃。本节将围绕半导体三极管为什么具有电流放大作用这个核心问题，讨论半导体三极管的结构、电流放大原理以及特性曲线和参数。

1.3.1 半导体三极管的结构和分类

半导体三极管种类很多，按照半导体材料不同可分为硅管和锗管，按照功率大小可分为小功率管和大功率管，按工作频率高低可分为高频管和低频管。虽然各种三极管外形不同，但其内部基本结构是相同的，都是在一块半导体晶片上制造出三个掺杂区，形成两个 PN 结再引出三个电极，然后用管壳封装。半导体三极管的结构示意图和符号如图 1-32 所示。

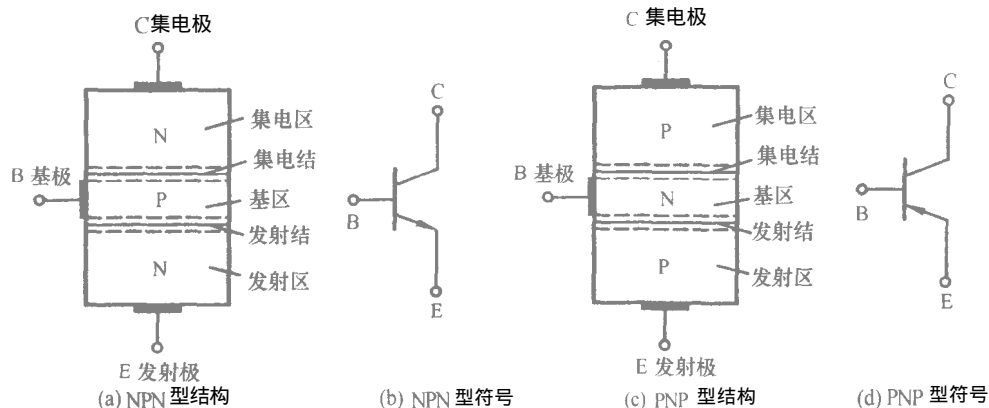


图 1-32 半导体三极管的结构示意图和符号

按两个 PN 结的组合方式不同，三极管可分为 NPN 型 [见图 1-32(a),(b)] 和 PNP 型 [见图 1-32(c),(d)] 两种。其内部均包含三个导电区：发射区、基区和集电区，并相应地引出三个电极：发射极 E、基极 B 和集电极 C。在三个区的两两交界处形成两个 PN 结，靠近集电区的称为集电结，靠近发射区的称为发射结。

为了使三极管具有放大作用，在制造时考虑了以下工艺要求：

发射区的掺杂浓度很高，便于多子的发射。

基区做得很薄，而且掺杂浓度比发射区和集电区要低得多。

集电区面积较大，便于收集由基区越过的载流子，也有利于散热。

从三极管结构示意图看，会误以为其构造是对称的，发射极和集电极可以互换，由上述工艺要求可知，这是不对的。实际上发射极和集电极在构造上是不对称的，一般不能互换。另外，三极管并不是两个 PN 结的简单组合，是不能用两个二极管代替的。

1.3.2 半导体三极管电流放大原理

为了使三极管能正常放大电流信号，除满足三极管内部工艺要求外，还需满足一定的外部条件：发射结必须正向偏置，集电结必须反向偏置。以 NPN 型三极管为例，为满足此条件应有 $U_{BE} > 0$ 和 $U_{BC} < 0$ ，即三个电极电位关系为 $U_C > U_B > U_E$ 。

下面以 NPN 型三极管为例分析三极管是如何进行电流放大的。图 1-33(a) 所示电路中，电源 V_{BB} 使三极管的发射结正偏，当 $V_{CC} > V_{BB}$ 时，只要电路参数取得合适，就能使集电结反向偏置。在满足了这一外部条件下，内部电流传输规律如图 1-33(b) 所示。

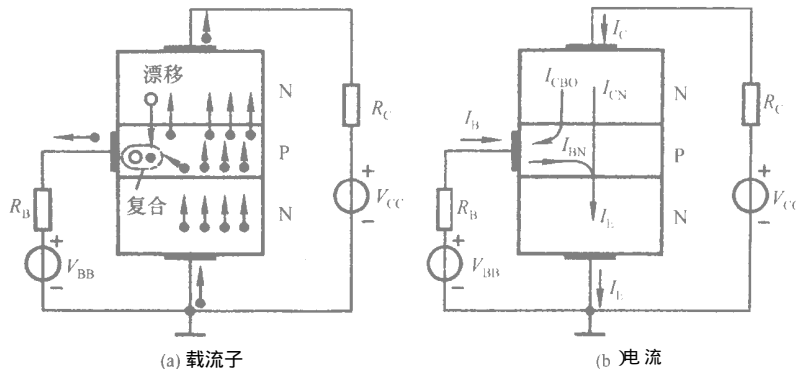


图 1-33 三极管中载流子和电流传输规律

三极管内部载流子传输规律如下。

1. 发射区向基区扩散电子

由于发射结正向偏置，这时发射结相当于一个正向偏置的二极管，故其内电场被削弱，同时由于发射区掺杂浓度高，就会有大量的多数载流子（电子）顺利扩散到基区，同时又不断从电源负极补充电子 因而形成发射极电流 I_E 。基区中的空穴（P型半导体中的多子）也会从基区扩散到发射区，由于基区空穴的浓度比发射区中电子的浓度低得多，因此，空穴电流是很小的。

2. 电子在基区的扩散与复合

发射区中大量的自由电子扩散到基区后，它在靠近发射结处浓度最大（这时的浓度数值与发射结电压 U_{BE} 有关， U_{BE} 愈大 浓度愈大）靠近集电结处浓度最小 形成浓度差。由于存在浓度差，故电子要继续朝集电结方向扩散，在扩散过程中会有少部分自由电子与基区中的空穴复合 形成复合电流 I_{BN} 。为了补充因复合而消失的空穴，使基区中空穴浓度保持不变，电源 V_{BB} 的正极不断地从基区拉走电子，向基区提供新的空穴，而被拉走的电子形成基极电流 I_B 。它基本上等于复合电流 I_{BN} 。

3. 集电区收集扩散到集电结边缘的电子

由于集电结上加的是反向电压，这个电压在集电结处产生的电场对于基区中的电子来说是加速电场，所以，扩散到集电结边缘的电子非常容易在这个电场作用下穿过集电结到达集电区 到达集电区的电子形成电流 I_{CN} 它基本上等于集电极电流 I_C 。

另外，在集电结反向电压的作用下，会使集电区少数载流子（空穴）和基区的少数载流子（电子）进行漂移运动 形成反向饱和电流 I_{CBO} 。 I_{CBO} 构成集电极电流和基极电流的一部分，其数值很小。

载流子运动形成的基极电流 I_B 显然小于集电极电流 I_C ，依节点电流代数和等于零的概念有

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-4)$$

由于

$$I_B = I_{BN} - I_{CBO} \quad \text{及} \quad I_C = I_{CN} + I_{CBO}$$

另外 定义

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I_{BN}} \quad (1-5)$$

有

$$\begin{aligned} I_C &= \bar{\beta} I_{BN} + I_{CBO} = \bar{\beta} (I_B + I_{CBO}) + I_{CBO} \\ &= \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO} \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中, β 定义为共射直流电流放大系数, I_{CBO} 为集电结反向饱和电流。

考虑到 I_{CBO} 数值很小, 可忽略不计, 有

$$I_C \approx \beta I_B \quad (1-7)$$

依式 1-4 有

$$I_E \approx (1 + \bar{\beta}) I_B \quad (1-8)$$

由于 I_C (或 I_E) 与 I_B 之间成一定的比例关系, 所以可以讲 I_C (或 I_E) 受 I_B 的控制, 或者讲基极电流 I_B 的少量变化可以引起集电极电流 I_C 的较大变化, 三极管具有电流放大作用。

1.3.3 半导体三极管共射特性曲线

三极管特性曲线是指三极管各电极电压与电流之间的关系曲线。它反映出三极管的工作状态, 是分析放大电路的重要依据。它可以用晶体管特性图示仪测出, 也可以用实验法获得。

三极管有三个电极, 以不同电极作为公共端, 就会有不同的特性曲线。这里主要介绍以发射极为公共端的特性曲线, 即共射特性曲线。仍以 NPN 型三极管为例进行讨论。

输入特性曲线

输入特性曲线是指集电极与发射极间电压 U_{CE} 为某一常数时, 输入回路中三极管基极与发射极间电压 U_{BE} 改变时对基极电流 I_B 的影响, 即

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

图 1-34 所示为三极管共射特性曲线的测试电路。

输入特性曲线分析如下:

(1) $U_{CE} = 0V$, 即集电极与发射极之间短路时, 由于发射结和集电结并联, 输入特性就是两个二极管并联后的正向特性, 如图 1-35 所示。

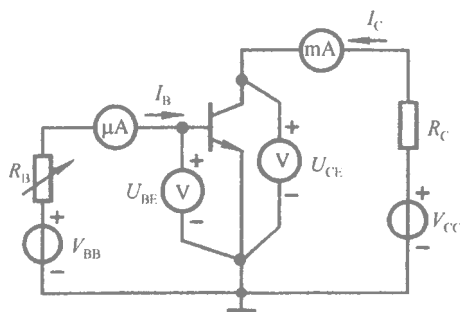


图 1-34 三极管共射特性曲线测试电路

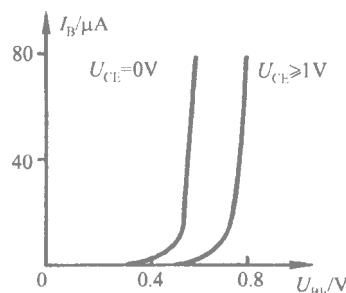


图 1-35 三极管输入特性

(2) $U_{CE} \geq 1V$ 时, 由于集电结加宽, 内电场增强, 收集载流子的能力增加, 而集电结加宽又使基区变薄, 载流子复合机会减小, 基区复合电流减小, I_B 减少, 因此特性曲线右移。

如果 U_{CE} 继续增加, 虽然收集能力进一步增强, 但基区中靠近集电结附近再无更多的载流子可收集, 因而基区复合电流不再明显减小, 输入特性基本上在一条曲线上。

由输入特性可知, 当 U_{BE} 较小时, $I_B = 0$ 这一段区域称为死区。只有 U_{BE} 大于死区电压后,

三极管的基极电流 I_B 才随 U_{BE} 增加而明显增大。硅管的死区电压约为 $0.5V$ 锗管的死区电压约为 $0.1V$ 。当三极管导通 正常工作时 硅管的 U_{BE} 为 $0.6\sim 0.8V$ 锗管的 U_{BE} 为 $0.1\sim 0.3V$ 。

2. 输出特性曲线

输出特性曲线是指在基极电流 I_B 一定时，输出回路集电极电流 I_C 与输出电压 U_{CE} 之间的关系曲线 即

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

对于 I_B 的每一个确定值，都有一条输出特性曲线 所以输出特性是一族曲线 如图 1-36 所示。各条曲线的形状基本相似，可分为放大区、饱和区和截止区。

(1) 放大区 当发射结正偏且 U_{BE} 大于死区电压，同时集电结反偏时，三极管的集电极电流 I_C 几乎仅决定于基区电流 I_B 即 $I_C \approx \beta I_B$ (与式 (1-7) 相同) 而与输出电压 U_{CE} 无关。 I_C 的变化远大于 I_B 的变化，表现出三极管的电流放大作用。

(2) 饱和区 当发射结正偏且 U_{BE} 大于死区电压 同时集电结正偏时 特性曲线十分密集 I_C 不受 I_B 控制，这是由于集电结内电场比较弱，收集载流子能力不强，使得在输入电流 I_B 相同时 输出电流 I_C 数值将减小 即 $I_C \neq \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO}$ ，三极管失去电流放大作用。

(3) 截止区 一般习惯上把 $I_B \leq 0$ 区域叫做截止区。此时，发射结和集电结均反偏， $I_C = 0$ ，三极管相当于开路，无放大作用。

通过以上三极管的特性分析可汇总如表 1-1 和表 1-2 所示。

表 1-1 三极管直流偏置状态

	放大区	饱和区	截止区
发射结	正偏	正偏	反偏
集电结	反偏	正偏	反偏
流控关系	$I_C = \beta I_B$	$I_C < \beta I_B$	$I_B = 0, I_C = 0$
电流分配	$I_E = I_B + I_C$		

表 1-2 三极管各极电位关系

		NPN 型		PNP 型	
		Si*	Ge	Si	Ge*
截止区	U_{BE}/V	<0	<0	>0	>0
	电位关系	$U_C > U_E > U_B$		$U_C < U_E < U_B$	
放大区	U_{BE}/V	0.7	0.2	-0.7	-0.2
	电位关系	$U_C > U_B > U_E$		$U_C < U_B < U_E$	
饱和区	U_{BE}/V	0.7	0.2	-0.7	-0.2
	电位关系	$U_B > U_C > U_E$		$U_B < U_C < U_E$	

* 为常见器件

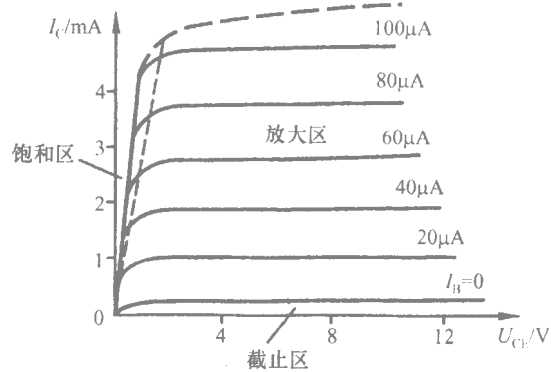


图 1-36 三极管输出特性曲线