

第 1 章 半导体器件

二极管和三极管是最常用的半导体器件，是构成各种电子线路的基本元件。本章从半导体的基本知识入手，分析半导体二极管、双极型三极管和场效应管的基本结构、特征曲线和性能参数，并在此基础上给出各种半导体器件的微变等效电路。

1.1 教学要求

知 识 要 点	掌 握 程 度
半导体的基本知识	(1) 理解半导体的基本特性； (2) 掌握本征半导体、杂质半导体的基本结构。
晶体二极管	(1) 掌握 PN 结的单向导电性； (2) 熟练掌握二极管的伏安特性曲线及应用。
晶体三极管	(1) 掌握三极管的放大原理； (2) 熟练掌握三极管的输入、输出特性及微变等效电路。
场效应管	(1) 理解场效应管的放大原理； (2) 掌握场效应管的输入、输出特性及微变等效电路。

1.2 引例：电子器件的发展历程

什么是电子管？电子管是一种在气密性封闭容器（一般为玻璃管）中产生电流传导，利用电场对真空中电子流的作用以获得信号放大或振荡的电子器件。

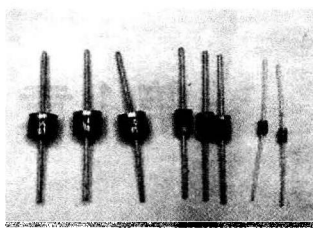
电子二极管是由一位名叫费莱明的英国工程师在 1904 年发明的，可以用来检测无线电波。1906 年，杰出的英国科学家德福雷斯发明了世界上第一支电子三极管，该电子三极管有放大微弱信号的功能。

电子管的发明，标志着世界从此进入了电子时代。然而，随着各种电子产品的广泛使用，电子管逐渐呈现出体积大、功耗大、发热厉害、寿命短等弊端，于是人们开始寻找和开发电子管的可替代产品。

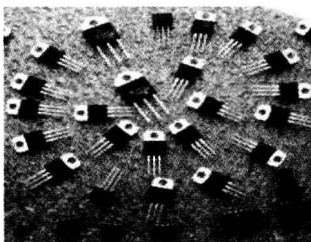
1947 年 12 月，美国贝尔实验室的肖克莱、巴丁和布拉顿组成的研究小组，研制出了一种点接触型的锗晶体管。什么是晶体管呢？晶体管是半导体做成的固体电子元件，最常用的半导体材料便是锗和硅，如图 1.0 所示。同电子管相比，晶体管具有消耗电能极少、不需预热、结实可靠、体积小、寿命长等优点。



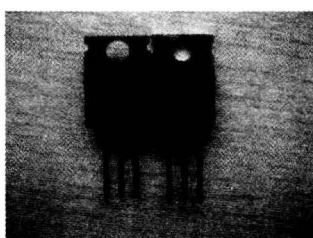
(a) 电子管



(b) 晶体二极管



(c) 晶体三极管



(d) 场效应管

图 1.0 常用的半导体器件

晶体管的横空出世,是 20 世纪的一项重大发明,是微电子革命的先声,它的重要性可以与印刷术、汽车和电话等发明相提并论。1956 年,肖克莱、巴丁、布拉顿 3 人,因发明晶体管同时荣获诺贝尔物理学奖。

晶体管发明之后便被广泛地应用于工农业生产、国防建设和人们的日常生活中,也为后来集成电路的诞生吹响了号角。

电子器件的发展,对人类社会的进步起着巨大的推动作用。从真空电子管的发明到晶体管的出现,从集成电路的诞生到大规模集成电路、超大规模集成电路的广泛应用,每一代小型化电子器件的出现,都带来了电子技术的革命,推动了电子科技的迅速发展,也促进了其他科技和社会生产的进步。

1.1 半导体的基本知识

自然界中的各种物质,按导电能力的大小可以分为导体、半导体和绝缘体三类。铜、铝等金属物质的电阻率在 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下,它们属于导体,具有较好的导电性能;橡胶、塑料等物质的电阻率在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上,它们属于绝缘体,导电性能较差;半导体的电阻率在 $10^{-4} \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 的范围内,导电性能介于导体和绝缘体之间。由于半导体具有热敏性、光敏性和掺杂性,由半导体制成的各种电子器件得到了非常广泛的应用。

(1) 热敏性:半导体的导电性能随着温度的变化发生明显的改变。利用热敏性可制作成各种热敏电阻,用于控制系统和温度测量等。

(2) 光敏性:半导体的导电性能对光照比较敏感。利用光敏性可制作成光电二极管、光电三极管及光敏电阻等多种类型的光电器件,广泛地应用于自动控制和电子设备中。

(3) 掺杂性:在纯净的半导体中掺入极少量的杂质元素,将会极大地改变半导体的导电性能。例如,在纯净的半导体中掺入百万分之一的杂质,其导电能力将提高 100 万倍。





利用掺杂性可制作成各种不同用途的半导体器件，如二极管、三极管和场效应管等。

在电子器件中用得最多的半导体材料是硅和锗。硅和锗都是四价元素，最外层原子轨道上具有 4 个价电子。由于相邻原子的距离很近，这四个价电子不仅受到自身原子核的束缚，而且受到相邻原子核的吸引，形成如图 1.1 所示的共价键结构。

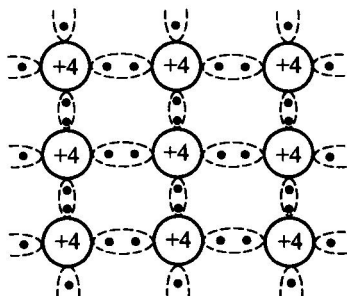


图 1.1 硅和锗的共价键结构

1.1.1 本征半导体

本征半导体指的是完全纯净，结构完整的半导体晶体。在绝对温度 $T=0\text{K}$ (开尔文) 和没有外界激发的前提下，本征半导体内的价电子全部被束缚在共价键中，不能自由运动，被称为束缚电子，不参与导电。因此，本征半导体中虽然有大量的价电子，但它们都不能自由移动，此时的本征半导体不具有导电性。

当半导体的温度升高或者受到光线照射等外界因素的影响时，共价键中的某些价电子获得能量，挣脱共价键的束缚成为自由电子；与此同时，原共价键中的相应位置留下空位，称作“空穴”，如图 1.2 所示。显然，电子和空穴总是成对出现的，即本征半导体中的电子和空穴的数目总是相等的，对外呈电中性。这种在热或光的作用下，本征半导体中产生电子空穴对的现象称为本征激发。

当共价键中出现空位时，邻近共价键中的价电子可以跳过去填补这个空位，而原来价电子的位置又出现新的空位，这个过程持续下去，即发生空位的迁移，如图 1.3 所示。如果把空穴看成带正电的载流子，那么空穴的移动与带负电的价电子反方向移动的效果是一样的。由此可见，本征半导体中存在电子和空穴两种可以导电的载流子，电子带负电，空穴带正电，本征半导体依靠电子和空穴这两种载流子的移动进行导电。

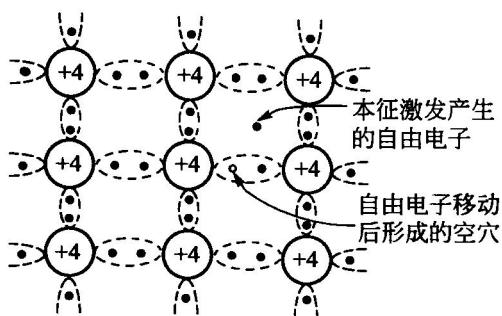


图 1.2 本征激发产生电子空穴对示意图

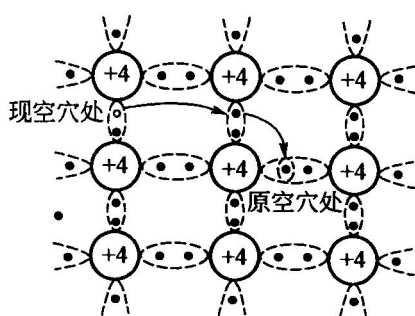


图 1.3 电子和空穴的移动形成电流



1.1.2 杂质半导体

实际应用中,在纯净的半导体材料中掺入少量的杂质形成杂质半导体,可以显著改变半导体的导电性能。根据掺杂不同,杂质半导体又可以分为N型半导体和P型半导体。

1. N型半导体

在纯净半导体中掺入微量的五价元素(如磷)后,可形成N型半导体,如图1.4所示。由于五价元素最外层有五个价电子,那么与四价元素形成共价键时,剩余一个价电子不能形成共价键而变成自由电子。同时考虑到常温下由于本征激发产生的少量电子空穴对,则在N型半导体中存在两种导电的载流子:自由电子和空穴。其中自由电子的浓度远大于空穴密度,被称为多数载流子,简称为多子;空穴浓度较低被称为少数载流子,简称为少子。N型半导体主要依靠电子导电,因此也被称为电子型半导体。

应当注意的是,释放了一个价电子的杂质正离子被束缚在晶格中,并不能像本征激发获得的空穴一样参与导电。同时,晶体中正负电荷数目相等,N型半导体整体呈电中性。

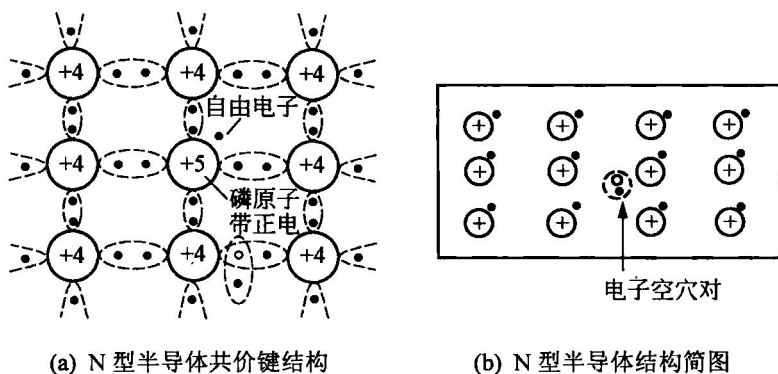


图 1.4 N型半导体结构

2. P型半导体

在纯净半导体中掺入微量的三价元素(如硼)后,可形成P型半导体。三价元素最外层只有三个价电子,那么与四价元素形成共价键时,将会存在一个多余的空穴,如图1.5所示。相邻共价键上的电子受到热振动或其他激发而获得能量时,就可能填补该空位使硼原子变成不能移动的负离子,原来共价键因为缺少电子形成空穴。晶体中正、负电荷数目相等,整体呈电中性。考虑到本征激发产生的少量电子空穴对,P型半导体中空穴的浓度远大于自由电子的浓度成为多子,自由电子浓度较低成为少子。P型半导体主要依靠空穴导电,因此也被称为空穴型半导体。



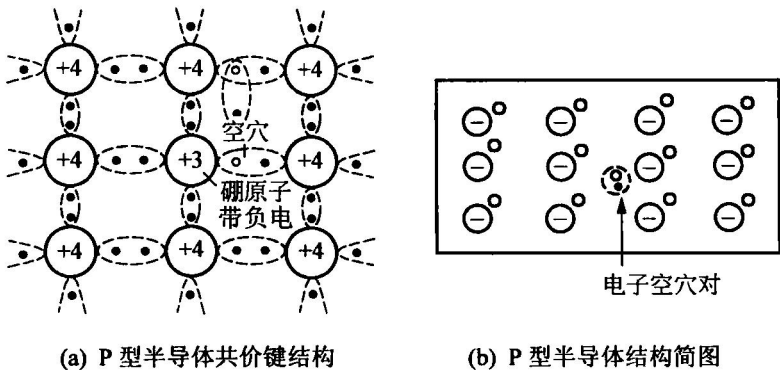


图 1.5 P 型半导体的结构

1.2 PN 结与二极管

在一块本征半导体上，通过一定的掺杂工艺，一侧形成 P 型半导体，另一侧形成 N 型半导体，由于载流子浓度的差别形成多子的扩散运动，P 区的空穴向 N 区扩散，N 区的电子向 P 区扩散。P 区一侧失去空穴留下不能移动的负离子，N 区一侧则失去电子留下不能移动的正离子，这些离子不能参与导电，在 P 区和 N 区交界处形成正、负离子的薄层，称为空间电荷区，这就是所谓的 PN 结，如图 1.6 所示。PN 结产生的内电场，方向由 N 区指向 P 区，该电场的逐渐建立将阻碍多子扩散运动的进行。另一方面，在 P 型和 N 型半导体的内部还存在少数，空间电荷区的内电场有利于少数形成漂移运动。随着内电场的逐渐建立，多子的扩散运动随之减弱，少子的漂移运动逐渐增强，最终到达扩散与漂移的动态平衡，空间电荷区的宽度基本保持不变。

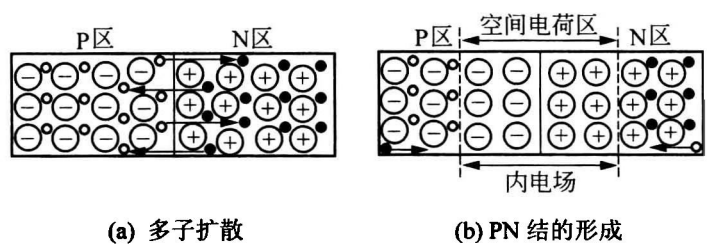


图 1.6 PN 结的形成

1.2.1 PN 结的单向导电性

PN 结最基本的特性为单向导电性，即外加正向电压，PN 结导通；外加反向电压，PN 结截止。

1. 外加正向电压

当 PN 结外加正向电压，即 P 区一侧接直流电源正极，N 区一侧接直流电源负极，称 PN 结正向偏置。

如图 1.7 所示，由于电源电压产生的外电场和 PN 结的内电场方向相反，外电场的存在



将削弱内电场的作用,使PN结的空间电荷区变窄,有利于两区的多数载流子向对方扩散,形成正向电流 I_F ,此时PN结处于正向导通状态。

在正常的工作范围内,正向电压稍有变化,流过PN结的电流就会发生显著变化,PN结呈现很小的正向电阻。为了防止PN结因电流过大而损坏,回路中必须串接限流电阻 R 。

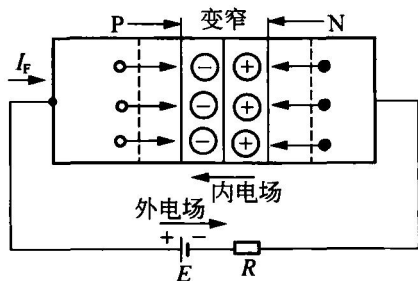


图 1.7 PN 结外加正向电压

2. 外加反向电压

当PN结外加反向电压,即P区一侧接直流电源负极,N区一侧接直流电源正极,称PN结反向偏置。

如图1.8所示,由于电源电压产生的外电场和PN结的内电场方向相同,外电场的存在将加强内电场的作用,使PN结的空间电荷区变宽,阻碍了多数载流子的扩散运动。因此,只有两区的少数载流子形成微弱的反向电流 I_R ,此时PN结处于反向截止状态。

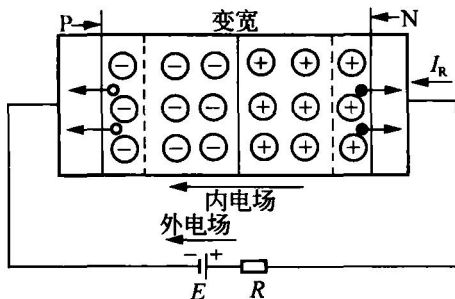


图 1.8 PN 结外加反向电压

应当注意的是,少数载流子是由于本征激发产生的,因此反向电流 I_R 受温度影响比较大。

综上所述,PN结具有单向导电性:正向偏置时导通,正向电阻很小;反向偏置时截止,反向电阻很大。

1.2.2 晶体二极管

1. 二极管的结构与类型

在PN结的P型和N型半导体上,分别引出两根金属引线,并用管壳封装,就形成了二极管。其中P区的引线对应阳极,N区引线对应阴极。

二极管按材料、用途和制作工艺等,可以进行不同的分类。



按所用半导体的材料，二极管可以分为锗二极管、硅二极管和砷化镓二极管等。

按管子的用途，二极管可以分为整流二极管、检波二极管、稳压二极管、开关二极管和光电二极管等。

按管子的制作工艺，二极管可以分为点接触型二极管、面接触型二极管和平面型二极管，分别如图 1.9(a)、(b)和(c)所示。点接触型二极管的特点是结面积小，因而结电容小，允许的工作电流较小。常用于高频检波电路和混频电路中；面接触型二极管的特点是结面积较大，因而允许通过较大电流，但由于结电容大，只能在较低频率下工作；平面型二极管若结面积较大，可通过较大电流，适用于大功率整流；结面积较小的，适用于脉冲与数字电路中作为开关管。二极管可以用如图 1.9(d)所示的符号表示。

二极管的种类和型号很多，国内外都采用各自规定的命名方法加以区分。我国国产半导体的命名方法采用国家标准 GB249—74。

半导体器件的型号由五个部分组成，各部分的具体含义见附录 1。例如 2AP5，其中“2”表示二极管，“A”表示该管子由 N 型锗材料构成，“P”表示普通管，“5”表为序号。又如 2CZ11，代表 N 型硅材料整流二极管。

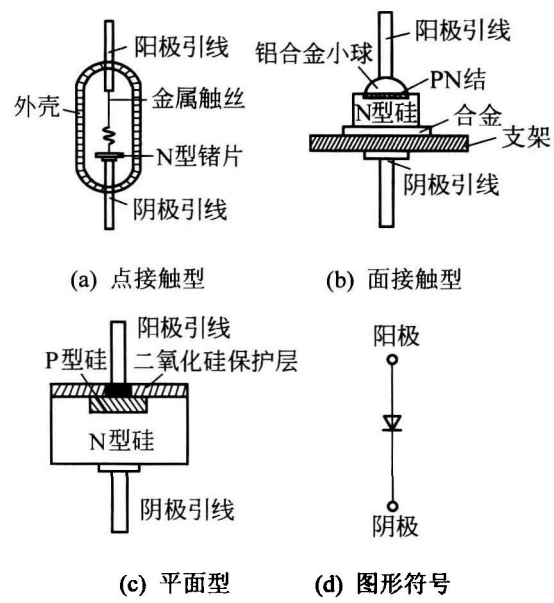


图 1.9 半导体二极管的结构和图形符号

2. 二极管的伏安特性曲线

二极管的性能可以通过它的伏安特性曲线加以描述。伏安特性是指流过二极管的电流随着外加电压的变化关系。若以外加电压作为横坐标，流过二极管的电流作为纵坐标，用作图法将相应的工作点连成平滑的曲线，即形成二极管的伏安特性曲线。不同的管子具有不同的伏安特性曲线，它是选择和使用二极管的重要依据。图 1.10 给出了某二极管的伏安特性曲线。

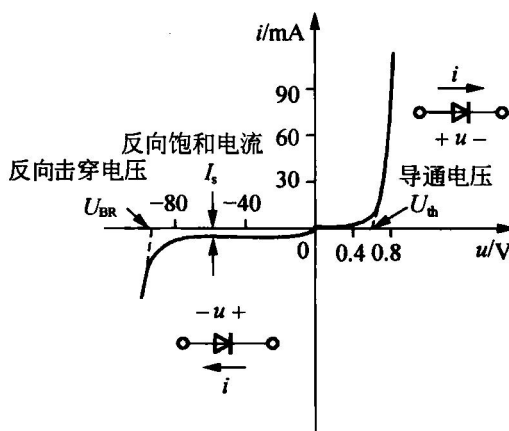


图 1.10 二极管伏安特性曲线

1) 正向特性

外加正向电压可以使 PN 结的空间电荷区变薄, 有利于多子的扩散运动。但当外加正向电压较小时, 外电场产生的作用力还不足以克服内场对多子扩散运动所形成的阻力, 因此正向电流非常微弱。

当正向电压超过某个数值(图中的 U_{th})以后, 正向电流明显增大, 二极管处于导通状态, 呈现很小的正向导通电阻。这一电压称为导通电压或者门槛电压。通常硅管的导通电压约为 $0.6 \sim 0.7V$, 锗管的导通电压约为 $0.2 \sim 0.3V$ 。

使用二极管正向工作时, 应注意它的正向导通电流不能超过最大允许值, 否则将烧坏 PN 结。

2) 反向特性

二极管外加反向电压时, 在很大的范围内反向电流很小且基本不随反向电压变化, 二极管呈现很大的电阻, 电路相当于断开状态。此时回流程过的电流称为反向饱和电流 I_s 。小功率锗管的 I_s 约几个微安, 硅管的 I_s 一般小于 $0.1\mu A$ 。

3) 反向击穿特性

当加到二极管上的反向电压达到一定数值后, 反向电流急剧增加, 这种现象称为反向击穿。反向击穿电压 U_{BR} 一般在几十伏以上。

此外, 温度对特性曲线有较大影响。温度升高时, 正向特性曲线左移, 导通电压下降; 反向特性曲线向下移动, 反向饱和电流增大。

3. 二极管的主要参数

1) 最大整流电流 I_F

最大整流电流 I_F 是指二极管长期工作时, 允许通过的最大正向工作电流。实际应用时, 二极管的平均工作电流不能超过此值。

2) 最大反向工作电压 U_{RM}

最大反向工作电压 U_{RM} 是指二极管在使用时允许加的最大反向电压(峰值)。通常手册上给出最大反向工作电压为击穿电压的 $1/2$ 左右。

3) 反向饱和电流 I_s

反向饱和电流 I_s 是指在规定反向电压和室温下所测得的反向电流值。该值越小, 说明管子的单向导电性能越好。

4) 二极管的直流电阻 R

二极管直流电阻 R 是指加在二极管两端的直流电压与流过二极管的直流电流的比值。二极管的正向电阻较小, 约为几欧到几千欧; 反向电阻很大, 一般可以达到零点几兆欧以上。

5) 最高工作频率 f_M

最高工作频率 f_M 是指二极管正常工作的上限频率。它的大小主要由 PN 结的结电容决定, 工作频率超过 f_M 时, 二极管的单向导电性能变差。

4. 二极管的近似模型及应用

1) 二极管的近似模型

二极管的特性曲线呈现非线性, 应用二极管的电路便成为非线性电路, 严格地分析这种非线性电路非常困难, 实际应用中往往根据应用条件和精度要求进行合理的模型近似。

理想二极管模型认为外加正向电压二极管导通, 导通电压为 0, 内阻也为 0, 此时的二极管相当于短路; 外加反向电压, 二极管截止, 内阻为无穷大, 二极管相当于开路。理想二极管模型的特性曲线, 如图 1.11(a)所示。

管压降模型认为只有外加在二极管的正向电压大于导通电压 U_{th} 时, 二极管才会导通, 导通内阻为 0, 且导通电压是恒定的, 不随电流而变, 其特性曲线如图 1.11(b)所示。对硅管而言, U_{th} 典型值为 0.7V。

折线模型如图 1.11(c)所示, 它对管压降模型进行了修正, 即认为二极管的管压降随着正向电流的增加而增加, 所以在模型中用电源 U'_{th} 和内阻 r_D 的串联来表示。若 $U'_{th} = 0.5V$, 二极管的导通电流为 1mA 时管压降为 0.7V, 则 r_D 的数值可计算如下

$$r_D = \frac{U_{th} - U'_{th}}{i_D} = \frac{0.7V - 0.5V}{1mA} = 200\Omega$$

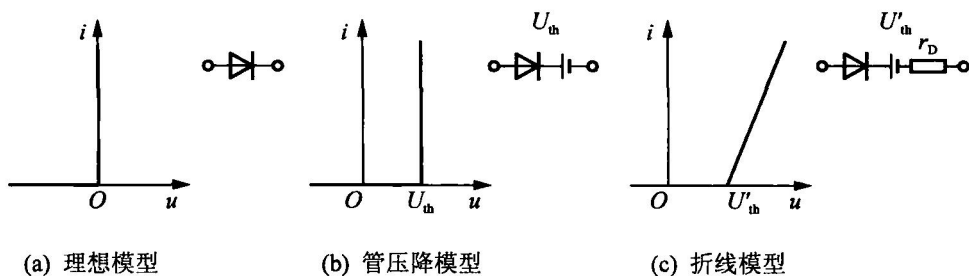


图 1.11 二极管的近似模型

2) 二极管的应用举例

(1) 二极管整流电路

利用二极管的单向导电性把交流电压变成单方向的脉动电压, 称为整流。

【例 1.1】简单的二极管整流电路如图 1.12(a)所示。令输入信号为正弦波, 如果二极管采用理想模型进行分析, 试画出 u_o 的波形。

解: 当 $u_i > 0$ 时, 二极管导通, 二极管相当于短路, $u_o = u_i$; $u_i < 0$ 时, 二极管截止,

二极管相当于开路, $u_o = 0$ 。因此, 由于二极管的单向导电性, R 上获得的单向脉动电压的输出波形如图 1.12(b)所示。

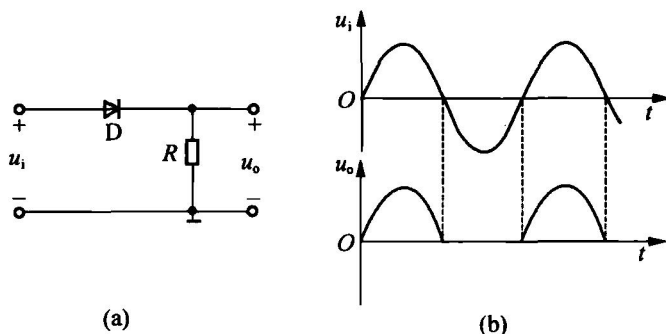


图 1.12 例 1.1 图

(2) 二极管限幅电路

利用二极管的单向导电性可以进行输入信号的整形和限幅。

【例 1.2】 某二极管构成的上限幅电路如图 1.13(a)所示, 图中的 D 为理想二极管。设输入信号 $u_i = U_{im} \sin \omega t$, 且 $U_{im} > U_{CC}$, 试画出 u_o 的波形。

解: 当 $u_i < U_{CC}$ 时, 二极管 D 截止, 此时 R 中没有电流, 输出电压 $u_o = u_i$; 当 $u_i > U_{CC}$ 时, 二极管 D 导通, 忽略它的导通压降, 输出电压 $u_o = U_{CC}$ 。输出波形的波形如图 1.13(b)所示。

从波形上来看, 限幅电路实际是把输入波形的一部分“削掉”, 因此又被称为削波电路。此外, 将电路中的二极管和电源 U_{CC} 反接, 还可构成下限幅电路。

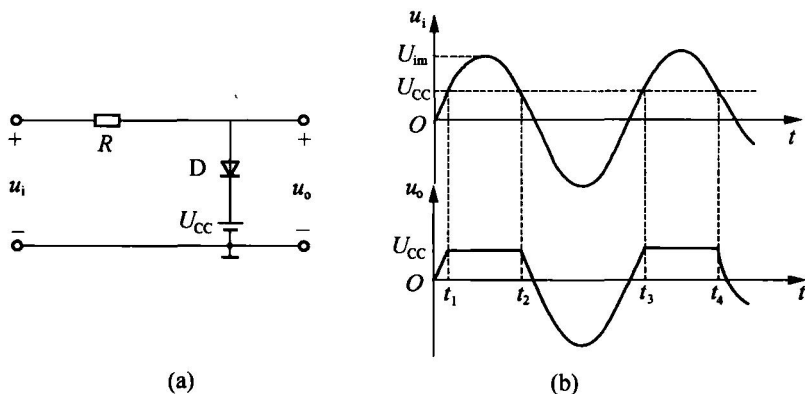


图 1.13 例 1.2 图

(3) 二极管构成的数字逻辑电路

利用二极管的开关特性, 还可以组成数字逻辑电路。

【例 1.3】 电路如图 1.14 所示, 它有两个输入端(A 、 B)和一个输出端(L), 令 A 、 B 两端对应三组不同的输入电位值: (a) $U_A = U_B = +3V$; (b) $U_A = 0V, U_B = +3V$; (c) $U_A = U_B = 0V$ 。试求 L 点对应的电位并分析输入、输出的数字逻辑关系。

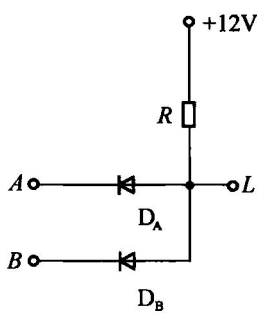


图 1.14 例 1.3 图

解：(a) 当 A 端和 B 端均为 $+3V$ 的高电位时， D_A 和 D_B 都处于正向导通状态，输出 $U_L = 3V$ ，即为高电平。

(b) 当 A 端为 $0V$ 的低电位， B 端为 $+3V$ 的高电位时， D_A 两端的电位差较大，比 D_B 优先导通，将输出 U_L 被钳位在 $0V$ ， D_B 处于反向电压的作用而截止，即输出 $U_L = 0V$ ，为低电平。

(c) 当 A 端和 B 端均为 $0V$ 的低电位时， D_A 和 D_B 都处于正向导通状态，输出 $U_L = 0V$ ，即为低电平。

因此，只有两个输入端均为高电平时，输出才是高电平，对应是数字电路中的与逻辑。

1.2.3 稳压二极管

稳压二极管是一种面接触型的硅二极管，它是一种利用 PN 结工作于反向击穿区以获得稳压性能的特殊二极管。

1. 稳压二极管的伏安特性及符号

稳压二极管是利用特殊工艺制造的面结型硅半导体二极管，其正向特性曲线与普通二极管相同，即稳压二极管工作在正向导通时，端电压为 $0.7V$ 左右。稳压二极管和普通二极管的区别在于它的反向击穿电压较低，且击穿特性陡峭，如图 1.15(a)所示。稳压二极管工作于管子的反向击穿区，当流过管子的电流在一定范围内变化时，管子两端的电压基本不变，此时的击穿电压称为稳压二极管的稳定电压 U_Z 。稳压二极管的电路符号如图 1.15(b)所示。

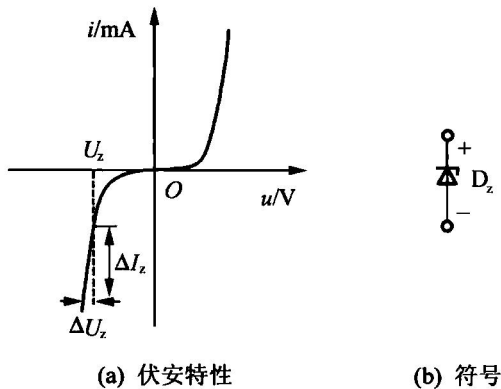


图 1.15 稳压二极管的伏安特性曲线和符号



应该注意的是,工作在击穿区并不意味着管子的损坏,只要在外电路上采取一定的限流措施,就可以保证管子安全地工作在稳压区。

2. 稳压二极管的主要参数

1) 稳定电压 U_Z

当稳压二极管工作在反向击穿状态,且流过的电流等于规定的测试值时,稳压二极管阴极和阳极之间的电压差即为稳定电压 U_Z 。对于同一种型号的稳压二极管,由于工艺方面和其他原因,器件手册中给出的 U_Z 值具有一定的分散性,例如 2DW7A 的稳压值为 5.8~6.6V,但对于某一只具体的稳压二极管,其 U_Z 是 5.8~6.6V 的一个确定值。

2) 稳定电流 I_{Zmin}

稳定电流 I_{Zmin} 是指稳压二极管工作于反向击穿区所要求的最小工作电流。使用中必须保证工作电流大于 I_{Zmin} ,管子才能具有较好的稳压作用。

3) 最大耗散功率 P_{ZM} 和最大稳定电流 I_{Zmax}

当稳压二极管工作在稳压状态时,管子上消耗的功率 $P_Z = U_Z I_Z$,其中 U_Z 为稳压值, I_Z 为流过稳压二极管的工作电流,该功率将以热损耗的形式转化为 PN 结温度的升高。

P_{ZM} 是由管子温度所限定的一个参数。为了保证管子不至于因为温度过高而损坏,使用中不允许超过 P_{ZM} 。根据 $P_{ZM} = U_Z I_{Zmax}$,可以确定管子的最大稳定电流 I_{Zmax} 。

4) 动态电阻 r_Z

动态电阻 r_Z 定义为在稳压管的工作范围内,两端的稳定电压变化量 ΔU_Z 与电流变化量 ΔI_Z 之比,即 $r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$,如图 1.15(a)所示。不难看出, r_Z 越小,表明在电流变化时,稳定电压的变化越小,稳压性能越好。 r_Z 一般在几欧到几十欧的范围内。

【例 1.4】 设计一个稳压二极管的稳压电路。已知输入电压 $U_1 = +12V$,要求负载电流 $I_L = 12mA$,输出电压 $U_O = 4.7V$ 。

解: 利用稳压二极管实现的简单稳压电路如图 1.16 所示。

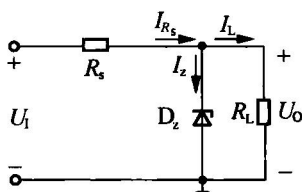


图 1.16 例 1.4 图

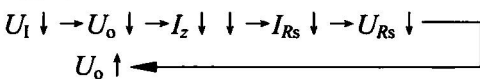
因为要求输出电压 $U_O = 4.7V$,即选用稳压二极管的稳压值为 $U_Z = 4.7V$ 。假设该管的稳定电流 $I_Z = 10mA$,则

$$I_{R_s} = I_Z + I_L = 10mA + 12mA = 22mA = 0.022A$$

$$R_s = \frac{U_1 - U_Z}{I_{R_s}} = \frac{12 - 4.7}{0.022} \approx 332(\Omega)$$

因此, R_s 可以取标称值为 330Ω 的电阻。图 1.16 所示电路可以获得稳压值为 4.7V 的输出。以电源电压的波动为例,该电路的稳压过程描述如下:若电源的波动使得 U_1 降低,

则 U_o 降低, 引起稳压管 D_z 上电流显著下降, 流过 R_s 的电流 I_{R_s} 下降, R_s 上压降减小, 使得 U_o 上升, 维持 D_z 稳定电压输出。



1.3 晶体三极管

晶体三极管又叫半导体三极管或双极型晶体管, 简称晶体管或三极管。晶体管种类繁多, 按所用材料可以分为硅管和锗管; 按结构可以分为 NPN 管和 PNP 管; 按使用的频率可以分为高频管和低频管; 按管子功耗可以分为小功率管、中功率管和大功率管。

1.3.1 晶体三极管的结构和电路符号

晶体三极管是在本征半导体中掺入不同杂质制成两个背靠背的 PN 结, 并引出相应的三个电极构成的。若两边是 N 型半导体, 中间是 P 型半导体, 则称为 NPN 晶体三极管, 其结构和电路符号如图 1.17(a) 所示; 若两边是 P 型半导体, 中间是 N 型半导体, 则称为 PNP 晶体三极管, 其结构和电路符号如图 1.17(b) 所示。

三个半导体区根据作用不同, 分别称为发射区、基区和集电区。由这三个区引出的三个电极, 分别称为发射极 e、基极 b、集电极 c。发射区和基区之间的 PN 结称为发射结, 集电区和基区之间的 PN 结称为集电结。符号中的箭头方向表示发射结正偏时实际的电流方向。

三极管的制造工艺特如下。

- (1) 发射区的掺杂浓度远大于集电区的掺杂浓度;
- (2) 基区制作很薄且掺杂浓度低;
- (3) 集电结面积大于发射结面积。

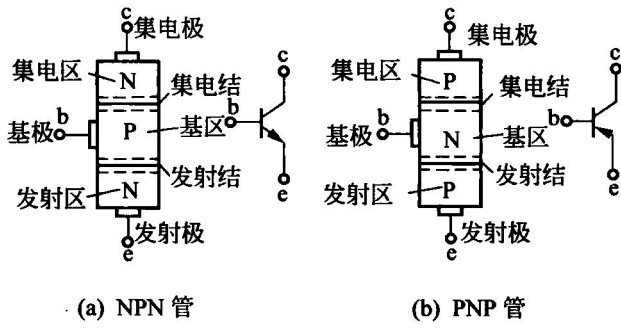


图 1.17 晶体管结构和符号

1.3.2 三极管的放大原理

NPN 管和 PNP 管的工作原理相同, 只是工作时外加电压的极性和各极的电流方向刚好相反。下面将针对 NPN 管分析三极管的放大原理, 所得结论同样适合于 PNP 管。

晶体管在电子线路中用作放大器件时, 发射结外加正向电压, 集电结外加反向电压,

即发射结正偏,集电结反偏,如图 1.18 所示。分析三极管的放大原理,必须首先分析晶体管内部载流子有规律的运动过程。

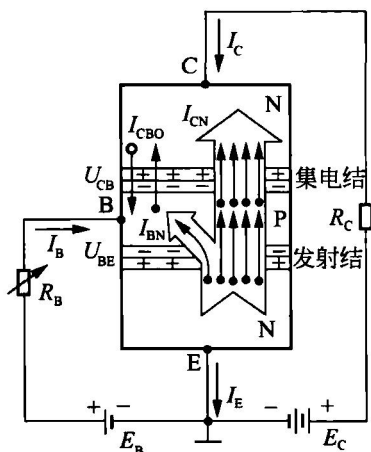


图 1.18 三极管内部载流子运动情况示意图

1. 晶体管内部载流子的运动

1) 发射区向基区注入电子

发射结外加正向电压,PN 结的内电场减弱,有利于发射区多数载流子的扩散运动,于是发射区的自由电子不断注入基区形成发射区电流;另一方面,基区的空穴注入发射区也形成同方向的发射极电流。但由于基区掺杂比较少,空穴浓度低,所以这部分电流可以忽略不计。因此发射极电流主要是由于发射区向基区注入电子流形成的,方向和电子流运动方向相反。

2) 电子在基区的扩散和复合

电子从发射区注入基区以后,靠近发射结的电子浓度较高,因此电子将继续向集电结方向扩散。扩散过程中,少量电子将会和基区的空穴形成复合电流 I_{BN} 。由于基区本身很薄,掺杂浓度较低,所以基区复合电流很小,绝大部分电子将通过基区输送到集电区。

3) 集电区收集电子

集电结外加反向电压,扩散到集电结边缘的电子将会被该反偏电压拉至集电区,形成集电极电流 I_{CN} ;另一方面,集电结反偏,引起基区少子(自由电子)与集电区少子(空穴)的漂移运动,形成反向饱和电流 I_{CBO} 。 I_{CBO} 虽然数值很小,但因为它随温度变化,所以对管子的性能影响较大。集电极电流 $I_C = I_{CN} + I_{CBO}$ 。

根据以上分析,晶体管内部有两种载流子参与导电,故称之为双极型晶体三极管。晶体三极管在一定外加偏压的作用下,载流子内部的运动形成了三个电极的电流,如图 1.18 所示,其中

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO} \quad (1-1)$$

$$I_B = I_{BN} - I_{CBO} \quad (1-2)$$

$$I_E = I_{CN} + I_{BN} = (I_{CN} + I_{CBO}) + (I_{BN} - I_{CBO}) = I_C + I_B \quad (1-3)$$

2. 三极管的电流分配和放大作用

通过对内部载流子运动的分析, 我们需要理解几个重要的结论。

(1) 三极管各极的电流符合基尔霍夫定律

$$I_E = I_C + I_B$$

式中, I_B 比 I_C 、 I_E 小得多, 因此可以认为 $I_E \approx I_C$, 即集电极电流和发射极电流大小近似相同。

(2) 基极电流 I_B 虽然很小, 但在发射结正偏, 集电结反偏的放大条件下, 它对 I_C 具有控制作用, 两者的对应关系符合

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

式中, $\bar{\beta}$ 称为共射极静态(直流)电流放大倍数。上述分析都是针对静态的直流电路进行分析的。

(3) 实际应用中, 晶体管往往用于放大动态信号, 如图 1.19 所示, 当输入回路在直流偏置的基础上叠加交流信号 ΔU_i , 引起基极电流变化量 ΔI_B , 由于三极管内部载流子的运动, 集电极电流的变化量为 ΔI_C , 则

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (1-5)$$

β 称为共射极动态(交流)电流放大倍数。通常 β 的数值为 20 ~ 200, 式(1-5)表明, 满足放大条件的三极管具有将基极电流变化量放大 β 倍的能力。

图 1.19 中, 当输入电压变化时, 引起输入电流(基极电流)的变化, 在输出端又将引起输出电流(集电极电流)的较大变化, 并在集电极负载电阻 R_C 上产生较大的电压输出。因此, 三极管实现放大作用的实质就是通过基极电流的微小变化, 引起集电极电流的较大变化, 从而实现输入交流信号的放大。

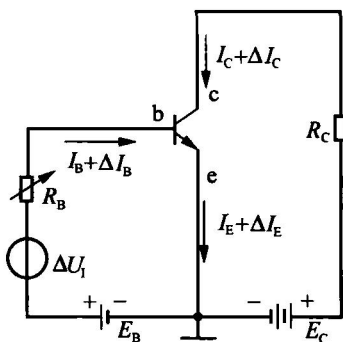


图 1.19 共射电路的电流和电压放大作用

在低频小信号放大电路中, 由于 β 和 $\bar{\beta}$ 相差很小, 往往认为 $\beta = \bar{\beta}$, 并在以后的电路分析中不再加以区分。

1.3.3 三极管的特性曲线及工作状态

三极管的特性曲线是指各电极之间所加电压和流过电流之间的关系曲线, 它能直观全

面反映三极管性能的好坏,下面将结合输入和输出特性曲线分析三极管的工作特性。

1. 输入特性曲线

输入特性曲线是指当集电极与发射极之间的电压 U_{CE} 为某一常数时,基极电流 i_B 与加在发射结上的电压 u_{BE} 之间的关系曲线,即

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

图 1.20 给出了硅 NPN 三极管 3DG6 在 $U_{CE}=0$ 或 $U_{CE} \geq 1$ 两种情况下对应的输入特性曲线。

当 $U_{CE}=0$ 时,相当于将发射极与集电极并联连接,此时的输入特性相当于两个二极管并联的正向特性, I_B 为两个二极管的正向电流之和。

当 $U_{CE}=1$ 时,输入特性曲线比当 $U_{CE}=0$ 时的特性曲线右移了一段距离。这是因为 U_{CE} 从 0 开始增大后,加在集电结上的电压逐渐由正偏转为反偏,增强了集电区收集电子的能力,减少了载流子在基区复合的机会。因此,在 u_{BE} 相同的情况下, u_{CE} 的增加将会使基极电流 I_B 减少,导致特性曲线右移。

U_{CE} 的继续增加,输入特性曲线右移很少,因此往往用 $U_{CE}=1$ 的这条特性曲线代替 $U_{CE}>1$ 的所有曲线。这是因为只要 U_{BE} 不变,那么从发射区发射到基区的电子数目基本固定,而 $U_{CE}>1$ 以后集电结所加反向偏压已经足以把这些电子中的绝大部分拉到集电区,即使 U_{CE} 再增加,基极电流 I_B 也不会明显减少。

由图 1.20 可见,三极管的输入特性曲线和二极管的伏安特性曲线很相似。正常导通时,硅管的 U_{BE} 约在 $0.6V \sim 0.7V$ 左右,而锗管的 U_{BE} 在 $0.3V$ 左右。

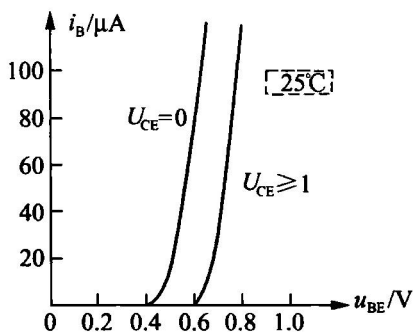


图 1.20 晶体管的输入特性曲线

2. 输出特性曲线

输出特性曲线是指当三极管的基极电流 I_B 为某一常数时,集电极电流 i_C 与加在集电极、发射极之间的电压 u_{CE} 之间的关系曲线,即

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{I_B=\text{常数}}$$

由于不同的 I_B 对应不同的输出特性,所以三极管的输出特性曲线是一簇曲线,图 1.21 给出了 3DG6 的输出特性曲线。

根据三极管的工作状态不同,可将输出特性分为三个区域。

1) 截止区

$I_B = 0$ 这条曲线以下的区域称为截止区。在此区域内，集电结和发射结均处于反向偏置， $i_c \approx 0$ ，集电极和发射极之间只有微小的反向漏电流，近似于开关的断开状态。晶体管工作在截止状态时，没有放大作用。

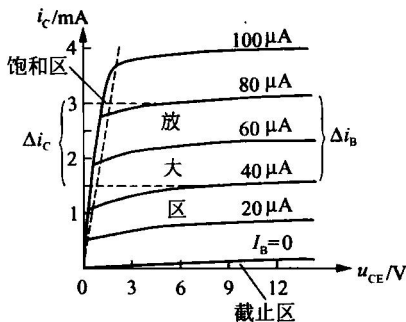


图 1.21 晶体管的输出特性曲线

2) 放大区

输出特性曲线中近似平行于横轴的曲线簇部分称为放大区。

当晶体管处于放大区时， $U_{CE} > U_{BE}$ ，即 $U_C > U_B$ ，发射结正偏，集电结反偏。由于集电结反偏电压足够大，使扩散到基区的绝大部分电子都已经被集电极拉了过来，因此 u_{CE} 继续增大， i_c 基本不变，曲线趋近于平坦。

放大区中，集电极电流的变化量 Δi_c 与基极电流的变化量 Δi_B 存在一种受控关系，即 $\Delta i_c = \beta \Delta i_B$ ，三极管具有电流放大作用。

3) 饱和区

靠近输出特性纵坐标轴，曲线上升部分所对应的区域称为饱和区。

当晶体管处于饱和区时， $U_{CE} < U_{BE}$ ，即 $U_C < U_B$ ，由于集电结正偏，不利于集电区收集从发射区扩散到基区的电子，使得在相同的 I_B 下，饱和区的 i_c 处于特性曲线的上升部分， i_c 将随着 U_{CE} 的增大而增大。饱和状态下， $i_c < \beta i_B$ ， i_c 不受 i_B 的控制，小于放大区对应的 i_c 值。

三极管饱和时对应的 U_{CE} 的值称之为饱和压降，用 U_{CES} 表示，一般小功率硅管约为 0.3V，锗管约为 0.1V。三极管工作在饱和区时，集电结与发射结都处于正向偏置， $U_{CE} \approx 0$ ，集电极和发射极之间相当于开关的接通状态。

【例 1.5】 已知晶体管各极电位如图 1.22 所示，试判断晶体管是硅管还是锗管，分别处于何种工作状态(饱和、放大或截止)。

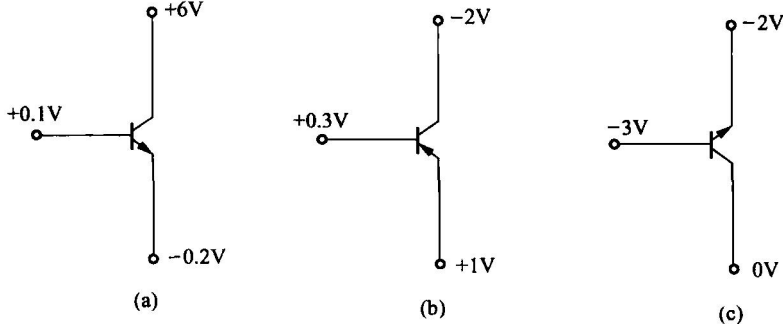


图 1.22 例 1.5 图