

# 第一篇 模拟电子技术基础

电子技术是应用电子元器件或电子设备达到某种特定目的或完成某项特定任务的技术。电子技术研究的对象是电子元器件和由电子元器件构成的各种基本功能的电路,以及用某些基本功能电路组成的具有专门用途的装置或系统。电子技术按照其处理信号的不同,分为模拟电子技术和数字电子技术两部分。模拟电子技术是研究平滑的、连续变化的电压或电流,即模拟信号下工作的电子电路及其技术;数字电子技术是研究在离散的、断续变化的电压或电流,即数字信号下工作的电子电路及其技术。

“电子技术基础”课程是工程类专业入门性质的技术基础课。它的任务是使学生获得电子技术的基本理论、基本知识和基本技能,培养学生分析问题和解决问题的能力,为以后深入学习电子技术知识和在专业中的应用打好基础。基本理论主要是指电子电路的分析方法;基本知识是指基本的电子元器件和电子电路的功能、性能及应用,基本技能是指电子测试技术及电子电路的识图、运算和应用能力。

电子技术基础尤其是模拟部分,内容庞杂繁多,具有不同于“物理”、“电路”等课程的特殊概念及独特的分析方法,即定性分析、定量估算、实验调整。初学者普遍感到不好理解、知识点零散、变化多,学了心中无底。这是课程本身特点所致,在学习的过程中要注意适应并掌握这个特点。更为重要的是要循序渐进,勤奋学习,刻苦钻研,突出基本概念、分析思路和理论联系实际。通过教学双方的共同努力开拓学习知识的兴趣、广度和深度,圆满完成本课程的学习任务。

## 第 1 章 半导体器件

半导体器件是构成各种电子系统的基本元件。学习电子技术,必须首先学习常用半导体器件的基本结构、工作原理和特性参数。本章主要介绍的半导体器件有二极管、三极管、场效应管等。

### 1.1 半导体的基础知识

各种半导体器件均是以半导体材料为芯片,其导电机理和特性参数都与半导体材料的导电特性密切相关,因此,在学习半导体器件前应对半导体、PN 结的基本性能有一定的了解。

#### 1.1.1 本征半导体

半导体是一种具有晶体结构,导电能力介于导体和绝缘体之间的固体材料。经过高度提纯,几乎不含有任何杂质的半导体称为本征半导体。本征半导体的原子在空间按一定规律整齐排列,又称为晶体,所以半导体管也称为晶体管。属于半导体的物质很多,用于制作半导体器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等,其中硅的应用最广泛。它们的共同特点是:导电能力随温度、光照和掺杂的变化而显著变化,有热敏特性、光敏特性和掺杂特性。

(1) 热敏特性: 半导体对温度很敏感, 其电阻率随温度升高而显著减小。该特性对半导体器件的工作性能有不利影响, 但利用这一特性可制成自动控制中有用的热敏元件, 如热敏电阻等。

(2) 光敏特性: 半导体对光照很敏感, 受光照时, 其电阻率会显著减小。利用这一特性可制成光电二极管、光敏电阻等。

(3) 掺杂特性: 半导体对掺入其内的杂质很敏感, 在半导体里掺入微量杂质, 其电阻率会显著减小。如在半导体硅中只要掺入亿分之一的硼, 电阻率就会下降到原来的几万分之一。正因为半导体具有这种特性, 于是人们就用控制掺杂方法制造出多种不同性能、不同用途的半导体器件。

半导体之所以具有上述独特导电特性的根本原因在于半导体的特殊结构。

硅和锗都是Ⅳ价元素, 每个原子的最外层具有 4 个价电子(为 4 价元素), 属于不稳定结构。当硅(或锗)原子结合成晶体时, 它们靠互相共用价电子而连接在一起实现稳定结构。共用价电子使两个相邻原子间产生一种束缚力, 使之不能分开。相邻原子共用价电子形成的束缚作用称为共价键。每个硅(或锗)原子有 4 个价电子, 要分别与 4 个与其相邻原子的价电子组成 4 个共价键。此时, 硅(或锗)原子最外层具有 8 个电子处于较为稳定的状态, 晶体的共价键结构示意图如图 1.1.1 所示。

晶体中的共价键具有较强的结合力, 若无外界能量的激发, 在热力学温度零度( $-273^{\circ}\text{C}$ )时, 价电子无力挣脱共价键的束缚, 晶体中不存在自由电子, 其导电能力相当于绝缘体。

在室温或光的照射下, 因热或光的激发, 少数价电子可以获得足够的能量而挣脱共价键的束缚成为自由电子, 同时在原来共价键上, 留下相同数量的空穴, 这种现象称为本征激发。在本征半导体中, 每激发出来一个自由电子, 就必然在共价键上留下一个空穴。可见, 自由电子和空穴总是相伴而生, 成对出现, 称为自由电子—空穴对, 如图 1.1.2 所示。自由电子带负电荷, 空穴因原子失去电子而产生, 故带正电荷。由于它们都是携带电荷的粒子, 又称为载流子。在没有外加电场作用时, 自由电子和空穴的运动是杂乱无章的, 不会形成电流。

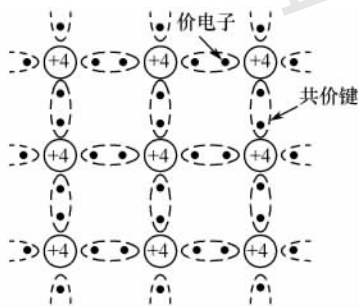


图 1.1.1 硅或锗晶体的共价键结构

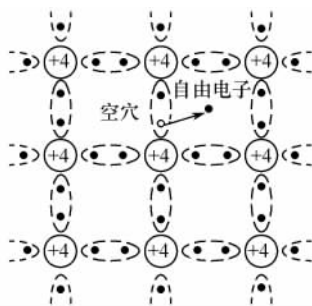


图 1.1.2 本征激发产生自由电子—空穴对

当半导体两端加上外电场时, 半导体中的载流子将产生定向运动, 称为漂移运动。其内部将出现两部分电流: 一部分是自由电子在外电场作用下逆电场方向运动形成的电子电流; 另一部分是空穴在外电场作用下顺电场方向运动形成的空穴电流。由于自由电子和空穴所带的电荷极性相反, 它们的运动方向也是相反的, 而形成的电流方向则是一致的, 即流过外电路的电流等于两者之和。温度越高, 本征激发产生的自由电子—空穴对越多, 即载流子数目越多, 产生的电流越大。

在半导体中,同时存在着电子导电和空穴导电,这是半导体导电方式的最大特点。

### 1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中,由于载流子数量极少,导电能力很弱,故其实用价值不大。如果在其中掺入某些微量杂质元素,就可以大大提高其导电能力,这种掺入了杂质元素的半导体称为杂质半导体。按掺入的杂质不同,杂质半导体可分为两类:N型半导体和P型半导体。

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量V价元素(如磷、砷、锑等),就形成了N型半导体。其结构示意图如图1.1.3(a)所示。杂质原子有5个价电子,其中4个将分别与相邻硅(或锗)原子的价电子组成共价键,多余一个价电子因只受原子的吸引作用,所以很容易挣脱杂质原子而成为自由电子,杂质原子则成为带正电荷的离子,由于这个多余的价电子不在共价键中,因此,在成为自由电子时不会同时产生空穴。在室温下,杂质原子都处于这种电离状态,每个杂质原子产生一个自由电子,致使N型半导体中自由电子的数目显著增加,例如:在本征硅中掺入百万分之一的磷原子,在硅晶体中则会产生  $5 \times 10^{22} \times 10^{-6} = 5 \times 10^{16}$  个/cm<sup>3</sup> 个自由电子(硅的原子密度为  $5 \times 10^{22}$  个/cm<sup>3</sup>),而同时由本征激发产生的载流子浓度仅为  $1.5 \times 10^{10}$  个/cm<sup>3</sup>。于是半导体中的自由电子数目多于空穴的数目,自由电子成为多数载流子,简称多子;空穴成为少数载流子,简称少子。这种主要靠自由电子导电的半导体称为电子型半导体或N型半导体。

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量III价元素(如硼、铝、镓),就形成了P型半导体。其结构示意图如图1.1.3(b)所示。在组成共价键时,每个杂质原子产生一个空穴。在室温下,空穴能吸引邻近的价电子来填补,杂质原子获得电子变成了带负电荷的离子。由于每个杂质原子都可向晶体提供一个空穴,但同时不会产生自由电子,于是半导体中的空穴数目多于自由电子的数目,空穴成为多数载流子,自由电子为少子。这种主要靠空穴导电的半导体称为空穴型半导体或P型半导体。

应该指出,在杂质半导体中,本征激发所产生的载流子浓度远小于掺杂所带来的载流子浓度。但是掺杂并没有破坏半导体内正、负电荷的平衡状态,它既没有失去电子,也没有获得电子,仍呈电中性,对外是不带电的。

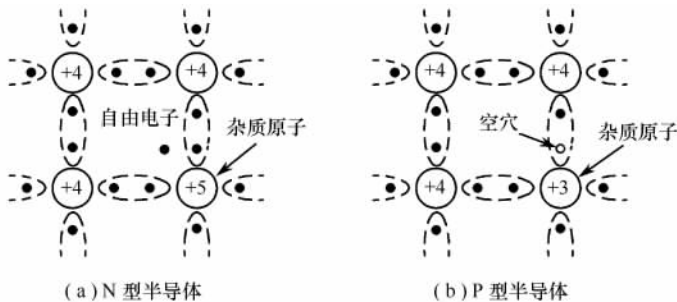


图 1.1.3 杂质半导体结构示意图

### 1.1.3 PN结

在已形成的N型或P型半导体基片上,再掺入相反类型的杂质原子,且浓度超过原基片杂质原子的浓度,则原N型或P型半导体就会转变为P型或N型半导体,这种转换杂质半导

体类型的方法称为杂质补偿。采用这种方法,将 N 型(或 P 型)半导体基片上的一部分转变为 P 型(或 N 型),这两部分半导体分别称为 P 区和 N 区,它们的交界面将形成一个特殊的带电薄层,称为 PN 结。PN 结是构成半导体二极管、三极管、集成电路等多种半导体器件的基础。

### 1. PN 结的形成过程

为了便于分析,将 N 区和 P 区简画成如图 1.1.4(a)所示,交界面两侧两种载流子浓度有很大的差异,N 区中电子很多而空穴很少,P 区则相反,空穴很多而电子很少。这样,电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。因此,一些电子要从 N 区向 P 区扩散;也有一些空穴要从 P 区向 N 区扩散。当 P 区中空穴扩散到 N 区后,便会与该区自由电子复合,并在交界面附近的 P 区留下一些带负电的杂质离子。同样,当 N 区中自由电子扩散到 P 区后,便会与该区空穴复合,而在交界面附近的 N 区留下一些带正电的杂质离子。结果是在交界面两侧形成一个带异性电荷的薄层,称为空间电荷区。这个空间电荷区中的正、负离子形成一个空间电场,称它为内电场,如图 1.1.4(b)所示。

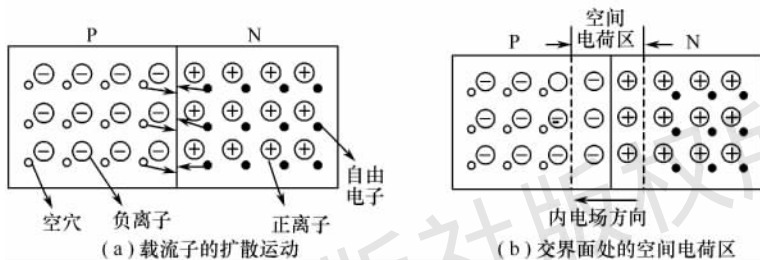


图 1.1.4 PN 结的形成

内电场形成后,一方面其电场会阻碍多数载流子的扩散运动,把 P 区向 N 区扩散的空穴推回 P 区,把 N 区向 P 区扩散的自由电子推回 N 区。另一方面,其电场将推动 P 区少数载流子自由电子向 N 区漂移,推动 N 区少数载流子空穴向 P 区漂移,漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。

由上面分析知道,内电场有两个作用:阻碍多数载流子的扩散运动;有利于少数载流子的漂移运动。

扩散运动和漂移运动是互相联系,又互相矛盾的。在开始形成空间电荷区时,多数载流子的扩散运动占优势,随着扩散运动的进行,空间电荷区逐渐加宽,内电场逐步加强,多数载流子的扩散运动逐渐减弱,少数载流子的漂移运动则逐渐增强;而漂移使空间电荷区变窄,电场减弱,又使扩散容易。而当漂移运动和扩散运动处于动态平衡状态时,空间电荷区宽度、内电场强度不再变化,PN 结形成。

### 2. PN 结的特性

在 PN 结两端外加电压,称为给 PN 结以偏置,如果使 P 区接电源正极,N 区接电源负极,称为加正向电压,也称为正向偏置,简称正偏,如图 1.1.5(a)所示。这时外加电压对 PN 结产生的电场,称为外电场,其方向与内电场方向相反,从而使空间电荷区变窄、内电场减弱,破坏了扩散运动与漂移运动的动态平衡,扩散运动占了优势,电路中产生了由多数载流子扩散运动形成的较大电流,称为扩散电流或正向电流  $I_F$ ,这时 PN 结呈现的电阻很低,呈导通状态。

如果使 P 区接电源负极,N 区接电源正极,称为加反向电压,也称为反向偏置,简称反偏,如图 1.1.5(b)所示。这时外加电压对 PN 结产生的外电场与内电场方向相同,从而使空间电

荷区变宽,内电场加强,破坏了扩散运动与漂移运动的动态平衡,漂移运动占了优势,电路中产生了由少数载流子漂移运动形成的极小电流,称为漂移电流或反向电流  $I_R$ ,这时 PN 结的电阻很高,呈截止状态。

PN 结加正向电压时导通,产生较大正向电流;加反向电压时截止,产生极小反向电流(可忽略不计)。这就是 PN 结的单向导电性。

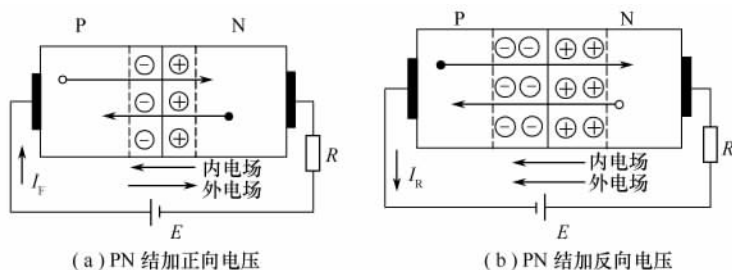


图 1.1.5 外加电压时的 PN 结特性

## 1.2 半导体二极管

### 1.2.1 二极管特性与参数

半导体二极管也称为晶体二极管,简称二极管。其内部就是一个 PN 结,其中 P 型半导体引出的电极为阳极, N 型半导体引出的电极为阴极。电路符号如图 1.2.1 所示。箭头方向表示单向导电时,正向电流流动的方向。

常用二极管可按以下几种方式分类:按材料分为硅二极管和锗二极管;按 PN 结面积大小分为点接触型、面接触型;按功能分为整流、稳压、发光、光电、检波、激光和变容二极管等。

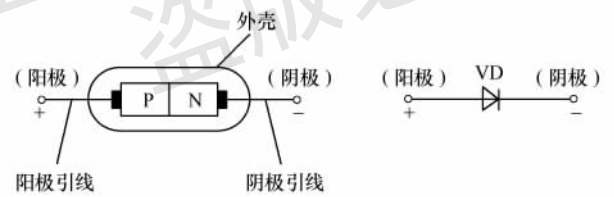


图 1.2.1 二极管的电路符号

### 1. 二极管的伏安特性

二极管既然是一个 PN 结,它当然具有单向导电性。其导电性能常用伏安特性来表征。

加在二极管两极间的电压  $V$  和流过二极管的电流  $I$  之间的关系称为二极管的伏安特性,用于定量描述这两者关系的曲线称为伏安特性曲线。二极管典型伏安特性曲线如图 1.2.2 所示。现分析如下:

#### (1) 正向特性

正向特性是指二极管加上正向电压时电流与电压之间的关系。当外加正向电压很低时,外电场不足以克服

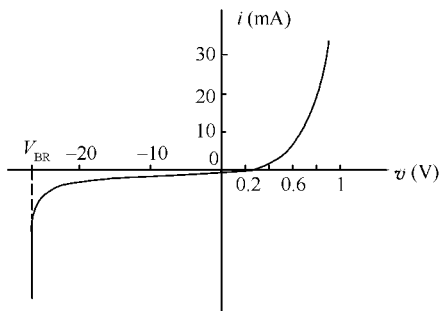


图 1.2.2 二极管伏安特性曲线

内电场对多数载流子扩散运动的阻力,产生的正向电流极小,当正向电压增加到一定值时,随着外加正向电压的增大,内电场被大大削弱,使正向电流迅速增大,二极管处于正向导通状态,其值称为导通电压,用  $V_{D(on)}$  表示。在正常使用条件下,二极管正向电流在相当大的范围内变化时,二极管两端电压基本上等于导通电压,硅管约为  $0.7V$ ,锗管约为  $0.2V$ 。此经验数据常作为小功率二极管正向工作时两端直流电压降的估算值。

### (2) 反向特性

反向特性是指二极管加上反向电压时电流与电压之间的关系。外加反向电压加强了内电场,有利于少数载流子的漂移运动,形成很小的反向电流。由于少数载流子数量的限制,这种反向电流在外加反向电压增加时并无明显增大,通常硅管为几微安到几十微安;锗管为几十微安到几百微安,故又称反向饱和电流。对应的这个区域称为反向截止区。

当反向电压增大到一定值时,反向电流急剧增大,特性曲线接近于陡峭直线,这种现象称为二极管的反向击穿。之所以产生反向击穿是因为过高的反向电压将产生很强的外电场,可以把价电子直接从共价键中拉出来,使其成为载流子。处于强电场中的载流子能获得足够的动能,又去撞击其他原子,把更多的价电子从共价键中撞击出来,如此形成连锁反应,使载流子的数目急剧上升,反向电流越来越大,最后使二极管反向击穿。发生反向击穿时,二极管两端加的反向电压称为反向击穿电压,用  $V_{BR}$  表示。二极管反向击穿后,如果反向电流和反向电压的乘积超过容许的耗散功率,将导致二极管热击穿而损坏。

### (3) 二极管的伏安特性表达式

在二极管两端施加正、反向电压时,通过管子的电流如图 1.2.2 所示,根据理论分析,该特性曲线可表达为

$$i_D = I_S (e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1) \quad (1.2.1)$$

式中,  $i_D$  为流过二极管的电流;  $v_D$  为二极管两端电压;  $V_T$  为温度电压当量,且  $V_T = \frac{kT}{q}$ , 其中  $k$  为玻耳兹曼常数,  $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ ,  $q$  为电子电荷,  $q = 1.60 \times 10^{-19} C$ ,  $T$  为热力学温度,即绝对温度,室温下 ( $300K$ )  $V_T = 26mV$ ;  $I_S$  为二极管的反向饱和电流,对于分立器件,其典型值的范围为  $10^{-8} \sim 10^{-14} A$ ,在集成电路中的二极管,其值更小。

① 当二极管正偏时,电压  $v_D$  为正值,当  $v_D$  比  $V_T$  大几倍时,式(1.2.1)中的  $e^{\frac{v_D}{V_T}}$  远大于 1, 括号中的 1 可以忽略。这样二极管的电流  $i_D$  与电压成指数关系,如图 1.2.2 中横轴右半部分所示。

② 当二极管反偏时,电压  $v_D$  为负值,若  $|v_D|$  比  $V_T$  大几倍时,指数项趋向于 0,  $i_D = -I_S$ , 如图 1.2.2 中横轴左半部分所示。可见当温度一定时,反向饱和电流是个常数  $I_S$ ,不随外加反向电压的大小而变化。

从二极管伏安特性曲线可以看出,二极管的电压与电流变化不是线性关系,其内阻不是常数,所以二极管属于非线性器件。

## 2. 二极管的主要参数

二极管的参数,是定量描述二极管性能优劣的质量指标。是设计电路时选择器件的依据。二极管参数较多,均可从手册中查得。现列举几个主要参数。

### (1) 最大整流电流 ( $I_F$ )

最大整流电流是指二极管长时间工作时,允许通过的最大正向平均电流。使用二极管时,

应注意流过二极管的电流不能超过这个数值,否则可能导致二极管损坏。

### (2) 最高反向工作电压( $V_{RM}$ )

最高反向工作电压是指二极管正常使用时允许加的最高反向电压。数值通常为二极管反向击穿电压  $V_{BR}$  值的一半。使用中不要超过此值,否则二极管有被击穿的危险。

### (3) 反向电流( $I_R$ )

在室温下,管子未被击穿时的反向电流值。其大小是温度的函数,其值越小,管子的单向导电性越好。

## 1.2.2 二极管的电路模型

当二极管两端所加电压变化很大时,称其为大信号工作状态。这时,可将二极管伏安特性近似地以两条折线表示如图 1.2.3(a)所示,折线在导通电压  $V_{D(on)}$  处转折,直线斜率的倒数  $R_D$  称为二极管的导通电阻,显然

$$R_D = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

$R_D$  表示大信号工作下二极管呈现的电阻值,因二极管正向特性曲线很陡,其导通电阻极小。若把图 1.2.3(b)曲线定义为理想二极管特性,即正向偏置时二极管压降为 0,反向偏置时二极管电流为 0,便可将二极管用图 1.2.3(c)所示电路等效。通常,可将阻值很小的导通电阻  $R_D$  忽略,则二极管等效电路如图 1.2.3(d)所示。

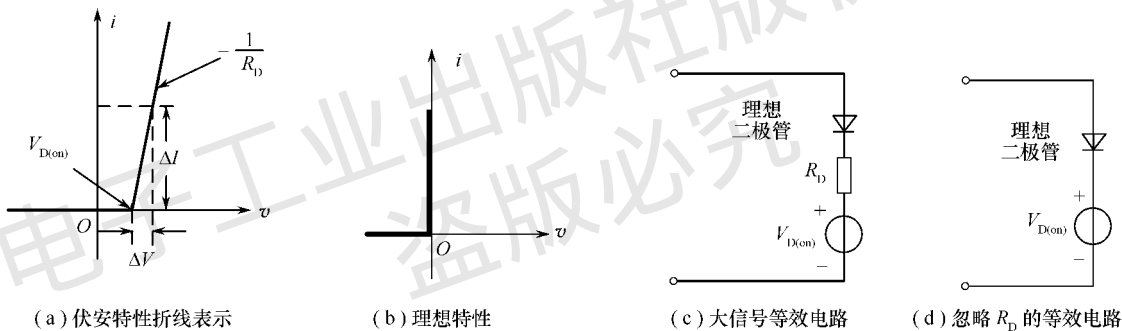


图 1.2.3 二极管大信号工作

## 1.2.3 二极管应用举例

二极管应用范围很广,利用其单向导电性,可以构成整流、检波、限幅和钳位等电路。

**【例 1.2.1】**二极管整流电路如图 1.2.4(a)所示,VD 为理想硅二极管,已知输入  $v_i$  为正弦波电压,试画出输出电压  $v_o$  的波形。

**解:**由于二极管是理想二极管,根据单向导电性,当  $v_i$  正半周时,VD 导通相当于短路线,  $v_o = v_i$ ;  $v_i$  负半周时,VD 截止相当于开路,  $v_o = 0$ 。由此画出输出的波形如图 1.2.4(b)所示。此电路称为二极管半波整流电路。

**【例 1.2.2】**二极管限幅电路如图 1.2.5(a)所示,VD<sub>1</sub>、VD<sub>2</sub>的导通电压为 0.7V,试求在图示输入信号  $v_i$  作用下,输出电压  $v_o$  的波形。

**解:**在图示大信号输入作用下,将二极管以其相应的等效电路代替,得图 1.2.5(b)。由图可知,  $v_i$  正半周电压小于二极管导通电压 0.7V 时,VD<sub>1</sub>、VD<sub>2</sub>均截止相当于开路,  $v_o = v_i$ ;  $v_i$  正

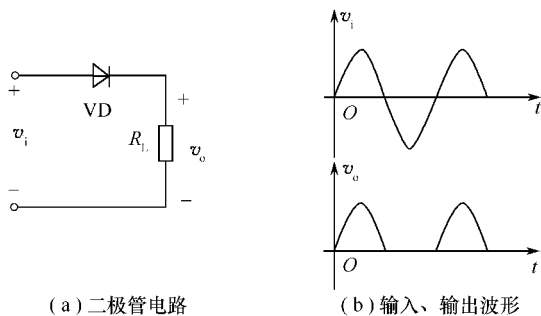


图 1.2.4 例 1.2.1 电路

半周超过导通电压  $0.7\text{V}$  时,  $\text{VD}_1$  导通、 $\text{VD}_2$  截止开路,  $v_o = 0.7\text{V}$ ;  $v_i$  负半周时, 情况相反,  $\text{VD}_1$  截止开路、 $\text{VD}_2$  导通  $v_o = -0.7\text{V}$ 。由此可得出输出波形如图 1.2.5(c) 所示。此电路称为双向限幅电路。

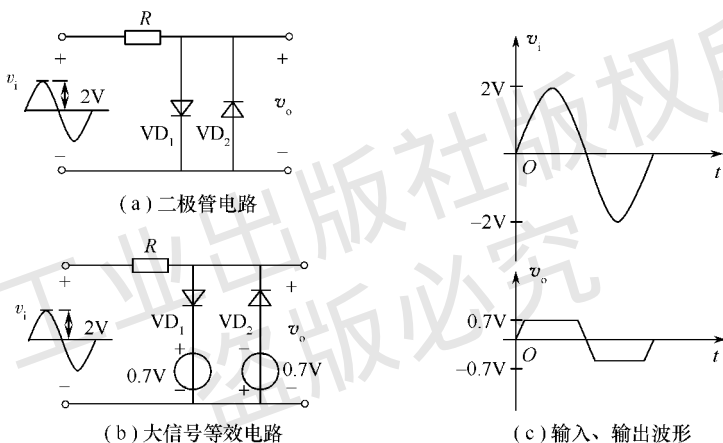


图 1.2.5 例 1.2.2 电路

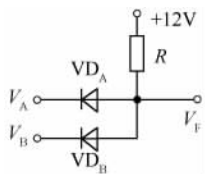


图 1.2.6 例 1.2.3 电路

【例 1.2.3】电路如图 1.2.6 所示,  $\text{VD}_A$ 、 $\text{VD}_B$  的导通电压为  $0.7\text{V}$ , 若  $V_A = 3\text{V}$ 、 $V_B = 0\text{V}$  时, 求输出端的电压  $V_F$ 。

解: 当两个二极管阳极连在一起时, 阴极电位较低的二极管优先导通。图中  $V_A > V_B$ , 所以  $\text{VD}_B$  抢先导通,  $V_F = 0.7\text{V}$ 。  $\text{VD}_B$  导通后,  $\text{VD}_A$  反偏而截止。在这里  $\text{VD}_B$  起钳位作用, 把输出端的电位钳制在了  $0.7\text{V}$  上。

## 1.2.4 特殊二极管

二极管的基本特性是单向导电性, 除此之外, 还具有击穿特性、变容特性等, 利用这些特性工作的二极管统称为特殊二极管。

### 1. 稳压二极管

稳压管是一种特殊的晶体二极管, 是利用 PN 结的反向击穿特性来实现稳压作用的。在



不同的工艺下,可使 PN 结具有不同的击穿电压,以制成不同规格的稳压二极管。

稳压管的电路符号和伏安特性如图 1.2.7 所示,与普通二极管的特性曲线非常类似,只是反向特性曲线非常陡直。正常工作时,稳压管应工作在反向击穿状态。反向电压超过击穿电压时,稳压管反向击穿。此后,反向电流在  $I_{Z\min} \sim I_{Z\max}$  之间变化,但稳压管两端的电压  $V_Z$  几乎不变。利用这种特性,稳压管在电路中就能达到稳压的目的。

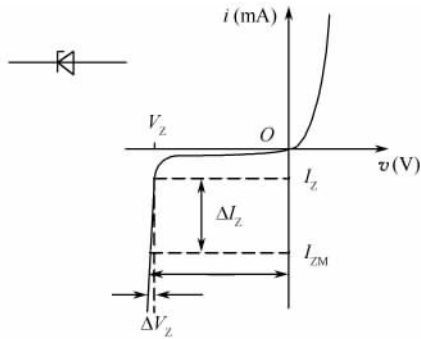


图 1.2.7 稳压管的电路符号及伏安特性

稳压管的主要参数如下。

- (1) 稳定电压 ( $V_Z$ ): 流过规定电流时,稳压管两端的电压,其值即为 PN 结的击穿电压。
- (2) 稳定电流 ( $I_Z$ ): 稳压管的工作电流,通常  $I_Z = (1/2 \sim 1/4) I_{Z\max}$ 。
- (3) 动态电阻 ( $r_Z$ ): 指稳压管端电压的变化量与相应的电流变化量的比值,即

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

稳压管的反向伏安特性曲线越陡,则动态电阻越小,稳压性能越好。

## 2. 变容二极管

二极管正常工作时,可等效为可变结电阻和可变结电容的并联。由伏安特性可知,正偏时结电阻随外加电压的变化而变化,所以等效为可变结电阻。结电容的大小除了与本身结构和工艺有关外,也与外加电压有关,它随反向电压的增加而减小,这种效应显著的二极管称为变容二极管,其电路符号和变容特性如图 1.2.8 所示。变容二极管在高频技术中应用较多。

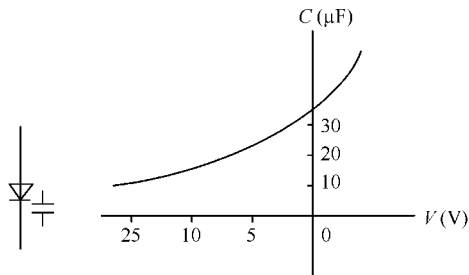


图 1.2.8 变容二极管的电路符号及变容特性

## 3. 光电二极管

在光电二极管的管壳上备有一个玻璃窗口以接收光照,其反向电流随光照强度的增加而上升。图 1.2.9 给出了光电二极管的电路符号,其主要特点是,它的反向电流与照度成正比。

光电二极管可用来作为光的测量,当制成大面积的光电二极管时,可当作一种能源,称为

光电池。

#### 4. 发光二极管

发光二极管通常用元素周期表中Ⅲ、Ⅴ族元素的化合物如砷化镓、磷化镓等制成。当这种管子通以电流时,将发出光来,这是由于电子和空穴直接复合而放出能量的结果,光谱范围比较窄,其波长由所使用的基本材料而定。图 1.2.10 所示为发光二极管的电路符号,它常用作显示器件,除单独使用外,也常制作成七段式或矩阵式,工作电流一般在几个毫安至十几毫安之间。

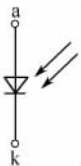


图 1.2.9 光电二极管

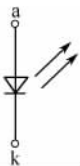


图 1.2.10 发光二极管

### 1.3 半导体三极管

半导体三极管,又称晶体三极管,简称三极管或晶体管。由于参与管子导电的有空穴和自由电子两种载流子,故又称为双极型晶体管。它是由两个相距很近的 PN 结构成的,由于 PN 结之间的相互影响,使三极管表现出不同于单个 PN 结的特性而具有电流放大功能,从而使 PN 结的应用发生了质的飞跃。本节将围绕三极管为什么具有电流放大作用这个核心问题,讨论三极管的结构、放大原理、特性曲线及参数。

#### 1.3.1 三极管的基本结构

三极管是在硅(或锗)基片上制作两个靠得很近的 PN 结,构成一个三层半导体器件,若是两层 N 型半导体夹一层 P 型半导体,就构成了 NPN 型三极管;若是两层 P 型半导体夹一层 N 型半导体,则构成了 PNP 型三极管。三极管若在硅基片上制成,称为硅管;若在锗基片上制成,称为锗管。通常 NPN 型管多为硅管,PNP 型管多为锗管。

无论三极管为哪种结构,都具有两个 PN 结,分别称为发射结和集电结;都形成三个区域,分别称作发射区、基区和集电区,由这三个区域引出的三个电极分别称为发射极、基极、集电极,并分别用字母 e、b、c 表示。NPN 型和 PNP 型三极管结构示意图及电路符号如图 1.3.1 所示。电路符号中,发射极的箭头方向表示发射结正向偏置时的电流方向。为了保证三极管具有放大特性,其结构具有如下特点:

- (1) 发射区杂质浓度大于集电区杂质浓度,以便于有足够的载流子供“发射”;
- (2) 集电结的面积比发射结的面积大,以利于集电区收集载流子;
- (3) 基区很薄,杂质浓度很低,以减少载流子在基区的复合机会。

通过以上描述可以看出,三极管的结构是不对称的,所以集电极和发射极不能对调使用。由于硅三极管的温度特性较好,所以应用较多。下面将以 NPN 型硅三极管为主进行原理分析。PNP 型管的工作原理与 NPN 型管相似,不同之处仅在于使用时,工作电源的极性相反。

#### 1.3.2 三极管的电流分配与放大作用

要使三极管正常放大交流信号,除了需要满足内部(结构)条件外,还需要满足外部条件:

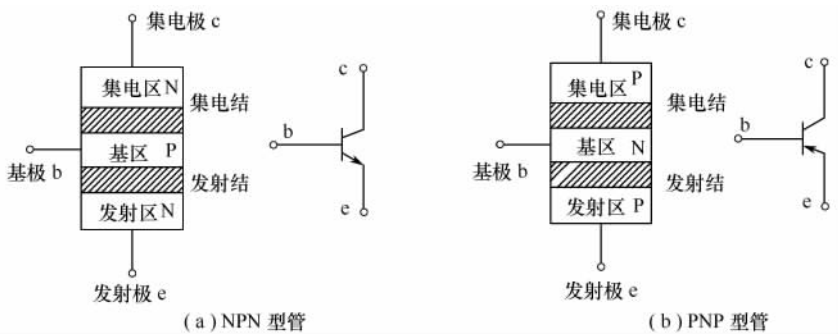


图 1.3.1 三极管结构示意图及电路符号

发射结正偏,集电结反偏。图 1.3.2 是一个处于放大状态的 NPN 型三极管内部载流子的传输过程。电源  $V_{BB}$  使发射结处于正向偏置,发射区的多子电子将不断通过发射结扩散到基区,形成发射结电子扩散电流  $I_{EN}$ ,其方向与电子扩散的方向相反;同时基区的多子空穴也要扩散到发射区,形成空穴电流  $I_{EP}$ ,其方向与空穴扩散的方向相同。 $I_{EN}$  和  $I_{EP}$  一起构成受发射结正向电压控制的发射结电流  $I_E$ ,即  $I_E = I_{EN} + I_{EP}$ 。由于发射区掺杂浓度远大于基区,所以  $I_{EP}$  很小, $I_E \approx I_{EN}$ 。

发射区的电子到达基区后,由于浓度差,且基区很薄,电子很快到达集电结。在扩散过程中,有一部分电子与基区的空穴相遇而复合,同时电源  $V_{BB}$  不断向基区补充空穴,形成基区复合电流  $I_{BN}$ 。由于基区掺杂浓度低且薄,复合的电子很少,即  $I_{BN}$  很小。

电源  $V_{CC}$  使集电结处于反向偏置,有利于少子的漂移运动,使基区中到达集电结边缘的电子很快漂移过集电结,被集电区收集形成  $I_{CN}$ 。同时基区自身的少子电子和集电区少子空穴也要向对方区域漂移,形成反向漂移电流  $I_{CBO}$ ,所以  $I_C = I_{CN} + I_{CBO}$ 。 $I_{CBO}$  的大小取决于基区和集电区的少子浓度,数值很小,但受温度影响很大,易使管子工作不稳定。

由图 1.3.2 可得基极电流为

$$\begin{aligned} I_B &= I_{EP} + I_{BN} - I_{CBO} = I_{EP} + I_{EN} - I_{CN} - I_{CBO} \\ &= I_E - I_C \end{aligned}$$

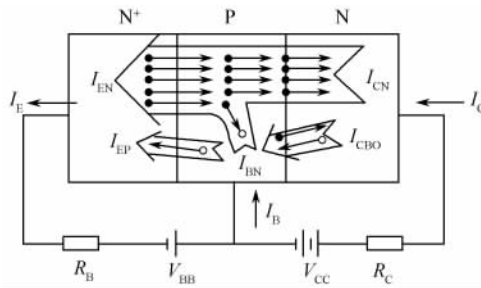


图 1.3.2 放大状态的三极管内部载流子的传输过程

一个放大器必须有两个端子接输入信号,另外两个端子作输出端,提供输出信号,而三极管只有 3 个电极,因此,用三极管组成放大器时必须有一个引出端作为输入和输出信号的公共端。采用不同的公共端有 3 种不同的组态,即共发射极电路、共基极电路和共集电极电路,如图 1.3.3 所示,在放大电路中,共发射极电路应用最多。

需要说明的是,无论是哪种连接方式,要想使三极管具有放大作用,都必须保证发射结正

偏,集电结反偏。而因其内部载流子的传输过程相同,所以 3 个电极的电流分配关系相同。

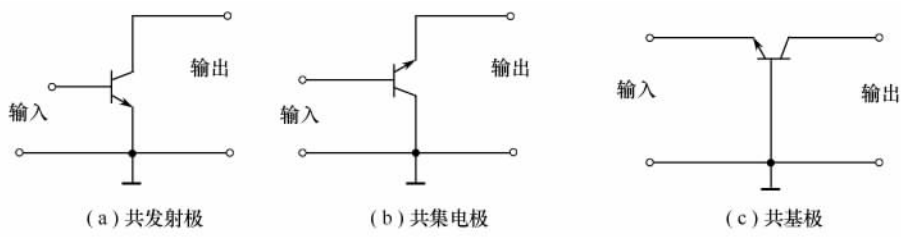


图 1.3.3 三极管的三种连接组态

图 1.3.4 为 NPN 型管共发射极实验电路。基极电源  $V_{BB}$  使发射结加正向偏置,而集电极电源  $V_{CC}$  使集电结加反向偏置,电路中有 3 条支路的电流通过三极管,即集电极电流  $I_C$ 、基极电流  $I_B$  和发射极电流  $I_E$ 。电流方向如图中箭头所示。调节电位器  $RP$  的阻值,可以改变发射结的偏置电压,从而控制基极电流  $I_B$  的大小。而  $I_B$  的变化又将引起  $I_C$  和  $I_E$  的变化。每取得一个  $I_B$  的确定值,必然可得一组  $I_C$  和  $I_E$  的确定值与之对应,实验取得数据如表 1.3.1 所列。

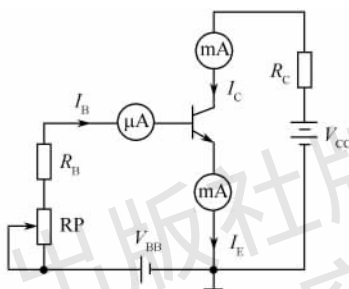


图 1.3.4 三极管电流分配实验电路

由表 1.3.1 看出:

(1) 流过三极管的电流无论怎样变化,始终满足三极管的电流分配规律,即

$$I_E = I_C + I_B \text{ 且 } I_C \gg I_B, I_E \approx I_C$$

(2) 基极电流有微小变化,集电极电流便会有较大变化。例如,当基极电流由  $0.01\text{mA}$  变化到  $0.03\text{mA}$  时,对应集电极电流则由  $0.56\text{mA}$  变化到  $1.74\text{mA}$ ,  $I_B$  变化量  $\Delta I_B = 0.02\text{mA}$ ,而  $I_C$  变化量  $\Delta I_C = 1.18\text{mA}$ ,两个变化量之比  $\Delta I_C / \Delta I_B = 55$ (倍),这个比值通常用符号  $\beta$  表示,称为三极管交流电流放大系数,记为  $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$ ,此式表明集电极电流变化量为基极电流变化量的 55 倍。由此可见,基极电流的微小变化可使集电极电流发生更大的变化。这种  $I_B$  对  $I_C$  的控制作用,称为三极管的电流放大作用。

表 1.3.1 三极管电流分配实验数据

$I_B(\text{mA})$	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
$I_C(\text{mA})$	0.01	0.56	1.14	1.74	2.33	2.91
$I_E(\text{mA})$	0.01	0.57	1.16	1.77	2.37	2.96

### 1.3.3 三极管的特性曲线

描绘三极管各电极电压与电流之间关系的曲线称为三极管的特性曲线,也称伏安特性曲线。它是三极管内载流子运动规律的外部表现,是分析三极管放大器和选择管子参数的重要

依据。常用的三极管特性曲线有输入特性曲线和输出特性曲线。

### 1. 输入特性曲线

当三极管集电极与发射极之间所加电压  $v_{CE}$  一定时,加在基极与发射极之间的电压  $v_{BE}$  与对应产生的基极电流  $i_B$  之间的关系曲线  $i_B = f(v_{BE}) |_{v_{CE}=\text{常数}}$ ,称为三极管输入特性曲线。输入特性曲线可采用查找半导体器件手册或用“晶体管特性图示仪”测量等方法获得。由于器件参数的分散性,不同三极管的输入特性曲线是不完全相同的,但大体形状是相似的。当  $v_{CE}$  为不同值,输入特性曲线为一簇曲线,当  $v_{CE} \geq 1V$  后,曲线簇重合,如图 1.3.5 所示。

$v_{BE}$  加在三极管发射结上,该 PN 结相当于一个二极管,所以三极管的输入特性曲线与二极管伏安特性曲线很相似。 $v_{BE}$  与  $i_B$  呈非线性关系,同样存在着导通电压,用  $V_{BE(on)}$  表示。只有当  $v_{BE}$  大于  $V_{BE(on)}$  时,三极管才出现基极电流  $i_B$ 。否则三极管不导通。当三极管正常工作时,NPN 型(硅)管的发射结电压  $V_{BE(on)} = 0.7V$ ,PNP 型(锗)管的  $V_{BE(on)} = -0.2V$ 。这是检查放大器中三极管是否正常工作的重要依据。若检测结果与上述数值相差较大,可直接判断三极管有故障存在。

### 2. 输出特性曲线

在基极电流  $i_B$  为确定值时, $v_{CE}$  与  $i_C$  之间为  $i_C = f(v_{CE}) |_{i_B=\text{常数}}$ ,其关系曲线称为三极管输出特性曲线。输出特性曲线同样可采用查找半导体器件手册和用“晶体管特性图示仪”测量等方法获得。图 1.3.6 所示即为  $i_B$  取不同值时,NPN 型硅管的输出特性曲线簇。由图中的任意一条曲线可以看出,在坐标原点处随着  $v_{CE}$  的增大, $i_C$  跟着增大。当  $v_{CE}$  大于 1V 以后,无论  $v_{CE}$  怎样变化, $i_C$  几乎不变,曲线与横轴接近平行。这说明三极管具有恒流特性。通常把三极管输出特性曲线簇分为 3 个区域,这 3 个区域对应着三极管 3 种不同的工作状态。

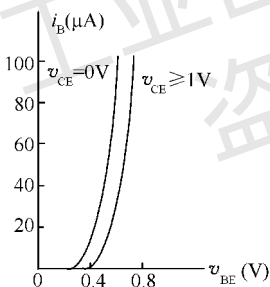


图 1.3.5 输入特性曲线

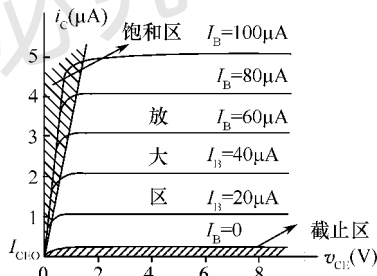


图 1.3.6 输出特性曲线

#### (1) 放大区

输出特性曲线平坦部分的区域是放大区。工作在放大区的三极管发射结处于正向偏置(大于导通电压),集电结处于反向偏置。 $i_C$  与  $i_B$  成比例增长,即  $i_B$  有一个微小变化, $i_C$  将按比例发生较大变化,体现了三极管的电流放大作用。在垂直于横轴方向作一直线,从该直线上找出  $i_C$  的变化量  $\Delta i_C$  和与之对应的  $i_B$  变化量  $\Delta i_B$ ,即可求出三极管的电流放大系数  $\beta = \Delta i_C / \Delta i_B$ 。这些曲线越平坦,间距越均匀,则三极管线性越好。在相同的  $\Delta i_B$  下,曲线间距越大,则  $\beta$  值越大。

#### (2) 饱和区

输出特性曲线簇起始部分的区域是饱和区。三极管工作在这个区域时, $v_{CE}$  很低, $v_{CE} < V_{BE}$ ,集电结处于正向偏置,发射结也处于正向偏置。在这个区域, $i_C$  不受  $i_B$  控制,三极管失去

电流放大作用。其集电极与发射极之间电压称为三极管饱和压降,记为  $V_{CES}$ 。对于 NPN 型(硅)管  $V_{CES}=0.3V$ ,PNP 型(锗)管  $|V_{CES}|=0.1V$ 。

### (3) 截止区

$i_B=0$  那条输出特性曲线以下的区域为截止区。要使  $i_B=0$ ,发射结电压  $V_{BE}$  一定要小于导通电压,为了保证可靠截止,常使发射结处于反向偏置,集电结也处于反向偏置。由图可见, $i_B=0$  时, $i_C \neq 0$ ,还有很小的集电极电流,称为穿透电流,记为  $I_{CEO}$ 。硅管  $I_{CEO}$  很小,在几微安以下;锗管稍大些,为几十微安到几百微安。

## 1.3.4 三极管的主要参数

三极管的参数是用来表征三极管性能优劣及其应用范围的指标,是选用三极管及对电路进行设计、调试的重要依据。

### 1. 电流放大系数

电流放大系数是表征三极管电流放大能力的参数,电流放大系数有直流、交流之分。

① 直流电流放大系数  $\bar{\beta}$ : 无交流信号输入时,三极管集电极直流电流  $I_C$  与基极直流电流  $I_B$  的比值,记为  $\bar{\beta}=I_C/I_B$ 。

② 交流电流放大系数  $\beta$ : 有交流信号输入时,三极管集电极电流变化量  $\Delta i_C$  与基极电流变化量  $\Delta i_B$  的比值,记为  $\beta=\Delta i_C/\Delta i_B$ 。

常用三极管的  $\beta$  值在  $20\sim 200$  之间,若  $\beta$  太小,三极管放大能力差; $\beta$  太大,则三极管工作时稳定性差。直流电流放大系数  $\bar{\beta}$  与交流电流放大系数  $\beta$  的含义不同,但数值相差很小,应用时通常不加以区别。

### 2. 极间反向电流

极间反向电流是决定三极管工作稳定性的重要参数,也是鉴别三极管质量优劣的重要指标,其值越小越好。

#### (1) 集电极—基极反向饱和电流 ( $I_{CBO}$ )

三极管发射极开路,集电结加反向电压时产生的电流,称为集电极—基极反向饱和电流,记为  $I_{CBO}$ ,如图 1.3.7 所示。性能好的三极管  $I_{CBO}$  很小,一般小功率硅管该电流为  $1\mu A$  左右,锗管为  $10\mu A$  左右。 $I_{CBO}$  受温度的影响大,随温度升高而增大,是使三极管工作不稳定的重要因素。

#### (2) 穿透电流 ( $I_{CEO}$ )

三极管基极开路,集电极与发射极之间加上一定电压时,流过集电极与发射极之间的电流,称为穿透电流,记为  $I_{CEO}$ ,如图 1.3.8 所示。两种极间反向电流  $I_{CBO}$  与  $I_{CEO}$  的关系是:  $I_{CEO}=(1+\beta)I_{CBO}$ 。与  $I_{CBO}$  一样, $I_{CEO}$  受温度的影响很大,温度越高  $I_{CEO}$  越大,三极管工作越不稳定。

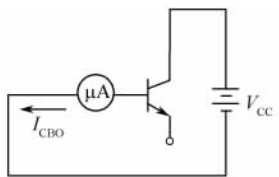


图 1.3.7 集电极—基极反向饱和电流  $I_{CBO}$

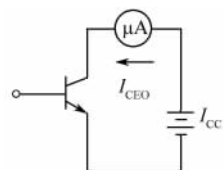


图 1.3.8 穿透电流  $I_{CEO}$

### 3. 极限参数

极限参数是指三极管正常工作时,所允许的电流、电压和功率等的极限值。如果超过这些数值,就难以保证管子正常工作,甚至损坏管子。常用极限参数有以下 3 个。

#### (1) 集电极最大允许电流( $I_{CM}$ )

当集电极电流增大到一定数值后,三极管的  $\beta$  值将明显下降。在技术上规定,使三极管  $\beta$  值下降到正常值三分之二时的集电极电流称为集电极最大允许电流,用  $I_{CM}$  表示。在使用三极管时,如果  $I_C$  超出  $I_{CM}$  不多,三极管不一定损坏,但其  $\beta$  值已显著下降,如果超出太多,将烧毁三极管。

#### (2) 集电极—发射极间反向击穿电压( $V_{(BR)CEO}$ )

基极开路时,加在集电极与发射极之间的最大允许电压,称为集电极—发射极间反向击穿电压,用  $V_{(BR)CEO}$  表示。在使用三极管时,集电极与发射极间所加电压绝不能超过此值,否则将损坏管子。

#### (3) 集电极最大允许耗散功率( $P_{CM}$ )

三极管因温度升高而引起的参数变化不超过允许值时,集电极消耗的最大功率称为集电极最大允许耗散功率,用  $P_{CM}$  表示。依据  $P_{CM} = V_{CE} I_C$  的关系,可在输出特性曲线簇上绘出  $P_{CM}$  允许功率损耗线,如图 1.3.9 所示。 $P_{CM}$  曲线右上方为过损耗区;左下方由  $I_{CM}$ 、 $V_{(BR)CEO}$  和  $P_{CM}$  三者共同确定了三极管的安全工作区。

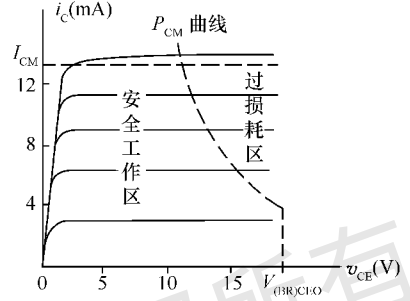


图 1.3.9 三极管  $P_{CM}$  功耗线

## 1.4 场效应晶体管

场效应晶体管也是一种三端半导体器件,其外形与普通三极管相似,但与三极管相比,具有输入电阻高、噪声小、功耗低和热稳定性好等特点,因而在集成电路尤其是计算机电路的设计中应用广泛。

场效应管根据结构的不同可以分为结型场效应管(Junction Field Effect Transistor, JFET)和绝缘栅型场效应管(Insulated Gate Field Effect Transistor, IGFET)两种类型,其中 IGFET 制造工艺简单、便于集成、应用更广泛,本书仅介绍 IGFET。

绝缘栅场效应管 IGFET 又称为金属—氧化物—半导体场效应管(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)。按照制造工艺和性能的不同又分为增强型(enhancement MOS 或 EMOS)与耗尽型(Depletion MOS 或 DMOS)两大类,每类又有 N 沟道(channel)和 P 沟道两种导电类型,但它们的工作原理相同。

### 1.4.1 N 沟道增强型 MOSFET

图 1.4.1(a)所示是增强型 NMOS 管的结构示意图,它是在一块 P 型半导体基片(又称衬底)上面覆盖一层二氧化硅绝缘层,在绝缘层上开两个小窗用扩散的方法制成两个高掺杂浓度的  $N^+$  区,分别引出电极,称为源极(Source,用 S 表示)和漏极(Drain,用 D 表示)。在 S、D 两极之间二氧化硅绝缘层上面再喷一层金属铝,引出电极称为栅极 G(Gate,用 G 表示)。在基片(衬底)下方引出电极 B,使用时通常和源极 S 相连(有些管子出厂时,已在内部连接好)。由于此类管子的栅级(G)与源极(S)、漏极(D)之间都是绝缘的,故又称绝缘栅场效应管,

图 1.4.1(b)是它的电路符号。

### 1. 栅源电压对导电沟道的影响

由图 1.4.1(a)看出, NMOSFET 的两个  $N^+$  区被 P 型衬底隔开, 成为两个背靠背的 PN 结。在栅源电压  $V_{GS}$  为零时, 不管漏源电压  $V_{DS}$  为何值, 总有一个 PN 结是反向偏置的, 因此漏极和源极之间不可能有电流流通。

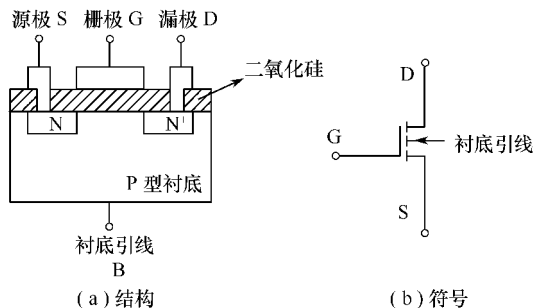


图 1.4.1 增强型 NMOSFET

当把源极 S 和衬底 B 接地, 并在栅、源极间加正电压  $V_{GS}$ , 就会在栅极与衬底之间建立起一个垂直电场, 其方向由栅极指向衬底, 在此电场作用下, P 型衬底中的少数载流子自由电子被吸引到栅极下面衬底的表层, 形成一层以电子为多数载流子的 N 型薄层, 这是一种能导电的薄层, 它与 P 型衬底的类型相反, 故称为反型层。反型层把源区和漏区连成一个整体, 形成 N 型导电沟道, 如图 1.4.2(a)所示。 $v_{GS}$  值越大, 形成的导电沟道越宽, 沟道电阻越小。这种在  $v_{GS}=0$  时没有导电沟道, 必须依靠栅源电压的作用才能形成导电沟道的 FET 称为增强型 FET。图 1.4.1(b)中所示的电路符号中, 虚线即为沟道线, 反映了增强型 FET 在  $v_{GS}=0$  时沟道是断开的特点。

导电沟道形成后, 在漏极(D)和源极(S)之间加上正电压  $v_{DS}$ , 就会产生漏极电流  $i_D$ 。使 D、S 极之间开始导电的栅源电压称为开启电压, 用  $V_T$  表示。

由上述可见, MOS 管的截止和导通是通过改变栅源电压  $V_{GS}$  而实现的, 所以 MOS 管是一种电压控制型导电器件; 它在工作过程中只有一种极性的载流子参与导电, 也称为单极型器件。

### 2. 漏源电压对导电沟道的影响

当  $v_{GS} \geq V_T$ , 外加较小的  $v_{DS}$  时, 漏极电流  $i_D$  将随  $v_{DS}$  的上升迅速增大, 在输出特性上如图 1.4.3(a)所示的 OA 段, 曲线斜率较大。但随着  $v_{DS}$  的上升, 由于沟道存在电位梯度, 所以造成沟道厚度的不均匀, 靠近源端厚, 靠近漏端薄, 即沟道呈楔形。当  $v_{DS}$  增大到一定数值, 使得  $v_{GD} = v_{GS} - v_{DS} = V_T$  时, 靠近漏端的反型层消失, 沟道发生预夹断, 如图 1.4.2(b)所示。但耗尽区中仍有电流通过。 $v_{DS}$  继续增加时, 增加的部分主要降落在夹断区, 沟道上的电压基本不变, 所以  $v_{DS}$  上升,  $i_D$  趋于饱和, 这时输出特性曲线斜率为 0, 如图 1.4.3(a)所示的 AB 段。

### 3. 输出特性曲线和转移特性曲线

增强型 NMOS 管的输出特性是指栅源电压  $v_{GS}$  一定的情况下, 漏极电流  $i_D$  与  $v_{DS}$  之间的关系, 如图 1.4.3(a)所示。与三极管输出特性曲线十分相似, MOS 管的输出特性曲线也分为 3 个工作区: 可变电阻区、饱和区和截止区。



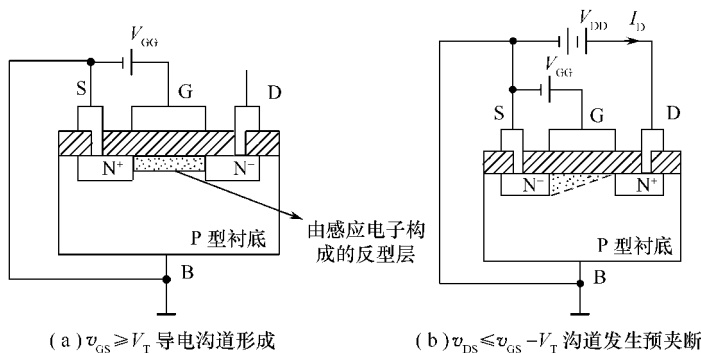


图 1.4.2 增强型 NMOS 管的导电沟道

在截止区:  $v_{GS} < V_T$  沟道尚未形成,  $i_D = 0$ , MOS 管工作在截止状态。

在可变电阻区:  $v_{GS} > V_T$ , 且  $v_{DS} \leq v_{GS} - V_T$ , 沟道尚未发生预夹断, MOS 管可以被等效为受  $v_{GS}$  控制的可变电阻。

在饱和区:  $v_{GS} > V_T$ , 且  $v_{DS} \geq v_{GS} - V_T$ ,  $i_D$  只受  $v_{GS}$  控制, 与  $v_{DS}$  无关。呈现恒流特性, 场效应管用作放大时就工作在这个区域, 所以饱和区又称放大区。满足

$$i_D = K_n V_T^2 \left( \frac{v_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2 = I_{D0} \left( \frac{v_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2 \quad (1.4.1)$$

式中  $I_{D0} = K_n V_T^2$ , 电导常数  $K_n$  的单位是  $\text{mA}/\text{V}^2$ 。

由于预夹断的条件是  $v_{GD} = v_{GS} - v_{DS} = V_T$ , 所以  $v_{DS} = v_{GS} - V_T$  是可变电阻区与饱和区的分界点, 据此可画出预夹断轨迹如图 1.4.3(a) 中虚线所示。显然, 该虚线是可变电阻区与饱和区的分界线。

增强型 NMOS 管的转移特性曲线如图 1.4.3(b) 所示。它表示输入栅源电压  $v_{GS}$  对输出漏极电流  $i_D$  的控制特性。该曲线在水平坐标轴上的起点  $V_T$  即为开启电压, 只有栅源电压  $v_{GS} > V_T$ , 导电沟道才能形成, 管子才导通。

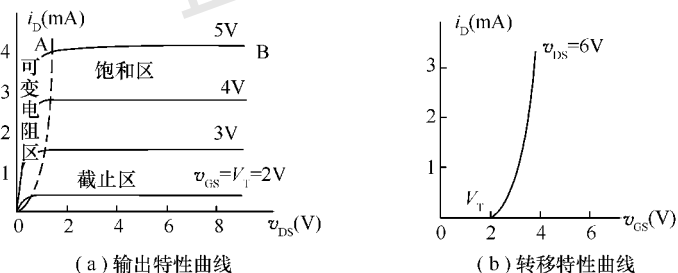


图 1.4.3 增强型 NMOS 管的特性曲线

## 1.4.2 N 沟道耗尽型 MOSFET

当用 P 型半导体基片 (衬底) 制造 MOS 场效应管时, 通过扩散或其他方法在漏区和源区之间预先制成一个导电的 N 沟道, 于是就成为耗尽型 NMOS 场效应管。这种场效应管在加上漏源电压  $v_{DS}$  后, 即使栅源电压  $v_{GS}$  为零, 仍将有一个相当大的漏极电流  $i_D$ 。把  $V_{GS} = 0$  时的  $I_D$  称为漏极饱和电流, 记为  $I_{DSS}$ 。

当  $v_{GS}$  为正, 导电沟道变宽,  $i_D$  增大; 当  $v_{GS}$  为负, 导电沟道变窄,  $i_D$  减小。当  $v_{GS}$  负到一定

程度时,导电沟道被夹断,  $i_D=0$ , 此时的栅源电压  $v_{GS}$  称为夹断电压, 用  $V_P$  表示。显然, 这种管子可以在正或负的栅源电压下工作, 而且基本上无栅流, 这是耗尽型 MOS 管的重要特点。

耗尽型 NMOS 管的转移特性曲线输出如图 1.4.4 所示。在饱和区满足

$$i_D = K_n V_P^2 \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P}\right)^2 = I_{DSS} \left(\frac{v_{GS}}{V_P} - 1\right)^2 \quad (1.4.2)$$

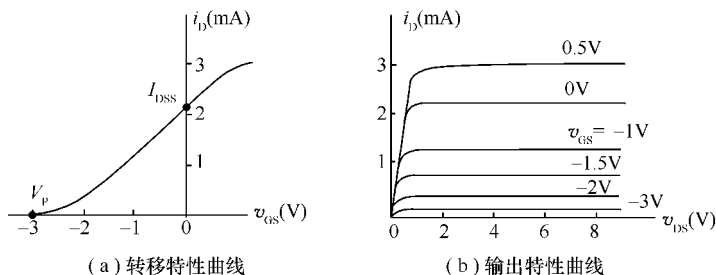


图 1.4.4 耗尽型 NMOS 管的特性曲线

### 1.4.3 场效应管的特性与参数

当把上述两种场效应管的基片(衬底)换成 N 型半导体, 源区、漏区和导电沟道改成 P 型, 就分别得到增强型 PMOS 场效应管和耗尽型 PMOS 场效应管。为了便于比较和使用, 现将 4 种类型 MOS 管的符号, 特性曲线归纳列于表 1.4.1 中。(图中假定  $i_D$  的正向为流进漏极)

表 1.4.1 4 种类型 MOS 管的符号及特性曲线

管型	增强型 NMOS 管	耗尽型 NMOS 管	增强型 PMOS 管	耗尽型 PMOS 管
电路符号				
转移特性				
输出特性				

(1) 为了表明是 NMOS 管还是 PMOS 管,管子符号中以衬底引线 B 的箭头方向来区分。箭头指向管内为 NMOS 管,指向管外为 PMOS 管。

(2) 为了表明是增强型管还是耗尽型管,在管子符号中,以漏源极之间的连线来区分。断续线表明  $V_{GS}=0$  时,管子 D、S 极间无导电沟道,为增强型;连续线表明  $V_{GS}=0$  时,管子有导电沟道,为耗尽型。

(3) 从输出特性曲线和转移特性曲线可以看出,NMOS 管和 PMOS 管外加电源电压极性是相反的,例如增强型 NMOS 管的栅源电压  $v_{GS}$  应加正电压,而增强型 PMOS 管的栅源电压  $v_{GS}$  应加负电压。

场效应管的主要参数如下:

(1) 跨导( $g_m$ ):指  $V_{DS}$  为某一固定值时,栅源电压对漏极电流的控制能力,定义为

$$g_m = \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} \right|_{V_{DS}=\text{常数}} \quad (1.4.3)$$

从转移特性曲线上看,跨导就是工作点处切线的斜率。

(2) 直流输入电阻( $R_{GS}$ ):栅源电压与栅极电流的比值,其值一般大于  $10^9 \Omega$ 。

(3) 漏极饱和电流  $I_{DSS}$ :定义为当  $V_{GS}=0$  时,在规定的  $v_{DS}$  下所产生的漏极电流。此参数只对耗尽型管子有意义。

(4) 开启电压( $V_T$ ):增强型 FET 的参数。当  $v_{DS}$  一定时,使管子导通的最小栅源电压。

(5) 夹断电压  $V_P$ :耗尽型 FET 的参数。当  $v_{DS}$  一定时,使管子截止的最小栅源电压。

由于 MOS 场效应管的栅极与其他电极之间处于绝缘状态,所以它的输入电阻很高,可达  $10^9 \Omega$  以上。因此,周围电磁场的变化很容易在栅极与其他电极之间感应产生较高的电压,将其绝缘击穿。为了防止损坏,保存 MOS 场效应管时,应把各电极短接,焊接时应把烧热的电烙铁断电或外壳接地。近年,生产出内附保护二极管的 MOS 场效应管,使用时就方便多了。

## 1.5 光电耦合器

光电耦合器是把发光二极管和光电三极管封装在一个管壳内构成的,其电路符号如图 1.5.1 所示。

前面已介绍过,发光二极管是一种能将电能直接转换成光能的特殊二极管,加正向电压可发光;与发光二极管相反,光电管是一种能把光能转换成电能的半导体器件。它包括光电二极管和光电三极管两大类。

光电二极管是由 PN 结和有聚光作用的透镜组成。通常情况下,给 PN 结加反向偏置电压时,产生的反向饱和电流是很小的,如果有光照射时,半导体电阻率会显著减小(光敏性),将激发产生光生载流子(电子空穴对),在反向电压作用下,光生载流子漂移通过 PN 结,使 PN 结由反向截止转换为反向导通。光电三极管是具有两个 PN 结的光电器件。它的工作原理与光电二极管类似,只是它还利用了三极管的放大作用,因此灵敏度更高。

光电耦合器以发光二极管为输入端,光电三极管为输出端。当输入端有电信号输入时(发光二极管加正向电压),发光二极管发光,光电三极管因受光照产生光电流,输出端就有电信号输出。因此,光电耦合器是以光为媒介传输电信号的。其特点是输入和输出之间实现了电绝缘。

使用光电耦合器时应注意以下几个参数:

① 隔离电阻:即发光二极管与光电三极管之间的绝缘电阻,一般在  $10^9 \sim 10^{11} \Omega$  之间。

② 极间耐压:即发光二极管与光电三极管之间的耐压,一般在 500V 以上。

③ 最高工作频率:一般不超过 100kHz。

光电耦合器主要用来实现微型计算机接口与各类控制对象之间的电气隔离,以增强抗干扰能力,提高系统工作的可靠性。图 1.5.2 电路是用于耦合脉冲信号的应用电路。当输入信号  $v_i$  为低电平时,三极管 VT 截止,光电耦合器输入端的发光二极管无电流通过不发光,输出端光电三极管截止,输出电压  $v_o$  为低电平;当输入信号  $v_i$  为高电平时,三极管 VT 饱和导通,发光二极管发光,光电三极管产生光电流,输出电压  $v_o$  为高电平。

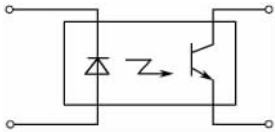


图 1.5.1 光电耦合器电路符号

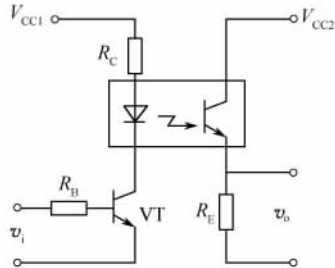


图 1.5.2 脉冲信号光电耦合电路

## 本章小结

(1) PN 结是半导体器件的基础,PN 结具有单向导电性,加正向电压导通,反向电压截止。

(2) 二极管是一种非线性器件,基本的特点是单向导电性。二极管的伏安特性曲线由正向特性和反向特性两部分组成,正向特性是指正向电压小于死区电压时,二极管截止,电流为零,正向电压大于死区电压时,正向电流随正向电压的变化近似按指数规律变化;反向特性是指反向电压小于反向击穿电压时反向电流很小,且受温度的影响,反向电压大于击穿电压时二极管起稳压作用。二极管的主要参数有最大整流电流、最高反向工作电压和反向击穿电压。

(3) 二极管可用于整流、限幅、钳位、检波和元件保护等电路。稳压二极管工作在反向击穿区,可用于稳定电压。其他特殊二极管应用也极为广泛。

(4) 晶体三极管是由两个 PN 结组成的电流控制型器件,按结构分为 NPN 和 PNP 两种类型,它的 3 个引出端分别称为发射极 e、基极 b 和集电极 c。

(5) 晶体三极管的电特性可用输入特性曲线和输出特性曲线表征。输出特性曲线可分为 3 个区域:放大区、截止区和饱和区。放大电路中晶体管应工作在放大区,必须满足发射结正偏,集电结反偏。三极管工作在饱和区或截止区则相当于开关,饱和区时三极管相当于开关接通,而工作在截止区时相当于开关断开。

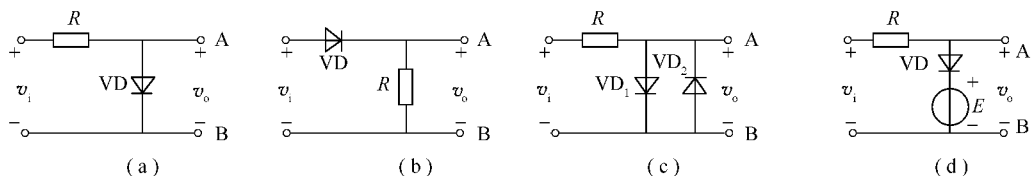
(6) 场效应管是电压控制型器件,其特点是输入电阻大、噪声低、温度稳定性好等。场效应管的输出特性曲线也分为可变电阻区、饱和区和截止区,用于放大时,应工作在饱和区。

## 思考题与习题

1.1 二极管伏安特性有何特点?

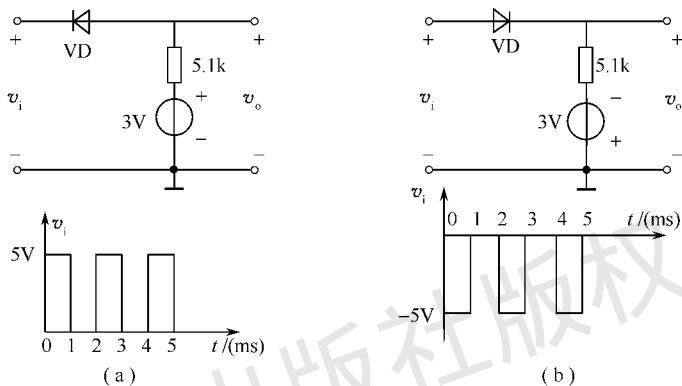
1.2 二极管是非线性器件,它的直流电阻和交流电阻有何区别?用万用表欧姆挡测量的二极管电阻属于哪一种?为什么用万用表欧姆挡的不同量程测出的二极管阻值会不同?

- 1.3 为什么稳压管的动态电阻越小,稳压效果越好?
- 1.4 在图题 1.4 所示的各种电路中,输入电压  $v_i = 10\sin\omega tV$ ,  $E = 5V$ 。试画出各电路输出  $v_o$  波形,并标出其幅值,设管子正向电压为  $0.7V$ ,反向电流可以忽略。



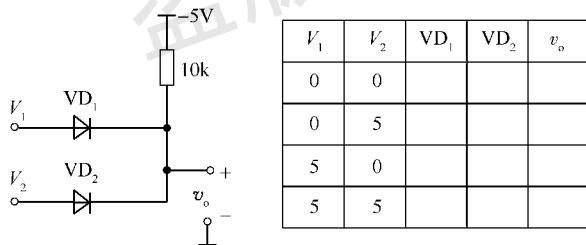
图题 1.4

- 1.5 画出图题 1.5 所示各电路中的  $v_o$  的波形(可忽略 VD 的正向压降)。



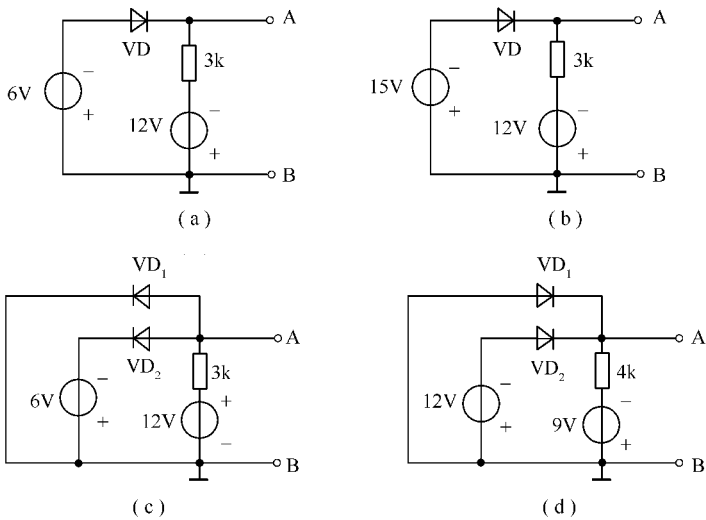
图题 1.5

- 1.6 分析图题 1.6 中所示电路中各二极管的工作状态(导通或截止),并确定出  $v_o$ ,将结果填入表中。(图中二极管均为理想三极管)

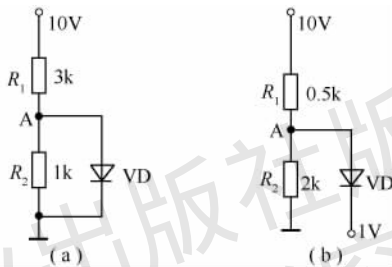


图题 1.6

- 1.7 二极管电路如图题 1.7 所示,判断图中的二极管是导通还是截止,并求出 AB 两端的电压  $V_{AB}$ (图中二极管均为理想二极管)。
- 1.8 试估算图题 1.8 所示各电路中流过二极管的电流和 A 点的电位(设二极管的正向压降为  $0.7V$ )。
- 1.9 既然三极管具有两个 PN 结,可否用两只二极管背靠背地相连以构成一只三极管,说明理由。
- 1.10 能否将三极管的发射极与集电极交换使用?为什么?
- 1.11 要使 PNP 型三极管具有线性放大作用,其发射结和集电结的偏置电压应如何连接;并说明其处于截止及饱和状态时的条件。

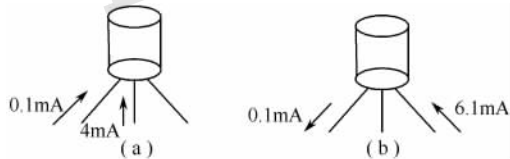


图题 1.7



图题 1.8

1.12 测得工作在放大电路中两个三极管的两个电极电流如图题 1.12 所示：(1) 求另一个电极电流，并在图中标出实际方向。(2) 判断是 NPN 型还是 PNP 型管，标出 e、c、b 极。



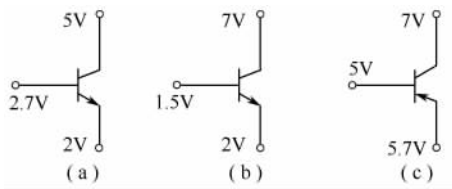
图题 1.12

1.13 测得某放大电路中三极管的 3 个电极 A、B、C 的对地电位分别为  $V_A = -9V$ ,  $V_B = -6V$ ,  $V_C = -6.2V$ , 分析 A、B、C 中哪个是基极、发射极、集电极，并说明此三极管是 NPN 型管还是 PNP 型管。

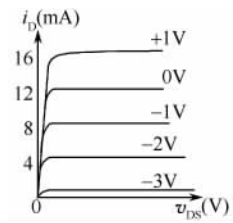
1.14 测得某放大电路中三极管的 3 个电极电位如图题 1.14, 试判断管子分别工作在什么状态？

1.15 有一个场效应管但不知道是什么类型，通过实验测试它的漏极特性如图题 1.15 所示。则：

- (1) 它是哪种类型的场效应管？
- (2) 它的电压  $V_P$  (或开启电压  $V_T$ ) 大约是多少？
- (3) 它的  $I_{DSS}$  大约是多少？

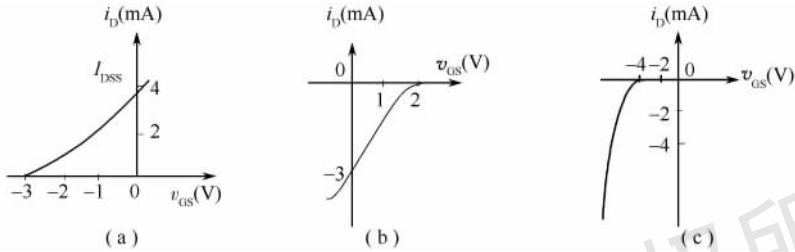


图题 1.14



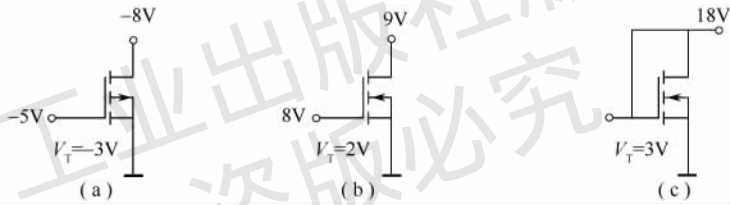
图题 1.15

- 1.16 图题 1.16 所示为 MOSFET 的转移特性, 分别说明各属于何种沟道。如是增强型, 说明它的开启电压  $V_T = ?$  如是耗尽型, 说明它的夹断电压  $V_p = ?$  (图中  $i_D$  的假定正向为流进漏极)



图题 1.16

- 1.17 判断图题 1.17 所示的 MOSFET 工作于何种区域?



图题 1.17