



音频放大器的制作与调试

本项目的学习目标是音频放大器的制作与调试。本项目包含三个任务:单管放大电路的制作与调试、简单门铃的制作与调试、音频放大器的制作与调试。在本项目中学习半导体器件的基础知识及放大电路的基本工作原理,了解反馈及多级放大。项目学习结束后,学生要能自行完成两个电路在面包板上的搭建与调试工作,掌握一个小的电子产品在生产过程中除整机装配外的流程。



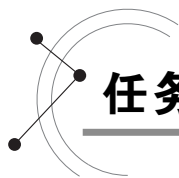
知识目标

- ◇ 了解电子器件中常用的半导体材料;
- ◇ 了解本征半导体与杂质半导体的区别;
- ◇ 掌握 P 型半导体与 N 型半导体材料中哪个是多数载流子;
- ◇ 掌握 PN 结的特性;
- ◇ 了解晶体管的结构;
- ◇ 会简单计算静态工作点 Q ;
- ◇ 掌握晶体管处在三种工作状态的条件;
- ◇ 掌握用万用表检测与判断二极管和晶体管好坏的方法。



能力目标

- ◇ 能够依据 PN 结的特性对二极管和晶体管的好坏进行检测;
- ◇ 能够用万用表区分出晶体管的三个极;
- ◇ 会使用面包板进行简单电路的搭接试验。



任务一 单管放大电路的制作与调试

任务导入

我们在电路中进行电信号处理时,被处理的信号往往是一个微弱的小信号,为了便于对这个小信号进行观察、应用,就需要把这个小信号放大。在电子器件中是否会有这样一类器件可以实现这一功能呢?答案是肯定的。下面我们就一起来学习一下这类器件中很有代表性的一种——晶体管。



知识准备

半导体器件是构成电子电路的基本器件,它们所用的材料是经过特殊加工且性能可控的半导体晶体。

一、本征半导体

纯净的无杂质无缺陷的半导体、晶体称为本征半导体。

1. 半导体

物质的导电性能决定于物质内部有没有自由移动的电荷。常用的半导体材料——硅(Si)和锗(Ge)均为四价元素,它们的最外层电子既不像导体那么容易挣脱原子核的束缚成为自由电子,也不像绝缘体那样被原子核束缚得那么紧无法自由移动,因而,其导电性介于二者之间。

半导体在光照和热辐射条件下,其导电性还有明显的增强,因此,半导体具有光敏性和热敏性。在形成晶体结构的半导体中,人为地掺入特定的杂质元素时,导电性能具有可控性。这些特殊的性质就决定了半导体可以制成各种电子器件。

2. 本征半导体的晶体结构

将纯净的半导体材料经过一定的工艺过程制成单晶体,即为半导体。晶体中的原子在空间形成排列整齐的点阵,称为晶格。由于相邻原子间的距离很小,因此,相邻两个原子的一对最外层电子(价电子)不但各自围绕自身所属的原子核运动,而且出现在相邻原子所属的轨道上,成为共用电子,这样的化学键称为共价键,如图 2-1 所示。图中标有“+4”的圆圈表示除价电子外的正离子。

3. 半导体中的两种载流子

晶体中的共价键具有很强的结合力,因此,在常温下,仅有极少数的价电子由于热运动(热激发)获得足够的能量,从而挣脱原子核的束缚成为自由电子。与此同时,在共价键中留下一个空位置,称为空穴。原子因失掉一个价电子而带正电,或者说空穴带正电。在半导体中,自由电子与空穴是成对出现的,即自由电子与空穴数目相等,如图 2-2 所示。这样,若在半导体两端外加一电场,则一方面自由电子将产生定向移动,形成电子电流;另一方面由于

空穴的存在,价电子将按一定的方向依次填补空穴,也就是说空穴也产生定向移动,形成空穴电流。由于自由电子和空穴所带电荷极性相反,所以它们的运动方向相反,半导体中的电流是两个电流之和。

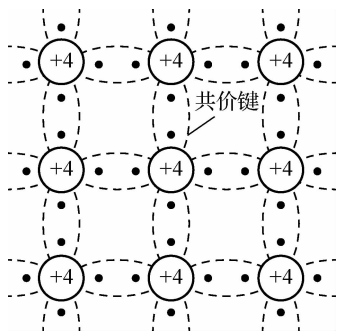


图 2-1 本征半导体结构示意图

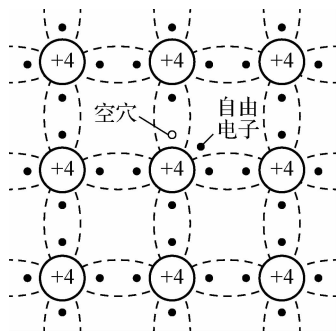


图 2-2 本征半导体中的自由电子和空穴

运载电荷的粒子称为载流子。导体只有一种载流子导电,即自由电子;而半导体有两种载流子参与导电,即自由电子和空穴,这是半导体导电的特殊性质。

4. 本征半导体中载流子的浓度

半导体在热激发下产生自由电子和空穴对的现象称为本征激发。自由电子在运动的过程中如果与空穴相遇就会填补空穴,使两者同时消失,这种现象称为复合。在一定的温度下,激发所产生的自由电子与空穴对,与复合的自由电子与空穴对数目相等,故达到动态平衡。换言之,在一定温度下,半导体中载流子的浓度是一定的,并且自由电子与空穴的浓度相等。当环境温度升高时,热运动加剧,挣脱共价键束缚的自由电子增多,空穴也随之增多,即载流子的浓度升高,因而必然使得导电性能增强。反之,若环境温度降低,则载流子的浓度降低,因而导电性能变差。可见,半导体载流子的浓度与环境温度有很密切的关系。

二、杂质半导体

通过扩散工艺,在半导体中掺入少量合适的杂质元素,便可得到杂质半导体。掺杂一般选用三价或五价的元素,不是任意的,如三价多选硼,五价多选磷。按掺入的杂质元素不同,杂质半导体可形成 N 型半导体和 P 型半导体;控制掺入杂质元素的浓度,就可控制杂质半导体的导电性能。

1. N 型半导体

在纯净的硅晶体中掺入五价元素(如磷),使之取代晶格中硅原子的位置,就形成了 N 型半导体。由于杂质原子的最外层有 5 个价电子,所以除了提供 4 个电子与其周围硅原子形成共价键外,还多出一个电子,如图 2-3 所示,多出的电子不受原子核的束缚,成为自由电子。而杂质原子因在晶格上,且又缺少电子,故变为不能移动的正离子。在 N 型半导体中,自由电子的浓度大于空穴的浓度,故称自由电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子);由于杂质原子可以提供电子,故称为施主原子。N 型半导体主要靠自由电子导电,掺入的杂质越多,多子(自由电子)的浓度就越高,导电性能也就越强。

2. P 型半导体

在纯净的硅晶体中掺入三价元素(如硼),使之取代晶格中硅原子的位置,就形成 P 型半

导体。由于杂质原子的最外层有 3 个价电子,所以当它们与周围的硅原子形成共价键时,就产生了一个空位(空位为电中性),当硅原子的外层电子填补此空位时,其共价键中便产生一个空穴,如图 2-4 所示,而杂质原子成为不可移动的负离子。因而在 P 型半导体中,空穴为多子,自由电子为少子,主要靠空穴导电。与 N 型半导体相同,掺入的杂质越多,空穴的浓度就越高,使得导电性能越强。因杂质原子中的空位吸收电子,故称为受主原子。

从以上分析可知,由于掺入的杂质使多子的数目大大增加,从而使多子与少子复合的机会大大增多。因此,对于杂质半导体,多子的浓度越高,少子的浓度就越低。可以认为,多子的浓度约等于所掺杂质原子的浓度,因而它受温度的影响很小;而少子是本征激发形成的,所以尽管其浓度很低,却对温度非常敏感,这将影响半导体器件的性能。

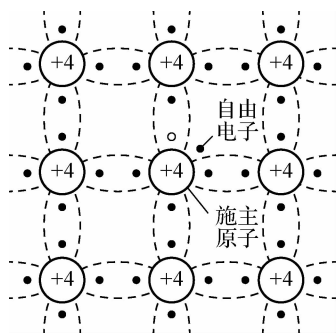


图 2-3 N 型半导体

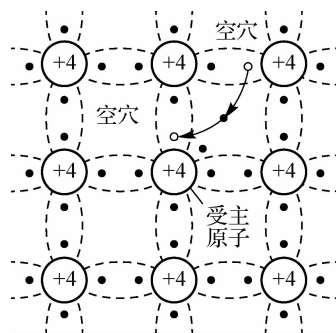


图 2-4 P 型半导体

三、PN 结

采用不同的掺杂工艺,将 P 型半导体与 N 型半导体制作在同一块硅片上,在它们的交界面就形成 PN 结。PN 结具有单向导电性。

1. PN 结的形成

物质总是从浓度高的地方向浓度低的地方运动,这种由于浓度差而产生的运动称为扩散运动。当把 P 型半导体和 N 型半导体制作在一起时,在它们的交界面,两种载流子的浓度相差很大,因而 P 区的空穴必然向 N 区扩散,与此同时,N 区的自由电子也必然向 P 区扩散,如图 2-5(a)所示。图中 P 区标有负号的小圆圈表示除空穴外的负离子(受主原子),N 区标有正号的小圆圈表示除自由电子外的正离子(施主原子)。由于扩散到 P 区的自由电子与空穴复合,而扩散到 N 区的空穴与自由电子复合,所以在交界面附近多子的浓度下降,P 区由于获得电子出现负离子区,N 区由于失去电子出现正离子区,它们是不能移动的,称为空间电荷区,从而形成内电场。随着扩散运动的进行,空间电荷区加宽,内电场增强,其方向由 N 区指向 P 区,正好阻碍扩散运动的进行。

在电场力作用下,载流子的运动称为漂移运动。当空间电荷区形成后,在内电场作用下,少子产生漂移运动,空穴从 N 区向 P 区运动,而自由电子从 P 区向 N 区运动。在无外电场和其他激发作用下,参与扩散运动的多子数目等于参与漂移运动的少子数目,从而达到动态平衡,形成 PN 结,如图 2-5(b)所示。此时,空间电荷区具有一定的宽度,电位差为 U_{ho} ,电流为零。

绝大部分空间电荷区内自由电子和空穴都非常少,在分析 PN 结特性时常忽略载流子

的作用,而只考虑离子区的电荷,这种方法称为“耗尽层近似”,故也称空间电荷区为耗尽层。

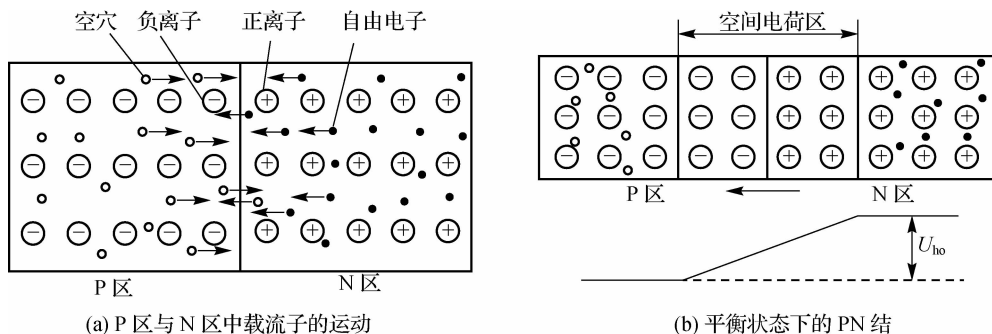


图 2-5 PN 结的形成

2. PN 结的单向导电性

如果在 PN 结的两端外加电压,就将破坏原来的平衡状态或建立新的平衡。如果新的平衡不能建立,扩散电流不再等于漂移电流,因而 PN 结将有电流流过,否则没有电流流过。当外加电压极性不同时,PN 结表现出两种截然不同的导电性能,即呈现出单向导电性。

(1)PN 结外加正向电压时处于导通状态。当电源的正极(或正极串联电阻后)接到 PN 结的 P 端,且电源的负极(或负极串联电阻后)接到 PN 结的 N 端时,称 PN 结外加正向电压,也称正向接法或正向偏置。此时外电场将多数载流子推向空间电荷区,使其变窄,削弱了内电场,破坏了原来的平衡,使扩散运动加剧,漂移运动减弱。由于电源的作用,扩散运动将源源不断地进行,从而形成正向电流,PN 结导通,如图 2-6 所示。PN 结导通时的结压降只有零点几伏,因而在它所在的回路中串联一个电阻,以限制回路的电流,防止 PN 结因正向电流过大而损坏。

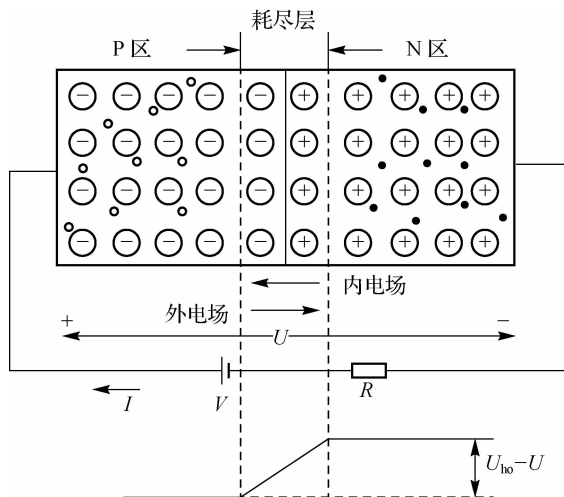


图 2-6 PN 结加正向电压时导通

(2)PN 结外加反向电压时处于截止状态。当电源的正极(或正极串联电阻后)接到 PN 结的 N 端,且电源的负极(或负极串联电阻后)接到 PN 结的 P 端时,称 PN 结外加反向电压

压,也称反向接法或反向偏置,如图 2-7 所示。此时外电场使空间电荷区变宽,加强了内电场,阻止扩散运动的进行,而加剧漂移运动的进行,形成反向电流,也称为漂移电流。由于反向电压使漂移电流与扩散电流形成新的平衡,两个电流相互抵消,认为 PN 结外加反向电压时处于截止状态。

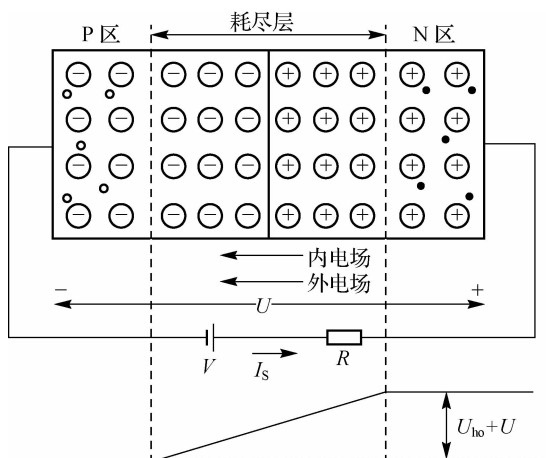


图 2-7 PN 结加反向电压时截止

3. PN 结的伏安特性

将加在 PN 结两端的电压与流过 PN 结的电流之间的关系画出 i 与 u 的关系曲线,如图 2-8 所示,称为 PN 结的伏安特性。其中, $u > 0$ 的部分称为正向特性, $u < 0$ 的部分称为反向特性。当反向电压超过一定数值 $U_{(BR)}$ 后,反向电流急剧增加,称为反向击穿。

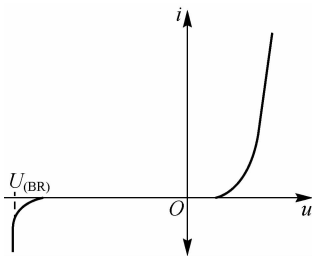


图 2-8 PN 结的伏安特性曲线

无论何时,若对其电流不加限制,都可能造成 PN 结的永久性损坏。

子任务 1 二极管和晶体管的识别

知识链接

一、半导体二极管

将 PN 结用外壳封装起来,并加上电极引线就构成了半导体二极管,简称二极管。由 P 区引出的电极为阳极,由 N 区引出的电极为阴极,二极管常见的几种外形如图 2-9 所示。

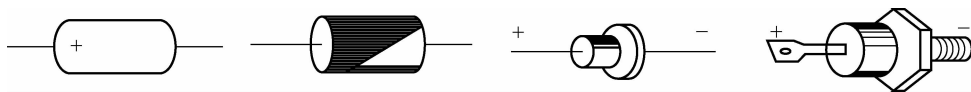


图 2-9 二极管常见的几种外形

1. 二极管的几种常见结构

二极管的几种常见结构如图 2-10(a)~图 2-10(c)所示,其符号如图 2-10(d)所示。

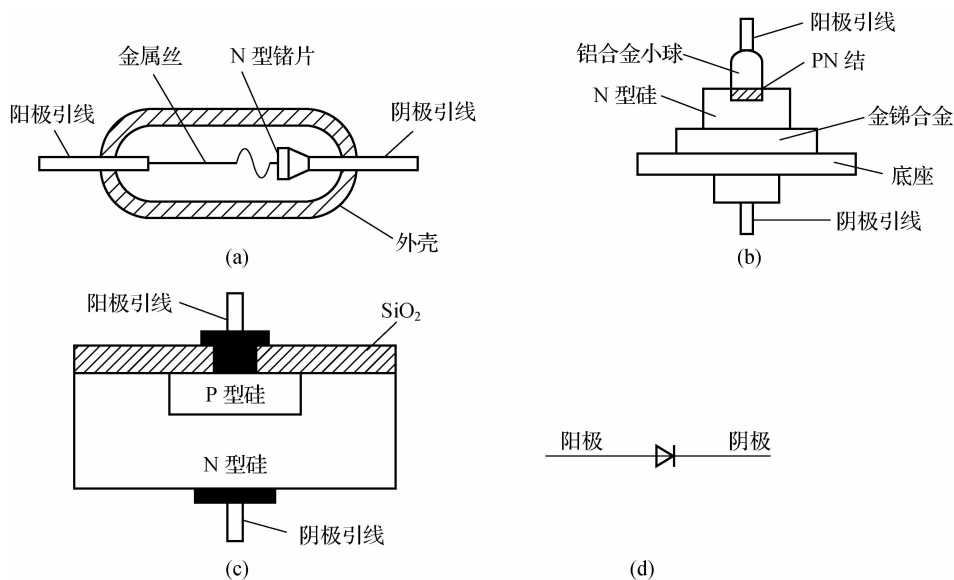


图 2-10 二极管的几种常见结构及其符号

图 2-10(a)所示为点接触型二极管,由一根金属丝经过特殊工艺与半导体表面相接形成 PN 结。

图 2-10(b)所示的面接触型二极管是采用合金法工艺制成的。其结面积大,能够流过较大的电流,但其结电容大,因而只能在较低频率下工作,一般仅作为整流管。

图 2-10(c)所示的平面二极管是采用扩散法制成的。其结面积较大的可用于大功率整流,结面积较小的可作为脉冲数字电路中的开关管。

2. 二极管的伏安特性

由于二极管其实就是一个PN结,与PN结一样,二极管也具有单向导电性。但是,由于二极管存在半导体电阻和引线电阻,所以当外加正向电压时,在电流相同的情况下,二极管的端电压大于PN结上的压降。或者说,在正向电压相同的情况下,二极管的正向电流要小于PN结的电流。在大电流情况下,这种影响更为明显。另外,二极管表面漏电流的存在使外加反向电压时的反向电流增大。

在近似分析时,仍然用PN结的电流方程式来描述二极管的伏安特性。实测二极管的伏安特性时发现,只有在正向电压足够大时,正向电流才从零随端电压按指数规律增大。使二极管开始导通的临界电压称为开启电压 U_{ON} ,如图2-11所示。当二极管所加反向电压的数值足够大时,反向电流为 I_s 。反向电压太大将使二极管击穿,不同型号二极管的击穿电压差别很大,从几十伏到几千伏不等。

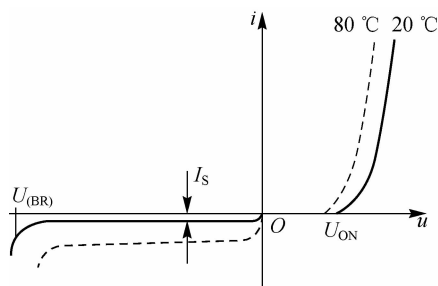


图 2-11 二极管的伏安特性曲线

表2-1列出了两种材料小功率二极管的开启电压、正向导通电压、反向饱和电流的数量级。

表 2-1 两种材料二极管比较

材 料	开启电压 U_{ON}/V	正向导通电压 U/V	反向饱和电流 $I_s/\mu A$
硅(Si)	约 0.5	0.6~0.8	<0.1
锗(Ge)	约 0.1	0.1~0.3	几十

由于硅材料PN结平衡时二极管的伏安特性耗尽层电势 U_{ho} 比锗材料的大,使得硅材料的 U_{ON} 比锗材料的大。

在环境温度升高时,二极管的正向特性曲线将左移,反向特性曲线将下移(图2-11虚线所示)。在室温附近,温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,正向压降减小 $2\sim 2.5\text{ mV}$;温度每升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,反向电流约增大一倍。可见,二极管的特性对温度很敏感。

3. 二极管的主要参数

为描述二极管的性能,常引用以下几个主要参数:

(1)最大整流电流 I_F 。 I_F 是二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流,其值与PN结面积及外部散热条件等有关。在规定散热条件下,二极管正向平均电流若超过此值,则将因结温过高而烧坏。

(2)最高反向工作电压 U_R 。 U_R 是二极管工作时允许外加的最大反向电压,超过此值

时,二极管有可能因反向击穿而损坏。通常 U_R 为击穿电压 $U_{(BR)}$ 的一半。

(3)反向电流 I_R 。 I_R 是二极管未击穿时的反向电流, I_R 越小,二极管的单向导电性越好, I_R 对温度非常敏感。

(4)最高工作频率 f_M 。 f_M 是二极管工作的上限截止频率。超过此值时,由于结电容的作用,二极管将不能很好地体现单向导电性。

应当指出,由于制造工艺所限,半导体器件的参数具有分散性,同一型号二极管的参数值也会有相当大的差距,因而手册上往往给出的是参数的上限值、下限值或范围。此外,使用时应特别注意手册上每个参数的测试条件,当使用条件与测试条件不同时,参数也会发生变化。

在实际应用中,应根据二极管所用场合,按其承受的最高反向电压、最大正向平均电流、工作频率、环境温度等条件,选择满足要求的二极管。

二、几种特殊二极管

1. 稳压二极管

稳压二极管简称稳压管,是一种由硅材料制成的面接触型晶体二极管。稳压管稳压时工作在反向击穿状态。在反向击穿时,在一定的电流范围内(或者说在一定的功率损耗范围内),端电压几乎不变,表现出稳压特性,因而广泛应用于稳压电源和限幅电路中。

(1)稳压二极管的伏安特性。稳压二极管的伏安特性与普通二极管相同,工作在正向时实际就是一个普通二极管,如图 2-12(a)所示。所不同的是,稳压二极管稳压时工作在反向击穿状态。当反向电压达到设定的状态时,稳压管一定击穿,这个预定的反向击穿电压可通过制造工艺确定。二极管反向击穿后,二极管两端的反向电压基本不变,但电流会迅速增加,所以,在伏安特性线上表现出几乎与纵轴平行的状况。由于稳压管稳压状态反向电流会迅速增加,使稳压管过热可能烧坏管子,所以稳压管一般要加接串联限流电阻并要解决好散热问题,以防稳压管工作时损坏而失去稳压效果。

稳压管的符号和等效电路如图 2-12(b)所示。在等效电路中,二极管 VD_1 表示稳压管加正向电压与虽加反向电压但未击穿时的情况,理想二极管 VD_2 、电压源 U_Z 和电阻 r_d 的串联支路表示稳压管反向击穿时的等效电路。

(2)稳压管的主要参数。

①稳定电压 U_Z 。 U_Z 是在规定电流下稳压管的反向击穿电压。

②稳定电流 I_Z 。 I_Z 是稳压管工作在稳压状态时的参考电流,电流低于此值时稳压效果变坏,甚至根本不稳压,故也常将 I_Z 记作 I_{Zmin} 。

③额定功耗 P_{Zm} 。 P_{Zm} 等于稳压管的稳定电压 U_Z 与最大稳定电流 I_{Zm} (或记作 I_{Zmax})的乘积。

④动态电阻 r_Z 。 r_Z 是稳压管工作在稳压区时,端电压变化量与其电流变化量之比,电流变化时 U_Z 的变化越小,则稳压管的稳压特性越好。

⑤温度系数 a 。 a 表示温度每变化 1°C 时稳压值的变化量。

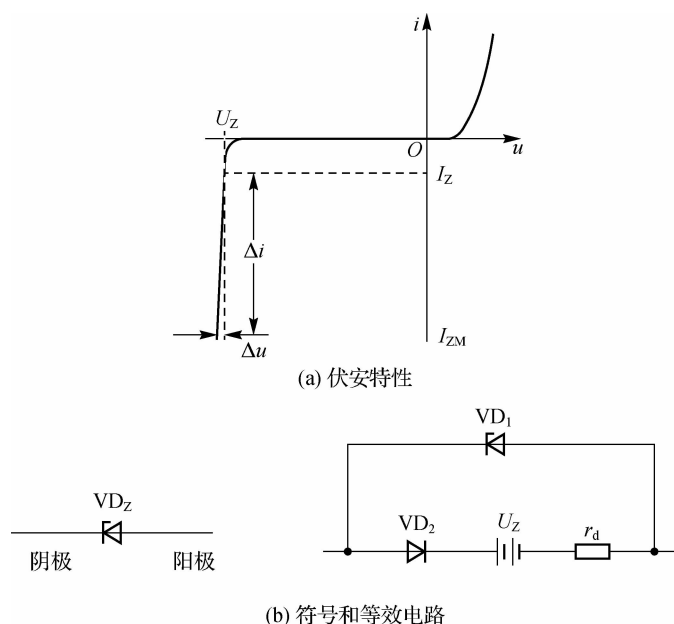


图 2-12 稳压管的伏安特性、符号和等效电路

2. 发光二极管

发光二极管发出的光包括可见光、不可见光、激光等不同类型,这里只对可见光发光二极管进行简单介绍。

发光二极管因其驱动电压低,功耗小,寿命长,可靠性高等优点,广泛用于显示电路中。使用时,应特别注意不要超过最大管功耗、最大正向电流和反向击穿电压等极限参数。发光二极管可以制成各种形状,如长方形、圆形等,其外形及符号如图 2-13 所示。发光二极管工作在正向导通状态。

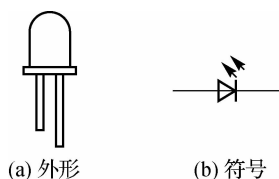


图 2-13 发光二极管的外形及符号

3. 光电二极管

光电二极管是一种将光信号转变为电信号的半导体器件。光电二极管工作在反向截止状态,由于工作在反向截止状态,所以并没有电流流过二极管,当有光照射时,由于半导体的热敏性,则在 PN 结内产生自由电子和空穴,使光照条件下的 PN 结上产生反向电流,取消光照则电流消失,这样,光电二极管就可将光信号转变为电信号输送到电路中,实现由光到电的转换。

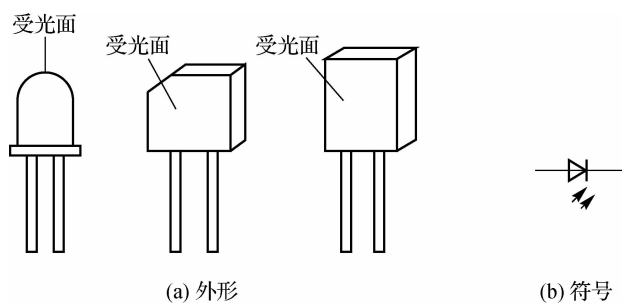


图 2-14 光电二极管的外形和符号

活动：自己动手试一试，按图 2-15 所示连接两个电路并观察现象，完成表 2-2 中各项的填写。

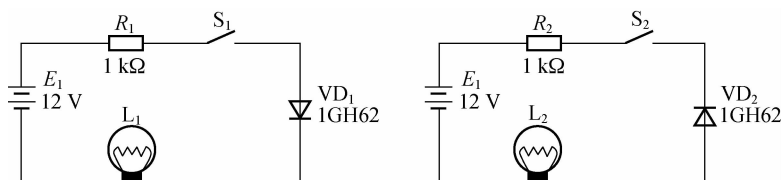


图 2-15 连接电路图

器件说明： E_1 、 E_2 为电源； R_1 、 R_2 为电阻； S_1 、 S_2 为开关； VD_1 、 VD_2 为二极管； L_1 、 L_2 为灯泡。

表 2-2 活动用表

电 路	开关(开/关)	灯泡状态	结 论
第一个电路	开		
	关		
第二个电路	开		
	关		

活动结论：二极管具有单向导电性。

使用指针式万用表电阻挡测量PN结的小常识： 在使用指针式万用表检测 PN 结时，选用电阻挡可以不用调零，因为此时只是对 PN 结进行定性测量，而不做定量分析。但一定要注意选择合适的挡位。例如，若选择 $\times 10k$ 挡，可能会因万用表对外输出电压过高，而把 PN 结击穿；若选择 $\times 10$ 或 $\times 1$ 挡位，则可能会因万用表对外输出的电流过大，而把 PN 结烧毁。

活动：使用指针式万用表电阻挡 $\times 1k$ 或 $\times 100$ 挡位，或使用数字式万用表测通断挡，分两个方向分别测试发光二极管和普通二极管，观察二极管及万用表的现象。

三、半导体晶体管

半导体晶体管又称双极型晶体管、晶体管、晶体三极管，以下简称晶体管。

1. 晶体管的结构与符号

晶体管的基本结构是两个反向接面的 PN 结,如图 2-16 所示,有 PNP 和 NPN 两种组合。三个接出来的端点依序称为发射极(e)、基极(b)和集电极(c),名称来源与它们在三极管工作时的功能有关。图 2-16(a)和图 2-16(b)所示分别为 NPN 型与 PNP 型晶体管的结构和电路符号,发射极被特别标出,箭头所在的极为发射极。在未接外加偏压时,两个 PN 面都会形成耗尽层,分别称为集电结与发射结,从而将中性的 P 型区和 N 型区隔开。

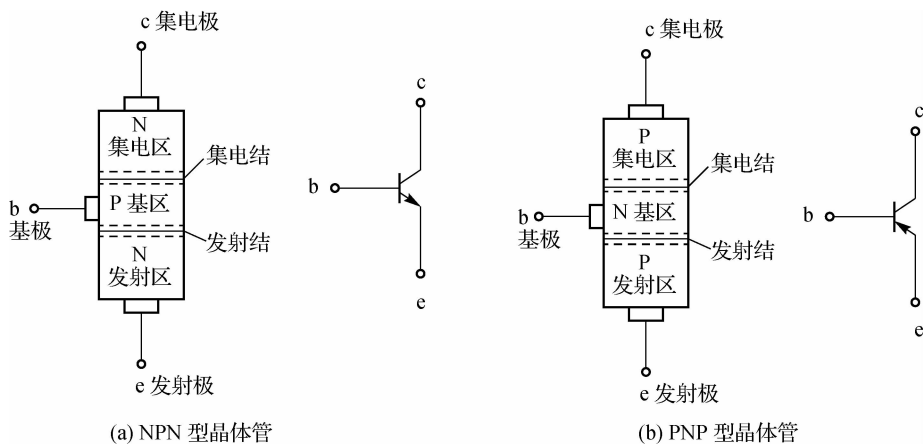


图 2-16 晶体管的结构和电路符号



活动: 使用指针式万用表电阻挡 $\times 1k$ 或 $\times 100$ 挡位,或使用数字式万用表测通断挡,把晶体管三个极之间两两正反向进行测量,判断出晶体管的好坏及结构,并找出基极。

2. 晶体管的作用

(1) 晶体管的放大作用。晶体管具有电流放大作用,所以,晶体管是电流放大器件,此处仅以 NPN 型晶体管的共发射极接法(见图 2-17)为例来说明一下晶体管放大电路的基本机理。

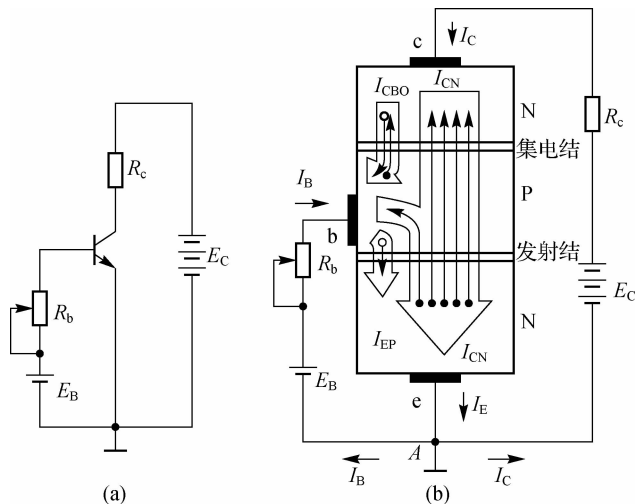


图 2-17 共发射极晶体管放大电路

在图 2-17 中,我们把从基极 b 流至发射极 e 的电流称为基极电流 I_B ;把从集电极 c 流至发射极 e 的电流称为集电极电流 I_C 。这两个电流的方向都是流出发射极的,所以发射极 e 上就用了一个箭头来表示电流的方向,发射极电流用 I_E 表示。

依据基尔霍夫电流定律有

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

在实际制作过程中,要让晶体管的集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 具有一个恒定的比例关系 β ,且这一比例关系的恒定性将作为一只晶体管的质量好坏的一个重要指标。集电极电流受基极电流的控制,并且基极电流很小的变化就会引起集电极电流很大的变化,且变化满足一定的比例关系:集电极电流的变化量是基极电流变化量的 β 倍,即基极电流变化被放大了 β 倍,所以把 β 称为晶体管的电流放大倍数。 β 一般远大于 1,达到几十到几百,由此可以看出,晶体管的电流放大作用的实质是放大基极电流的变化量。

这时,式(2-1)变为

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

通过晶体管的这一特性,可以把一个小的电流信号变化量放大为一个大的电流信号变化量,那么如何把一个电流信号变为一个大的电压信号呢?如果集电极电流 I_C 流过一个电阻 R ,那么根据电压计算公式 $U = IR$ 可以得知电阻上的电压会发生很大变化。我们将这个电阻上的电压取出来,就得到了放大后的电压信号。

(2)晶体管的开关作用。晶体管除了有电流放大作用外,还可以当成开关使用。在晶体管的输出特性曲线(见图 2-18)上共有三个区域:放大区,即体现晶体管的电流放大作用;饱和区与截止区则可以体现晶体管的开关作用。

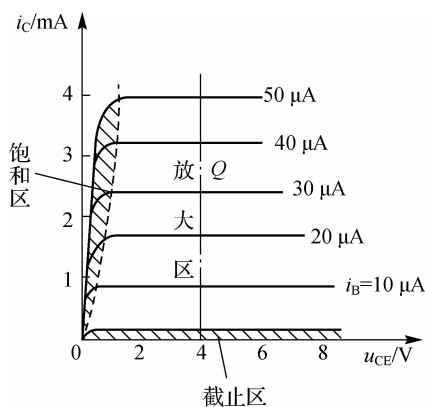


图 2-18 晶体管的输出特性曲线

当晶体管处于截止区时,晶体管上的基极与发射极间的 PN 结和基极与集电极间的 PN 结均处于反向偏置状态,且基极电流与集电极电流均为 0;进入截止状态后,晶体管的集电极与发射极之间的电流基本为 0,可以理解为一个开关打开了。

当晶体管处于饱和区时,晶体管上的基极与发射极间的 PN 结和基极与集电极间的 PN 结均处于正向偏置状态,且基极电流与集电极电流之间不具有 β 倍的关系。进入饱和状态后,晶体管的集电极与发射极之间的电压将很小,可以理解为一个开关闭合了。

这样我们就可以把晶体管当作开关使用:当基极电流为 0 时,晶体管集电极电流为 0(称

为晶体管截止), 相当于开关断开; 当基极电流很大以至于晶体管饱和时, 相当于开关闭合。如果晶体管主要工作在截止和饱和状态, 那么一般把这样的晶体管称为开关管。

3. 晶体管的特性曲线

(1) 输入特性曲线。由输入回路可写出晶体管的输入特性方程为

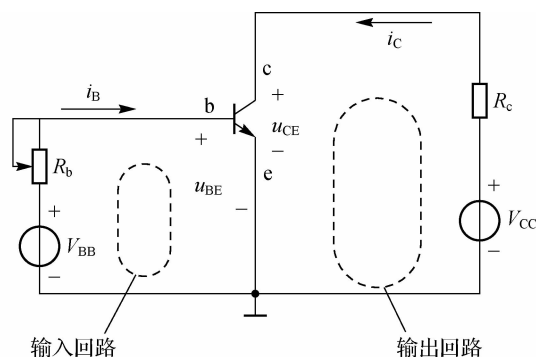
$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{u_{CE} = \text{常数}}$$

实测的某 NPN 型硅晶体管的输入特性曲线如图 2-19(b) 所示, 由图可见, 曲线的形状与二极管的伏安特性类似, 不过它与 u_{CE} 有关, $u_{CE} = 1 \text{ V}$ 的输入特性曲线比 $u_{CE} = 0 \text{ V}$ 的曲线向右移动了一段距离, 即 u_{CE} 增大曲线向右移, 但当 $u_{CE} > 1 \text{ V}$ 后, 曲线右移距离很小, 可以近似认为与 $u_{CE} = 1 \text{ V}$ 的曲线重合, 所以图 2-19(b) 中只画出两条曲线。在实际使用中, u_{CE} 总是大于 1 V 的。由图可见, 只有 u_{BE} 大于 0.5 V (该电压称为死区电压) 后, i_B 才随 u_{BE} 的增大迅速增大, 正常工作时管压降 u_{BE} 为 $0.6 \sim 0.8 \text{ V}$, 通常取 0.7 V , 称为导通电压 $u_{BE(\text{on})}$ 。对锗管, 死区电压约为 0.1 V , 正常工作时管压降 u_{BE} 的值为 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$, 导通电压 $u_{BE(\text{on})} \approx 0.2 \text{ V}$ 。

(2) 输出特性曲线。输出回路的输出特性方程为

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

特性曲线如图 2-19(c) 所示, 晶体管的输出特性曲线为截止区、饱和区和放大区三个区, 每区各有其特点。



(a) 共发射极晶体管电路图

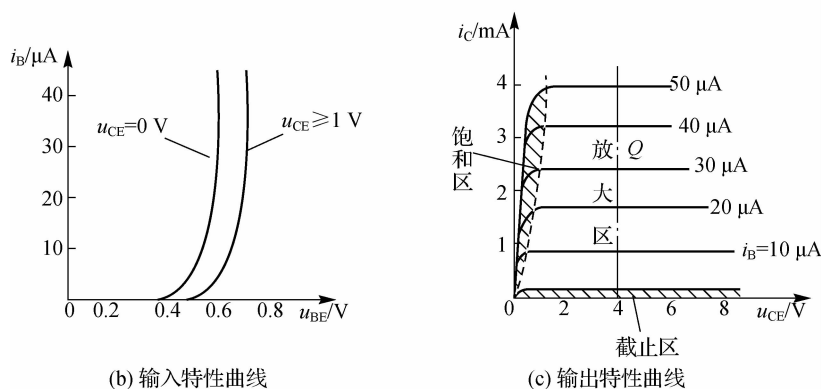


图 2-19 共发射极晶体管电路和输入、输出特性曲线

①截止区。 $i_B \leq 0, i_C = I_{CEO} \approx 0$, 此时两个 PN 结均反向偏置。 I_{CEO} 为发射结的反向穿透电流。

②放大区。 $i_C = \beta i_B + I_{CEO}$, 此时发射结正向偏置, 集电结反向偏置, 特性曲线比较平坦且等间距。 i_C 受 i_B 控制, i_B 一定时, i_C 不随 u_{CE} 变化而变化。

③饱和区。 $u_{CE} < u_{BE}, u_{CB} = u_{CE} - u_{BE} < 0$, 此时, 两个 PN 结均正向偏置, i_C 不受 i_B 控制, 晶体管失去放大作用。曲线上升部分 u_{CE} 很小, 当 $u_{CE} = u_{BE}$ 时, 达到临界饱和状态, 深度饱和时, 硅管 $u_{CE(SAT)} = 0.3 \text{ V}$, 锗管 $u_{CE(SAT)} = 0.1 \text{ V}$ 。

(3) 温度对特性曲线的影响。

①温度升高, 输入特性曲线向左移。温度每升高 1°C , u_{BE} 减小 $2 \sim 2.5 \text{ mV}$; 温度每升高 10°C , 集电极、基极间反向饱和电流 I_{CBO} 约增大 1 倍。

②温度升高, 输出特性曲线向上移, 输出特性曲线间距增大。

4. 晶体管的主要参数

(1) 电流放大系数。

①共发射极电流放大系数: β (β) 为直流(交流)电流放大系数, 即

$$\beta = I_C / I_B (\beta = \Delta i_C / \Delta i_B)$$

②共基极电流放大系数: $\alpha = \beta / (1 + \beta)$, $\alpha < 1$, 一般为 0.98 以上。

(2) 极间反向饱和电流: 集电极、基极间反向饱和电流 I_{CBO} , 集电极、发射极间反向饱和电流 I_{CEO} 。 I_{CBO} 、 I_{CEO} 均随温度的升高而增大。

(3) 极限参数。

① I_{CM} : 集电极最大允许电流, 超过此值时 β 值明显降低。

② P_{CM} : 集电极最大允许功率损耗。

③ $U_{(BR)CEO}$: 基极开路时集电极、发射极间反向击穿电压。

④ $U_{(BR)CBO}$: 发射极开路时集电极、基极间反向击穿电压。

⑤ $U_{(BR)EBO}$: 集电极极开路时发射极、基极间反向击穿电压。

$U_{(BR)CEO}$ 、 $U_{(BR)CBO}$ 和 $U_{(BR)EBO}$ 三者之间的关系如下:

$$U_{(BR)CBO} > U_{(BR)CEO} > U_{(BR)EBO}$$

 **活动:** 使用指针式万用表电阻挡 $\times 1k$ 或 $\times 100$ 的挡位, 找出晶体管的集电极与发射极。通过活动一判断出晶体管的结构与基极后, 以 NPN 型晶体管为例, 把红、黑表笔分别放在另外两个未知的电极上不动, 然后用手指去接触黑表笔与已知的基极(此时一定别让身体的任何部位接触到红表笔), 记住指针的最大摆动位置; 然后, 把红、黑表笔接触的电极互换, 再次用手指去接触黑表笔与已知的基极。看前后两次哪一次指针的摆动幅度大, 幅度大的一次黑表笔接触的那个电极是集电极。如果是 PNP 型晶体管, 手指接触的表笔相反, 依然看指针摆动幅度, 此时红表笔接触的是集电极。



任务实施

小组成员分工协作, 对二极管和晶体管进行识别和测量, 并完成工作计划单的填写工作。

工作计划单

任务名称	二极管和晶体管的识别		
资料收集	(1)二极管和晶体管的结构和符号； (2)二极管和晶体管的特点； (3)晶体管的三种工作状态及其条件； (4)二极管和晶体管的极性和好坏辨别		
电路中的器件符号	二极管	图形符号	作用及工作条件
	晶体管	图形符号	作用及工作条件
极性和好坏辨别	二极管	辨别方法	
	晶体管	辨别方法	
存在的问题和解决办法			
学员签字		教师签字	

小组成员分工协作,根据工作计划单进行任务实施,并完成任务实施单的填写工作。

任务实施单

步 骤	实施项目	实施过程记录
1		
2		
3		
4		
5		
结论		
学员签字		教师签字

评价:

根据任务完成情况填写考核评价表,见表 2-3。

表 2-3 二极管和晶体管的识别考核评价表

成绩: _____

考核内容	分值	评分标准	自评 (10%)	互评 (10%)	教师评 (80%)	得分
电路搭接完整,工作正常	20	(1)两个图少接一个,减 6 分; (2)电路工作情况与图不符,每个减 4 分				
正确识别两种结构的晶体管,并分辨出三个极	40	(1)少识别一个结构,减 5 分; (2)两种结构中少识别出一个极,减 5 分				
正确使用工具及仪表	30	(1)使用工具方法不正确,一次减 5 分; (2)工具损坏,一个减 10 分; (3)器件损坏,一次减 5 分				
整理	10	(1)工具未整理,每处减 5 分; (2)器件不整理,每处减 5 分				

子任务 2 单管放大电路的原理图绘制

知识链接

一、放大电路的分析与静态工作点的计算

晶体管为非线性器件,对含有这些器件的电路进行分析时,可采用适当的近似方法,按线性电路来处理。利用叠加定理可对电路中的交、直流分量分别进行分析。

(一)分析方法

1. 图解法

在输入、输出特性曲线上画出交、直流负载线,求静态工作点 Q ,分析动态波形及失真等。

2. 微变等效电路法

根据发射结导通压降估算静态工作点 Q ,再用等效电路法分析计算小信号交流通路的电路动态参数。

(二)电量参数的表示

设电量参数的表示符号为 B_b 。其中, B 为主要符号,大写表示该电量是与时间无关的量(直流、平均值、有效值),小写表示该电量是随时间而变化的量(瞬时值); b 为下标符号,大写表示直流量或总电量(总最大值、总瞬时值),小写表示交流分量。

(三) 直流分析

只研究在直流电源作用下, 电路中各直流量的大小称为直流分析(静态分析), 由此而确定的各极直流电压和电流称为直流工作点(静态工作点)参量。

晶体管静态电路如图 2-20(a) 所示, 晶体管的输入、输出特性曲线如图 2-20(b)、图 2-20(c) 所示。晶体管的共发射极电流放大倍数 β 为 100。

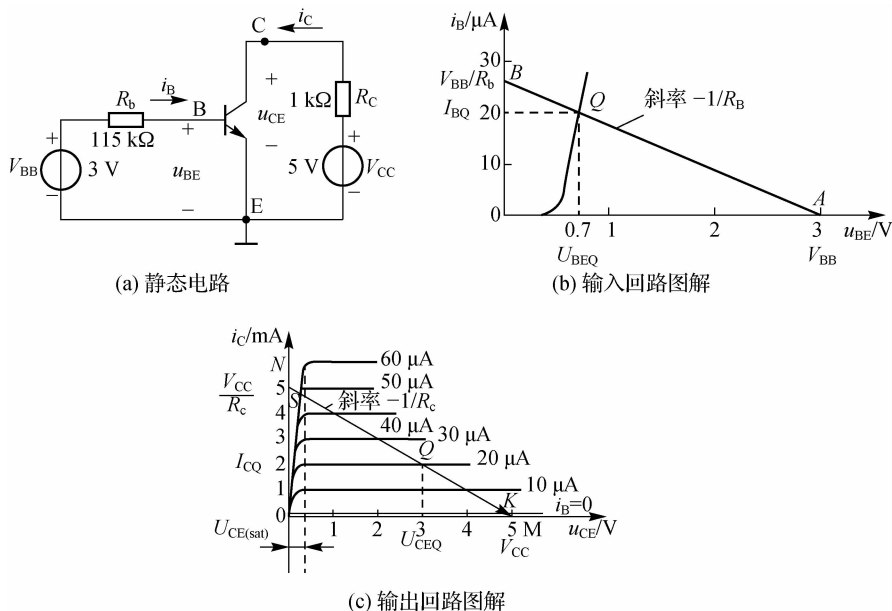


图 2-20 图示法直流分析

由图 2-20 可求得

$$I_{BQ} = (V_{BB} - U_{BEQ}) / R_b = (3 - 0.7) / 115 = 20 \mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 100 \times 20 = 2 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c = 5 - 2 \times 1 = 3 \text{ V}$$

以上方程为直流分析中静态工作点的计算公式。改变 R_b 与 R_c 的值会改变电路中的静态工作点 Q 。一个放大电路静态工作点选取的位置直接决定了放大电路的工作情况是否正常。静态工作点选得太高, 即 I_{BQ} 值太大, 会使电路的输出信号产生饱和失真, 反之则会产生截止失真。

(四) 交流分析

当外电路接入交流信号后, 为了确定叠加在静态工作点上的各交流量而进行的分析, 称为交流分析(动态分析)。

1. 动态图解分析

晶体管电路动态工作时的电流、电压可利用晶体管特性曲线通过作图求得。现通过例题来说明动态图解的分析过程。

例 2-1 晶体管电路如图 2-21(a) 所示, 交流电压 u_i 通过电容 C 加到晶体管的基极, 设 C 对交流信号的容抗为零; 晶体管采用硅管, 其输入、输出特性曲线如图 2-21(b) 所示。已知 $u_i = 10 \sin \omega t$ (mV), 试用图解法求该电路各交流电压和电流值。

解 输入回路图解,先令 $u_i=0$,由图 2-21(a)可得

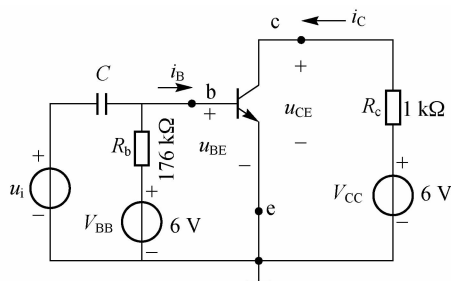
$$I_{BQ} = (V_{BB} - U_{BE(ON)}) / R_b = (6 - 0.7) / 176 = 30 \mu A$$

由此可在图 2-21(b)所示的输入特性曲线上确定基极回路的静态工作点 Q 。若输入交流信号为 u_i ,它在基极回路与直流电压 U_{BEQ} 相叠加,使得晶体管 b、e 极之间的电压 u_{BE} 在原有直流电压 U_{BEQ} 的基础按 u_i 的变化规律而变化,即 $u_{BE} = U_{BEQ} + u_i = U_{BEQ} + U_{im} \sin \omega t$,则其波形如图 2-21(b)中①所示。

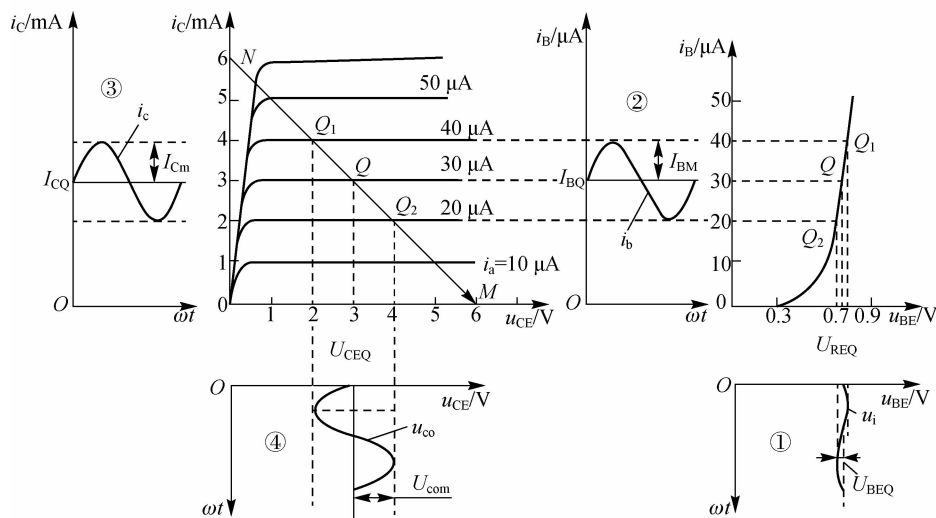
根据 u_{BE} 的变化规律,便可在输入特性曲线上画出对应的 i_B 波形,如图 2-21(b)中②所示。由于输入电压幅值很小,输入特性曲线的动态工作范围很小,可将这一段曲线 $Q_1 Q_2$ 看作一段直线,因此, $i_B = I_B + i_b = I_{BQ} + I_{BM} \sin \omega t$,由图 2-21(b)可读出其瞬时值为 $20 \sim 40 \mu A$, i_b 的幅度 $I_{BM} = 10 \mu A$,它与 U_{im} 成正比。

2. 回路的图解

根据 V_{CC} 及 R_c 的值可在图 2-21(b)所示输出特性曲线中作出直流负载线 NM ,它与 $i_B = I_{BQ} = 30 \mu A$ 的输出特性曲线相交于 Q 点, Q 点便是集电极回路的直流工作点。由图可知,其对应的 $I_{CQ} = 3 \text{ mA}$, $U_{CEQ} = 3 \text{ V}$ 。随着基极电流的变化,负载线 MN 与输出特性曲线簇的交点也随之变化。按基极电流 i_B 在不同时间的数值,找出相应的输出特性曲线及其与负载线 MN 的交点,便可画出集电极电流 i_c 和 c、e 极间电压 u_{CE} 的波形,如图 2-21(b)中③、④所示,由图可知,输出电流 i_c 和输出电压 u_{CE} 都在原来静态直流的基础上叠加了一个交流量。



(a) 晶体管电路交流电路



(b) 晶体管电路输入、输出特性曲线

图 2-21 动态图解分析

由于输出特性曲线间距近似相等,故 i_C 与 i_B 成正比,因此有

$$i_C = I_{CQ} + i_c = I_{CQ} + I_{CM} \sin \omega t$$

$$u_{CE} = U_{CEQ} + u_{ce} = U_{CEQ} + U_{CEM} \sin(\omega t - 180^\circ)$$

式中, $u_{ce} = -i_c R_c$, $U_{CEM} = I_{CM} R_c$ 。

由图 2-21(b)可读出 i_c 的瞬时值为 $2 \sim 4$ mA, i_c 的幅度 $I_{CM} = 1$ mA; 而 u_{CE} 的瞬时值为 $2 \sim 4$ V, u_{CE} 的幅度 $U_{CEM} = 1$ V。可见, $U_{CEM} > U_{IM}$, 电路实现了交流电压放大作用。此外, 可看出 u_{ce} 波形与 u_i 波形的相位相差 180° (反相关系)。

总结图解法分析的优点如下:

- (1) 既能分析静态的工作情况, 又能分析动态的工作情况。
- (2) 直观形象。
- (3) 适合分析具有特殊输入/输出特性的管子。
- (4) 适合分析工作在大信号状态下的放大电路。

总结图解法分析的缺点如下:

- (1) 特性曲线存在误差。
- (2) 作图麻烦。
- (3) 无法分析复杂电路和高频小放大信号。

小结: 晶体管的输出有三个状态——放大、截止和饱和; 可以完成两种功能——放大信号、开关。放大状态满足的条件是发射结正偏、集电结反偏; 截止状态满足的条件是发射结反偏、集电结反偏; 饱和状态满足的条件是发射结正偏、集电结正偏。

二、晶体管微变等效电路

晶体管是一个非线性器件, 为了更好地分析电路, 当晶体管工作的 Q 点处在近似线性区, 输入信号为微小变化的交流信号时, 可以把晶体管组成的非线性电路变换成一个与原电路功能相同的线性电路来处理, 如图 2-22 所示。

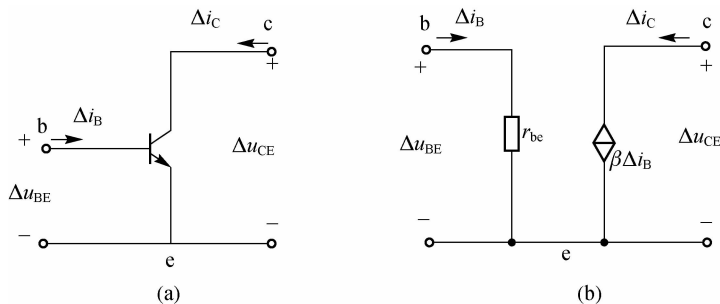


图 2-22 晶体管微变等效电路

图 2-22(a)中 r_{be} 为交流输入电阻, 即

$$r_{be} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} = r_{bb'} + \frac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})} \quad (2-3)$$

式中, 如无特殊说明, $r_{bb'}$ 表示常温下的基区电阻, $r_{bb'} \approx 300 \Omega$, 26 mV 是二极管正向导通的交流电压值。这样, 输入电阻常用 $r_{be} = 300 + \frac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})}$ 求得。

三、微变等效电路法求放大电路的重要参数

1. 放大倍数 $\dot{A}_u$ 、 $\dot{A}_i$

放大倍数是衡量放大电路对信号放大能力的主要参数。

(1) 电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 。电压放大倍数是指输出电压与输入电压的比值,由图 2-23 可得

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta \dot{I}_b (R_C // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}} \quad (2-4)$$

式中,负号表示输出电压与输入电压相位相反。

(2) 电流放大倍数 $\dot{A}_i$ 。电流放大倍数表示输出电流与输入电流的比值,即

$$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} \quad (2-5)$$

2. 输入电阻 R_i

输入电阻是放大电路输入电压 $\dot{U}_i$ 与输入电流 $\dot{I}_i$ 的比值,即

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} \quad (2-6)$$

在图 2-23(b) 中, $R_i = R_B // r_{be}$ 。

3. 输出电阻 R_o

输出电阻是放大电路输入电压 $u_i = 0$, 负载开路时输出电压与输出电流的比值,即

$$R_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \quad (2-7)$$

在图 2-23 中, $R_o = R_C$ 。

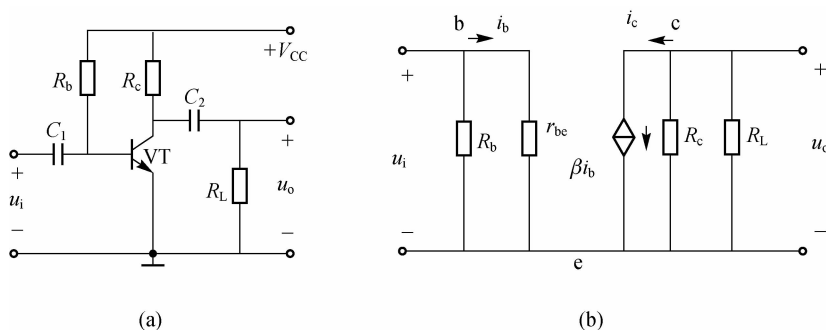


图 2-23 共发射极放大电路及微变等效电路

微变等效电路法分析的优点如下:

- (1) 简单方便。
- (2) 适用于分析任何基本工作在线性范围的简单或复杂的电路。

微变等效电路法分析的缺点如下:

- (1) 只能解决交流分量的计算问题。
- (2) 不能分析非线性失真。
- (3) 不能分析最大输出幅度。

四、稳定静态工作点

1. 温度对静态工作点 Q 的影响

在放大电路中,静态工作点 Q 会受到很多因素的影响,但影响最大的是温度的变化。由于半导体的热敏性,所以晶体管是一个对温度非常敏感的器件,当温度发生变化时,器件的参数会受到很大的影响,在温度变化中又以温度升高对器件影响最大。当温度升高时电压不变的情况下,基极电流增加,集电极电流比基极电流成倍增加,发射结导通电压会下降。温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,发射结导通电压约减小 2.2 mV 。

2. 分压式偏置放大电路

分压式偏置放大电路又称为固定偏置放大电路,如图 2-24 所示。由于基极电流很小忽略不计时, R_{b1} 、 R_{b2} 可近似看作单纯的串联电路, R_{b1} 、 R_{b2} 的分压结果可使基极电压基本保持不变,这样,当温度升高时, I_B 增加, I_C 也增加,使 I_E 增加,由于 R_e 的存在,使 $U_E = I_E R_e$ 增加,从而引起发射结电压 $U_{BE} = U_B - U_E$ 下降, U_{BE} 下降,可使增加的 I_B 降下来,这样就可以很好地稳定静态工作点 Q 。

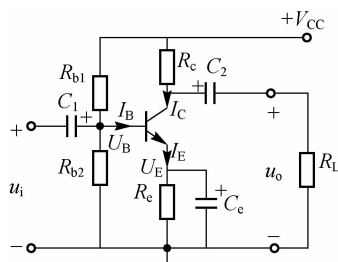


图 2-24 分压式偏置放大电路

分压式偏置放大电路稳定工作点的关键是 R_e 的存在:

$$T \uparrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_E = I_B + I_C \uparrow \rightarrow U_E = I_E R_e \uparrow$$

$$I_B \downarrow \leftarrow U_{BE} = U_B - U_E \downarrow \leftarrow$$

五、晶体管单管放大电路的三种基本接法

晶体管组成的基本放大电路有三种接法:共发射极接法、共集电极接法和共基极接法。

(1) 共发射极接法。信号从基极输入,从集电极输出,发射极为输入与输出的公共端,如图 2-25(a)所示。

(2) 共集电极接法。信号从基极输入,从发射极输出,集电极为输入与输出的公共端,如图 2-25(b)所示。

(3) 共基极接法。信号从发射极输入,从集电极输出,基极为输入与输出的公共端,如图 2-25(c)所示。

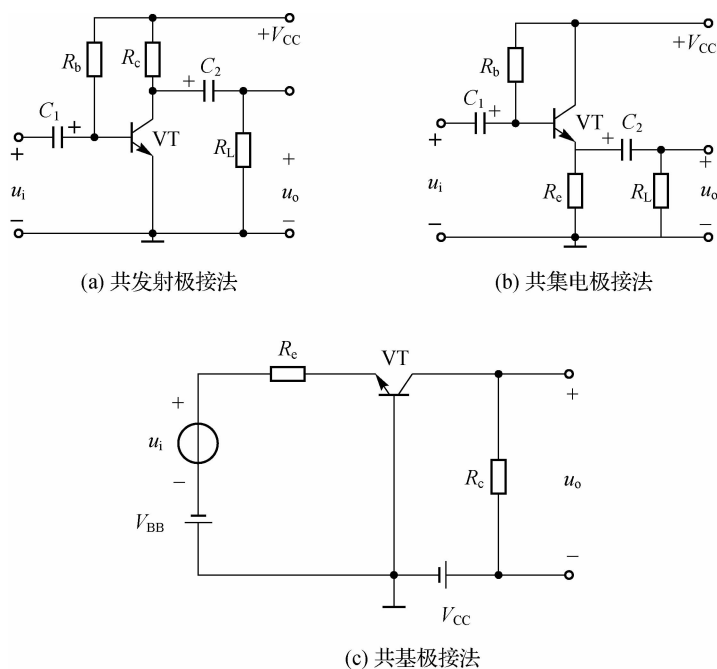


图 2-25 放大电路的三种接法

三种接法电路的具体分析方法,前面以共发射极接法为例做了详细介绍,后两种接法的分析方法参照前面的分析方法进行,对于后两种接法不做重点介绍。下面对三种接法的性能进行比较性说明,见表 2-4 和表 2-5。

表 2-4 空载情况下三种接法的性能比较

参 数	接 法		
	共发射极	共集电极	共基极
A_u	大	小于 1 但接近 1	大
A_i	β	$1+\beta$	小于 1
R_i	中	大	小
R_o	大	小	大
频带	窄	中	宽

表 2-5 放大电路性能比较

类 别	共发射极放大电路	共集电极放大电路	共基极放大电路
电压放大倍数	较大	小(≤ 1)	较大
输入与输出电压相位关系	反相	同相	同相
电流放大倍数	较大	较大	小(≤ 1)
输入电阻	中等	高阻	低阻
输出电阻	中等	低阻	高阻

续表

类 别	共发射极放大电路	共集电极放大电路	共基极放大电路
频率响应	较差	较好	好
用途	多级放大电路的中间级	输入级、中间级、输出级	高频或宽频放大电路及恒流源电路



活动: 再次用指针式万用表测量晶体管的三个极,区分出三个极分别是什么,画出每一步测量的等效电路。



任务实施

小组成员分工协作,对单管放大电路的原理图进行绘制,并完成工作计划单的填写工作。

工作计划单

任务名称	单管放大电路的原理图绘制		
资料收集	(1)单管放大电路的组成； (2)单管放大电路的工作原理； (3)单管放大电路静态图解分析； (4)单管放大电路动态图解分析		
绘制电路图并分析	电路绘制	绘制原则	
	原理分析	分析步骤	
存在的问题和解决办法			
学员签字		教师签字	

小组成员分工协作,根据工作计划单进行任务实施,并完成任务实施单的填写工作。

任务实施单

步 骤	实施项目	实施过程记录
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
结论		
学员签字		教师签字

评价：

根据任务完成情况填写考核评价表,见表 2-6。

表 2-6 单管放大电路的原理图绘制考核评价表

成绩: _____

考核内容	分值	评分标准	自评 (10%)	互评 (10%)	教师评 (80%)	得分
分辨晶体管的结构及三个电极,画出每一步测量的等效电路图	80	(1)结构识别不准确,一个减 5 分; (2)三个极识别不准确,每个极减 5 分; (3)不能画出等效电路,每个减 5 分				
正确使用工具及仪表	10	(1)使用工具方法不正确,一次减 2 分; (2)工具损坏,一个减 10 分; (3)器件损坏,一次减 5 分				
整理	10	(1)工具未整理,每处减 5 分; (2)器件不整理,每处减 5 分; (3)工作台不整洁,每处减 5 分				