



目 录

第一章 半导体器件	(1)
1.1 半导体的基本知识	(1)
1.2 半导体二极管	(9)
1.3 半导体三极管	(25)
1.4 场效应管	(36)
本章小结	(44)
思考与练习	(46)
第二章 基本放大电路	(49)
2.1 共发射极电压放大电路	(49)
2.2 共基极电压放大电路	(53)
2.3 静态工作点自稳定放大电路	(55)
2.4 共集电极放大电路	(57)
2.5 功率放大电路	(60)
2.6 差分放大电路	(65)
2.7 场效应晶体管放大电路	(70)
本章小结	(72)
思考与练习	(73)
第三章 集成运算放大器	(75)
3.1 集成运算放大器的概述	(75)
3.2 放大电路中的反馈	(81)
3.3 运算放大器组成的基本运算电路	(85)
3.4 运算放大器组成的信号处理电路	(92)
本章小结	(98)
思考与练习	(99)
第四章 直流稳压电源	(104)
4.1 直流电源的组成	(104)
4.2 整流电路	(105)
4.3 单相可控整流电路	(110)



4.4	三相可控整流电路	(115)
4.5	滤波电路	(121)
4.6	稳压电路	(125)
	本章小结	(130)
	思考与练习	(130)
第五章	组合逻辑电路	(134)
5.1	概述	(134)
5.2	组合逻辑电路的基本分析方法和设计方法	(135)
5.3	加法器和奇偶校验器	(141)
5.4	编码器和译码器	(148)
5.5	数据选择器和数据分配器	(167)
5.6	用中、大规模集成电路实现组合逻辑电路	(173)
	本章小结	(177)
	思考与练习	(178)
第六章	集成触发器	(183)
6.1	集成触发器概述	(183)
6.2	触发器的基本电路	(184)
6.3	主从 RS 触发器	(191)
6.4	主从 JK 触发器和边沿 JK 触发器	(193)
6.5	边沿 D 触发器	(201)
6.6	触发器的功能分类及相互转换	(206)
6.7	触发器的主要参数	(211)
	本章小结	(213)
	思考与练习	(213)
第七章	半导体存储器	(219)
7.1	半导体存储器概述	(219)
7.2	只读存储器 ROM	(223)
7.3	随机存储器 RAM	(239)
	本章小结	(256)
	思考与练习	(256)



第一章 半导体器件

【学习目标】

知识目标

1. 了解半导体的特征,本征半导体的特点及导电原理,杂质半导体的形成及其特点。
2. 理解 PN 结的形成,PN 结的伏安特性,PN 结的单向导电性能。
3. 熟悉半导体二极管的伏安特性、主要参数及简单应用。

技能目标

1. 掌握稳压二极管的伏安特性、稳压原理及主要参数。
2. 掌握 PN 结工作原理,晶体二极管应用电路及晶体三极管和场效应管的工作原理、特性曲线、主要参数及其应用电路的分析和计算。
3. 掌握晶体三极管尤其是场效应管的工作原理、特性曲线及其应用电路的分析和计算。
4. 掌握双极型三极管的电流放大原理及其伏安特性,熟悉其主要参数。

1.1 半导体的基本知识

在物理学中,根据材料的导电能力,可以将它们划分为导体、绝缘体和半导体。半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间,半导体具有光敏、热敏和掺杂特性。典型的半导体是硅和锗,它们都是四价元素。

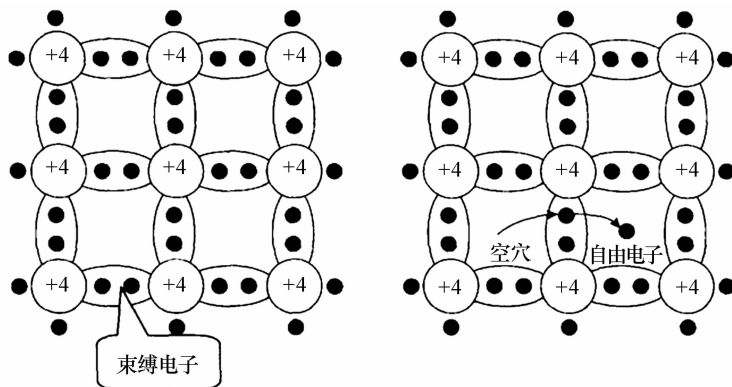
1.1.1 本征半导体

纯净的半导体称为本征半导体。制造半导体器件的半导体材料的纯度要达到 99.999999%,常称为“九个 9”。常用的半导体材料有硅和锗。它们都是四价元素,原子结构的最外层轨道上有四个价电子,当把硅或锗制成晶体时,它们是靠共价键的作用而紧密联系在一起。在绝对温度 T 趋于 0 K 时,所有的价电子都紧紧束缚在共价键中,不会成为自由电子,因此本征半导体的导电能力很弱,接近绝缘体。当温度升高或受到光的照射时,束缚电子能量增高,有的电子可以挣脱原子核的束缚而参与导电,成为自由电子。自由电子产



生的同时,在其原来的共价键中就出现了一个空位,称为空穴。

空穴带正电,和自由电子一样,也是一种载流子(能运载电荷的带电粒子)。因此半导体中有两种载流子,一种是带负电荷的自由电子,一种是带正电荷的空穴,它们是成对出现的,而导体中只有自由电子一种载流子参与导电。我们用晶体结构示意图来描述一下,如图 1-1 所示。在外电场的作用下,自由电子产生定向移动,形成电子电流的同时价电子也按一定的方向依次填补空穴,从而使空穴产生定向移动,形成电流。



(a)本征半导体的共价键结构 (b)此现象称为本征激发也称热激发

图 1-1 本征半导体的晶体结构示意图

在温度 T 趋于 0 K 时,如果没有外界激发,硅原子的所有价电子都被共价键所束缚,不会形成自由电子,因此,称为束缚电子。这时,在硅中不会形成传导电流。但是,与绝缘体材料相比,半导体材料中的价电子受共价键的束缚力较小,只要得到较小的能量,价电子就会摆脱共价键的束缚,成为自由电子。例如,在温度 T 趋于 0 K 时,硅原子中的价电子只要获得 1.2 eV 的能量,就会变成自由电子。因此,在室温条件下,相当多的价电子都会受到热激发,变为自由电子。这种物理现象称为本征激发。

在半导体材料中,不但存在着本征激发,而且存在自由电子受原子核的吸引,重新回到共价键中的现象。这就好像自由电子和空穴相互结合,正负电荷彼此抵消,这种现象称为复合。在一定温度下,半导体材料中的本征激发和复合现象不断发生,达到动态平衡。在室温条件下,硅材料中电子空穴对的密度仅为三万亿分之一。当温度升高时,电子空穴对的数量将会增加。温度每升高 $10\text{ }^\circ\text{C}$,电子空穴对的数量就会增加一倍。因此,温度对半导体材料的导电性能影响较大。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中两种载流子的浓度很低,因此导电性很差。我们向晶体中有控制地掺入特定的杂质来改变它的导电性,这种半导体被称为杂质半导体。杂质半导体是制造各种半导体器件的基础。根据掺入杂质的不同可分为 N 型半导体和 P 型半导体。



(1) N 型半导体

图 1-2 所示为 N 型半导体的内部结构示意图。在四价的硅中采用扩散工艺,掺入五价的元素磷(或砷、锑等),则磷原子将会代替原来晶格位置上的硅原子。磷原子最外层有五个价电子,其中的四个价电子与周围的四个硅原子的价电子组成共价键。另外还有一个价电子无法组成共价键。这个价电子受到的束缚力很小,只要得到 0.05 eV 左右的能量就会变成自由电子。而一般硅原子的价电子变成自由电子则需要得到 1.21 eV 的能量。上述过程称为杂质电离。失去一个价电子的磷原子带有一个正电荷,变为正离子。在室温下,N 型半导体中所有的磷原子都会发生杂质电离,使一个价电子变为自由电子。由于杂质元素磷可以提供自由电子,因而称为施主杂质。

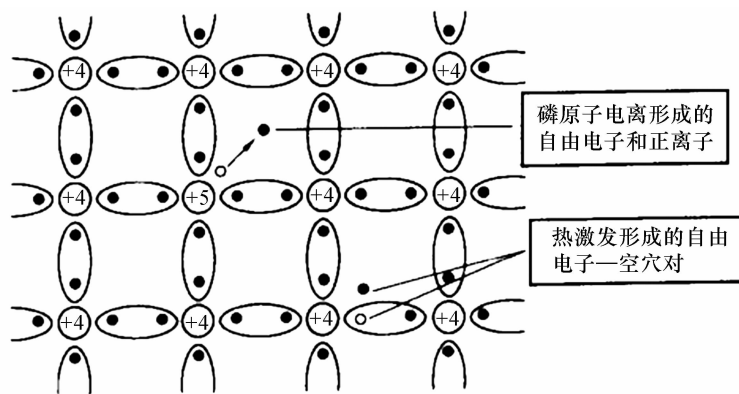


图 1-2 N 型半导体

在这种杂质半导体中,不但有杂质电离产生的自由电子,而且还有本征激发产生的电子空穴对。前者比后者的数量要大得多。因此,在这种杂质半导体中既有自由电子,又有空穴,两种载流子都有。自由电子是由杂质电离和本征激发产生的;而空穴只是由本征激发产生。由于自由电子的数量比空穴大得多,因此,这种半导体称为 N 型半导体。其中的自由电子称为多数载流子,空穴称为少数载流子。整个半导体材料是电中性的。

(2) P 型半导体

图 1-3 所示为 P 型半导体的内部结构示意图。在四价的硅中掺入三价的元素硼(或镓、铟等),则硼原子将会代替原来晶格位置上的硅原子。硼原子最外层有三个价电子,与周围的四个硅原子组成共价键时,缺少一个价电子,出现了一个空位。相邻共价键上的价电子受激发就会来填补这个空位。这样,硼原子多了一个电子,变成带负电荷的负离子。而失去价电子的硅原子形成了一个空穴。这也是一个杂质电离的过程。在室温下,P 型半导体中的所有硼原子都会发生杂质电离,产生空穴。由于杂质元素硼可以接收自由电子,因而称为受主杂质。

在这种杂质半导体中,同样既有自由电子,又有空穴。空穴是由杂质电离和本征激发产生的;而自由电子只是由本征激发产生。空穴的数量比自由电子大得多,因此,这种半导体

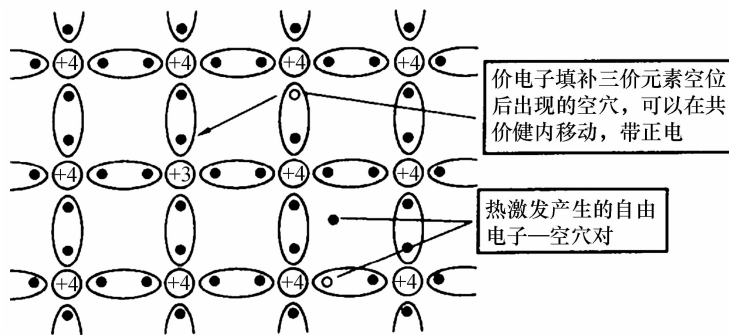


图 1-3 P 型半导体

称为 P 型半导体, 其中的空穴称为多数载流子, 自由电子称为少数载流子。多数载流子数目是由杂质浓度决定, 而少数载流子是由温度决定。杂质离子不能移动, 不参与导电。P 型、N 型半导体均呈电中性。

在半导体中, 少数载流子的浓度与本征激发和复合有关, 受温度的影响很大。所以, 它对半导体器件的温度特性产生很大影响。

在同一块半导体材料中, 既掺入施主杂质, 又掺入受主杂质, 它到底会成为哪种半导体材料呢? 这要由施主杂质和受主杂质的密度决定。哪一种密度高, 就成为哪种半导体。由此可见, 采用适当的掺杂密度, 可以使 P 型和 N 型半导体相互转换。

1. 1. 3 PN 结

(1) PN 结的形成

通过现代工艺, 把一块本征半导体的一边形成 P 型半导体, 另一边形成 N 型半导体, 于是这两种半导体的交界处就形成了特殊空间电荷区, 这个电荷区被称为 PN 结, 它是构成半导体器件体的基础, 我们要掌握好它的特性。

在形成的 PN 结中, 由于两侧的电子和空穴的浓度相差很大, 因此它们会产生扩散运动: 电子从 N 区向 P 区扩散; 空穴从 P 区向 N 区扩散。因为它们都是带电粒子, 它们向另一侧扩散的同时在 N 区留下了带正电的空穴, 在 P 区留下了带负电的杂质离子, 这样就形成了空间电荷区, 也就是形成了电场(自建场)。它们的形成过程如图 1-4 所示。

在电场的作用下, 载流子将做漂移运动, 它的运动方向与扩散运动的方向相反, 阻止扩散运动。电场的强弱与扩散的程度有关, 扩散得越多, 电场越强, 同时对扩散运动的阻力也越大, 当扩散运动与漂移运动相等时, 通过界面的载流子达到动态平衡。此时, PN 结的交界区就形成一个缺少载流子的高阻区, 我们又把它称为阻挡层或耗尽层。

在空间电荷区的 P 区一边, 只有负离子; N 区一边, 只有正离子。其电荷量相等。这个正负离子区域形成了一个内电场, 内电场的方向由 N 区指向 P 区。这说明 N 区的电位比 P 区高, 一般高零点几伏。这个电位差称为接触电位差。电子要从 N 区到 P 区, 必须增加足

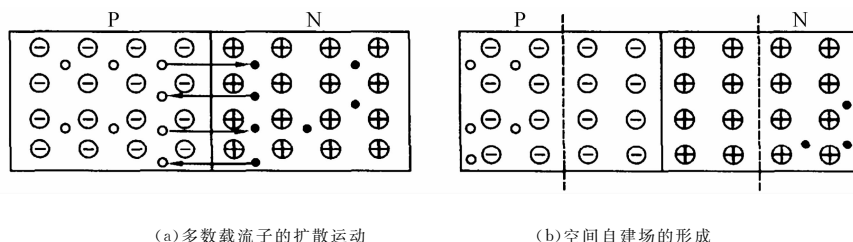


图 1-4 PN 结的形成过程

够的能量才行。这相当于上了一个能量高坡,称为势垒。因此,空间电荷区又称为势垒区。

内电场是由多数载流子的扩散运动形成的。内电场建立后,对载流子的运动产生了两种不同影响。对于两个区域中多数载流子的扩散运动,内电场起到阻碍作用。两个区域还有少数载流子在电场作用下向对方区域运动,这种运动叫做漂移运动。内电场对少数载流子的漂移运动起到促进作用。

多数载流子的扩散运动使得空间电荷区的正负离子数量增加,内电场加大。内电场加大的结果阻碍了多数载流子扩散运动的进一步增强。同时,内电场的加大促进了少数载流子的漂移运动。少数载流子漂移时,N区的少数载流子空穴到达P区后,会使P区的负离子减少;P区的少数载流子自由电子到达N区后,会使N区的正离子减少。正负离子数量的减少使得内电场减弱。内电场的减弱又反过来促进了多数载流子的扩散。由此可见,载流子的扩散运动和漂移运动对内电场及其自身的影响是相互矛盾的,运动到一定程度就会达到动态平衡。这时,空间电荷的数量达到稳定,内电场的大小也稳定下来。从微观上看,虽然仍有载流子流过PN结,但其正负电荷的数量是相等的。因此,从宏观上看,没有电流流过PN结。

在空间电荷区中,正负离子的数量是相等的。如果N区和P区的杂质浓度相等,耗尽区在两个区域内的宽度是相等的,这种PN结称为对称PN结;如果杂质浓度不相等,耗尽区在两个区域内的宽度是不相等的,这种PN结称为不对称PN结。

(2)PN 结的单向导电性

上述讨论是PN结没有外接电压的情况。如果PN结外接电压后,将会呈现出单向导电性。这是PN结的一个非常重要的特性。

如图1-5所示,当外加直流电压 E_w 的正极接P区,负极接N区时,我们说PN结加了正向电压,称为正向偏置或者正偏。这时,外加电场 E_w 与内电场 E 的极性相反。在外加电场 E_w 的作用下,N区中的多数载流子电子和P区中的多数载流子空穴将向对方区域运动。进入空间电荷区后,N区中的部分多数载流子电子要与正离子中和;P区中的部分多数载流子空穴要与负离子中和。这会使空间电荷区中正负离子的数量减少,PN结变薄,内电场减弱。内电场减弱后,原来的动态平衡被打破了,使得多数载流子的扩散运动大大增强,扩散电流大大增加。



加正向电压后,少数载流子漂移形成的漂移电流很小,与扩散电流相比是微不足道的。因此,在加正向电压的情况下,主要是扩散电流流过 PN 结,称为正向电流,记为 I_F 。 I_F 的大小主要取决于外加电压 E_w 和电路中的限流电阻 R 。

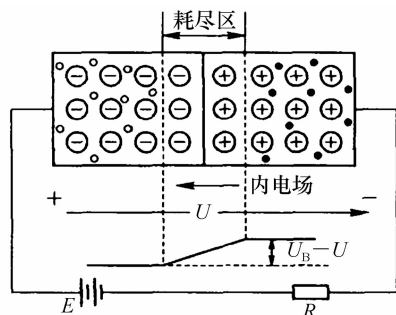


图 1-5 PN 结正向偏置

当外加直流电压 E_w 的正极接 N 区,负极接 P 区时,我们说 PN 结外加反向电压,称为反向偏置或者反偏。这时,外加电场量 E_w 与内电场 E 的极性相同,如图 1-6 所示。在外加电场 E_w 的吸引下,N 区中的多数载流子电子和 P 区中的多数载流子空穴都将远离 PN 结,使 PN 结中正负离子的数量增加。PN 结变厚,内电场增强。这时,多数载流子的扩散运动大为减弱,扩散电流大大减小。少数载流子的漂移运动有所增强,漂移电流占了主导地位。漂移电流又称反向电流 I_R ,其方向是与扩散电流相反的。少数载流子是由热激发而产生的,数量很少,而且与反向电压的大小基本无关。因此,在一定温度下,这个漂移电流基本不变,被称为反向饱和电流 I_s 。

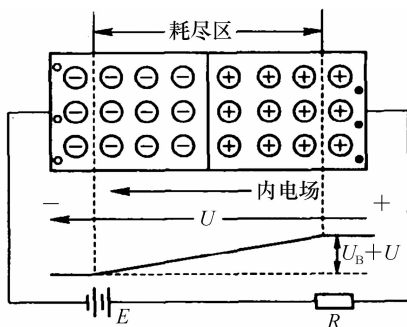


图 1-6 PN 结反向偏置

综上所述,PN 结正向偏置时,将会通过较大的正向电流 I_F ,电流的方向是从 P 区流向 N 区,PN 结的等效电阻较小;PN 结反向偏置时,只有很小的反向电流 I_R ,电流的方向是从 N 区流向 P 区,PN 结的等效电阻很大。PN 结正向电流 I_F 远大于反向电流 I_R ,这就是 PN 结的单向导电性。

(3)PN 结的伏安特性

PN 结特性对温度变化很敏感,反应在伏安特性上即为:温度升高,正向特性左移,反向



特性下移,如图 1-7 中虚线所示。具体变化规律是:保持正向电流不变时,温度每升高 1°C ,结电压减小约 $2\sim 2.5\text{ mV}$,即

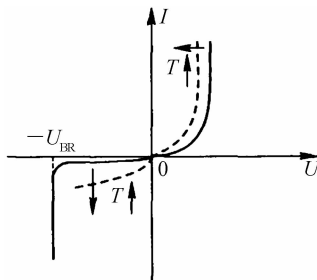


图 1-7 PN 伏安特性

$$\Delta U / \Delta T \approx -(2\sim 2.5)\text{ mV}/^{\circ}\text{C} \quad (1-1)$$

温度每升高 10°C ,反向饱和电流 I_S 增大一倍。如果温度为 T_1 时, $I_S = I_{S_1}$; 温度为 T_2 时, $I_S = I_{S_2}$, 则

$$I_{S_2} = I_{S_1} 2^{(T_2 - T_1)/10} \quad (1-2)$$

当温度升高到一定程度时,由本征激发产生的少数浓度有可能超过掺杂浓度,使杂质半导体变得与本征半导体一样,这时 PN 结就不存在了。因此,为了保证 PN 结正常工作,对它的最高工作温度有一个限制,对硅材料约为 $(150\sim 200)^{\circ}\text{C}$,对锗材料约为 $(75\sim 100)^{\circ}\text{C}$ 。

(4) PN 结的击穿特性

如上所述,PN 结的反向电流 I_R 与所加的反向电压几乎无关,这是在反向电压幅度较小时的情况。如果反向电压继续增大,电流是否还会跟着增大? 经过实际测试,人们发现情况不是这样。当反向电压的幅度大到一定程度时,反向电流将会突然大幅度增加,这个现象称为 PN 结的反向击穿。反向击穿时的电压称为反向击穿电压 U_{BR} 。

这种击穿是一种电击穿,其物理过程仍然是可逆的。如果外加反向电压及时减小,反向击穿现象就会消失,PN 结不会遭到破坏。然而,在发生了电击穿后,如果反向电压不能及时减小,PN 结承受的反向电压很大,流过 PN 结的反向电流也很大,消耗在 PN 结上的功耗是很大的。这样,很快就会使 PN 结发热,超过其功耗限制,造成热击穿。一旦发生了热击穿,PN 结的反向电流增加和温度升高出现恶性循环,它们都会迅速增大,PN 结很快就被烧坏了。

当 PN 结两端加的反向电压足够大时,内电场也随之增强。电子和空穴通过空间电荷区时,在内电场的作用下,获得的能量显著增加,运动速度大大加快。这些载流子在运动过程中,会与半导体的晶体原子发生碰撞,将一部分动能转移给共价键中的电子,使价电子脱离共价键的束缚,变成自由电子,从而产生了电子空穴对。新产生的电子空穴对与原有的自由电子和空穴一样,被内电场加速,去撞击其他原子,再产生新的电子空穴对。这就是载流子的倍增效应。这种现象和高原雪山发生的雪崩类似,因此称为雪崩击穿。

在一些杂质浓度较高的 PN 结中,杂质密度大,空间电荷区中的正负离子密度也大,空



间电荷区很薄。这样,只要加上不大的反向电压,就可以使内电场达到足够的场强。这个内电场将会直接把价电子从共价键中拉出来,产生电子空穴对,从而形成较大的反向电流。基于这种现象产生的反向击穿称为齐纳击穿。

对于 PN 结来说,反向电压 7 V 以上的击穿一般是雪崩击穿;4 V 以下的反向击穿一般是齐纳击穿。在 4 V 和 7 V 之间时,两种击穿可能同时存在。发生雪崩击穿时,PN 结的电压温度系数为正,即温度升高时,击穿电压也升高;发生齐纳击穿时,PN 结的电压温度系数为负,即温度升高时,击穿电压降低。两种击穿同时存在时,电压温度系数接近于零。

(5) PN 结的电容效应

在物理学中,电容表示了一个器件电荷量与电压之间的关系。在 PN 结中,空间电荷区中正负离子的数量,扩散到 P 区的电子和扩散到 N 区的空穴的数量,都与外加电压有关系,这也表现出电容效应。这个电容效应分为两种:一种叫做势垒电容;一种叫做扩散电容。

PN 结本身的体电阻很大,其两边分布着正负离子,与平板电容器非常类似。当 PN 结外加正向电压时,空间电荷区中正负离子的数量要减少,PN 结变薄;当外加反向电压时,空间电荷区中正负离子的数量要增加,PN 结变厚。这种现象类似于平板电容器的充放电。势垒区中正负离子的数量随外加电压变化而发生变化的效应称为势垒电容 C_B 。根据理论分析可知,势垒电容

$$C_B = \frac{C_B(0)}{\left(1 - \frac{U_D}{U_0}\right)^n} \quad (1-3)$$

式中, $C_B(0)$ 是 PN 结外加电压等于零时的 C_B 值; U_D 是外加电压; U_0 是 PN 结的接触电位差; n 是变容指数,其大小取决于 PN 结的工艺、结构等因素,一般取 1/3 到 6 之间。一般地,势垒电容 C_B 的大小为 1~100 pF。

PN 结本身有一个结电阻,从等效的观点看,势垒电容与它是并联的。当 PN 结外加正向电压时,PN 结的结电阻很小,势垒电容 C_B 的等效阻抗较大,两者并联主要是结电阻起作用,可以不考虑势垒电容 C_B 的影响。当 PN 结外加反向电压时,PN 结的结电阻很大,势垒电容的等效阻抗也不小,两者的作用都是不能忽略的。因此,势垒电容 C_B 主要是在 PN 结反偏时起作用。

当 PN 结外加正向电压时,P 区中的多数载流子空穴和 N 区中的多数载流子电子都要向对方区域扩散。在扩散过程中不断与对方区域中的多数载流子复合。这样,扩散过去的载流子在靠近 PN 结边界处浓度最高,距边界越远,浓度越低,呈某种浓度梯度分布。当外加正向电压变化时,载流子的数量和浓度梯度都要变化。这种电容效应称为扩散电容 C_D 。根据理论分析可知,扩散电容

$$C_D = \frac{\tau_p I_D}{U_T} \quad (1-4)$$

式中, τ_p 是非平衡载流子空穴的平均寿命, I_D 为流过 PN 结的扩散电流, U_T 为温度电压



当量。扩散电容 C_D 的大小一般为 $10 \sim 100 \text{ pF}$ 。显然,扩散电容主要是在 PN 结外加正向电压时起作用。

势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 都是随外加电压变化而变化的非线性电容,两者是并联关系。PN 结的结电容是两者之和。

1.2 半导体二极管

在 PN 结的两端加上电极引线并加以封装,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。

1.2.1 普通二极管

(1) 半导体二极管的结构

半导体二极管按其结构的不同可分为点接触型和面接触型两类。

点接触型二极管的 PN 结面积很小,如图 1-8 (a) 所示,极间电容很小,同时也不能承受高的反向电压和大的电流。这种类型的管子适合做高频检波和脉冲数字电路的开关元件,也可用作小电流整流。如 2AP1 是点接触型锗二极管,最大整流电流为 16 mA ,最高工作频率为 150 MHz 。

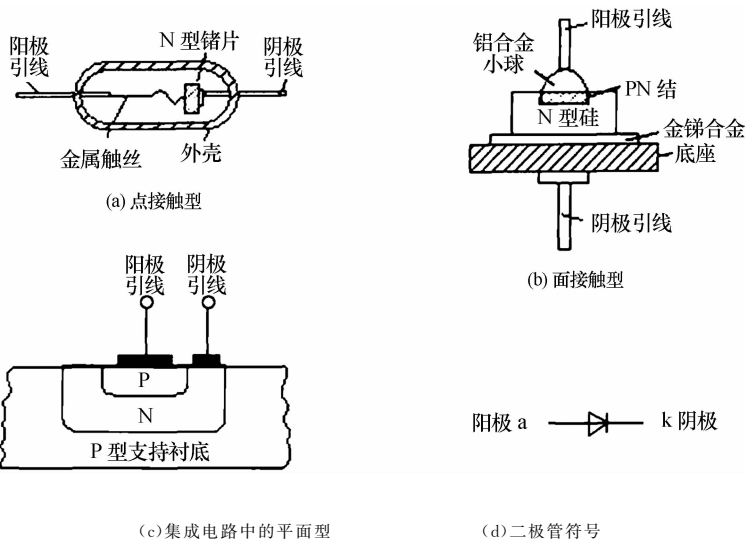


图 1-8 半导体二极管的结构及符号

面接触型或称面结型二极管的 PN 结面积大,如图 1-8(b) 所示,可承受较大的电流,但极间电容也大。这类器件适用于整流,不宜用于高频电路中。如 2CP1 为面接触型硅管,最大整流电流为 400 mA ,最高工作频率只有 3 kHz 。

图 1-8(c) 是硅工艺平面型二极管的结构图,是集成电路中常见的一种形式。二极管符



号如图 1-8(d)所示。

(2) 二极管的伏安特性

实际二极管的伏安特性如图 1-9 所示。可以看出,二极管的伏安特性和 PN 结的伏安特性基本上是相同的。下面对二极管的伏安特性曲线分三部分加以讨论。

① 正向特性

对应于图 1-9 的第①段为正向特性,此时加于二极管的正向电压只有零点几伏,但流过二极管的电流却可以很大,因此,管子呈现的正向电阻很小。但是,在正向特性的起始部分,由于正向电压较小,外电场还不足以克服 PN 结的内电场,因此,这时的正向电流几乎为 0,二极管呈现出一个大电阻。就好像有一个门坎,硅管的门坎电压 U_{th} (又称死区电压) 约为 0.5 V,锗管的 U_{th} 约为 0.1 V,当正向电压大于 U_{th} 时,内电场大为削弱,电流迅速增长。

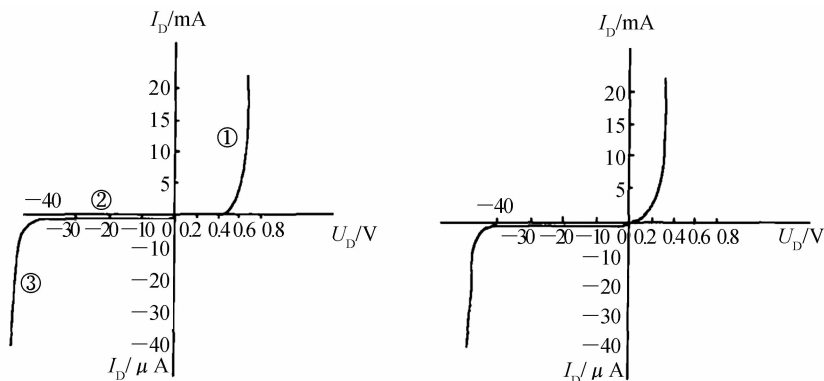


图 1-9 硅二极管 2CP10 的 $V-I$ 特性

② 反向特性

在反向电压作用下,P 区的少数载流子电子和 N 区的少数载流子空穴很容易通过 PN 结,形成反向饱和电流。但由于少数载流子的数目很少,因此,反向电流很小,如图 1-9 的第②段,一般硅管的反向电流比锗管小很多。由于少数载流子对温度很敏感,因此,温度升高时,反向电流会随之增加。

③ 反向击穿特性

因为在一定温度条件下,少数载流子数目有限,所以当增加反向电压时,在一定的范围内反向电流没有多大变化,当反向电压增加到一定值时,反向电流剧增,这种现象称作二极管的反向击穿,对应于图 1-9 的第③段。

(3) 二极管的参数

二极管的性能常用以下几个主要参数加以描述:

① 最大整流电流 I_F : I_F 是指二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流。在规定



散热条件下,二极管正向平均电流若超过此值,则会因 PN 结温升过高而烧坏。

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。一般手册上给出的最高反向工作电压 U_R 约为反向击穿电压 U_{BR} 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能越好, 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。

⑤二极管的直流电阻只加到二极管两端的直流电压与流过二极管的电流之比,称为二极管的直流电阻 R_D ,即

$$R_D = \frac{U_Q}{I_Q} \quad (1-5)$$

此值可由二极管特性曲线求出,如图 1-10 所示。工作点电压 $U_Q = 1.5 \text{ V}$, 电流 $I_Q = 50 \text{ mA}$, 则

$$R_D = \frac{U_Q}{I_Q} = \frac{1.5}{50 \times 10^{-3}} = 30 \Omega$$

且由图可看出, R_D 随工作电流加大而减小,故 R_D 呈现非线性。用万用表测量出的电阻值为 R_D , 用不同挡测量出的 R_D 值显然是不同的。二极管加正、反向电压所呈现的电阻也不同。加正向电压时, R_D 为几十至几百欧,加反向电压时 R_D 为几百千欧至几兆欧。一般正、反向电阻值相差越大,二极管的性能越好。

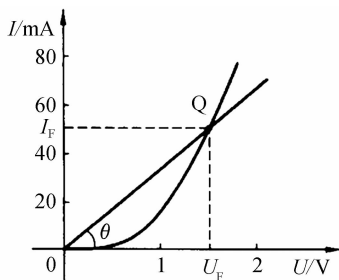


图 1-10 求直流电阻

⑥二极管的交流电阻 r_d 。在二极管工作点附近,电压的微变值 ΔU 与相应的微变电流值 ΔI 之比,称为该点的交流电阻 r_d ,即

$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1-6)$$

从其几何意义上讲,当 $\Delta \rightarrow 0$ 时

$$r_d = \frac{dU}{dI} \quad (1-7)$$



r_d 就是工作点 Q 处的切线斜率的倒数。显然, r_d 也是非线性的,即工作电流越大, r_d 越小。交流电阻 r_d 也可从特性曲线上求出,如图 1-11 所示。过 Q 点做切线,在切线上任取两点 A, B ,查出这两点间的 ΔU 和 ΔI ,则得

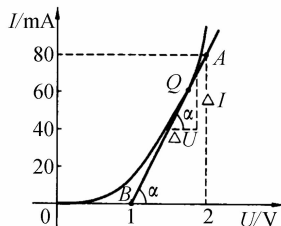


图 1-11 求交流电阻

$$r_d = \left. \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|_{I_{DQ}, U_{DQ}} = \frac{2-1}{(80-0) \times 10^{-3}} = 12.5 \Omega \quad (1-8)$$

交流电阻 r_d 也可利用 PN 结的电流方程求出。取 I 的微分可得

$$dI = d[I_s e^{\frac{U}{U_T}} - 1] = \frac{I_s}{U_T} e^{\frac{U}{U_T}} dU \approx \frac{I_D}{U_T} dU$$

即

$$r_D = \frac{U_T}{I_D} \approx \frac{26}{I_{DQ}} \quad (1-9)$$

式中, I_{DQ} 为二极管工作点的电流,单位取 mA。式(1-9)的近似等式在室温条件下($T=300$ K)成立。

对同一工作点而言,直流电阻 R_D 大于交流电阻 r_d ;对不同工作点而言,工作点愈高, R_D 和 r_d 愈低。表 1-1 列出了几种半导体二极管的典型参数。

表 1-1 半导体二极管的典型参数

型号 \ 参数	最大整流电流 I_r/mA	最高反向电压 U_R/V	反向电流 $I_R/\mu\text{A}$	最高工作频率 f_M/kHz	结电容 C_i/pF	备注
2AP1	16	20	≤ 250	150	≤ 1	点接触型锗管
2AP2	16	30	≤ 250	150	≤ 1	
2AP11	< 25	< 10	≤ 250	40	≤ 1	
2AP12	< 40	< 10	≤ 250	40	≤ 1	
2CP1	400	100	205	3		面接触型硅管
2CP2	400	200	250	3		
2CP6A	100	100	≤ 20	50		
2CP6B	100	200	≤ 20	50		



型号 \ 参数	最大整流电流 I_f/mA	最高反向电压 U_R/V	反向电流 $I_R/\mu\text{A}$	最高工作频率 f_M/kHz	结电容 C_i/pF	备注
2CZ11A	1000	100	≤ 600	≤ 3		加 60 mm×60 mm×1.5 mm 铝散热板
2CZ12A	3000	50	≤ 1000	≤ 3		加 80 mm×80 mm×1.5 mm 铝散热板

二极管的参数是正确使用二极管的依据,一般半导体器件手册都给出不同型号管子的参数。在使用时,应特别注意不要超过最大整流电流和最高反向工作电压,否则管子容易损坏。

此外,由于制造工艺的原因,半导体器件参数具有分散性,同一型号管子的参数会有较大的差异,因而手册上给出的往往是参数的上限值、下限值或范围。还要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,参数也会有所不同。

(4) 二极管的型号及其选择

① 型号

国产半导体器件的型号由一组数字和汉语拼音字母组成,用来表示器件的类型、材料和参数等。

② 选用二极管的一般原则

选取二极管的一般原则如下:

- (i) 要求导通后正向压降较小时选择锗管,要求反向电流较小时选用硅管。
- (ii) 要求工作电流大时选择面接触型,工作频率高时选择点接触型。
- (iii) 要求反向击穿电压较高时选用硅管。
- (iv) 要求耐高温时选用硅管。

读者可根据实际电路的技术要求,估算二极管应具有的参数,并考虑适当的裕量,查阅手册以确定管子的型号和参数。

(5) 二极管的应用电路及其分析方法

二极管是一种非线性器件,因而二极管电路一般要采用非线性电路的分析方法。但是为了便于近似估算,本节只介绍理想二极管和实际二极管的两种分析方法。

① 理想二极管的概念

理想二极管的概念是:当管子正向偏置时,其管压降为 0 V,而当管子处于反向偏置时,认为它的电阻为无穷大,电流为 0 μA 。在实际电路中,当电源电压远比二极管的管压降大时,或设定二极管为理想时,利用此概念来近似分析是可行的。

② 实际二极管的分析方法

对于实际二极管,只要联系二极管的伏安特性,运用单向导电性近似分析即可。分析方



法如下:假设二极管正向导通压降为 U_{on} , 约定硅管 $U_{on}=0.7\text{ V}$, 锗管 $U_{on}=0.2\text{ V}$ 只有当二极管的正向压降大于等于 U_{on} 时, 管子才导通, 导通后管压降被钳位成 U_{on} 且具有恒压特性, 而流过管子的电流则由电路参数来计算; 否则, 二极管反偏截止, 电流约为 $0\ \mu\text{A}$ 。该方法提供了合理的近似, 因此应用也较广。

(6) 二极管应用电路举例

在电子电路中, 二极管有着广泛的应用, 例如充当整流、检波、开关、钳位和限幅保护元件等。下面只介绍限幅电路和开关电路, 其他应用电路将在后续有关章节和数字电路中讨论。

二极管限幅是指限制电路中的输入或输出电压幅度。当输入信号电压经过限幅电路后, 只有其中的一部分加到输入端或输出端, 其余部分被限制而消失了。在模拟电子电路中, 常用限幅电路来减小或限制某些信号的幅值, 以适应电路的不同要求, 例如用在集成运算放大器的输入端和输出端。

① 串联限幅电路

实际二极管限幅电路如图 1-12(a) 所示。因为二极管 VD 与负载电阻 R_L 串联, 所以称为串联限幅电路。设图中 u_i 为正弦输入信号, 由二极管的单向导电性可知, 当 u_i 处于正半周, 且其值大于 VD 的导通电压 U_{on} 时, VD 导通, 输出电压 $u_o = u_i - U_{on}$; 当 u 处于负半周或其值小于 U_{on} 时, VD 截止, $u_o = 0\text{ V}$ 。 u_o 的波形见图 1-12(b), 可见该电路中正弦信号的负半波受到了限幅。

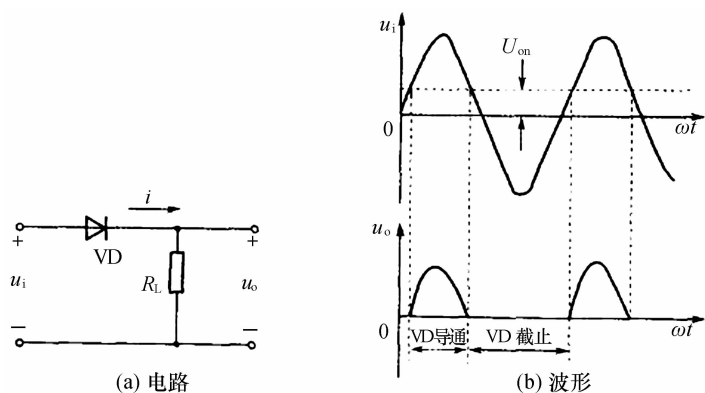


图 1-12 二极管串联限幅电路

② 并联限幅电路

实际二极管限幅电路见图 1-13(a), 因 VD 与输出端并联, 故称为并联限幅电路。当输入正弦信号 u 处于正半周, 且其值大于 VD 的导通电压 U_{on} 时, VD 导通, $u_o = U_{on}$ 。当 u 处于负半周或其值小于 U_{on} 时, VD 截止, 此时 u_i 的波形全部传送到输出端, 即 $u_o = u_i$ 。输出电压 u_o 的波形图见图 1-13(b)。并联限幅电路限制了输入正弦信号的正半波。

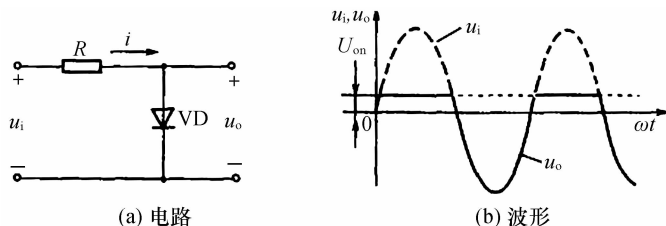


图 1-13 二极管并联限幅电路

③ 双向限幅电路

【例 1-1-1】实际二极管限幅电路见图 1-14(a), 分析电路并画出输入正弦信号 u_i 和输出 u_o 的波形图。

解:图 1-14(a)将两个二极管 VD_1 和 VD_2 正、反向并联在电路输出端, 构成了双向限幅电路。根据上述串、并限幅电路的工作原理。可得如图 1-14(b)所示的输出波形。由波形图可见, 双向限幅电路限制了输出信号的正向和负向幅度, 将输出电压 u_o 的幅值限制为 $\pm U_{on}$ 。

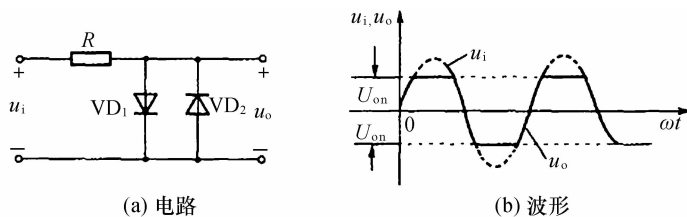


图 1-14 例 1-1-1 的双向限幅电路

【例 1-1-2】理想的二极管开关电路见图 1-15, 当 u_{i1} 和 u_{i2} 为 0 V 或者 5 V 时, 求输入电压 u_{i1} 和 u_{i2} 的值为不同组合情况时, 输出电压 u_o 的值。

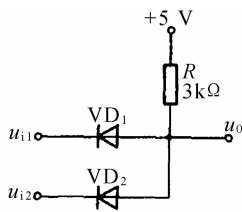


图 1-15 例 1-1-2 的理想二极管电路

解:(1) 当 $u_{i1} = 0$ V, $u_{i2} = 5$ V 时, VD_1 为正偏, $u_{i1} = 0$ V (此时, 二极管为理想二极管), 此时 D_2 的阳极电位为 0 V, 阴极为 5 V, 处于反偏状态, 故 VD_2 截止。

(2) 以此类推, 将 u_{i1} 和 u_{i2} 的其余 3 种组合和输出电压列于表 1-2 中。



表 1-2 例 1-1-2 的分析结果

u_{i1}/V	u_{i2}/V	二极管工作状态		u_o/V
		VD ₁	VD ₂	
0	0	导通	导通	0
0	5	导通	截止	0
5	0	截止	导通	0
5	5	截止	截止	5

由表 1-2 可见,在输入电压 u_{i1} 和 u_{i2} 中,只要有 1 个 0 V,则输出为 0 V,只有当 2 个输入电压均为 5 V 时,输出才 5 V,这种关系在数字电路中称为逻辑“与”关系。

④ 二极管整流电路

把交流电源电压变换成直流电压的过程称为整流,被广泛地应用于直流电源系统之中。利用二极管的单向导电特性,可组成半波整流、全波整流及桥式整流多种电路。现仅分析二极管半波整流电路,其他电路将在后续相关章节中介绍。

【例 1-1-3】二极管半波整流电路如图 1-16。假设变压器副边电压有效值为 12 V。副边电阻为 3 Ω 。二极管反向漏电流忽略不计。负载电阻 $R_L = 50 \Omega$,试求负载电压 u_L 的平均(直流)值 U_L 。

分析:在这一电路中,若当 $u_s > U_D$ 时二极管导通, $u_L = u_s - U_D$; 而当 $u_s < U_D$ 时二极管截止, $u_L = 0$ 。负载电流仅在正弦波的正半周内流通,从而构成半波整流。电路输入电压与输出电压的关系可用电压传输特性表达,如图 1-17 所示。

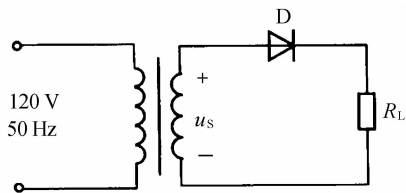


图 1-16 例 1-1-3 的电路图

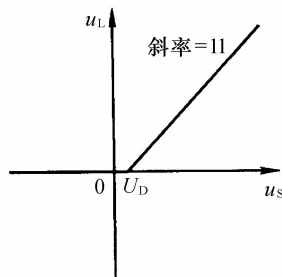


图 1-17 半波整流电路的电压传输特性

解:若二极管采用分段线性模型等效,这一半波整流电路表达为如图 1-18(a)所示的形式(由于回路电流较大,分段线性模型中电阻 r_D 设为 1 Ω)。

根据电路的电压传输特性可知,仅当 $u_s > U_{th} (=0.5 \text{ V})$ 时二极管才导通,因此当 $u_s < U_{th}$ 时,

$$i_L = 0$$

当 $u_s > U_{th}$ 时,

$$i_L = \frac{u_s - U_{th}}{R_s + r_D + R_L} = \frac{\sqrt{2} \times 12 \sin \omega t - 0.5}{3 + 1 + 50}$$



负载电压为

$$u_L = i_L R_L$$

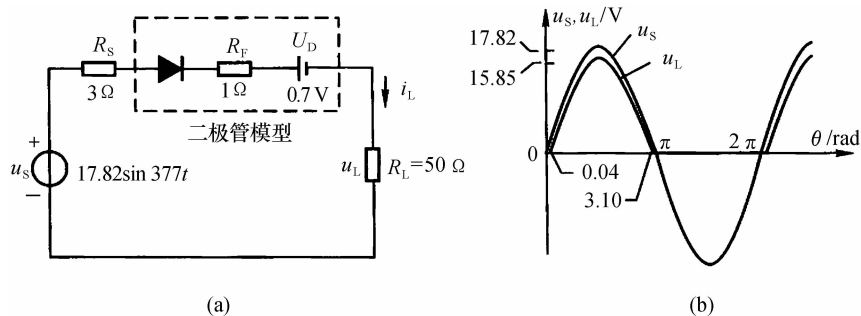


图 1-18 例 1-1-3 的半波整流器

(a) 模型; (b) 波形

由于二极管采用分段线性模型等效, 可知在 $(\sqrt{2} \times 12 \sin \omega t - 0.5) \text{V}$ (此时 $\omega t = 0.03 \text{ rad}$ 或者 1.69°) 之前 $u_L = 0$, 因此负载电压 u_L 和 u_s 电源的波形如图 1-18(b) 所示。负载电压 u_L 在一个周期内的平均值为

$$\begin{aligned} U_L &= \frac{1}{2\pi} \int_{0.03}^{\pi-0.03} \frac{\sqrt{2} \times 12 \sin \omega t - 0.5}{3+1+50} \times 50 \, d\omega t \\ &= \frac{-15.71 \cos \omega t - 0.46}{2\pi} \Big|_{0.03}^{\pi-0.03} = 4.77 \text{ V} \end{aligned}$$

讨论: 若当二极管采用恒压降模型等效, 并忽略变压器副边电阻损耗时, 负载电压的平均值 U_L 将趋向于 $u_{S(\text{峰})} / \pi$ 。电路中选用的二极管必须能耐受反向电压的峰值 $u_{S(\text{峰})}$, 以保证电路可靠工作。

1.2.2 稳压二极管

(1) 稳压管的稳压作用

稳压管是一种特殊工艺制成的面接触型硅二极管。由于它在电路中与适当数值的电阻配合后能起稳定电压的作用, 故称为稳压管。

稳压管的伏安特性和普通二极管的伏安特性基本相似, 主要区别是稳压管的反向击穿区特性曲线比普通二极管更陡。稳压管的伏安特性曲线及电路符号如图 1-19 所示。

稳压管工作于反向击穿区。从稳压管的反向特性曲线上可以看出, 反向电压在一定范围内变化时, 反向电流很小。当反向电压增高到击穿电压时, 反向电流突然剧增, 稳压管反向击穿。此后, 电流虽然在很大范围内变化, 但稳压管两端的电压变化很小。利用这一特性, 稳压管在电路中能起稳压作用。

稳压管与一般二极管不一样, 它的反向击穿是可逆的。当去掉反向电压之后, 稳压管又恢复正常。值得注意的是, 如果稳压管的反向电流超过允许范围, 稳压管会因过热而损坏。



所以,与稳压管配合的电阻要适当,才能起稳压作用。

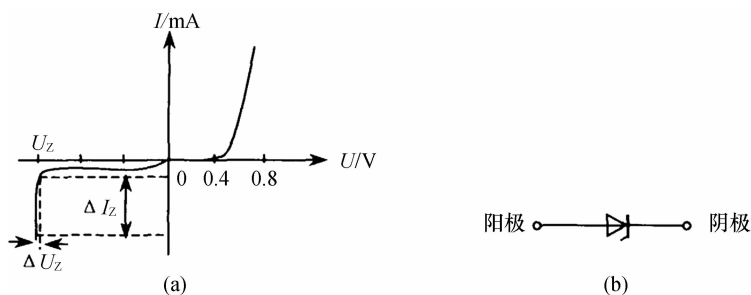


图 1-19 稳压管的伏安特性曲线及电路符号

(a) 伏安特性曲线; (b) 电路符号

使用稳压管组成稳压电路时,需要注意几个问题;稳压二极管正常工作是在反向击穿状态,即外加电源正极接管子的 N 区,负极接 P 区;稳压管应与负载并联,由于稳压管两端电压变化量很小,因而使输出电压比较稳定;必须限制流过稳压管的电流 I_Z ,使其不超过规定值。以免因过热而烧毁管子。同时,还应保证流过稳压管的电流 I_Z 大于某一数值(稳定电流),以确保稳压管有良好的稳压特性。如图 1-20 所示,其中限流电阻 R 即起此作用。

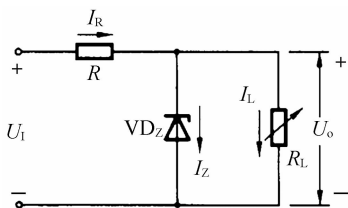


图 1-20 稳压二极管稳压电路

(2) 稳压管的主要参数

稳压管的主要参数如下:

① 稳定电压 U_Z 。

稳定电压是稳压管工作在反向击穿区时的稳定工作电压。由于稳定电压随着工作电流的不同而略有变化,因而测试 U_Z 时应使稳压管的电流为规定值。稳定电压 U_Z 是根据要求挑选稳压管的主要依据之一。不同型号的稳压管,其稳定电压值不同。同一型号的管子,由于制造工艺的分散性,各个管子的 U_Z 值也有差别。例如,稳压管 2DW7C,它的 $U_Z = 6.1 \sim 6.5 \text{ V}$,其稳定值有的管子是 6.1 V ,有的可能是 6.5 V ,等等,表明均为合格产品,但这并不意味着同一个管子的稳定电压的变化范围有如此之大。

② 稳定电流 I_Z

稳定电流就是指在稳压管两端加稳定电压时通过的电流值。稳压管的稳定电流只是一个作为依据的参考数值,设计选用时要根据具体情况(例如工作电流的变化范围)来考虑。但对各种型号的稳压管,都规定有一个最大稳定电流 $I_{Z\max}$,即 $I_{Z\max} = P_Z / U_Z$ 。



③电压温度系数 α

α 指稳压管温度变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,所引起的稳定电压变化的百分比。一般情况下,稳定电压大于 7 V 的稳压管, α 为正值,即当温度升高时,稳定电压值增大,如 $2\text{CW}17, U_Z = 9 \sim 10.5\text{ V}, \alpha = 0.09\%/^{\circ}\text{C}$,说明当温度升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,稳定电压增大 0.09% 。而稳定电压小于 4 V 的稳压管, α 为负值,即当温度升高时,稳定电压值减小,如 $2\text{CW}11, U_Z = 3.2 \sim 4.5\text{ V}, \alpha = -(0.05\% \sim 0.03\%)/^{\circ}\text{C}$,若 $\alpha = -0.05\%/^{\circ}\text{C}$,表明当温度升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,稳定电压减小 0.05% 。稳定电压在 $4 \sim 7\text{ V}$ 间的稳压管,其 α 值较小,稳定电压值受温度影响较小,性能比较稳定。

④动态电阻 r_Z

r_Z 是稳压管工作在稳压区时,两端电压变化量与电流变化量之比,即 $r_Z = \Delta U / \Delta I$ 。 r_Z 值越小,则稳压性能越好。同一稳压管,一般工作电流越大时, r_Z 值越小。通常手册上给出的值是在规定的稳定电流之下测得的。稳压管的 r_Z 越小,稳压性能越好。

⑤额定功率 P_Z 和最大稳定电流 $I_{Z\text{max}}$

由于稳压管两端的电压值为 U_Z ,而管子中又流过一定的电流,因此要消耗一定的功率。这部分功耗转化为热能,会使稳压管发热。 P_Z 取决于稳压管允许的温度升高幅度。额定功率 P_Z 是在稳压管允许结温下的最大功率损耗。最大稳定电流 $I_{Z\text{max}}$ 是指稳压管允许通过的最大反向电流。它们之间的关系是: $P_Z = U_Z I_{Z\text{max}}$ 。

表 1-3 给出了几种稳压管的典型参数。其中 $2\text{DW}7$ 系列的稳压管是一种具有温度补偿效应的稳压管,用于电子设备的精密稳压源中。管子内部实际上包含两个温度系数相反的二极管对接在一起。当温度变化时,一个二极管被反向偏置,温度系数为正值,而另一个二极管被正向偏置,温度系数为负值,二者互相补偿,使 1,2 两端之间的电压随温度的变化很小。它们的电压温度系数比其他一般的稳压管约小一个数量级,如 $2\text{DW}7\text{C}, \alpha = 0.005\%/^{\circ}\text{C}$ 。

表 1-3 稳压管的典型参数

参数 型号	稳压电压 U_Z/V	电压温度系数 $\alpha/(\%/^{\circ}\text{C})$	动态电阻 r_Z/Ω	稳定电流 I_Z/mA	最大稳定电流 $I_{Z\text{max}}/\text{mA}$	耗散功率 P_Z/W
2CW11	3.2~4.5	-0.05~0.03	≤ 70	10	55	0.25
2CW12	4~5.5	-0.04~0.04	≤ 50	10	45	0.25
2CW16	8~9.5	0.08	≤ 20	5	26	0.25
2CW17	9~10.5	0.09	≤ 25	5	23	0.25
2CW21	3.2~4.5	-0.05~0.03	40	30	220	1
2CW21A	4~5.5	-0.04~0.04	30	30	180	1
2CW21E	8~9.5	0.08	7	30	105	1
2CW21F	9~10.5	0.09	9	30	95	1
2CW7B	5.8~6.6	0.005	≤ 15	10	30	0.2
2CW7C	6.1~6.5	0.005	≤ 10	10	30	0.2

(3) 稳压二极管的应用

稳压二极管正常工作时应处于反向击穿区,所以稳压管必须反向连接,且输入电压要大



于稳压管的稳定电压。当稳压二极管反向击穿时,电流增加很快,稳压管的功率消耗大增,而功耗增大将使管子发热剧增。这又促使管子中的电流增加,使发热量进一步变大。这种情况如不加限制,必会发生热击穿——管子被烧毁。为安全考虑,需要限制稳压管反向击穿时的电流大小。方法是串入一个阻值恰当的限流电阻,保证稳压二极管有一个大小合适的工作状态。所以稳压二极管的典型应用电路如图 1-21 所示。电路中输入电压是待稳定的直流电源电压。比如是经由整流滤波电路提供的不稳定电压。电阻 R 是限流电阻, R_L 是用电器,在这里相当于负载。稳压管 VD_Z 在电路中起着关键作用,当 U_i 或 R_L 变化时, VD_Z 两端电压的微小变化会引起 I_Z 的较大变化,这种电流变化会改变限流电阻 R 上的压降,达到维持输出电压基本稳定的目的:例如当 R_L 固定而 U_i 增大时,将有下面的自动调整过程:

$$U_i \uparrow \rightarrow U_o \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow I_R R \uparrow \rightarrow U_o \downarrow$$

其结果是输出电压基本上维持恒定。同理,当 U_i 减小或 R_L 变化时,也会有一个自动调整的过程,以维持输出电压的基本不变。除了构成稳压管稳压电路外,稳压管还可以用来把信号电压的幅度限制在一定的电平上,作为限幅元件使用。

【例 1-2-1】已知图 1-21(a)所示电路的输入电压 $u_i = 12\sin \omega t(\text{V})$,稳压管稳定电压比 $U_Z = 6\text{V}$,画出电路输出电压 u_o 的波形。

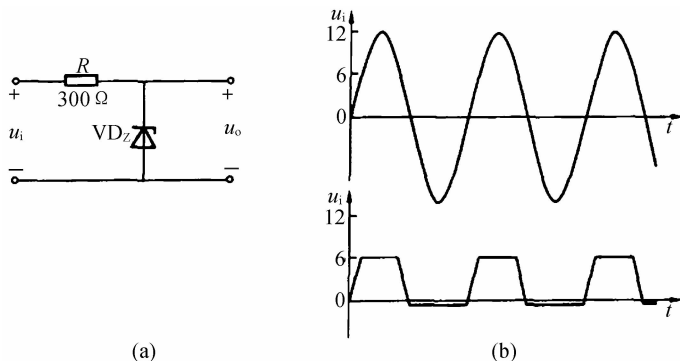


图 1-21 稳压二极管限幅电路

(a) 电路原理图;(b) 输入输出波形图

分析:当输入正弦波电压为正半周,且幅值大于 U_Z 时,稳压管进入反向击穿区,将输出电压稳定在 6V 上;当输入的正半周波形幅值小于 U_Z 时,稳压管处于反向截止状态。既然稳压管截止,限流电阻中的电流为零,电阻上的压降亦为零,则输出波形与输入波形相同;当输入波形进入负半周时,稳压管正向导通,若考虑其正向压降为 0.7V ,则输出电压将被限制在 -0.7V 上。

根据以上分析,可画出输出波形图如 1-21(b)。

【例 1-2-2】稳压二极管电路如图 1-22 所示。图中稳压管的主要参数为:稳定电压 U_Z 、稳定电流范围 ($I_{L\min} \sim I_{L\max}$), R 为限流电阻, R_L 为负载电阻。(1)试分析当输入电压 U_i (满足 U_i



$>U_Z$) 在 $(U_{i\min} \sim U_{i\max})$ 范围内波动, 负载电阻 R_L 在 $(R_{L\min} \sim R_{L\max})$ 范围内波动时, 限流电阻 R 的取值范围; (2) 当负载恒定时, 若输入电压为 $u_i = U_i \sin \omega t \text{ V}$, 且 $U_i > U_Z$ 时, 试绘出电路输出电压 u_o 的波形。

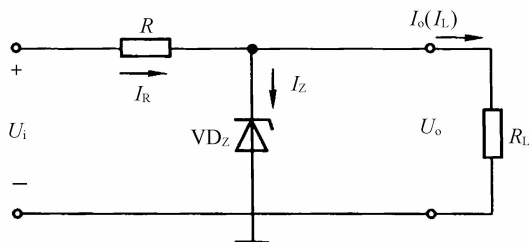


图 1-22 例 1-2-2 电路图

分析: 用稳压管组成电路时, 必须串接一限流电阻, 将其反向击穿电流限制在稳压管的稳压工作范围之内, 若电流过大, 会使稳压管因热击穿而损坏。限流电阻的取值, 应根据输入电压及负载的变化范围而定。若负载恒定, 并设稳压管的正向导通管压降为 0.6 V , 则电路的电压传输特性如图 1-23 (a) 所示。利用传输特性即可按题意要求绘出电路输出电压的波形。

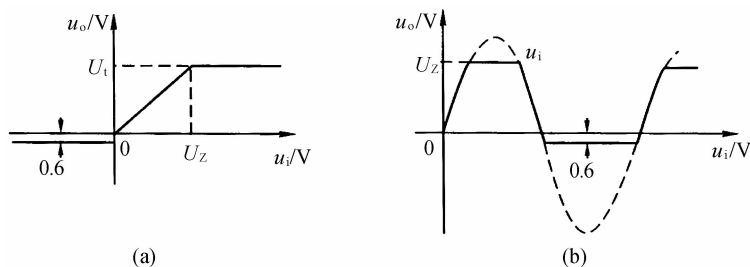


图 1-23 例 1-2-2 波形图

(a) 稳压管 VD_Z 的传输特性; (b) 电路的输入输出波形

解: (1) 确定限流电阻的取值范围

由于 $U_i > U_Z$, 稳压管处于反向击穿即稳压工作状态, 因此当 U_i, R_L 变化时, I_Z 应始终满足 $I_{Z\min} < I_Z < I_{Z\max}$ 。由图 1-23 可知, 当 $U_i = U_{i\min}, R_L = R_{L\min}$ 时, I_Z 最小, 这时应满足

$$\frac{U_{\min} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_{L\min}} > I_{Z\min}$$

即

$$R < \frac{U_{\min} - U_Z}{R_{L\min} I_{Z\min} + U_Z} R_{L\min} = R_{\max}$$

当 $U_i = U_{i\max}, R_L = R_{L\max}$ 时, I_Z 最大, 这时应满足

$$\frac{U_{\min} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_{L\max}} < I_{Z\max}$$



即

$$R > \frac{U_{\text{imax}} - U_Z}{R_{\text{Lmax}} I_{\text{Zmax}} + U_Z} R_{\text{Lmax}} = R_{\text{min}}$$

因此限流电阻的取值范围： $R_{\text{min}} < R < R_{\text{max}}$ 。

(2) 绘制输出电压波形

当输入信号 $u_i = U_i \sin \omega t$ ，且 $U_i > U_Z$ 时，通过电路的传输特性。给出的输出电压 u_o 的波形如图 1-23(b) 所示。

讨论：在确定稳压管的限流电阻时，若出现 $R_{\text{min}} > R_{\text{max}}$ 的结果，则说明在给定条件下，已超出了稳压管的稳压工作范围。此时，需要改变使用条件或重新选择大容量稳压管，以满足电路正常工作。由于稳压管在正向导通时，其特性与普通二极管一致，且 $U_i > U_D$ 。在绘制电路传输特性时，可用理想二极管模型等效稳压管，从而使电路分析更为简便。

1.2.3 发光二极管

(1) 发光二极管的工作原理

发光二极管(LED)是一种将电能直接转换成光能的固体发光器件。制造发光二极管的材料是化合物半导体，如砷化镓、磷砷化镓等。制造 PN 结所用材料不同，光的颜色也不同，例如砷化镓(GaAs)材料发出的是不可见的红外线；磷化镓(GaP)材料发红光或绿光；磷砷化镓(GaAsP)材料发红光或黄光；氮化镓(GaN)材料发蓝光。所以发光二极管的发光颜色有红、绿、黄、蓝等。还有红外发光二极管和激光二极管。其原理是通过正向电流时，PN 结内部 P 型区和 N 型区的多数载流子扩散到对方区域。并与对方区域中的多数载流子复合。而这种复合所释放的能量会产生光辐射。其电路符号和外形如图 1-24。

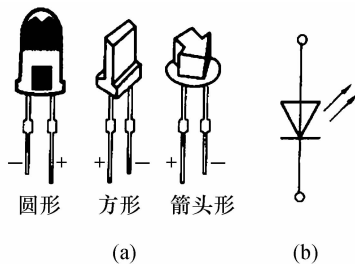


图 1-24 发光二极管

(a) 外形；(b) 电路符号

发光二极管的伏安特性与普通小电流二极管相比，除了正向压降较大一些和反向击穿电压较小外，在电气性能方面基本相同。发光二极管的正向压降大约为 1.3~2.5 V (材料不同压降亦不同)，反向击穿电压一般为 5~6 V。工作电流通常在几毫安到十几毫安之间。一般来说，发光二极管的发光亮度与正向电流的大小有关。在正向电流 1 mA 以内发光二极管已开始发光，在 1~10 mA 亮度与电流大小成正比，超过 25 mA，亮度随



电流增大而变慢。此外,发光二极管还有响应速度快、寿命长、稳定性好、抗震性强、体积小等优点。

(2) 发光二极管的应用

发光二极管的应用极其广泛,下面仅举几个简单例子予以说明。

① 电源指示灯和工作指示灯。在许多电子设备中,都会采用发光二极管作为电源指示灯和工作状态指示灯。用来指示设备工作情况。当发光二极管用于直流电源的指示时,电路如图 1-25。电阻 R 用来限制回路电流的大小。当发光二极管用于交流电源的指示时,可以采用图 1-26 所示电路,在(a)图中为避免在交流电的负半周 LED 因反向电压过高而损坏。将一普通二极管与 LED 串联,二极管的最高反向工作电压要大于交流电的峰值电压。在(b)图中,普通二极管与 LED 反向并联,可保证 LED 承受的反压只有零点几伏。限流电阻 R 的大小用来调整 LED 的亮度(注意要核算限流电阻的消耗功率,并由此决定其额定功率)。

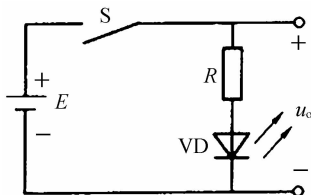


图 1-25 发光二极管用于直流电源指示

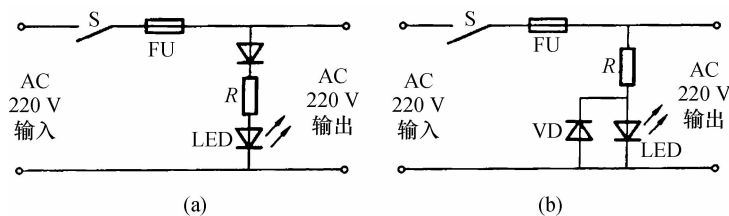


图 1-26 发光二极管用于交流电源指示

② 数码显示器。数码显示器可以显示从 0~9 的阿拉伯数字,7 个 LED 组成了显示器的各段,从 0~9 的所有数字都可以让相应的段通过电流显示出来,如图 1-27 所示。

③ 电压超限报警。LED 与稳压二极管配合,可以组成一个简单的电压越限报警电路,如图 1-28 所示。图中若稳压管的稳压值为 U_Z ,则当电源电压超过 $U_Z + U_D$ 后,驱动 LED 亮。发出报警信号。当然,如果采用本书后面介绍的电路,可以组成检测精度高、功能完善的电压超限报警电路。

④ 作为光电检测中的光源。由于 LED 有驱动功率小、使用寿命长、耐振等特点,是小功率便携式光电检测、遥控设备中首选的辐射光源。比如红外发光二极管大量用于各种音响设备中的红外遥控器、计算机鼠标中的位置检测、软盘驱动器中磁盘道检测。激光二极管是

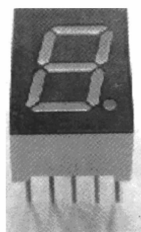


图 1-27 LED 数码管

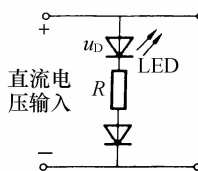


图 1-28 简单的超限报警电路

计算机的光盘驱动器、CD、VCD、DVD 和激光打印机等设备中的激光源。

⑤在光通信设备中作为光辐射源。由于发光二极管的响应速度快,可以将频率较高的脉冲信号转换成光信号。经过光纤传输后,用光电器件接收,还原成电信号。由于光纤传输光信号的过程不受电磁干扰的影响,且传输信息容量大,是当今一种非常重要的信息传输手段。

利用发光二极管和光电器件可以实现两个相互绝缘隔离的电路系统之间的电—光—电信号的转换。光电耦合器就是这样的一类器件。

⑥照明用点光源。由于发光二极管具有工作电压低,电流小的特点,在各种电子仪器设备中常用作照明光源。如手机的液晶显示屏照明、收音机的刻度照明、汽车仪表盘照明等。

1.2.4 光电二极管

光电二极管又称为光敏二极管。光电二极管的符号如图 1-29 所示,其工作原理恰好与发光二极管相反。当光线照射到光电二极管的 PN 结时,能激发更多的电子,使之产生更多的电子空穴对,从而提高了少数载流子的浓度。在 PN 结两端加反向电压时反向电流会增加,反向电流的大小与光的照度成正比,所以光电二极管正常工作时所加的电压为反向电压。为使光线能照射到 PN 结上,在光电二极管的管壳上设有一个小的通光窗口。

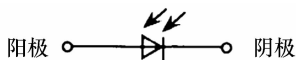


图 1-29 光电二极管的电路符号

光电二极管应用广泛,如冲床安全保护装置就是光电二极管应用的具体例子。把光电二极管安装在冲床工件的前面。正常时有光照射到光电二极管上,光电二极管有光电流,冲床可以启动,当操作人员的手未离开工件而将光路挡住时,光电二极管无光电流,发出禁止启动冲床的信号,起到安全保护作用。

光电二极管可用于光的测量。当制成大面积光电二极管时,能将光能直接转换成电能,可当作一种电源,称为光电池。



1.3 半导体三极管

半导体三极管又称为晶体管、双极性三极管,它们是组成各种电子电路的核心器件极管有 3 个电极,其外形如图 1-30 所示。

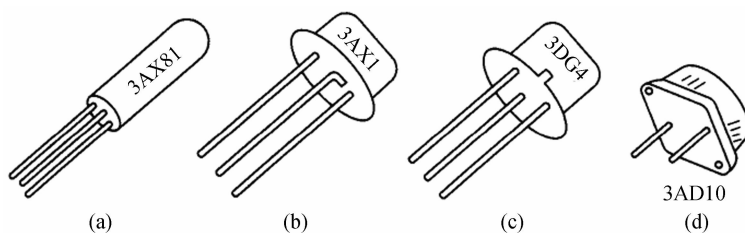


图 1-30 几种半导体三极管的外形

1.3.1 三极管的结构及类型

若将两个 PN 结“背靠背”地(同极区相对)连接起来(用工艺的办法制成),则组成三极管。按 PN 结的组合方式,三极管有 PNP 和 NPN 两种类型,其结构示意图和符号如图 1-31 所示。

无论是 PNP 型或是 NPN 型,它们均包含 3 个区:发射区、基区和集电区,并相应地引出 3 个电极:发射极(e)、基极(b)和集电极(c)。同时,在 3 个区的两两交界处,形成两个 PN 结,分别称为发射结和集电结。常用的半导体材料有硅和锗,因此共有 4 种三极管类型,它们对应的型号分别为 3A(锗 PNP)、3B(锗 NPN)、3C(硅 PNP)、3D(硅 NPN)4 种系列。由于硅 NPN 三极管用得最广,故在无特殊说明时,下面均以硅 NPN 三极管为例讲述。

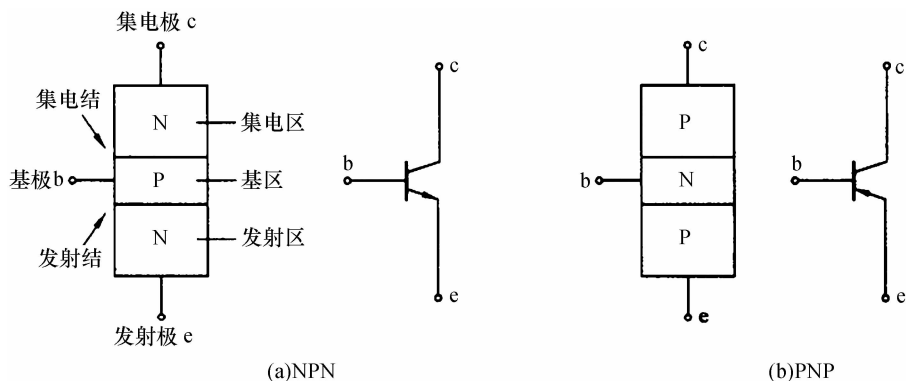


图 1-31 三极管的结构示意图和符号



1.3.2 三极管的3种连接方式

因为放大器一般是4端网络,而三极管只有3个电极,所以组成放大电路时,有一个电极作为输入与输出信号的公共端。根据所选择的公共端电极的不同,三极管有共发射极、共基极和共集电极3种不同的连接方式(指对交流信号而言),如图1-32所示。

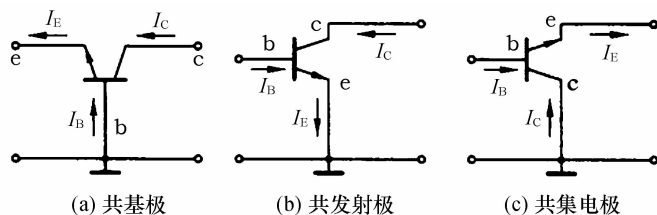


图 1-32 三极管的3种连接方式

1.3.3 电流的分配和放大原理

三极管尽管从结构上看,相当于两个二极管背靠背地串联在一起,但是,当我们用单独的两个二极管按上述关系串联起来时将会发现,它们并不具有放大作用。其原因是,为了使三极管实现放大,必须由三极管的内部结构和外部条件来保证。

从三极管的内部结构来看,应具有以下3点:

第一,发射区进行重掺杂,因而多数载流子电子浓度远大于基区多数载流子空穴浓度。

第二,基区做得很薄,通常只有几微米到几十微米,而且是低掺杂。

第三,集电极面积大,以保证尽可能收集到发射区发射的电子。

从外部条件来看,外加电源的极性应保证发射结处于正向偏置状态,集电极处应处于反向偏置状态。

在满足上述条件下,我们来分析放大过程(由于共发射极应用广泛,故下面以共发射极为例)。

(1) 载流子的传输过程

我们分3个过程讨论三极管内部载流子的传输过程。

①发射。由于发射结正向偏置,则发射区的电子大量地扩散注入到基区,与此同时,基区的空穴也向发射区扩散。由于发射区是重掺杂,因而注入到基区的电子浓度远大于基区向发射区扩散的空穴数,在下面的分析中,将这部分空穴的作用忽略不计。

②扩散和复合。由于电子的注入,使基区靠近发射结处电子浓度很高。集电结反向运用,使靠近集电结处的电子浓度很低(近似为0)。因此,在基区形成电子浓度差,从而电子靠扩散作用,向集电区运动。电子扩散的同时,在基区将与空穴相通产生复合。由于基区空穴浓度比较低,且基区做得很薄,因此,复合的电子是极少数,绝大多数电子均能扩散到集电结处,被集电极收集。



③收集。由于集电结反向运用,在结电场作用下,通过扩散到达集电结的电子将做漂移运动,到达集电区。因为集电结的面积大,所以基区扩散过来的电子,基本上全部被集电区收集。

此外,因为集电结反向偏置,所以集电区中的空穴和基区中的电子(均为少数载流子)在电场作用下做漂移运动。上述载流子的传输过程如图 1-33 所示。

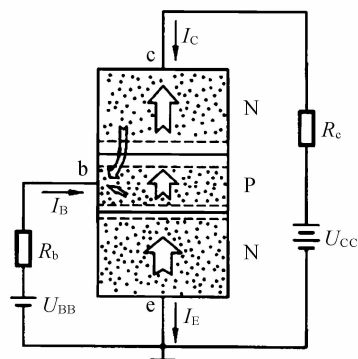


图 1-33 三极管中载流子的传输过程

(2) 电流分配

载流子的运动即形成相应的电流,其电流关系如图 1-34 所示。

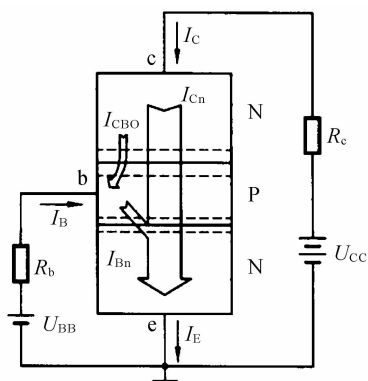


图 1-34 三极管电流分配

集电极电流 I_C 由两部分组成: I_{Cn} 和 I_{CBO} ,前者是由发射区发射的电子被集电极收集后形成的,后者是由集电区和基区的少数载流子漂移运动形成的,称为反向饱和电流。于是有

$$I_C = I_{Cn} + I_{CBO} \quad (1-10)$$

发射极电流 I_E 也由两部分组成: I_{En} 和 I_{Ep} 。 I_{En} 为发射区发射的电子所形成的电流, I_{Ep} 是由基区向发射区扩散的空穴所形成的电流。因为发射区是重掺杂,所以 I_{Ep} 可忽略不计,即 $I_E \approx I_{En}$ 。 I_{En} 又分成两部分,主要部分是 I_{Cn} ,极少部分是 I_{Bn} 。 I_{Bn} 是电子在基区与空穴复合



时所形成的电流,基区空穴是由电源 U_{BB} 提供的,故它是基极电流的一部分。

$$I_E \approx I_{En} = I_{Cn} + I_{Bn} \quad (1-11)$$

基极电流 I_B 和 I_{Bn} 与 I_{CBO} 之差为

$$I_B = I_{Bn} - I_{CBO} \quad (1-12)$$

我们希望发射区注入的电子绝大多数能够到达集电极,形成集电极电流,即要求 $I_{Cn} > I_{Bn}$ 。

通常用共基极直流电流放大系数衡量上述关系,用 $\bar{\alpha}$ 来表示,其定义为

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{Cn}}{I_{En}} \approx \frac{I_{Cn}}{I_E} \quad (1-13)$$

一般三极管的 $\bar{\alpha}$ 值为 $0.97 \sim 0.99$ 。将上式代入(1-10)可得

$$I_C = I_{Cn} + I_{CBO} = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO} \quad (1-14)$$

通常 $I_C \gg I_{CBO}$, 可将 I_{CBO} 忽略,有上式可得出

$$\bar{\alpha} \approx \frac{I_C}{I_E} \quad (1-15)$$

如将基极作为输入,集电极作为输出,我们希望知道 I_C 和 I_B 的关系式,推导如下。

三极管的 3 个极的电流满足节点电流定律,即

$$I_E = I_C + I_B \quad (1-16)$$

将上式代入可得

$$I_C = \bar{\alpha}(I_C + I_B) + I_{CBO}$$

经过整理后得

$$I_C = \frac{\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} I_B + \frac{1}{1-\bar{\alpha}} I_{CBO}$$

令

$$\bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} \quad (1-17)$$

$\bar{\beta}$ 称为共发射极直流电流放大系数。当 $I_C \gg I_{CBO}$ 时, $\bar{\beta}$ 又可以写成

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1-18)$$

则

$$I_C = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \quad (1-19)$$

其中 I_{CEO} 称为穿透电流,即

$$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \quad (1-20)$$

一般三极管的 $\bar{\beta}$ 约为几十至几百。 $\bar{\beta}$ 太小,管子的放大能力就差,而 $\bar{\beta}$ 过大则管子性能不够稳定。

为了对三极管的电流关系增加一些感性认识,我们将某个实际晶体管的电流关系列于表 1-4。



表 1-4 三极管电流关系的一组典型数据

I_B/mA	-0.001	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
I_C/mA	0.001	0.01	0.56	1.14	1.74	2.33	2.91
I_E/mA	0	0.01	0.57	1.16	1.77	2.37	2.96

从上表可看出,任一行 3 个电流之间的关系均符合公式 $I_E = I_C + I_B$,而且除第一、二列外均符合一如关系

$$I_B < I_C < I_E, I_C \approx I_E$$

我们还可以看出,当三极管的基极电流 I_B 有一个微小的变化时,如由 0.02 mA 变 0.04 mA ($\Delta I_B = 0.02 \text{ mA}$),相应的集电极电流产生了较大的变化,由 1.14 mA 变为 2.33 mA ($\Delta I_C = 1.19 \text{ mA}$),这就说明了三极管的电流放大作用。我们定义这两个变化电流之比为共发射极交流电流放大系数,即

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}=\text{常数}} \quad (1-21)$$

相应地,将集电极电流与发射极电流的变化量之比,定义为共基极交流电流放大系数,即

$$\bar{\beta} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \right|_{U_{CB}=\text{常数}} \quad (1-22)$$

故

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E - \Delta I_C} = \frac{\Delta I_C \Delta I_E}{1 - \Delta I_C / \Delta I_E} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (1-23)$$

显然, β 与 $\bar{\beta}$, α 与 $\bar{\alpha}$ 其意义是不同的,但在多数情况下 $\beta \approx \bar{\beta}$, $\alpha \approx \bar{\alpha}$ 。例如,从表 1-4 知,在 $I_B = 0.03 \text{ mA}$ 附近,设有 I_B 由 0.02 mA 变为 0.04 mA,可求得

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.33 - 1.14}{0.04 - 0.02} = 59.5$$

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.74}{0.03} = 58$$

$$\alpha = \frac{2.33 - 1.14}{2.37 - 1.16} = 0.983$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1.74}{1.77} = 0.983$$

这就证实了上述近似关系,所以,今后我们不再严格地区分 β 与 $\bar{\beta}$, α 与 $\bar{\alpha}$ 。

1.3.4 特性曲线

三极管外部各极电压电流的相互关系,当用图形描述时称为三极管的特性曲线。它既简单又直观,全面地反映了各极电流与电压之间的关系。特性曲线与参数是选用三极管的主要依据。特性曲线通常用晶体管特性图示仪显示出来,其测试电路如图 1-35 所示。三极



管的不同连接方式,有不同的特性曲线,因共发射极用得最多,为此,我们只讨论共发射极特性曲线。下面讨论 NPN 三极管的共发射极输入特性和输出特性。

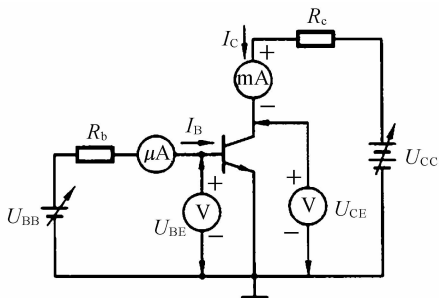


图 1-35 三极管共发射极特性曲线测试电路

(1) 输入特性

当 U_{CE} 不变时,输入回路中的电流 I_B 与电压 U_{BE} 之间的关系曲线称为输入特性,即

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

输入特性如图 1-36 所示。

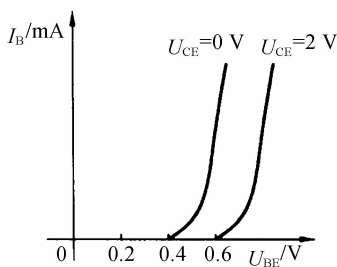


图 1-36 三极管的输入特性

$U_{CE} = 0 \text{ V}$ 时,从三极管的输入回路看,相当于两个 PN 结(发射结合集电极)并联。当 b, e 间加上正电压时, e 间加上正电压时,三极管的输入特性就是两个正向二极管的伏安特性。

$U_{CE} \geq 1 \text{ V}$, b, e 间加正向电压,此时集电极的电位比基极高,集电结为反向偏置,阻挡层变宽,基区变窄,基区电子复合减少,故基极电流下降。与 $U_{CE} = 0 \text{ V}$ 时相比,在相同的条件下, I_B 要小得多。结果输入特性将右移。

当 U_{CE} 继续增大时,严格地讲,输入特性应该继续右移。但是,当 U_{CE} 大于某一数值以后(如 1 V),在一定的 U_{CE} 之下,集电结的反向偏置电压已足以将注入基区的电子基本上都收集到集电极,此时 U_{CE} 再增大, I_B 变化不大。因此, $U_{CE} > 1 \text{ V}$ 以后,不同 U_{CE} 值的各条输入特性几乎重叠在一起。所以,常用 $U_{CE} > 1 \text{ V}$ (如 2 V) 的一条输入特性曲线来代表 U_{CE} 更高的情况。



在实际的放大电路中意义。三极管的 U_{CE} 一般都大于零, 因而 $U_{CE} > 1 \text{ V}$ 的特性更具有实用意义。

(2) 输出特性

当 I_B 不变时, 输出回路中的电流 I_C 与电压 U_{CE} 之间的关系曲线称为输出特性, 即

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

固定一个 I_B 值, 得一条输出特性曲线, 改变 I_B 值后可得一条输出特性曲线, 如图 1-37 所示。在输出特性上可以划分为 3 个区域: 截止区、放大区和饱和区。

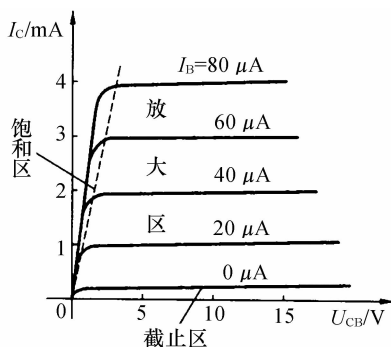


图 1-37 三极管的输出特性

①截止区。一般将 $I_B \leq 0$ 的区域称为截止区, 在图 1-37 中为 $I_B = 0$ 的一条曲线的以下部分。此时 I_C 也近似为零。由于各极电流都基本上等于零, 因而此时三极管没有放大作用。

其实 $I_B = 0$ 时, I_C 并不等于零, 而是等于穿透电流 I_{CEO} 。一般硅三极管的穿透电流小于 $1 \mu\text{A}$, 在特性曲线上无法表示出来。锗三极管的穿透电流约几十至几百微安。

当发射结反向偏置时, 发射区不再向基区注入电子, 则三极管处于截止状态。所以, 在截止区, 三极管的两个结均处于反向偏置状态。对 NPN 三极管, $U_{BE} < 0, U_{BC} < 0$ 。

②放大区。此时发射结正向运用, 集电结反向运用。在曲线上是比较平坦的部分, 表示当 I_B 一定时, I_C 的值基本上不随 U_{CE} 而变化。在这个区域内, 当基极电流发生微小的变化量 ΔI_B 时, 相应的集电极电流将产生较大的变化量 ΔI_C , 此时二者的关系为

$$\Delta I_C = \beta \Delta I_B$$

该式体现了三极管的电流放大作用。对于 NPN 三极管, 工作在放大区时 $U_{BE} > 0.7 \text{ V}$, 而 $U_{BC} < 0$ 。

③饱和区。曲线靠近纵轴附近, 各条输出特性曲线的上升部分属于饱和区。在这个区域, 不同 I_B 值的各条特性曲线几乎重叠在一起, 即当 U_{CE} 较小时, 管子的集电极电流 I_C 基本上不随基极电流 I_B 而变化, 这种现象称为饱和。此时三极管失去了放大作用, $I_C = \bar{\beta} I_B$ 或者是 $\Delta I_C = \bar{\beta} \Delta I_B$ 关系不成立。

一般认为 $U_{CE} = U_{BE}$, 即 $U_{CB} = 0$ 时, 三极管处于临界饱和状态, 当 $U_{CE} < U_{BE}$ 时称为过饱



和。三极管饱和时的管压降用 U_{CES} 表示。深度饱和时,小功率管管压降通常小于 0.3 V 。

三极管工作在饱和区时,发射结和集电结都处于正向偏置状态。对 NPN 三极管 $U_{BE} > 0, U_{BC} > 0$ 。

1.3.5 主要参数

三极管参数描述了三极管的性能,是评价三极管质量以及选择三极管的依据

(1) 电流放大系数

三极管的电流放大系数是表征管子放大作用的参数。按前面讨论,有如下几种。

① 共发射极交流电流放大系数 β 。 β 体现共射极接法之下的电流放大作用。

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}=\text{常数}}$$

② 共发射极直流电流放大系数 $\bar{\beta}$, 由上式得

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B}$$

当 $I_C \gg I_{CEO}$ 时, $\beta \approx I_C / I_B$ 。

③ 共基极交流直流放大系数 α 。 α 体现共基极接法下的电流放大作用。

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$$

④ 共基极直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$ 。在忽略反向饱和电流 I_{CBO} 时

$$\bar{\alpha} \approx \frac{I_C}{I_E}$$

(2) 极间反向电流

① 集电极-基极反向饱和电流 I_{CBO} 。它表示当 e 极开路时, c 和 b 之间的反向电流, 测量电路如图 1-38(a) 所示。

② 集电极-发射极穿透电流 I_{CEO} 。它表示当 b 极开路时, c 和 e 之间的电流, 测量电路如图 1-38(b) 所示。

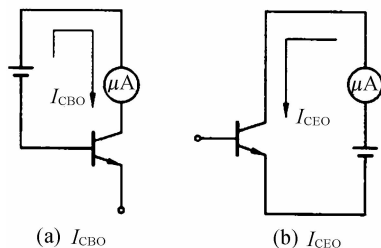


图 1-38 三极管间反向电流的测量

实际工作中使用三极管时,要求所选用管子的 I_{CBO} 和 I_{CEO} 尽可能小。它们越小,则表明三极管的质量越高。



(3) 极限参数

三极管的极限参数是指使用时不得超过的极限值,以保证三极管安全工作或工作性能正常。

①集电极最大允许电流 I_{CM} 。由于三极管电流放大系数 β 值与工作电流有关,其关系曲线如图 1-39 所示。从曲线可看出工作电流太大,将使 β 值下降得太多,使三极管性能下降,放大的信号产生严重失真。一般定义当 β 值下降为正常值的 $1/3 \sim 2/3$ 时的 I_C 值为 I_{CM} 。

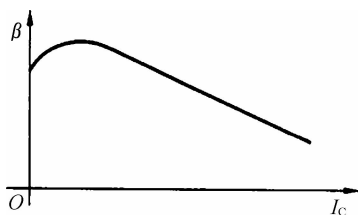


图 1-39 β 与 I_C 关系曲线

②集电极最大允许功率损耗 P_{CM} 。当三极管工作时,管子两端电压为 U_{CE} ,集电极电流为 I_C ,因此集电极损耗的功率为

$$P_C = I_C U_{CE}$$

集电极消耗的电能将转化为热能,使管子的温度升高,这会使三极管的性能恶化,甚至被损坏,因而应加以限制。将 I_C 与 U_{CE} 的乘积等于 P_{CM} 值的各点连接起来,可得一条双曲线,如图 1-40 所示。双曲线下区域 $P_C < P_{CM}$ 为安全区;上方区域 $P_C > P_{CM}$ 为过耗区,易烧坏管子。

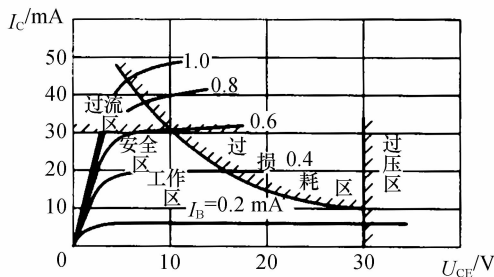


图 1-40 三极管的安全工作区

需要指出的是, P_{CM} 与工作环境温度有关,如工作环境温度高或散热条件差,则 P_{CM} 值下降。

(4) 反向击穿电压

反向击穿电压表示使用三极管时外加在各电极之间的最大允许反向电压,如果超过这个限度,则管子的反向电流急剧增大,可能损坏三极管。反向击穿电压有以下几项:

BU_{CBO} ——发射极开路时,集电极-基极间的反向击穿电压。

BU_{CEO} ——基极开路时,集电极-发射极间的反向击穿电压。



BU_{CER} ——基射极间接有电阻 R 时,集电极-发射极间的反向击穿电压。

BU_{CES} ——基射极间短路时,集电极-发射极间的反向击穿电压。

BU_{EBO} ——集电极开路时,发射极-基极间的反向击穿电压,此电压一般较小,仅有几伏左右。

上述电压一般存在如下关系

$$BU_{\text{CBO}} > BU_{\text{CES}} > BU_{\text{CER}} > BU_{\text{CEO}} > BU_{\text{EBO}}$$

由于 BU_{EBO} 最小,因此,使用时 $U_{\text{CE}} < BU_{\text{EBO}}$ 即可安全工作。

由上可见,三极管应工作在安全工作区,而安全工作区受到一定的限制。图 1-40 表示了三极管的安全工作区。

1.3.6 温度对三极管参数的影响

由于半导体的载流子浓度受温度影响,因而,三极管的参数也会受温度影响,这将严重地影响到三极管电路的热稳定性。通常,半导体三极管的如下参数受温度影响比较明显。

(1) 温度对 U_{BE} 的影响

输入特性曲线随温度升高向左移。即 I_{B} 不变时, U_{BE} 将下降,其变化规律是温度每升高 1°C , U_{BE} 减小 $2 \sim 2.5 \text{ mV}$, 即

$$\frac{\Delta U_{\text{BE}}}{\Delta T} = -2.5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$$

(2) 温度对 I_{CBO} 的影响

I_{CBO} 是由少数载流子形成的。当温度上升时,少数载流子增加,故 I_{CBO} 也上升。其变化规律是,温度每上升 10°C , I_{CBO} 约上升 1 倍。 I_{CEO} 随温度变化规律大致与 I_{CBO} 相同。在输出特性曲线上,温度上升,曲线上移。

(3) 温度对 β 的影响

β 随温度升高而增大,变化规律是:温度每升高 1°C , β 值增大 $0.5\% \sim 1\%$, 在输出特性曲线图上,曲线间的距离随温度升高而增大。

综上所述:温度对 U_{BE} 和 I_{CB}/β 的影响,均使 I_{C} 随温度上升而增加,这严重影响三极管的工作状态,其后果如何以及如何克服,将在以后的相关章节讲述。表 1-5 给出了部分三极管的典型参数。



表 1-5 三极管的典型参数

参数 型号	直流参数			交流参数		极限参数			备注
	I_{CBO} / μA	I_{CBO} / μA	β	f_T /MHz	C_P /pF	I_{CM} /mA	BU_{CBO} /V	P_{CM} /mW	
3AX31B	≤ 10 ≤ 30	≤ 750 $\leq 1\ 000$	50~150 30~250	$f_{\beta} \geq 8$ kHz $f_{\beta} \geq 10$ kHz		125 200	≥ 18 10	125 200	PNP 合金型锗管, 用于低频放大以及甲类和乙类功率放大电路
3AG6E 3AG11	≤ 10 ≤ 30		30~250	≥ 100 ≥ 30	≤ 3 ≤ 15	10 10	≥ 10 10	50 30	PNP 合金扩散型锗管, 用于高频放大及低频功率放大
3AD6A 3AD18C	≤ 400 ≤ 1000	≤ 2500	≥ 12 ≥ 15	$f_{\beta} \geq 2$ kHz $f_{\beta} \geq 100$ kHz		2A 15A	18 60	10 W	PNP 合金扩散型锗管, 用于低频功率放大
3DG6C 3DG12C	≤ 0.01 ≤ 1	≤ 0.01 ≤ 10	20~200 20~200	≥ 250 ≥ 300	≤ 3 ≤ 15	20 300	20 30	100 700	NPN 外延平面型硅管, 用于中频放大、高频放大及振荡电路
3DD1C 3DD8B	< 15 100	< 50	> 12 10~20	$f_{\beta} \geq 200$ kHz		3.00 7.5A	≥ 15 60	1 W 100 W (加散热板)	NPN 外延平面硅管, 用于低频功率放大电路
3DA14C 3DA28D	≤ 10 ≤ 200	≤ 50 ≤ 1000	≥ 20 ≥ 20	≥ 200 ≥ 50	≤ 30 ≤ 40	1A 1.5A	45 90	5 W (加散热板) 1 W (不加散热板) 10 W (加散热板)	NPN 外延平面硅管, 用于高频功率放大、振荡等电路
3CG1E 3CG2C	≤ 0.5 ≤ 0.5	≤ 1 ≤ 1	35 > 20	> 80 > 60	≤ 10 < 15	35 60	50 20	350 600	PNP 平面型硅管, 用于高频放大和振荡电路

1.3.7 特殊三极管

(1) 带阻尼三极管

带阻尼三极管是将三极管与阻尼二极管、保护电阻封装为一体构成的特殊三极管, 常用于彩色电视机和计算机显示器的行扫描电路中。

(2) 达林顿管

达林顿管是复合管的一种连接形式。它是将两只三极管或更多只三极管集电极连在一



起,而将第一只三极管的发射极直接耦合到第二只三极管的基极,依次级联而成。达林顿管的放大系数很高,主要用于高增益放大电路、电动机调速、逆变电路及继电器驱动、LED 显示屏驱动等控制电路。

(3) 差分对管

差分对管是将两只性能参数相同的三极管封装在一起构成的电子器件,一般用在音频放大器或仪器、仪表的输入电路做差分放大管。

(4) 带阻三极管

带阻三极管是指基极和发射极之间接有一只或两只电阻并与晶体管封装为一体的三极管。由于带阻三极管通常应用在数字电路中,因此带阻三极管有时又被称为数字三极管或数码三极管。带阻三极管通常作为一个中速开关管,在电路中可看作一个电子开关,但其饱和导通时,管压降很小。广泛应用于电视机、影碟机、录像机、DVD 及显示器等家电产品中。

1.4 场效应管

场效应管根据结构的不同,可分为两大类:结型场效应管 JFET(Junction Field Effect Transistor)和绝缘栅型场效应管 IGFET(Insulated Gate Field Effect Transistor)。

1.4.1 结型场效应管

1. N 沟道 JFET

(1) 管子结构

结型场效应管的结构与绝缘栅场效应管相似,工作机理也相同。结型场效应管的结构和符号如图 1-41 所示,它是在 N 型半导体硅片的两侧各制造一个 PN 结,形成两个 PN 结夹着一个 N 型沟道的结构。两个 P 区即为栅极,N 型硅的一端是漏极,另一端是源极。

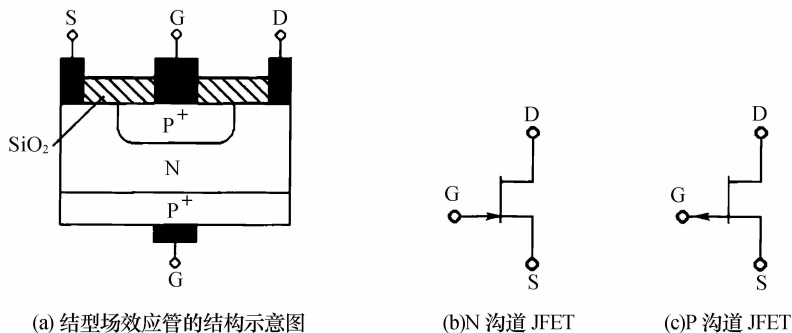


图 1-41 结型场效应管



(2) 工作原理

根据结型场效应管的结构,因它没有绝缘层,只能工作在反偏的条件下,对于N沟道结型场效应管只能工作在负栅压区,P沟道的只能工作在正栅压区,否则会出现栅流。现以N沟道为例说明其工作原理。

① 栅源电压对沟道的控制作用

当 $U_{CS} = 0$ 时,在漏、源之间加有一定电压时,在漏源间形成多子的漂移运动,产生漏极电流 I_D 。当 $U_{CS} < 0$ 时,PN结反偏,形成耗尽层,漏源间的沟道将变窄, I_D 将减小, U_{CS} 继续减小,沟道继续变窄, I_D 继续减小直至为0。当漏极电流为0时所对应的栅源电压 U_{CS} 称为夹断电压 $U_{CS(off)}$ 。这一过程如图1-42所示。

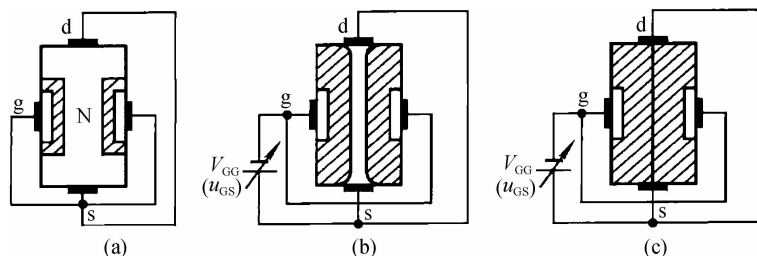


图 1-42 U_{CS} 对沟道的控制作用

② 漏源电压对沟道的控制作用

在栅极加有一定的电压,且 $U_{CS} > U_{CS(off)}$,若漏源电压 U_{DS} 从零开始增加,则 $U_{GD} = U_{GS} - U_{DS}$ 将随之减小,使靠近漏极处的耗尽层加宽,沟道变窄,从左至右呈楔形分布,如图1-43(a)所示。当 U_{DS} 增加到使 $U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} = U_{CS(off)}$ 时,在紧靠漏极处出现预夹断,如图1-43(b)所示。当

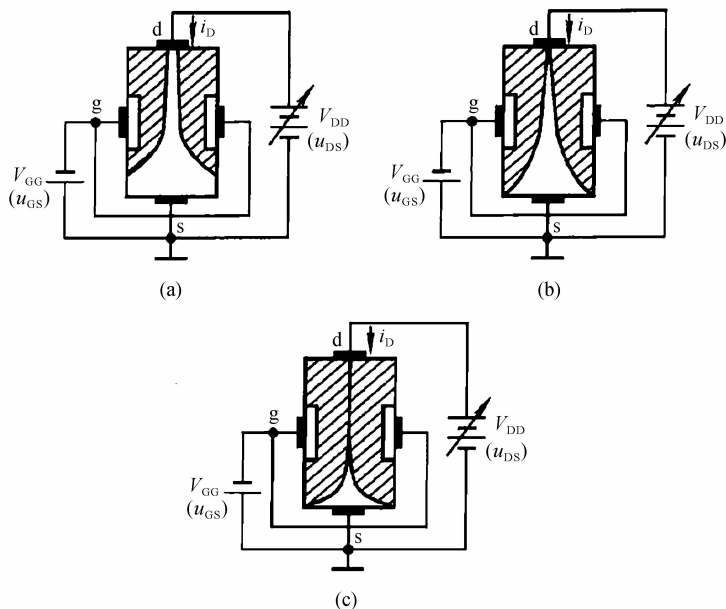


图 1-43 漏源电压对沟道的控制作用



U_{DS} 继续增加,漏极处的夹断继续向源极方向生长延长,如图 1-43(c)所示。

③漏极输出特性曲线与转移特性曲线

结型场效应管的特性曲线有两条:一是转移特性曲线,二是输出特性曲线。它与绝缘栅场效应管的特性曲线基本相同,只不过绝缘栅场效应管的栅压可正、可负,而结型场效应管的栅压只能是 P 沟道的为正或 N 沟道的为负。结型场效应管在恒流区转移特性曲线可以近似表示为:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$$

式中: I_{DSS} 是 $U_{GS} = 0$ V 时对应的 I_D ; U_P 是夹断电压。

1.4.2 绝缘栅型场效应管(MOS 管)

绝缘栅型场效应管是利用半导体表面的电场效应进行工作的,由于它的栅极处于不导电(绝缘)状态,因此,输入电阻很高,最高可达 $10^{18} \Omega$ 。

绝缘栅型场效应管又称为金属-氧化物-半导体场效应管(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor,简称 MOSFET 或 MOS 场效应管)。它有 N 沟道和 P 沟道两类,其中每一类又可分为增强型和耗尽型两种。所谓耗尽型就是当 $u_{GS} = 0$,存在导电沟道, $i_D \neq 0$;所谓增强型是指 $u_{GS} = 0$ 时,没有导电沟道,即 $i_D = 0$ 。例如,N 沟道增强型,只有当 $u_{GS} > 0$ 时才有可能开始有 i_D 。P 沟道和 N 沟道 MOS 管的工作原理类似,本节首先讨论 N 沟道增强型 MOSFET,然后指出其他管子特点。

1. N 沟道增强型 MOSFET

(1) 结构

如图 1-44 所示 N 沟道增强型 MOSFET,它基本上是一种左右对称的拓扑结构,它是在 P 型半导体上生成一层 SiO_2 薄膜绝缘层,然后用光刻工艺扩散两个高掺杂的 N 型区,从 N 型区引出电极,一个是漏极 D,一个是源极 S。在源极和漏极之间的绝缘层上镀一层金属铝作为栅极 G。P 型半导体称为衬底,用符号 B 表示。衬底引出引线 B,将它与源极连在一起。图 1-44 (b)是其电路符号,其箭头的方向表示由 P 型衬底指向 N 型沟道。

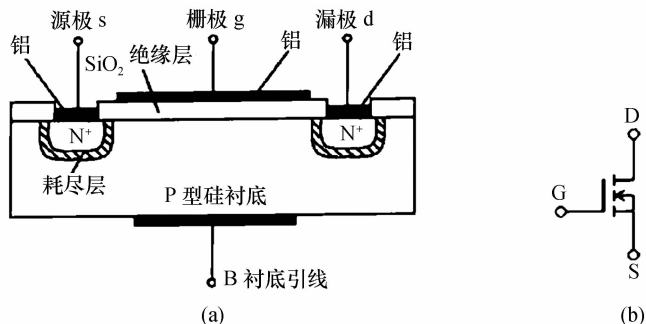


图 1-44 N 沟道增强型 MOSFET 的结构示意图和符号



(2) 工作原理

① 栅源电压 U_{GS} 的控制作用

当 $U_{GS} = 0 \text{ V}$ 时,漏源之间相当两个背靠背的二极管,不论在 D 和 S 之间加不加电压,都不会在 D 和 S 间形成电流 I_D 。

当栅极加有电压时,若 $0 < U_{GS} < U_{GS(th)}$ ($U_{GS(th)}$ 称为开启电压)时,通过栅极和衬底间的电容作用,将靠近栅极下方的 P 型半导体中的空穴向下方排斥,同时出现了一薄层负离子的耗尽层。耗尽层中的少子(电子)将向表层运动,但数量有限,不足以形成沟道,将漏极和源极沟通,所以仍然不足以形成漏极电流 I_D 。进一步增加 U_{GS} 。当 $U_{GS} > U_{GS(th)}$ 时,由于栅极电压已经比较强,在靠近栅极下方的 P 型半导体表层中聚集较多的电子,可以形成沟道,将漏极和源极沟通。如果此时加有漏源电压 U_{DS} ,就可以形成漏极电流 I_D 。在栅极下方形成的导电沟道的电子,因与 P 型半导体的载流子空穴极性相反,故称为反型层。随着 U_{GS} 的继续增加, I_D 将不断增加。在 $U_{GS} = 0 \text{ V}$ 时, $I_D = 0$,只有当 $U_{GS} > U_{GS(th)}$ 后才会出现漏极电流,这种 MOS 管称为增强型 MOS 管。

② 漏源电压 U_{DS} 对漏极电流 I_D 的控制作用

与场效应管放大时的实际工作情况相同,我们在 $U_{GS} > U_{GS(th)}$,且固定为某一值的情况下,来讨论分析漏源电压 U_{DS} 从小到大变化时,对场效应管的导电沟道和漏极电流 I_D 的影响。 U_{DS} 的不同变化对沟道的影响如图 1-45 所示。根据此图可以有如下关系:

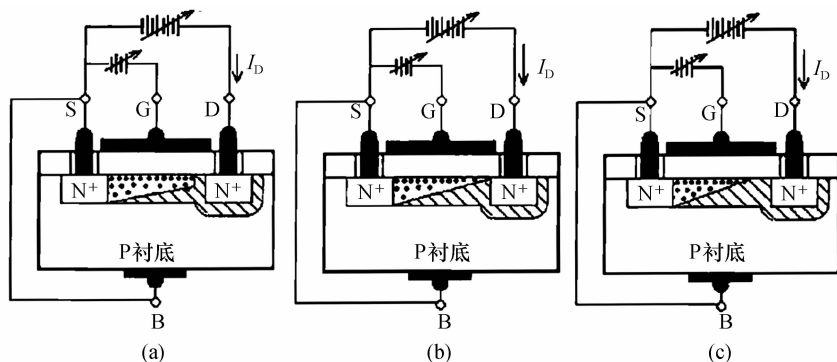


图 1-45 漏源电压 V_{DS} 对沟道的影响

$$U_{DS} = U_{DG} + U_{GS} = -U_{GD} + U_{GS}$$

$$U_{GD} = U_{GS} - U_{DS}$$

当 $U_{DS} = 0$ 时,尽管已经形成了导电沟道,但漏极电流 $I_D = 0$ 。将 U_{DS} 从 0 逐渐增大,将会使沟道中电流迅速增大,因为此时 U_{DS} 较小,相当于 $U_{GD} > U_{GS(th)}$,沟道分布如图 1-45(a)。此时对沟道影响不大, U_{DS} 基本均匀降落在沟道中,所以,在此阶段沟道电阻基本上是一个常数,其大小主要取决于栅源电压 U_{GS} ,而与 U_{DS} 的关系不大。所以,沟道中电流随 U_{DS} 线性增大。但随着 U_{DS} 增大,在导电沟道中出现的横向电场会逐渐增强,方向由漏区指向源区。所以,导电沟道中



不同位置对源极的电位不再相同,越靠近漏区,电位越高。由于此横向电场的存在,使得导电沟道中各点处与栅极之间的垂直电场发生变化,越靠近漏区,电场越小,相应的反型层厚度也将发生变化,越靠近漏区,反型层越薄,导电沟道呈“楔形”分布。因为沟道截面积变小,沟道电阻变大,将使 I_D 随 U_{DS} 迅速增大的趋势得以抑制, I_D 增长速度将变缓。

当 U_{DS} 继续增大到使 $U_{DS} = U_{GS(th)}$ 时,沟道如图 1-45(b) 所示。靠近漏区处的导电沟道将因垂直电场强度进一步减弱而消失,这相当于 U_{DS} 增加使漏极处沟道缩减到刚刚开启的情况,称为预夹断,此时的漏极电流 I_D 基本饱和。当 $U_{DS} < U_{GS(th)}$ 时,沟道如图 1-45(c) 所示。此时,预夹断区域加长,伸向 S 极。 U_{DS} 增加的部分基本降落在随之加长的夹断沟道上, I_D 基本趋于不变。

当 $U_{DS} > U_{GS(th)}$,且固定为某一值时, U_{DS} 对 I_D 的影响,即 $i_D = f(u_{DS})|_{u_{DS} = \text{const}}$,这一关系曲线如图 1-46 所示。这一曲线称为漏极输出特性曲线。

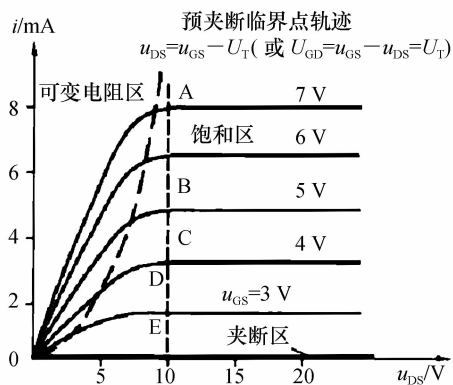


图 1-46 漏极输出特性曲线

在漏极输出特性曲线上可分为四个区,即可变电阻区、恒流区(或饱和区)、夹断区和击穿区。

U_{GS} 对漏极电流的控制关系可用 $i_D = f(u_{GS})|_{u_{DS} = \text{const}}$ 这一曲线描述,称为转移特性曲线,在恒流区转移特性曲线可近似表示为:

$$I_D = I_{D0} \left(\frac{U_{GS}}{U_T} - 1 \right)^2$$

式中: I_{D0} 是 $U_{GS} = 2U_T$ 时对应的 I_D ; U_T 是开启电压。转移特性曲线如图 1-47 所示。

转移特性曲线的斜率 g_m 的大小反映了栅源电压对漏极电流的控制作用。 g_m 的量纲为 mA/V,所以, g_m 也称为跨导、互导。

跨导的定义式如下:

$$g_m = \Delta I_D / \Delta U_{GS} \Big|_{U_{GS} = \text{const}}$$