

项目一

直流稳压电源的制作

知识目标

- ▶ 掌握二极管的外形和电路图形符号；
- ▶ 掌握二极管的相关特性参数；
- ▶ 了解整流电路的基本组成，理解其工作原理，能进行简单的工程计算；
- ▶ 熟悉电容滤波的基本形式，知道滤波电容参数的选用原则；
- ▶ 了解常用的几种特殊二极管的功能及使用常识。

技能目标

- ▶ 掌握直流电源的制作方法；
- ▶ 能看懂简易电源电路原理图；
- ▶ 可在万能电路板上设计安装线路；
- ▶ 可用万用表检测元器件；
- ▶ 会根据电路设计图安装电路；
- ▶ 检查后通电，并用万用表测输出电压值；
- ▶ 用示波器观察变压器次级波形、整流后的波形以及滤波后的波形。

项目分析

在工业或民用电子产品中，其控制电路通常采用直流电源供电。对于直流电源的获取，除了直接采用蓄电池、干电池或直流发电机外，还可以将电网的 380 V/220 V 交流电通过电路转换的方式转换成直流电来获取。

项目分析

简易直流稳压电源电路如图 1-1 所示，试分析其工作原理并制作该电路。

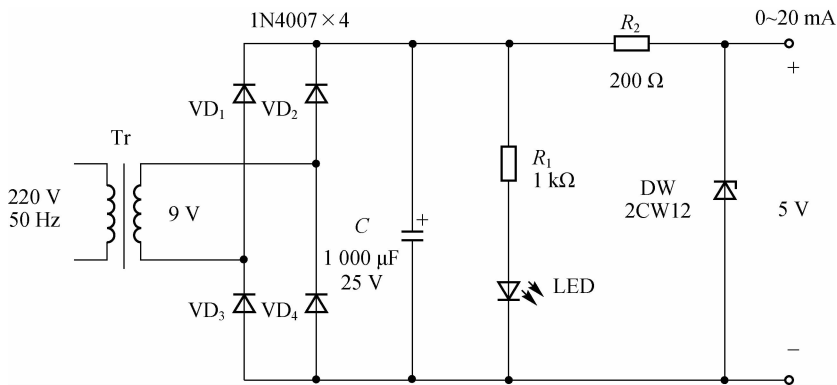


图 1-1 简易直流稳压电源电路

图 1-1 所示的直流稳压电源可用图 1-2 所示的方框图来表示。

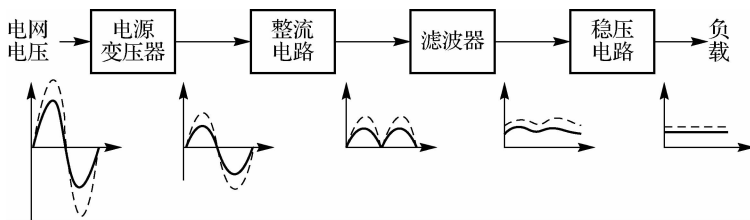


图 1-2 直流稳压电源的方框图

任务一 半导体及二极管

半导体元件是电子线路的核心元件,本任务在介绍半导体的基本知识后,重点介绍了半导体二极管的结构、特性和主要参数,为以后的学习奠定基础。

一、半导体基础知识

物质按导电性能可分为导体、绝缘体和半导体。容易传导电流的物质为导体。导体具有良好的导电特性,常温下其内部存在着大量的自由电子,它们在外电场的作用下做定向运动形成较大的电流,因而导体的电阻率很小,只有 $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$ 。金属一般为导体,如铜、铝、银等。能够可靠地隔绝电流的物质为绝缘体,绝缘体几乎不导电,如橡胶、陶瓷、塑料等。在这类材料中,几乎没有自由电子,即使受外电场作用也不会形成电流,所以,绝缘体的电阻率很大,一般在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,而且其导电能力在外界其他因素的作用下会发生显著的变化。例如,在纯净的半导体(通常称为本征半导体)中掺入极其微量的杂质元素,则它的导电能力将大大增强,利用掺杂半导体可以制造出二极管、三极管、场效应管、晶闸管等半导体器件;温度的变化也会使半导体的导电率发生变化,利用这种热敏效应可以制作出热敏元件,但热敏效应也会使半导体器件的热稳定性下降;光照也可以改变半导体的导电率,利用这种光电效应可以制作出光电二

极管、光电三极管、光电耦合器和光电电池等。综上所述,半导体具有掺杂性、热敏性和光敏性三个特性。

(一)本征半导体

纯净的、不含其他杂质的半导体称为本征半导体。用于制造半导体器件的纯硅和纯锗都是晶体,其原子最外层轨道上有 4 个电子,这些电子称为价电子,它们同属于 4 价元素。在单晶体结构中,原子在空间形成排列整齐的点阵(称为晶格),价电子为相邻的原子所共有,形成图 1-3 所示的共价键结构,图中+4 代表 4 价元素原子核和内层电子所具有的净电荷。共价键中的价电子将受共价键的束缚。在室温或光照下,少数价电子可以获得足够的能量摆脱共价键的束缚成为自由电子,同时在共价键中留下一个空位,如图 1-3 所示。这种现象称为本征激发,这个空位称为空穴,可见本征激发产生的自由电子和空穴是成对的。原子失去价电子后带正电,可等效地看成是因为有了带正电的空穴。空穴很容易吸引邻近共价键中的价电子去填补,使空位发生转移,这种价电子填补空位的运动可以看成空穴在运动,但其运动方向与价电子运动方向相反。自由电子和空穴在运动中相遇时会重新结合而成对消失,这种现象称为复合。温度一定时,自由电子和空穴的产生与复合将达到动态平衡,这时自由电子和空穴的浓度一定。

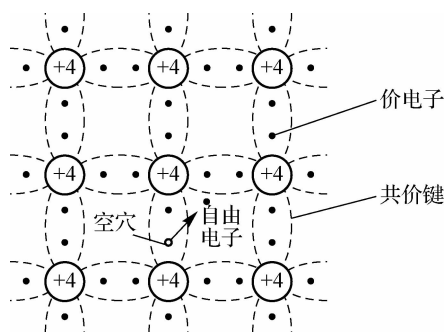


图 1-3 本征半导体结构图

在电场作用下,自由电子和空穴将做定向运动,这种运动称为漂移,所形成的电流称为漂移电流。自由电子又称电子载流子,空穴又称空穴载流子。因此,半导体中有自由电子和空穴两种载流子参与导电,分别形成电子电流和空穴电流。在常温下本征半导体载流子浓度很低,因此导电能力很弱。

(二)杂质半导体

掺入杂质的半导体称为杂质半导体,根据掺入杂质性质的不同,可以分为 N 型半导体和 P 型半导体。载流子以电子为主的半导体称为电子型半导体或 N 型半导体;载流子以空穴为主的半导体称为空穴型半导体或 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体(4 价硅或锗的晶体)中掺入微量 5 价元素,如磷、锑、砷等,则原来晶格中的某些硅(锗)原子将被杂质原子代替,如图 1-4(a)所示,N 型半导体示意图如图 1-4(b)所示。由于杂质原子的最外层有 5 个价电子,因此它与周围 4 个硅(锗)原子组成共价键时,还多余 1 个电子。该电子不受共价键的束缚,而只受自身原子核的束缚,因此,只要得到较少

的能量就能成为自由电子,并留下带正电的杂质离子(不能参与导电)。由于杂质原子可以提供自由电子,故称为“施主原子”或“施主离子”。掺入多少杂质原子就能电离产生多少个自由电子,因此自由电子的浓度将大大增加。这时由本征激发产生的空穴被复合的机会增多,使空穴浓度反而减少。这种以电子导电为主的半导体称为N型(或电子型)半导体,其中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)。

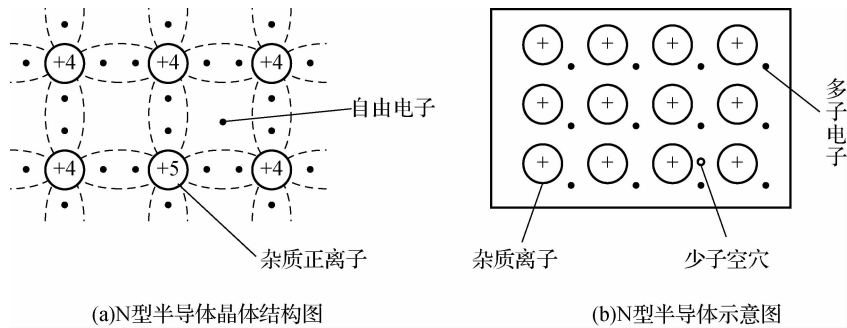


图 1-4 N型半导体结构图

2. P型半导体



动画
PN结的单向导电性

在本征半导体中掺入少量的3价杂质元素,如硼、镓和铟等,就形成P型半导体,如图1-5(a)所示,P型半导体示意图如图1-5(b)所示。杂质原子的3个价电子与周围的硅原子形成共价键时,出现一个空位,在室温下这些空位能吸引邻近的价电子来填充,使杂质原子变成带负电的离子。这种杂质因能够吸收电子被称为“受主原子”,这种掺杂使空穴的浓度大大增加。这种以空穴导电为主的半导体称为P型(或空穴型)半导体,其中空穴是多数载流子(简称多子),自由电子是少数载流子(简称少子)。

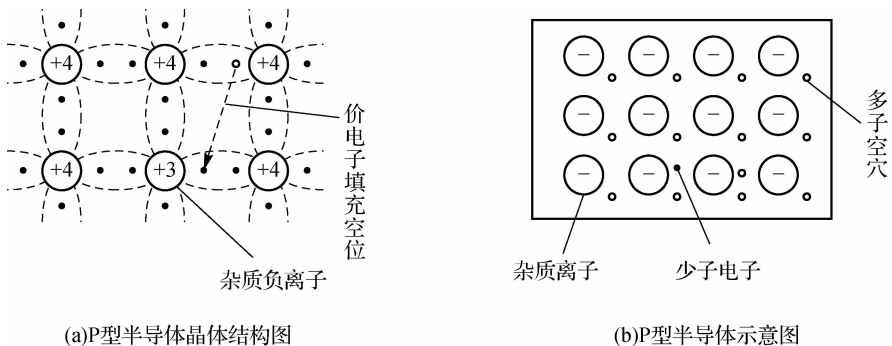


图 1-5 P型半导体结构图

(三)PN结

单纯的一块P型半导体或N型半导体,只能作为一个电阻元件。PN结是构成二极管、三极管、晶闸管、集成电路等众多半导体器件的基础。

1. PN结的形成

在一块完整的本征硅片上,用不同的掺杂工艺使其一边形成N型半导体,另一边形成P型半导体,在这两种杂质半导体的交界面附近就会形成一个具有特殊性质的薄层(正离子或

负离子的区域),这个特殊的薄层就是PN结。

由于P型半导体和N型半导体界面两侧的两种载流子浓度有很大差异,因此会产生载流子从高浓度区向低浓度区的运动,这种运动称为扩散,如图1-6(a)所示。P区中的多子空穴扩散到N区,与N区中的自由电子复合而消失;N区中的多子电子向P区扩散并与P区中的空穴复合而消失。结果使界面附近载流子浓度骤减,形成了由不能移动的杂质离子构成的空间电荷区,同时建立了内电场,内电场方向由N区指向P区,如图1-6(b)所示。

内电场有两个作用:一方面阻碍多子的扩散运动,另一方面促使两个区靠近界面处的少数子产生漂移运动。起始时内电场较小,扩散运动较强,漂移运动较弱。随着扩散运动的进行,空间电荷区增宽,内电场增大,扩散运动逐渐困难,漂移运动逐渐加强。外部条件一定时,扩散运动和漂移运动最终达到动态平衡,即扩散过去多少载流子必然漂移过来同样多的同类载流子,因此扩散电流等于漂移电流,如图1-6(c)所示。这时空间电荷区的宽度一定,内电场一定,形成了所谓的PN结。PN结内电场的电位称为内建电位差,又称为接触电位,其电压一般为零点几伏,室温下硅材料PN结的内建电位差为 $0.5\sim 0.7\text{ V}$,锗材料PN结的内建电位差为 $0.2\sim 0.3\text{ V}$ 。

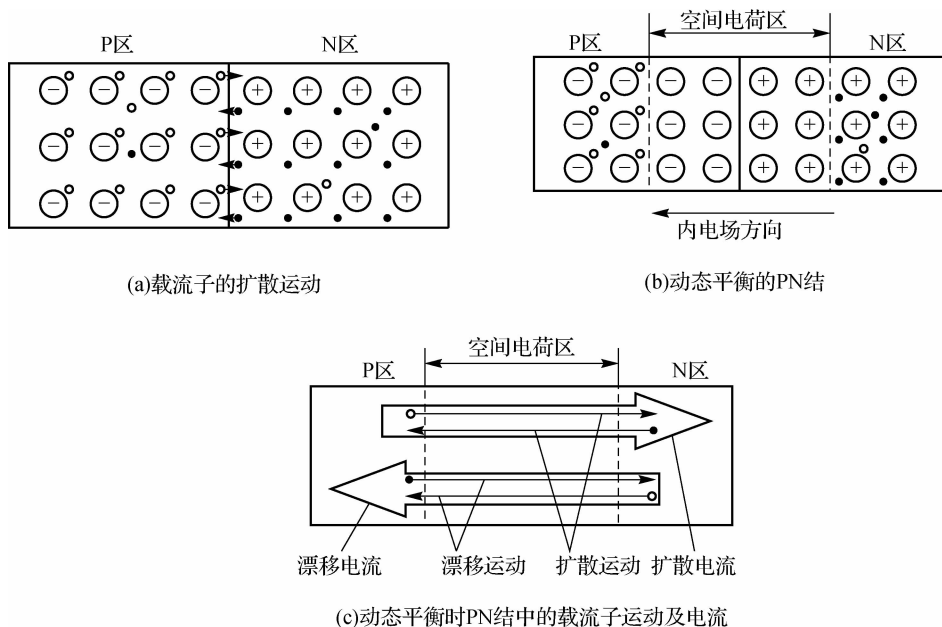


图 1-6 PN 结的形成

由于空间电荷区中载流子极少,几乎都被消耗殆尽了,所以空间电荷区又称为耗尽区。另外,从PN结内电场阻止多子继续扩散这个角度来说,空间电荷区也可称为阻挡层或势垒区。

综上所述,PN结中进行着两种载流子的运动,即多数载流子的扩散运动和少数载流子的漂移运动。

2. PN 结的单向导电性

在 PN 结外加不同方向的电压,就可以破坏原来的平衡,从而呈现出单向导电特性,加在 PN 结上的电压称为偏置电压。

1)PN 结正偏

假设在 PN 结上加一个正向电压,即电源的正极接 P 区,负极接 N 区,PN 结的这种接法称为正向接法或正向偏置(简称正偏),如图 1-7(a)所示。

采用正向接法时,外电场的方向与 PN 结中内电场的方向相反,因而削弱了内电场。此时,在外电场的作用下,P 区中的空穴向右移动,与空间电荷区内的一部分负离子中和;N 区中的电子向左移动,与空间电荷区内的一部分正离子中和。由于多子移向了耗尽层,使空间电荷区的宽度变窄,于是电位势垒也随之降低,这有利于多数载流子进行扩散运动,而不利于少数载流子进行漂移运动。因此,回路中的扩散电流将大大超过漂移电流,最后形成一个较大的正向电流,其方向在 PN 结中是从 P 区流向 N 区。

正向偏置时,只要在 PN 结两端加上一定的正向电压(大于电位势垒),就可得到较大的正向电流。为了防止回路中电流过大,一般可接入一个电阻。

2)PN 结反偏

假设在 PN 结上加一个反向电压,即电源的正极接 N 区,而电源的负极接 P 区,这种接法称为反向接法或反向偏置(简称反偏),如图 1-7(b)所示。

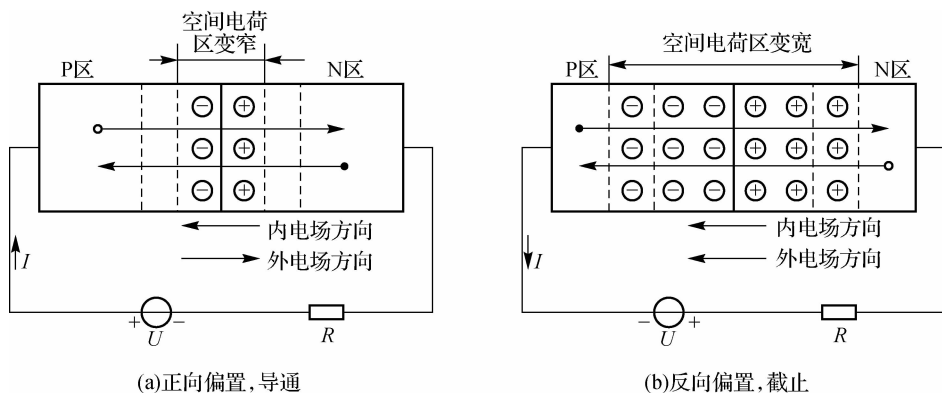


图 1-7 PN 结的单向导电性

采用反向接法时,外电场的方向与 PN 结中内电场的方向一致,因而增强了内电场的作用。此时,外电场使 P 区中的空穴和 N 区中的电子各自向着远离耗尽的方向移动,从而使空间电荷区变宽,同时电位势垒也随之增高,这不利于多数载流子进行扩散运动,而有利于少数载流子进行漂移运动。因此,漂移电流将超过扩散电流,于是在回路中形成一个基本上由少数载流子运动产生的反向电流,在 PN 结中从 N 区流向 P 区。因为少数载流子的浓度很低,所以反向电流的数值非常小。在一定温度下,当外加反向电压超过某个值后,反向电流将不再随着外加反向电压的增加而增大,这时称其为反向饱和电流,通常用符号 I_s 表示。正因为反向饱和电流是由少数载流子产生的,所以对温度十分敏感。随着温度的升高, I_s 将急剧增大。此时,PN 结呈现很大的电阻,称为截止。

综上所述,PN 结正偏时导通,呈现很小的电阻,形成较大的正向电流;反偏时截止,呈现

很大的电阻,反向电流近似为零。因此,PN 结具有单向导电特性。

3. PN 结的击穿特性

当加于 PN 结两端的反向电压增大到一定值时,PN 结的反向电流将随反向电压的增加而急剧增大,这种现象称为反向击穿。反向击穿后,只要反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结容许的耗散功率,PN 结一般不会损坏。若反向电压下降到击穿电压以下后,其性能可恢复到原有情况,则这种击穿是可逆的,称为电击穿;若反向击穿电流过大,则会导致 PN 结结温过高而烧坏,这种击穿是不可逆的,称为热击穿。PN 结的反向击穿有雪崩击穿和齐纳击穿两种机理。

二、半导体二极管

半导体二极管简称二极管,是电子线路中最常用的半导体器件,是一种非线性半导体器件。由于它具有单向导电特性,故广泛应用于整流、检波、限幅、开关、稳压等场合。

(一) 二极管的结构

半导体二极管是由一个 PN 结加上管壳封装而成的,从 P 端引出的一个电极称为阳极,从 N 端引出的另一个电极称为阴极。二极管的实物图、外形及符号如图 1-8 所示。电路符号中的箭头方向表示正向电流的流通方向。

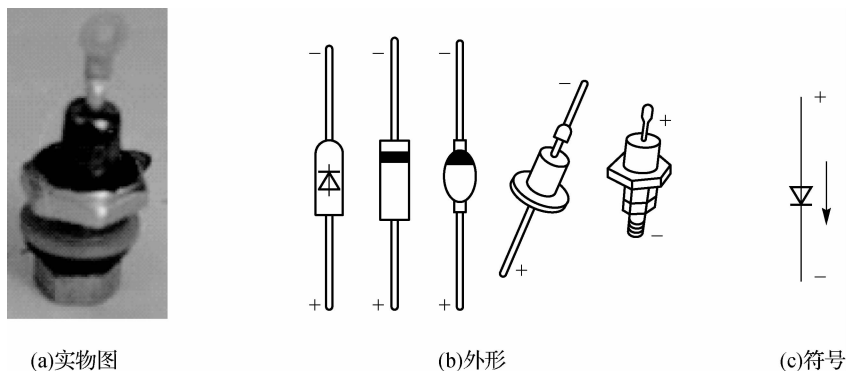


图 1-8 半导体二极管的实物、外形与符号

(二) 二极管的类型

半导体二极管的种类有很多,若按结构的不同来分,可分为点接触型二极管和面接触型二极管;若按应用场合的不同来分,可分为整流二极管、稳压二极管、检波二极管、限幅二极管、开关二极管和发光二极管等;若按功率的不同来分,可分为小功率二极管、中功率二极管和大功率二极管;若按制作材料的不同来分,可分为锗二极管和硅二极管等。

点接触型二极管是由一根很细的金属触丝(如 3 价元素铝)和一块 N 型半导体(如锗)的表面接触,然后在正方向通过很大的瞬时电流,使触丝和半导体牢固地熔接在一起,3 价金属与锗结合构成 PN 结,如图 1-9(a)所示。由于点接触型二极管金属丝很细,形成的 PN 结面积很小,所以它不能承受大的电流和高的反向电压,同时由于极间电容很小,所以这类管子适用于高频电路。例如,2AP1 是点接触型锗二极管,其最大整流电流为 16 mA,最高工作频率为 150 MHz,但最高反向工作电压只有 20 V。

面接触型或称面结型二极管的PN结是用合金法或扩散法制成的,其结构如图1-9(b)所示。这种二极管的PN结面积大,可承受较大的电流,但极间电容较大,适用于低频电路,主要用于整流电路。例如,2CZ53C为面接触型硅二极管,其最大整流电流为300 mA,最高反向工作电压为100 V,而最高工作频率只有3 kHz。

图1-9(c)所示是硅工艺平面型二极管的结构图,它是集成电路中常见的一种形式。当用于高频电路时,要求其PN结面积小;当用于大电流电路时,则要求其PN结面积大。

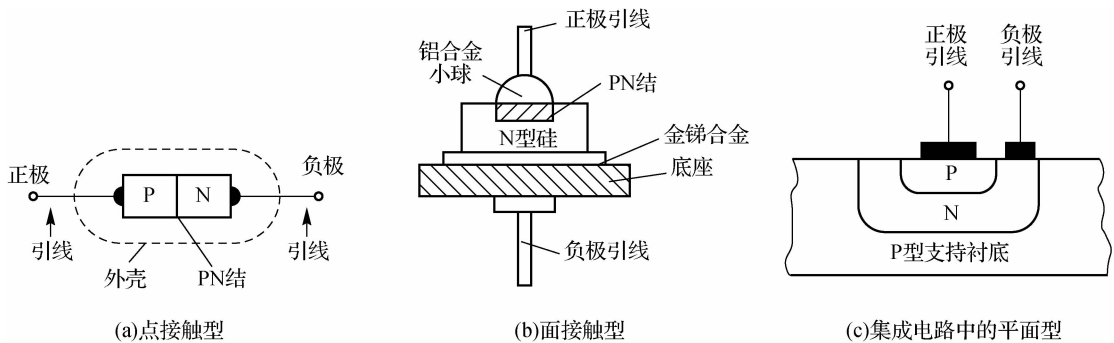


图 1-9 二极管的结构

(三)二极管的导电特性

二极管由一个PN结构成,因此,它同样具有单向导电特性。半导体二极管的导电特性可用其伏安特性来说明,所谓伏安特性是指流过二极管的电流与其两端电压之间的关系曲线。图1-10所示为伏安特性的实验电路,图1-11所示为半导体二极管的伏安特性曲线。

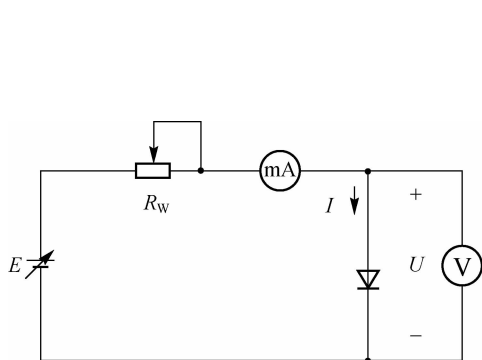


图 1-10 伏安特性实验电路

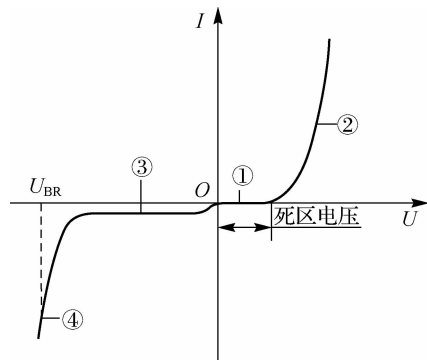


图 1-11 半导体二极管伏安特性

1. 正向特性

所谓正向特性是指二极管阳极接高电位、阴极接低电位时的伏安特性,这时二极管所加的电压称为正向电压。由图1-11看出,当二极管所加的正向电压较小时,流过二极管的电流几乎为零,这时二极管的工作状态称为截止状态。当正向电压超过某数值后,才有电流流过二极管,这一电压值称为死区电压。硅管的死区电压一般为0.5 V,锗管则约为0.1 V。图1-11中的①为死区。

当二极管的正向电压大于死区电压时,才有较大的电流流过二极管,这时的电流称为正向电流,二极管的工作状态称为导通状态(如图 1-11 中的②所示)。二极管导通时的正向电压,硅管约为 $0.6\sim 0.8\text{ V}$,锗管约为 $0.2\sim 0.3\text{ V}$ 。

2. 反向特性

所谓反向特性是指二极管阴极接高电位、阳极接低电位时的伏安特性,这时二极管所加的电压称为反向电压。由图 1-11 看出,当二极管加反向电压时,流过二极管的电流(反向电流)很小,几乎为零,因此二极管工作于截止状态(如图 1-11 中的③所示)。当反向电压达到一定数值时,反向电流突然增大,这时二极管处于反向击穿状态,对应的临界电压称为反向击穿电压 U_{BR} (如图 1-11 中的④所示),这时若没有采取适当的限流措施,则较大的反向电流会使管子过热而损坏,因此,通常不允许二极管工作在该状态。

通过以上分析不难得出结论:当二极管加正向电压(大于死区电压)时,二极管导通,有较大的正向电流流过二极管;当二极管加反向电压(小于反向击穿电压)时,二极管截止,流过二极管的反向电流基本为零。因此二极管具有单向导电的特性。

3. 温度特性

温度对二极管的特性有显著影响,如图 1-12 所示。温度升高,正向特性曲线向左移,反向特性曲线向下移。其规律是:在接近室温,同一电流下,温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,正向电压减小 $2\sim 2.5\text{ mV}$;温度每升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,反向电流增大大约 1 倍。

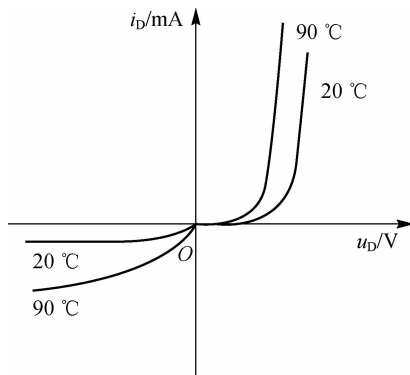


图 1-12 温度对二极管特性曲线的影响

(四) 二极管的主要参数

1. 二极管的型号命名法

国家标准规定,国产半导体器件的型号由以下 5 部分组成。

第 1 部分:用阿拉伯数字表示器件的电极数目。“2”代表二极管,“3”代表三极管。

第 2 部分:用汉语拼音字母表示管子的材料。“A”为 N 型锗管,“B”为 P 型锗管,“C”为 N 型硅管,“D”为 P 型硅管。

第 3 部分:用汉语拼音字母表示管子的类型。“P”为普通管,“Z”为整流管,“K”为开关管,“W”为稳压管。

第 4 部分:用阿拉伯数字表示序号。序号不同的二极管其特性不同。

第5部分:用汉语拼音字母表示规格号。序号相同、规格号不同的二极管特性差别不大,只是某个或某几个参数有所不同。

例如,2AP1是N型锗材料制成的普通二极管,2CZ11D是N型硅材料制成的整流管。

目前,市面上更常见的是使用国外晶体管型号命名方法的二极管,如IN4001、IN4004、IN4148等,这类二极管采用的是美国电子工业协会对半导体器件的命名法,凡型号以“IN”开头的二极管都是美国制造或以美国专利在其他国家制造的产品,IN后面的数字表示该器件在美国电子工业协会登记的顺序号。

而从日本进口的彩色电视机中,二极管的型号则以“1S”开头,如1S1885,其中“1”表示二极管,“S”表示日本电子工业协会注册产品,最后的数字表示在日本电子工业协会登记的顺序号。登记顺序号的数字越大,表示产品越新。

2. 二极管的主要参数

描述器件的物理量称为器件的参数。它是器件特性的定量描述,也是选择器件的依据。各种器件的参数可由手册查得。为了正确合理地使用二极管,必须了解二极管的指标参数。在实际应用中最主要的参数如下。

1) 最大整流电流 I_F

最大整流电流通常称为额定工作电流,是指二极管在长期运行时,允许通过的最大正向平均电流。不同型号的二极管其最大整流电流差异很大,如果电路中实际工作电流超过了 I_F ,那么二极管过分发热就有可能烧坏PN结,使二极管永久损坏。此值取决于PN结的面积、材料和散热情况等。

2) 最大反向工作电压 U_{RM}

最大反向工作电压通常称为额定工作电压,它是为了保证二极管不至于反向击穿而规定的最高反向电压。工作时加在二极管两端的反向电压不得超过此值,否则二极管可能被击穿。为了确保二极管安全工作,一般手册中规定最大反向电压为反向击穿电压的 $1/3 \sim 1/2$ 。

3) 反向饱和电流 I_S

反向饱和电流又称反向漏电流,它指二极管未进入击穿区的反向电流,其值越小,则二极管的单向导电性越好。此外,由于反向电流是由少数载流子形成的,因此 I_S 值受温度的影响很大。温度增加,反向电流就会急剧增大。通常锗管PN结温度达到 90°C 以上,硅管PN结温度达到 150°C 以上时,就会因反向电流急剧增加而造成热击穿,所以使用二极管时要注意温度的影响。

4) 最高工作频率 f_M

二极管的PN结具有结电容,随着工作频率的升高结电容充放电将加剧影响PN结的单向导电特性,所以 f_M 是保证管子正常工作的最高频率。一般小电流二极管的 f_M 高达几百兆赫兹,而大电流的整流管仅几千赫兹。

5) 直流电阻 R_D

(1) 正向直流电阻。加到二极管两端的直流电压 U_D 与流过二极管的直流电流 I_D 之比称为二极管的直流电阻,用 R_D 表示,即

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \quad (1-1)$$

(2)反向直流电阻。二极管处于反向工作状态时,由于反向电流很小且几乎不变,所以反向直流电阻很大。加反向电压时, R_D 为几百千欧至几兆欧。

6)交流电阻 r_D

(1)正向交流电阻。二极管在工作点 Q 附近电压的微小变化量 Δu_D 与相应的电流微小变化量 Δi_D 之比称为二极管的交流电阻,用 r_D 表示,即

$$r_D = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \quad (1-2)$$

由于交流电阻反映了二极管在工作点 Q 附近电压、电流作微小变化时的等效电阻,因此又称为动态电阻或微变等效电阻。

$$r_D \approx \frac{U_T}{I_D} \approx \frac{26 \text{ mV}}{I_D (\text{mA})} \quad (1-3)$$

U_T 称为温度电压当量。式(1-3)说明,在温度一定时, r_D 的数值与直流工作点电流 I_D 有关,并且 I_D 越大, r_D 越小。正向交流电阻 r_D 约为几欧至几十欧。例如,在室温下, $U_T \approx 26 \text{ mV}$,若 $I_D = 5 \text{ mA}$,则 $r_D = 5.2 \Omega$,可见二极管的动态电阻是很小的。

(2)反向交流电阻。二极管处于反向工作状态时,由于反向电流很小且几乎不变,因此反向交流电阻很大。反向交流电阻 r_D 一般大于几十千欧。

为了计算在 Q 点附近电流或电压的变化量 Δi_D 或 Δu_D ,可根据交流电阻的概念画出二极管的小信号模型(也称微变等效电路),如图 1-13 所示。它表明,在 Q 点,动态时的二极管可用一交流电阻 r_D 来等效。

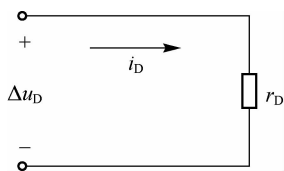


图 1-13 二极管小信号模型

三、特殊二极管

除了普通二极管外,还有一些二极管由于使用的材料和工艺特殊,从而具有特殊的功能和用途,这种二极管属于特殊二极管,如稳压二极管、发光二极管、光电二极管、光电耦合器、变容二极管等。

(一)稳压二极管

稳压二极管是一种特殊的面接触型硅二极管,由于它在电路中能起稳定电压的作用,故称为稳压二极管,简称稳压管。

1. 稳压二极管的特性及主要参数

1)伏安特性曲线

稳压二极管的符号及通过实验测得的伏安特性曲线分别如图 1-14(a)、图 1-14(b)所示。

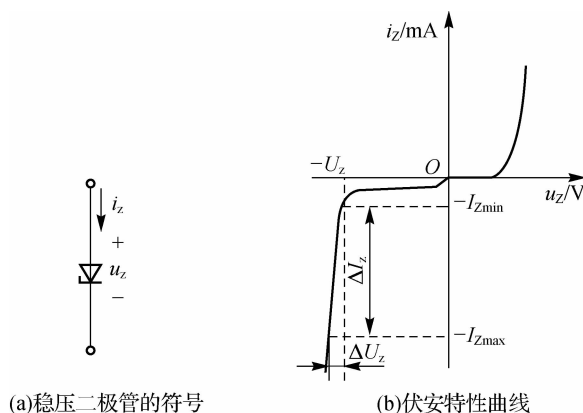


图 1-14 稳压二极管符号及伏安特性曲线

从伏安特性曲线看,稳压管的正向特性曲线和普通二极管相似;反向偏压时,开始一段和二极管一样,当反向电压增大到一定数值时,反向电流突然上升,这一特性称为反向击穿特性,曲线比普通二极管陡直。

值得注意的是,当反向电压增加到一定数值时,如增加到图 1-14(b)中所示的电压值 U_Z ,反向电流急剧上升。此后反向电压只要稍有增加,如增加一个 ΔU_Z ,反向电流就会增加很多,这种现象就是电击穿,电压 U_Z 称为击穿电压。由此可见,通过稳压二极管的电流在很大范围内变化时,如图 1-14(b)中从 I_{Zmin} 变化到 I_{Zmax} ,稳压二极管两端电压变化很小,仅为 ΔU_Z 。据此可以认为,二极管两端的电压基本保持不变。可见稳压二极管能稳定电压正是利用其反向击穿后电流剧变,而二极管两端的电压几乎不变的特性来实现的。

此外,由击穿转化为稳压,还有一个值得注意的条件,就是要适当限制通过稳压二极管的反向电流。否则过大的反向电流,如超过 I_{Zmax} ,将造成稳压二极管击穿后的永久性损坏(热击穿)。因此,在电路中应给稳压二极管串联适当阻值的限流电阻。

通过以上分析可知,稳压二极管若要实现稳压功能,则必须具备以下两个基本条件。

- (1) 稳压二极管两端需加上一个大于其击穿电压的反向电压。
- (2) 采取适当措施限制击穿后的反向电流值。例如,将稳压二极管与一个适当的电阻串联后,再反向接入电路中,使反向电流和功率损耗均不超过其允许值。

2) 稳压管的主要参数

(1) 稳定电压 U_Z 。 U_Z 是指稳压管在正常工作状态下稳压管两端的电压值。由于制造上的原因,即使同种型号的稳压管,这个电压值也稍有差异,使用时要注意选择。例如,型号为 2CW11 的稳压管的稳定电压为 3.2~4.5 V,但就某一只稳压管而言, U_Z 应为确定值。

(2) 稳定电流 I_Z 。 I_Z 指稳压管在稳定电压下的工作电流。稳压管的稳定电流有一定的允许变化范围。当工作电流低于 I_Z 时,稳压效果变差,甚至不能稳压,故常将 I_Z 记作 I_{Zmin} 。只要不超过稳压管的额定功率,电流愈大,稳压效果愈好,但要多消耗电能。

(3) 最大耗散功率 P_{ZM} 。 稳压管的稳定电压 U_Z 与最大稳定电流 I_{Zmax} 的乘积,称为稳压管的耗散功率。在使用中若超过这个数值,稳压管将被烧毁。

(4) 动态电阻 r_z 。 r_z 指稳压管两端电压变化量和电流变化量之比,即

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

它是衡量稳压性能好坏的指标,击穿区的特性越陡,则 r_z 越小,稳压性能越好,一般 r_z 值很小,约为几欧到几十欧。

(5)温度系数。通常稳压值大于 6 V 的稳压管具有正温度系数,即温度升高时,其稳压值略有上升。稳压值低于 6 V 的稳压管具有负温度系数,即温度升高时,其稳压值略有下降。稳压值为 6 V 的稳压管,其温度系数趋近于零。

由于硅管的热稳定性比锗管好,故一般采用硅材料制作稳压二极管。其型号有 2CW 和 2DW 两大类。

2. 二极管稳压电路

1) 电路结构

利用稳压二极管组成的稳压电路如图 1-15 所示,其中, U_1 为未经稳定的直流输入电压, R 为限流电阻, R_L 为负载电阻, U_O 为稳压电路的输出电压。

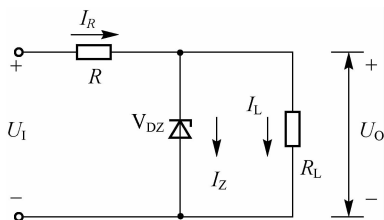


图 1-15 稳压二极管稳压电路

2) 稳压原理

当稳压二极管正常工作时,有下述关系式成立。

$$U_O = U_1 - I_R R = U_Z$$

$$I_R = I_Z + I_L$$

当电路的输入电压或负载的大小发生变化时,负载两端的电压因稳压管的存在而基本不变。

(1)负载不变,输入电压变化。若输入电压 U_1 升高,则必将引起输出电压 U_O 升高,而对于并联在负载两端的稳压管来说,其电压 U_Z 稍一增加,就会使流过稳压管的电流急剧增加,这将导致限流电阻 R 上的压降增加,从而使负载两端的输出电压下降。可见稳压管是利用其电流的剧烈变化,通过限流电阻将其转化为压降的变化来吸收输入电压 U_1 的变化,从而维持了输出电压 U_O 的稳定。相关分析如下。

$$U_1 \uparrow \rightarrow U_Z \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow I_R R \uparrow \rightarrow U_O \text{ 不变}$$

(2)输入电压不变,负载变化。若负载电阻 R_L 减小,则会造成输出电流 I_O 和 I_R 的增大,引起输出电压 U_O 减小。此时将导致稳压管中电流 I_Z 急剧减小,限流电阻 R 上的压降也将减小,从而使输出电压 U_O 升高,维持了输出电压 U_O 的稳定。

$$R_L \downarrow \rightarrow U_Z \downarrow \rightarrow I_Z \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \rightarrow I_R R \downarrow \rightarrow U_O \text{ 不变}$$

以上讨论表明,限流电阻不仅可以保护稳压管,还起着调整电压的作用。正是稳压管和限流电阻的相互配合,才完成了稳压的过程。

例 1-1 稳压电路如图 1-15 所示,已知稳压二极管的稳定电压 $U_Z = 8 \text{ V}$, $I_Z = 5 \text{ mA}$, $I_{ZM} = 30 \text{ mA}$,限流电阻 $R = 390 \Omega$,负载电阻 $R_L = 510 \Omega$,试求输入电压 $U_1 = 17 \text{ V}$ 时,输出电压 U_O

及电流 I_L 、 I_R 、 I_Z 的大小。

解 令稳压二极管开路,求得 R_L 上的压降 U'_0 为

$$U'_0 = \frac{U_1 R_L}{R + R_L} = \frac{17 \times 510}{390 + 510} \text{ V} \approx 9.6 \text{ V}$$

因 $U'_0 > U_Z$,稳压二极管接入电路后即可工作在反向击穿区,略去动态电阻 r_z 的影响,稳压电路的输出电压 U_0 就等于稳压二极管的稳压电压 U_Z ,即

$$U_0 = U_Z = 8 \text{ V}$$

由此不难求出各电流的大小分别为

$$I_L = \frac{U_0}{R_L} = \frac{8}{510} \text{ A} \approx 0.0157 \text{ A} = 15.7 \text{ mA}$$

$$I_R = \frac{U_1 - U_0}{R} = \frac{17 - 8}{390} \text{ A} \approx 0.0231 \text{ A} = 23.1 \text{ mA}$$

$$I_Z = I_R - I_L = (23.1 - 15.7) \text{ mA} = 7.4 \text{ mA}$$

可见, $I_{Z\min} < I_Z < I_{Z\max}$,稳压二极管处于正常稳压工作状态,上述计算结果是正确的。

3. 稳压管和限流电阻的选择

1) 稳压管的选择

选择稳压管主要从电路的输出电压值和负载电流的大小两方面进行考虑:稳压管稳定电压 U_Z 等于电路的输出电压 U_0 ;稳压管稳压电流 I_Z 应大于电路负载电流 I_0 的 5 倍左右。满足这两个条件,再根据电路要求的稳压精度来选择稳压管。

2) 限流电阻的选择

限流电阻 R 在电路中起保护稳压管和调整电压的作用,要从两方面来考虑:一是阻值,二是额定功率。

由于稳压管的反向电流小于 $I_{Z\min}$ 时不稳压,大于 $I_{Z\max}$ 时会因超过额定功率而损坏,因此在稳压管电路中必须串联一个电阻来限制电流,从而保证稳压管正常工作,故称这个电阻为限流电阻。只有在 R 取值合适时,稳压管才能安全地工作在稳定状态。

(二) 发光二极管

发光二极管(light emitting diode,LED)是一种把电能转变成光能的半导体器件。发光二极管的实物图和符号如图 1-16 所示。它是由镓(Ga)、砷(As)、磷(P)等半导体材料制成的。由这些材料构成的 PN 结在外加正向电压时就会发光,光的颜色主要取决于制造所用的材料,如砷化镓发红光,磷化镓发绿光等。目前,市场上发光二极管的颜色主要有红、黄、绿、蓝、白 5 种,按外形可分为圆形、长方形等数种。

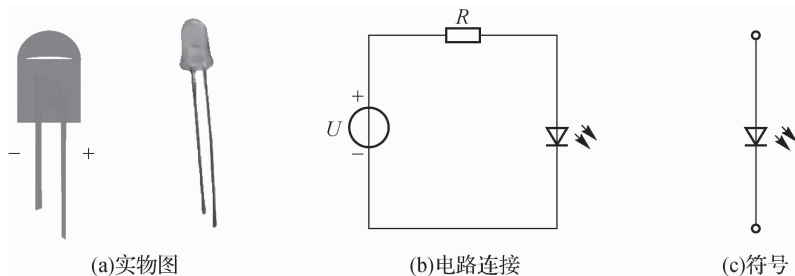


图 1-16 发光二极管

发光二极管的导通电压比普通二极管大,一般为 $1.2\sim 2.5\text{ V}$,而反向击穿电压一般比普通二极管低,在 5 V 左右。LED 是目前使用比较普遍的一种显示器件,就是由于它具有亮度高、电压低、体积小、可靠性高、寿命长、响应速度快、颜色鲜艳等一系列优点。

发光二极管主要用作显示器件,可单个使用,也可制成七段数字显示器以及矩阵式器件。近年来在数字仪器仪表、计算机显示、电子钟表上的应用愈来愈广,并且在高档家电、音响装置、大屏幕汉字、图形显示中发挥作用,其应用范围还在不断扩展,LED 各种驱动器集成电路芯片也在不断推出。发光二极管的另一个重要用途是将电信号变为光信号,通过光缆传输,然后用光电二极管接收并再现电信号,从而组成光电传输系统,应用于光纤通信和自动控制系统中。此外,发光二极管还可以与光电二极管一起构成光电耦合器件。

(三)光电二极管

光电二极管又称光敏二极管或远红外线接收管,是一种将光能与电能进行转换的器件,是将光信号转换为电信号的特殊二极管,其实物图、结构及符号如图 1-17 所示。光电二极管的结构与普通二极管一样,其基本结构也是一个 PN 结,但是它的 PN 结面积较大,同时管壳上开有一个嵌着玻璃的窗口,以便于光线射入。它是利用 PN 结在施加反向电压时,在光线照射下反向电阻由大变小的原理来工作的。也就是说,当没有光照射时反向电阻很大,反向电流很小(约 $0.1\ \mu\text{A}$)。当有光照射时,反向电阻减小,反向电流增大,通过接在回路中的电阻 R_L 就可获得电压信号,从而实现了光电转换。硅光电二极管对红外光最为敏感,锗光电二极管对远红外光最为敏感,常用于光的测量和光电自动控制系统,如光纤通信中的光接收机、电视机和家庭音响的遥控接收装置等。大面积的光电二极管可用来作为能源,即光电池;线性光电器件通常称为光电耦,可以实现光与电的线性转换,在信号传送和图形图像处理领域有广泛的应用。

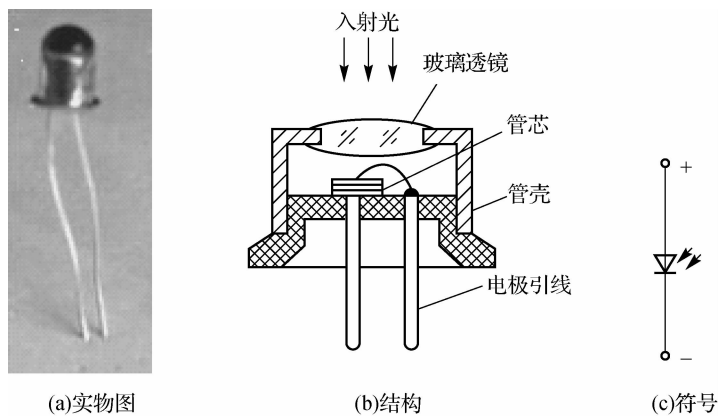


图 1-17 光电二极管

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

(四)光电耦合器

将发光二极管和光电二极管组合起来即可构成光电耦合器,如图 1-18 所示。将输入的电信号加到发光二极管 V_1 的两端,使之发光,照射到光电二极管 V_2 上,这样就在器件的输出端产生与输入信号变化规律相同的电信号,从而实现了信号的光电耦合。将电信号从输入端传送到输出端时,由于两个二极管之间是电隔离的,因此光电耦合器是用光传输信号的

电隔离器件,常在计算机控制系统中用作接口电路。

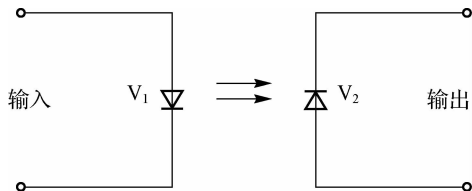
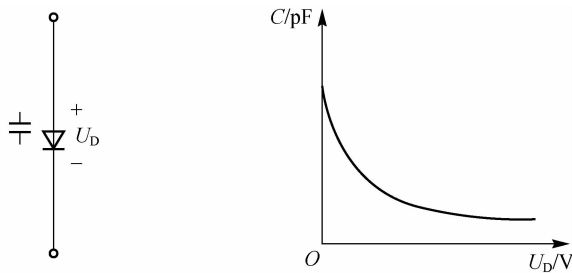


图 1-18 二极管型光电耦合器

(五)变容二极管

PN 结具有电容效应,当 PN 结反向偏置时它的反向电阻很大,近似开路,PN 结可构成理想的电容器件,且其容量随加于 PN 结两端反向电压的增加而减小。利用这种特性制成的二极管称为变容二极管,其电路符号及电容-电压特性曲线如图 1-19 所示。变容二极管广泛用于高频电子电路中,如用于谐振回路的电调谐、调频信号的产生等。



(a)变容二极管的符号

(b)电容-电压特性曲线

图 1-19 变容二极管

任务二 二极管基本电路

在电子技术中,二极管电路得到广泛的应用,本任务重点介绍几种基本的二极管电路,包括二极管整流电路、二极管滤波电路和二极管稳压电路。

一、二极管整流电路

由于电网系统供给的电能都是交流电,而电子设备需要稳定的直流电源供电才能正常工作,因此必须将交流电变换成直流电,这一过程称为整流。本任务主要介绍单相半波整流电路和单相桥式整流电路。

(一)单相半波整流电路

由于在一个周期内,二极管导电半个周期,负载只获得半个周期的电压,故称为半波整流。经半波整流后获得的是波动较大的脉动直流电。

1. 电路结构

单相半波整流电路由整流二极管、电源变压器和用电负载构成,如图 1-20(a)所示。T

为电源变压器,VD 为整流二极管, R_L 为负载电阻。

2. 工作原理

设变压器二次电压为

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \quad (1-4)$$

式中, U_2 为变压器二次电压有效值。

当 u_2 为正半周期($0 \leq \omega t \leq \pi$)时,假设变压器二次绕组的极性是上“+”下“-”,则二极管 VD 承受正向电压导通,流过二极管的电流同时流过负载电阻,即如果忽略 VD 的管压降,负载电阻上的电压 $u_o \approx u_2$ 。当 u_2 为负半周期($\pi \leq \omega t \leq 2\pi$)时,变压器副边绕组的极性变为上“-”下“+”,二极管承受反向电压截止, $i_o \approx 0$,因此输出电压 $u_o \approx 0$,此时 u_2 全部加在二极管两端,即二极管承受反向电压 $u_D \approx u_2$ 。第二个周期开始又重复上述过程。电路中电压和电流的波形如图 1-20(b)所示,由图可见,负载上得到单方向的脉动电压。由于该电路只在 u_2 的正半周期有输出,所以称为半波整流电路。

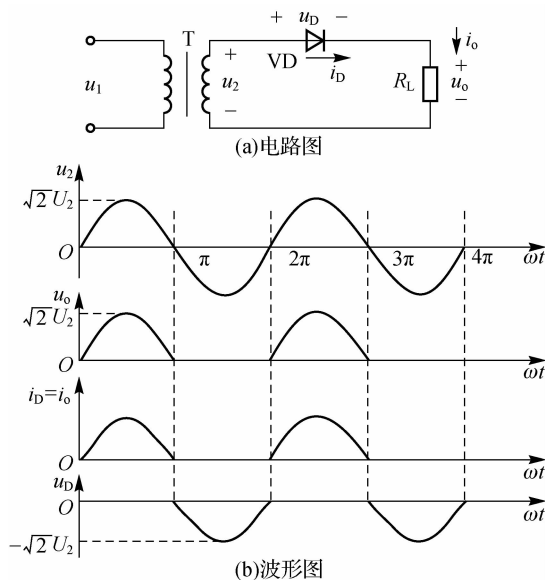


图 1-20 单相半波整流电路及其波形

可见,变压器副边的正弦交流电压变换成了负载两端的单向脉动直流电压,达到了整流的目。

3. 参数计算

负载上获得的是脉动直流电压,其大小用平均值 U_o 来衡量,即

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0.45 U_2 \quad (1-5)$$

负载电流的平均值为

$$I_o = \frac{0.45 U_2}{R_L} \quad (1-6)$$

流过二极管的平均电流与负载电流相等,故

$$I_{VD} = I_o = \frac{0.45}{R_L} U_2 \quad (1-7)$$

二极管反向截止时承受的最高反向电压等于变压器副边电压的最大值,所以

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 \quad (1-8)$$

4. 特点

单相半波整流电路简单、元件少,但输出电流脉动很大,变压器利用率低。因此半波整流仅适用于要求不高的场合。

(二)单相桥式整流电路

为了克服半波整流的缺点,常采用桥式整流电路,如图 1-21(a)所示,图中 $VD_1 \sim VD_4$ 这 4 只整流二极管接成电桥形式,故称为桥式整流,其简化电路如图 1-21(b)所示。

1. 电路结构

单相桥式整流电路如图 1-21(a)所示。

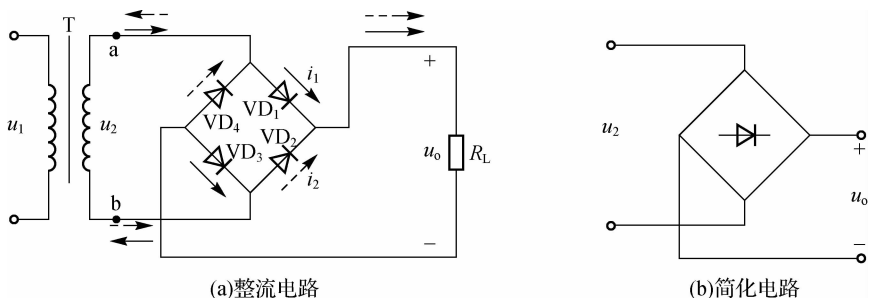


图 1-21 桥式整流电路

2. 工作原理

设变压器二次电压 $u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$, 波形如图 1-22(a)所示。当 u_2 为正半周期时,即 a 点为正, b 点为负时, VD_1 、 VD_3 承受正向电压而导通,此时有电流流过 R_L , 电流路径为 a— VD_1 — R_L — VD_3 —b, 此时 VD_2 、 VD_4 因反偏而截止,负载 R_L 上得到一个半波电压,如图 1-22(b)所示。若略去二极管的正向压降,则 $u_o \approx u_2$ 。

当 u_2 为负半周期时,即 a 点为负, b 点为正时, VD_1 、 VD_3 因反偏而截止, VD_2 、 VD_4 因正偏而导通,此时有电流流过 R_L , 电流路径为 b— VD_2 — R_L — VD_4 —a。这时 R_L 上得到的半波电压如图 1-22(b)所示,若略去二极管的正向压降, $u_o \approx -u_2$, 由此可得输出电压波形,它是单方向的脉动电压,上述电路称为桥式整流电路。

3. 参数计算

负载的平均电压为

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} 2\sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) \approx 0.9 U_2 \quad (1-9)$$

负载的平均电流为

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = 0.9 \frac{U_2}{R_L} \quad (1-10)$$

在每个周期内,两组二极管轮流导通,各导电半个周期,二极管电流如图 1-22(c)所示,

所以每只二极管的平均电流应为负载电流的一半,即

$$I_{VD} = \frac{1}{2} I_o = \frac{1}{2} \frac{U_o}{R_L} = 0.45 \frac{U_2}{R_L} \quad (1-11)$$

在 u_2 的正半周期, VD_1 、 VD_3 导通时,可将它们看成短路,这样 VD_2 、 VD_4 就并联在 u_2 上,其承受的反向峰值电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 \quad (1-12)$$

二极管承受电压的波形如图 1-22(d)所示。

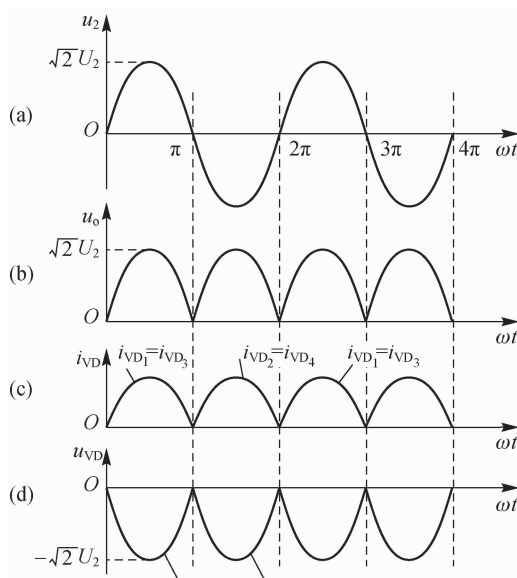
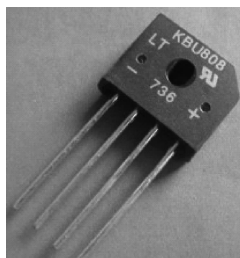


图 1-22 桥式整流电路电压、电流波形

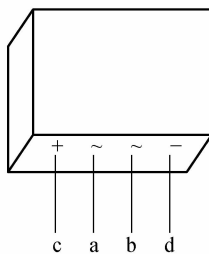
4. 特点

桥式整流电路比半波整流电路复杂,但输出电压脉动比半波整流小一半,变压器的利用率也较高,因此桥式整流电路得到了广泛应用。

将桥式整流电路的 4 只二极管制作在一起,封装成为一个器件就称为整流桥,其实物及外形分别如图 1-23(a)、图 1-23(b)所示。a、b 端接交流输入电压,c、d 端为直流输出端,c 端为正极性端,d 端为负极性端。



(a)实物图



(b)外形图

图 1-23 整流桥

二、二极管滤波电路

整流电路将交流电变为脉动直流电,但其中含有大量的交流成分(称为纹波电压)。为了获得平滑的直流电压,必须利用滤波器将交流成分滤掉。常用的滤波电路有电容滤波电路、电感滤波电路和复合式滤波电路等。

(一)电容滤波电路

下面以单相桥式整流电容滤波电路来说明电容滤波的原理。

1. 电路组成



动画
单相桥式整流
电容滤波电路

电路由单相桥式整流电路、大容量电容 C 和负载 R_L 组成,电路如图 1-24 所示。

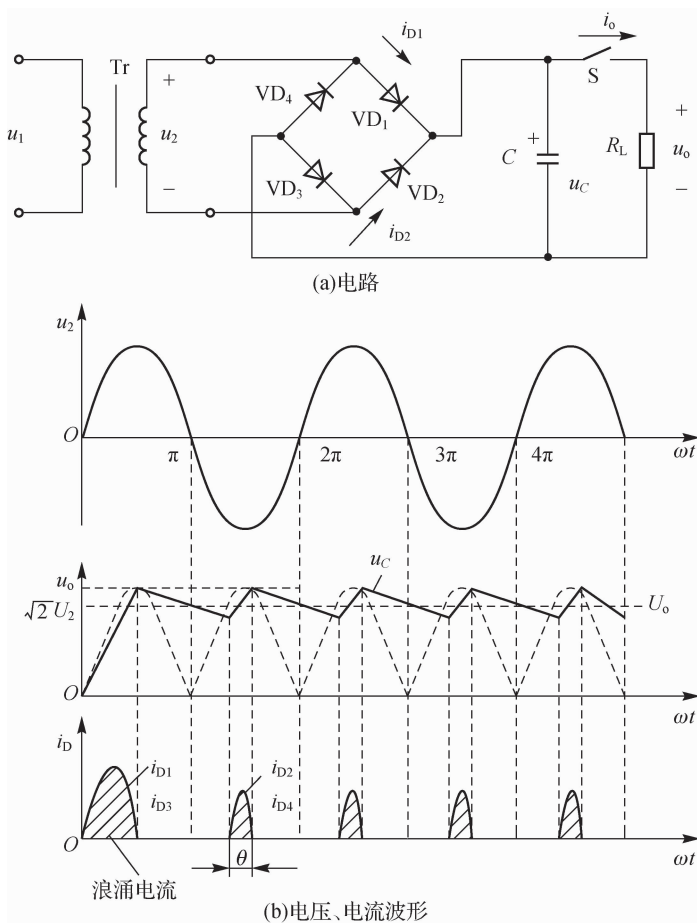


图 1-24 桥式整流电容滤波电路及其波形

2. 工作原理

1) 不接负载 R_L 的情况

图 1-24(a)所示的桥式整流电容滤波电路中,将开关 S 打开。

设电容上已充有一定电压 u_C ,当 u_2 为正半周期时,二极管 VD_1 和 VD_3 仅在 $u_2 > u_C$ 时才导通;同样,在 u_2 为负半周期时,仅当 $|u_2| > u_C$ 时,二极管 VD_2 和 VD_4 才导通;二极管在导

通期间, u_2 对电容充电。

无论 u_2 在正半周期还是负半周期, 当 $|u_2| < u_C$ 时, 由于 4 只二极管均受反向电压而处于截止状态, 所以电容 C 没有放电回路, 故 C 很快地充到 u_2 的峰值, 即 $u_o = u_C = \sqrt{2}U_2$, 并且保持不变。

2) 接负载 R_L 的情况

图 1-24(a) 所示的桥式整流电容滤波电路中, 将开关 S 闭合。电容 C 两端并上负载 R_L 后, 当在 u_2 正半周期或负半周期时, 只要 $|u_2| > u_C$, 则 VD_1 和 VD_3 与 VD_2 和 VD_4 轮流导通, u_2 不仅对负载 R_L 供电, 还对电容 C 充电。

当 $|u_2| < u_C$ 时, 同样, 4 只二极管均受反向电压而处于截止状态, 而电容 C 将向负载 R_L 放电, 以后重复上述充、放电过程, 便可得到如图 1-24(b) 所示的输出电压波形, 它近似锯齿波直流电压。

3) 特点

电容滤波电路虽然简单, 但输出直流电压的平滑程度与负载有关。当负载减小时, 时间常数 $R_L C$ 减小, 输出电压的纹波增大, 所以电容滤波不适用于负载变化较大的场合。电容滤波也不适用于负载电流较大的场合, 因为这时只有增大电容的容量才能取得好的滤波效果。但电容容量太大, 会使电容体积增大, 成本上升, 而且大的充电电流也容易引起二极管损坏。

3. 主要参数

1) 输出电压平均值 U_o

经过滤波后的输出电压平均值 U_o 得到了提高。工程上, 一般按下式估算 U_o 与 U_2 的关系。

$$U_o \approx 1.2U_2 \quad (1-13)$$

2) 二极管的选择

由于电容在开始充电瞬间的电流很大, 这时二极管流过较大的冲击尖峰电流, 所以在实际应用中如有如下要求。

(1) 二极管的额定电流 $I_F \geq (2 \sim 3) \frac{U_L}{2R_L}$ 。

(2) 二极管的最高反向电压 $U_{RM} \geq \sqrt{2}U_2$ 。

3) 电容器的选择

负载上直流电压平均值及其平滑程度与放电时间常数 $\tau = R_L C$ 有关。 τ 越大, 放电越慢, 输出电压平均值越大, 波形越平滑。实际应用中一般取

$$\tau = R_L C = (3 \sim 5) \frac{T}{2} \quad (1-14)$$

式中, 交流电源的周期 $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50 \text{ Hz}} = 0.02 \text{ s}$ 。

电容的耐压为

$$U_C \geq \sqrt{2}U_2 \quad (1-15)$$

4. 整流变压器的选择

由负载 R_L 上的直流平均电压 U_o 与变压器的关系 $U_o \approx 1.2U_2$ 得出

$$U_2 = \frac{U_o}{1.2} \quad (1-16)$$

在实际应用中,考虑到二极管正向压降及电网电压的波动,变压器副边的电压值应超出计算值的 10%。变压器副边电流 I_2 一般取 $(1.1 \sim 1.3)I_L$ 。

例 1-2 单相桥式整流电容滤波电路如图 1-24(a)所示,交流电源频率 $f=50 \text{ Hz}$,负载电阻 $R_L=40 \ \Omega$,要求输出电压 $U_o=20 \text{ V}$ 。试求变压器二次电压有效值 U_2 ,并选择二极管和滤波电容。

解 由式(1-17)可得

$$U_2 = \frac{U_o}{1.2} = \frac{20 \text{ V}}{1.2} \approx 17 \text{ V}$$

通过二极管的电流平均值为

$$I_{VD} = \frac{1}{2} I_o = \frac{1}{2} \frac{U_o}{R_L} = \frac{1}{2} \times \frac{20 \text{ V}}{40 \ \Omega} = 0.25 \text{ A}$$

二极管承受的最高反向电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 17 \text{ V} \approx 24 \text{ V}$$

因此应选择 $I_F \geq (2 \sim 3) I_{VD} = (0.5 \sim 0.75) \text{ A}$, $U_{RM} > 24 \text{ V}$ 的二极管,查手册可选 4 只 2CZ55C 二极管(参数: $I_F=1 \text{ A}$, $U_{RM}=100 \text{ V}$)或选用 1 A、100 V 的整流桥。

根据式(1-14),取 $R_L C = 4 \times \frac{T}{2}$,因为 $T = \frac{1}{f}$,故 $T = \frac{1}{50} \text{ s} = 0.02 \text{ s}$,所以

$$C = \frac{4 \times \frac{T}{2}}{R_L} = \frac{4 \times 0.02 \text{ s}}{2 \times 40 \ \Omega} = 1000 \ \mu\text{F}$$

因此,可选取 $1000 \ \mu\text{F}$ 耐压 50 V 的电解电容。

(二)电感滤波电路

利用电感线圈交流阻抗很大、直流电阻很小的特点,将电感线圈与负载电阻 R_L 串联,组成电感滤波电路,如图 1-25 所示。电感 L 起着阻止负载电流变化使之趋于平直的作用。整流电路输出的电压中,其直流分量由于电感近似于短路而全部加到负载 R_L 两端,即 $U_o = 0.9U_2$ 。交流分量由于 L 的感抗远大于负载电阻而大部分降在电感 L 上,负载 R_L 上只有很小的交流电压,达到了滤除交流分量的目的。电感量越大,电压就越平稳,滤波效果就越好。但电感量大会引起电感的体积过大,成本增加,输出电压下降。一般电感滤波电路只应用于低电压、大电流的场合。

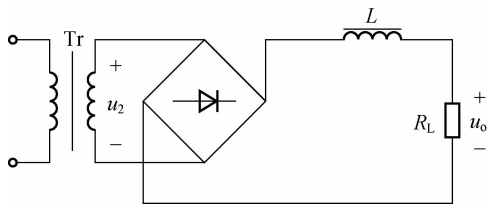


图 1-25 电感滤波电路

(三)复合滤波电路

将电容滤波和电感滤波组合起来,可获得比单个滤波器更好的滤波效果,这就是复合滤

波器。图 1-26 所示为常用的复合滤波电路。常见的有 T 型和 π 型两类复合滤波器。

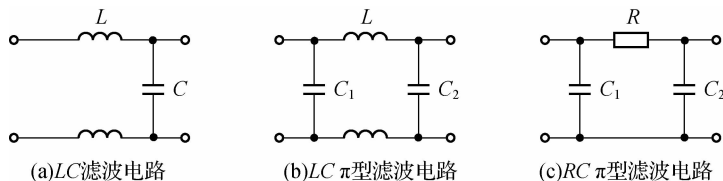


图 1-26 常用复合滤波电路

1. T 型滤波器

为了减小负载电压的脉动程度,在电感线圈后面再接电容,如图 1-27(a)所示,这样先经过电感滤波,去掉大部分交流成分,然后再经电容滤波,滤除剩余的交流成分,使负载电阻得到一个更平滑的直流电压,这种电路的性能与电感滤波电路的性能基本相同。

2. π 型滤波器

为了进一步减小负载电压中的纹波,可采用图 1-27(b)所示 π 型 LC 滤波电路。由于电容 C_1 、 C_2 对交流的容抗很小,而电感 L 对交流的阻抗很大,因此,负载 R_L 上的纹波电压很小。若负载电流较小时,也可用电阻代替电感组成 π 型 RC 滤波电路。由于电阻要消耗功率,所以此时电源的损耗功率较大,电源效率降低。

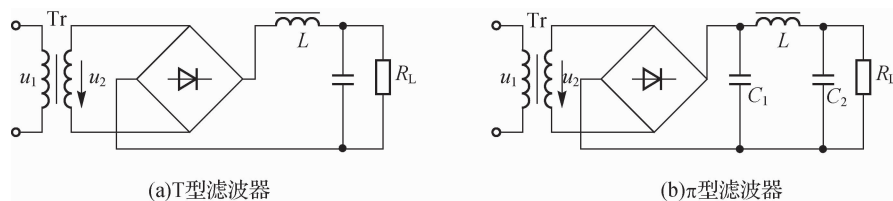


图 1-27 复合滤波器

三、二极管稳压电路

目前,大多数直流电源都是通过将电网 220 V 的交流电源经过整流、滤波和稳压来获得的。前面已了解整流、滤波电路的工作过程,下面将重点介绍串并联型稳压电路及集成稳压电路的工作原理。

(一) 直流稳压电源的组成

几乎所有的电子设备都需要稳定的直流电源,而这些通常都是由交流电网供电的,因此需要将交流电转变成稳定的直流电。直流稳压电源的作用就是将交流电经过整流变成脉动的直流电,然后再经过滤波和稳压转换成稳定的直流电。

小功率直流电源通常通过单相整流获得。其主要是利用二极管的单向导电特性,将交流电变为脉动直流电。直流稳压电源一般由交流电源变压器、整流电路、滤波电路和稳压电路 4 部分组成,如图 1-28 所示。

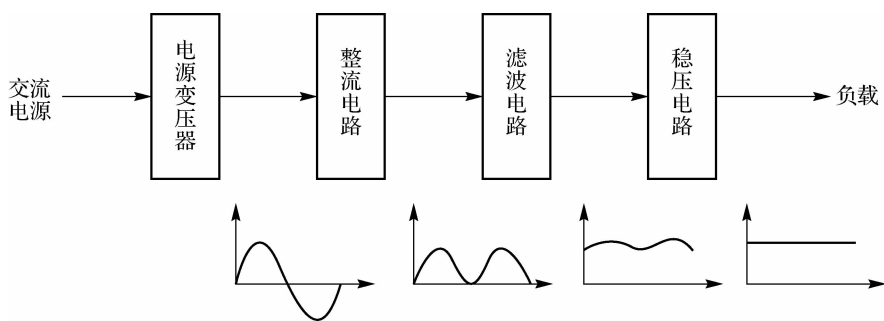


图 1-28 直流稳压电源的组成

1. 电源变压器

电源变压器的任务是将交流电的幅度转换为直流电源所需要的幅度。

2. 整流电路

整流电路的目的是利用具有单向导电性能的整流元件,将正负交替的正弦交流电压整流成为单方向的脉动电压。

3. 滤波电路

滤波电路的功能是将整流后的单向脉动电压中的脉动成分尽可能地过滤掉,使输出电压成为比较平滑的直流电压。该电路由电容、电感等储能元件组成。

4. 稳压电路

稳压电路的功能是减小电源电压波动、负载变化和温度变化的影响,以维持输出电压的稳定。

(二) 稳压电路在直流稳压电源中的作用及要求

1. 稳压电路在直流稳压电源中的作用

克服电源波动及负荷的变化,使输出直流电压恒定不变。

2. 稳压电路在直流稳压电源中的要求

(1) 稳定性好。由于输入电压变化而引起输出电压变化的程度,称为稳定度指标,输出电压的变化越小,电源的稳定度越高。

(2) 输出电阻小。负载变化时,输出电压应基本保持不变。稳压电源这方面的性能可用输出电阻表征。输出电阻越小,负载变化时输出电压的变化也越小。

(3) 电压温度系数小。当环境温度变化时,会引起输出电压的漂移。良好的稳压电源应在环境温度变化时有效地抑制输出电压的漂移,保持输出电压稳定。

(4) 输出电压纹波小。所谓纹波电压,是指输出电压中频率为 50 Hz 或 100 Hz 的交流分量,通常用有效值或峰值表示。经过稳压作用,可以使整流滤波后的纹波电压大大降低。

(三) 串联型稳压电路

1. 电路结构

串联型稳压电路包括四大部分,其组成框图如图 1-29(a)所示。它由调整管、取样电路、基准电压和比较放大电路等部分组成。由于调整管与负载串联,故称为串联型稳压电路。

2. 工作原理

图 1-29(b)所示为串联型稳压电路的电路原理图,图中, V_1 为调整管,它工作在线性放大区,故又称为线性稳压电路。 R_3 和稳压管 V_2 组成基准电压源,为集成运算放大器 A 的同相输入端提供基准电压, R_1 、 R_2 和 R_P 组成取样电路,它将稳压电路的输出电压分压后送到集成运算放大器 A 的反相输入端,集成运算放大器 A 构成比较放大电路,用来对取样电压与基准电压的差值进行放大。当输入电压 U_1 增大引起输出电压 U_O 增加时,取样电压 U_F 随之增大, U_Z 与 U_F 的差值减小,经 A 放大后使调整管的基极电压 U_{B1} 减小,集电极电流 I_{C1} 减小,管压降 U_{CE} 增大,输出电压 U_O 减小,从而使得稳压电路的输出电压上升趋势受到抑制,稳定了输出电压。同理,当输入电压 U_1 减小或负载电流 I_O 增大引起 U_O 减小时,电路将产生与上述相反的稳压过程,亦将维持输出电压基本不变。

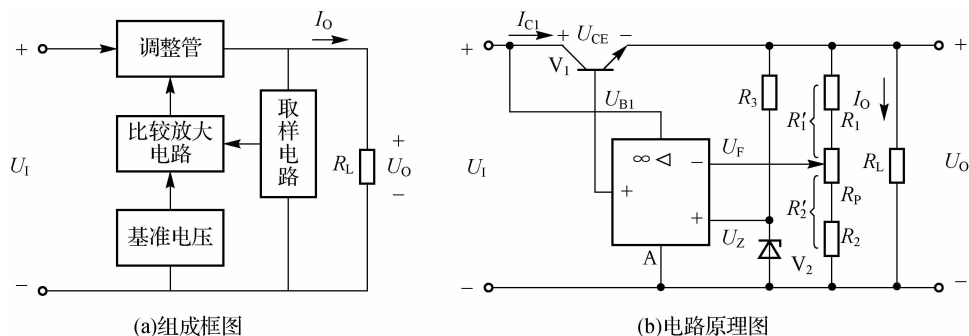


图 1-29 串联型稳压电路

由图 1-29(b)可得

$$U_F = \frac{R_2'}{R_1 + R_2 + R_P} U_O \quad (1-17)$$

由于 $U_F \approx U_Z$, 所以稳压电路输出电压 U_O 等于

$$U_O = \frac{R_1 + R_2 + R_P}{R_2'} U_Z \quad (1-18)$$

由此可见,通过调节电位器 R_P 的动端,可调节输出电压 U_O 的大小。

3. 特点

串联型稳压电源工作电流较大,输出电压一般可连续调节,稳压性能优越。目前这种稳压电源已经制成单片集成电路,广泛应用在各种电子仪器 and 电子电路之中。串联型稳压电源的缺点是损耗较大、效率低。

(四) 并联型稳压电路

1. 电路结构

图 1-30 所示为并联型稳压电路,虚线框内为稳压电路, R 为限流电阻, V 为稳压二极管。不论是电网电压波动还是负载电阻 R_L 的变化,并联型稳压电路都能起到稳压作用,原因是 U_Z 基本恒定, $U_O=U_Z$ 。

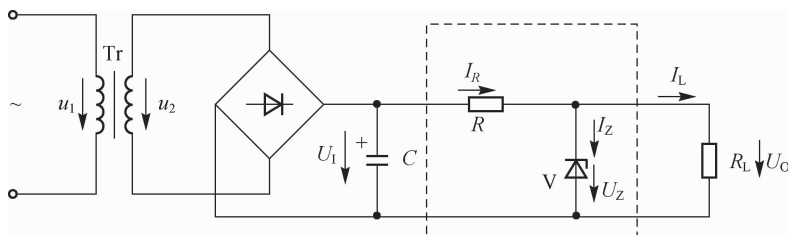
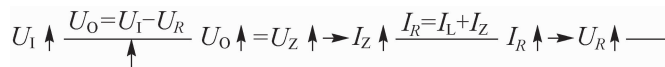


图 1-30 并联型稳压电路

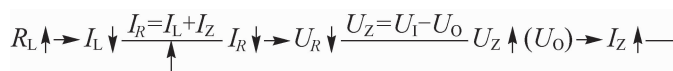
2. 工作原理

下面从两个方面来分析其稳压原理。

(1) 负载不变,输入电压变化时,稳压过程分析如下。



(2) 输入电压不变,负载变化时,稳压过程分析如下。



由此可见,在稳压电路中,稳压管起着电流控制作用,无论是输出电流变化,还是输入电压变化,都将引起较大的改变,并通过限流电阻产生调压作用,从而使输出电压稳定。在实际使用中,上述两个调整过程是同时存在并同时进行的。

3. 特点

并联型稳压电路可以使输出电压稳定,但稳压值不能随意调节,而且输出电流很小。

(五) 集成稳压器

前面介绍的硅稳压管稳压电路虽然电路结构很简单,但其输出的负载电流太小,稳压精度也不够高,一般只能应用于小负载的场合。当负载电流较大时,可采用集成稳压器来稳压。

集成稳压器将串联稳压电路和各种保护电路集成在一起。它具有稳压性能好、体积小、重量轻、价格便宜、使用方便、过流过热保护等优点,在现代电子技术中得到了广泛应用。

集成稳压器的种类较多,按其输出电压是否可调,可分为输出电压不可调集成稳压器和输出电压可调集成稳压器,按输出电压极性的不同,可分为正输出电压集成稳压器和负输出电压集成稳压器。

项目实施

一、电子元器件的检测与筛选

(一)外观质量检查

电子元器件应完整无损,各种型号、规格、标志应清晰、牢固,不能模糊不清或脱落。

(二)元器件的测试

1. 电阻器

常用电阻器实物及图形符号如图 1-31 所示。

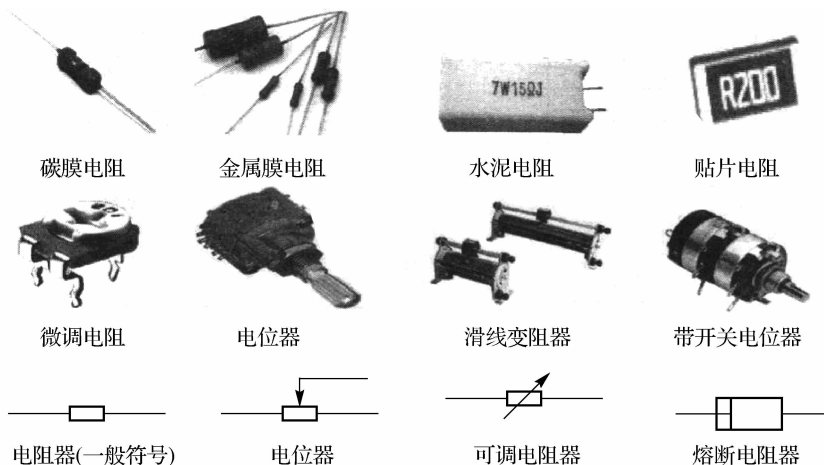


图 1-31 常用电阻器实物及图形符号

(1)电阻器常用的标示法。电阻器常用的标示法有三种。第一种是直标法,即用阿拉伯数字和单位符号在电阻器的表面直接标出标称电阻值和允许偏差,如图 1-32 所示。其优点是直观,易于判读。该方法主要用于功率比较大的电阻器。

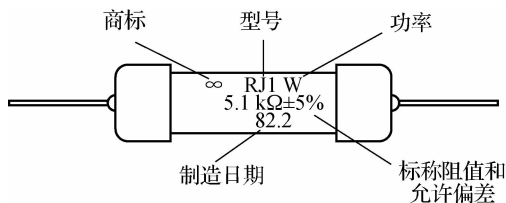


图 1-32 直标法表示的电阻器

第二种标示法是文字符号法,即用阿拉伯数字和字母符号按一定规律的组合来表示标称电阻值及允许偏差,其优点是认读方便、直观,可提高数值标记的可靠性。两位数码,如 15 表示 $100\ 000\ \Omega$;三位数码,如 103 表示 $10\ 000\ \Omega$ 。前面的数字表示有效数字,末位数字表示零的个数。这种标注方法在贴片电阻器上广泛采用。

文字符号法规定:用于表示电阻值时,字母符号 Ω 、k、M 之前的数字表示电阻值的整数

值,之后的数字表示电阻值的小数值,字母符号表示小数点的位置和电阻值单位,如 2k7 表示 2.7 kΩ。

第三种标示法是色标法,即用色环在电阻器表面标出电阻值和允许误差,颜色规定见表 1-1,其特点是标志清晰,易于看清。色标法又分为四色环色标法和五色环色标法,普通电阻器大多采用四色环色标法来标注。四色环的前两条色环表示电阻值的有效数字,第三条色环表示电阻值倍率,第四条色环表示电阻值允许误差范围。精密电阻器大多采用五色环法来标注,五色环的前三条色环表示电阻值的有效数字,第四色环表示电阻值倍率,第五色环表示允许误差范围。色标法的标志示意图如图 1-33 所示。

表 1-1 色标对应表

颜 色	有效数字	倍 率	允许误差	颜 色	有效数字	倍 率	允许误差
棕色	1	10 ¹	±1%	灰色	8	10 ⁸	—
红色	2	10 ²	±2%	白色	9	10 ⁹	±50%~±20%
橙色	3	10 ³	—	黑色	0	10 ⁰	—
黄色	4	10 ⁴	—	金色	—	10 ⁻¹	±5%
绿色	5	10 ⁵	±0.5%	银色	—	10 ⁻²	±10%
蓝色	6	10 ⁶	±0.2%	无色	—	—	±20%
紫色	7	10 ⁷	±0.1%	—	—	—	—

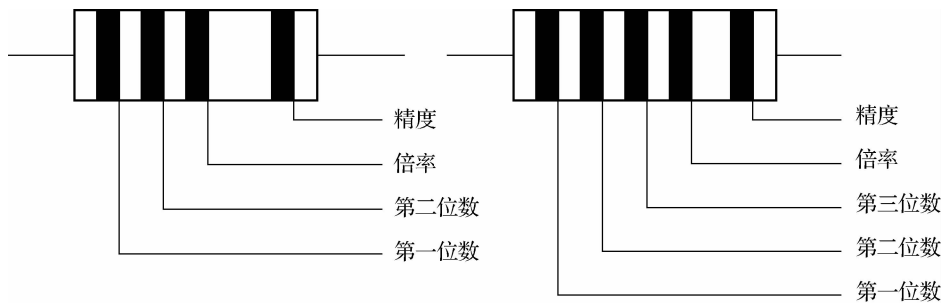


图 1-33 色环电阻器阻值标志图

(2)测试方法。使用电阻器时,首先要知道电阻器的好坏,然后再测定它的实际阻值。测量电阻时一般采用万用表的欧姆挡来进行。测量前,应将万用表调零。例如,将万用表置于 $R \times 10 \Omega$ 挡,将红、黑两根表笔短接,使表头指针阻值为零。然后用表笔接被测电阻器的两个引出脚,此时将表头指针偏转的指示值乘 10,即为被测电阻器的阻值。若指针不动或偏转较小,则可将万用表换到 $R \times 1 \text{ k}\Omega$ 挡,并重新调零再测量,此时若指针仍不摆动,则表示电阻器内部已断开,不能使用。如果指针指示几乎为零,可将万用表置于 $R \times 1 \Omega$ 挡(每次换挡均需要重新调零后才能进行测量),此时指针偏转后指示的值乘以 1 得到的值即为电阻器的阻值。

测量时应注意,手不能同时接触被测电阻器的两根引出脚,以免人体电阻影响测量的准确性。若测量电路板上的电阻器,则必须将电阻器的一端从电路中断开,以防电路中的其他元器件影响测量结果。

2. 变压器

常用变压器实物及图形符号如图 1-34 所示。用万用表测量变压器是最简单的方法。测量时,将万用表选在 $R \times 1 \Omega$ 挡或 $R \times 10 \Omega$ 挡,把表笔分别接在原边线圈(或副边线圈)的两端。若表针指示电阻值为无穷大,则说明线圈断路;若电阻值接近于零,则说明线圈正常;若电阻值为零,则说明线圈短路。之后把一只表笔接原边线圈,另一只表笔接副边线圈,电阻值应为无穷大,否则,说明原边线圈和副边线圈之间存在短路。若需进一步测量,可将原边线圈接交流 220 V,这时副边的空载电压应为 9 V。

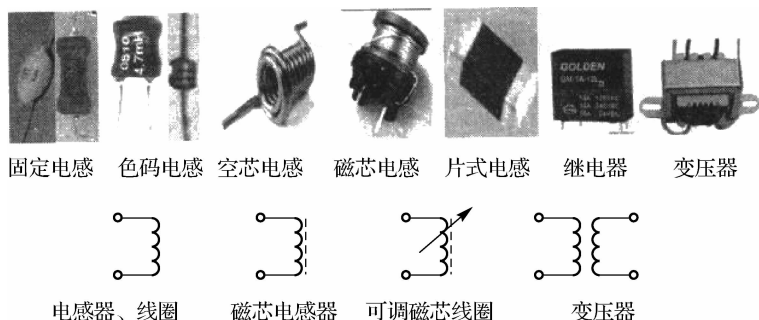


图 1-34 常用变压器实物及图形符号

3. 电容器

常用电容器实物及图形符号如图 1-35 所示。

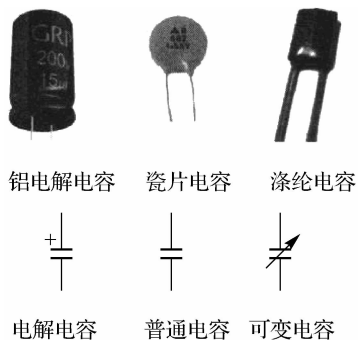


图 1-35 常用电容器实物及图形符号

(1) 电容器容量常用的标注方法。

电容器容量常用的标注方法有以下 5 种。

- ①直标法。直标法是将标称容量及偏差直接标在电容体上,如 $2\ 200\ \mu\text{F}/25\ \text{V}$ 。
- ②数字表示法。数字表示法是只标数字不标单位。采用此法仅限单位为 pF 和 μF 的两种电容器。例如,47、0.01 分别表示 47 pF、0.01 μF ;对于电解电容 1、220 则分别表示 1 μF 、220 μF 。
- ③数字字母法。数字字母法是在容量单位标示前面标出整数,后面标出小数。例如,1p5、6n8、4 μ 7、1m5 分别表示 1.5 pF、6 800 pF、4.7 μF 、1 500 μF 。
- ④数码法。前面的数字表示有效数字,末位数字表示 10 的幂指数。单位一般为 pF。

例如,103 表示 $10 \times 10^3 \text{ pF}$ ($0.01 \mu\text{F}$),224 表示 $22 \times 10^4 \text{ pF}$ ($0.22 \mu\text{F}$)。

⑤色标法。这种表示法与电阻器的色环法类似,将不同颜色涂于电容器的一端或从顶端向引线排列。一般只有三种颜色,前两环表示有效数字,第三环表示倍率,单位为 pF。有时色环较宽,如红—红—橙,两个红色环连在一起涂成一个宽环,表示 22 000 pF。

(2)测试方法。用普通的指针式万用表就能简单地判断电容器的质量、电解电容器的极性,并能定性比较电容器容量的大小。

①质量判定。用万用表 $R \times 1 \text{ k}\Omega$ 挡,将表笔接触电容器($1 \mu\text{F}$ 以上的容量)的两引脚,接通瞬间,表头指针应向顺时针方向偏转,然后逐渐逆时针回复,稳定后的读数就是电容器的漏电电阻,阻值越大表示电容器的绝缘性能越好;若在上述检测过程中,表头指针无摆动,说明电容器开路;若表头指针向右摆动的角度大且不回复,说明电容器存在严重漏电;若表头指针保持在 0Ω 附近,说明该电容器内部已击穿短路。

对于容量小于 $1 \mu\text{F}$ 的电容器来说,由于电容器充、放电现象不明显,检测时表头指针偏转幅度很小或根本无法看清,但并不说明电容器质量有问题。

②容量判定。检测过程同上,表头指针向右摆动的角度越大,说明电容器的容量越大,反之则说明容量越小。

③极性判定。根据电解电容器正接时漏电流小、漏电阻大,反接时漏电流大、漏电阻小的特点可判断其极性。将万用表置于 $R \times 1 \text{ k}\Omega$ 挡,先测一下电解电容器的漏电阻值,之后将表笔对调,再测一次漏电阻值。两次测试中漏电阻值小的那次的黑表笔接的是电解电容器的负极,红表笔接的是电解电容器的正极。

二、元器件和材料清单

本任务所用元器件和材料清单见表 1-2。

表 1-2 元器件和材料清单

符 号	规格/型号	名 称	符 号	规格/型号	名 称
T	220 V/9 V	变压器	R_2	200 Ω /0.5 W	电阻器
VD ₁	1N4007	二极管	LED	红色	发光二极管
VD ₂	1N4007	二极管	DW	2CW12	稳压二极管
VD ₃	1N4007	二极管	C	2 200 μF /25 V	电解电容器
VD ₄	1N4007	二极管	—	SYB-130	面包板
R ₁	1 k Ω /0.25 W	电阻器	—	$\Phi=0.6 \text{ mm}$	单股绝缘导线

三、电路的连接

本任务将利用单股绝缘导线在面包板上完成电路的连接。

(一)面包板的使用

面包板是专为电子电路的无焊接实验而设计制造的。由于各种电子元器件可根据需要插入或拔出,免去了焊接,节省了电路的组装时间,而且元件可以重复使用,因此非常适合电子电路的组装和调试训练。

1. 常用面包板的结构

SYB-130 型面包板如图 1-36 所示,插座板中央有一凹槽,凹槽两边各有 65 列小孔,每

一系列的 5 个小孔在电气上相互连通。集成电路的引脚就分别插在凹槽两边的小孔上。插座上、下边各一排(即 X 和 Y 排)在电气上是分段相连的 55 个小孔,分别用做电源与地线插孔。对于 SYB-130 插座板,X 和 Y 排的 1~20 孔、21~35 孔以及 36~55 孔在电气上是相通的。

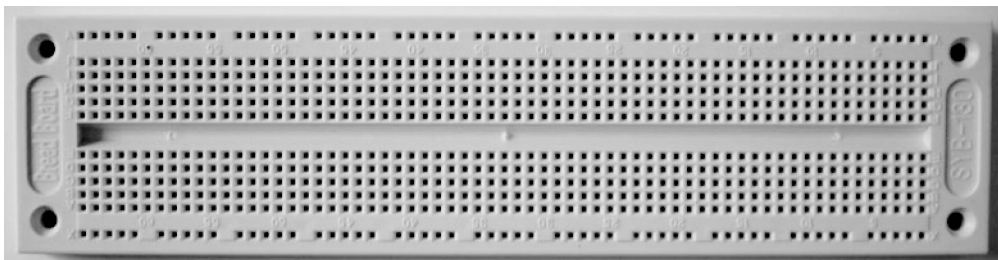


图 1-36 SYB-130 型面包板

面包板插孔所在的行、列分别以数码和文字标注,以便查对。

2. 布线工具

面包板布线时所用的工具主要有偏口钳、剥线钳、扁嘴钳和镊子。

偏口钳主要用来剪断导线和元器件的多余引脚。剥线钳用来剥离导线绝缘皮。扁嘴钳用来弯折和理直导线。镊子则用来夹住导线或元器件的引脚并将其送入面包板指定的插孔。

3. 使用方法和注意事项

(1)在插装元器件时,应便于看到其极性和标志,将元件引脚理直后,在需要的地方折弯。元器件一般不剪断引脚,以便于重复使用。一般不要插入引脚直径大于 0.8 mm 的元器件,以免破坏插座内部接触片的弹性。

(2)根据信号流程的顺序,采用边安装边调试的方法。元器件安装之后,先连接电源线和地线。为了查线方便,应尽量采用不同颜色的连线。

(3)连线宜使用直径为 0.6 mm 左右的单股导线。根据连线的距离以及插入插孔的长度剪断导线,要求线头剪成 45°斜口,线头剥离长度约为 6 mm,要求全部插入底板以保证接触良好。裸线不宜露在外面,以防止与其他导线短路。

(4)连线要紧贴的面包板上,以免碰撞弹出面包板,造成接触不良。连线时,不得使导线互相重叠在一起,尽量做到横平竖直,这样有利于查线、更换元器件及连线。

(二)元器件和材料的预处理

元器件插装前,首先利用万用表对元器件参数进行测试。然后利用小刀将元器件引脚上的氧化层刮掉,以避免接触不良,并用偏口钳将引脚的端头剪成 45°斜口,以便于插装。对连接导线的端头也进行同样处理。

(三)电路的连接

在面包板上按图 1-37 所示的位置和顺序插装元器件,并连接导线。在连线时一定要注意电容器、整流二极管、稳压管和发光二极管的极性。

四、电路的检测与调试

(一)目视检验

电路连接完成后,不要通电,应对照电路原理图或接线图逐个元件、逐条导线地认真检

查电路的连线是否正确、元器件的极性是否接反、元件的引脚及导线的端头在面包板插孔中的接触是否良好、布线是否符合要求等。

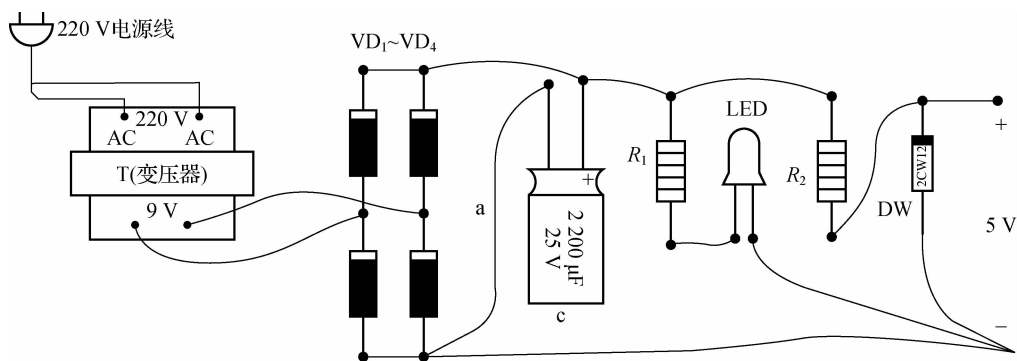


图 1-37 电路接线图

(二) 通电检测

目视检验完成后,把变压器原边经 0.5 A 的熔断器接入 220 V 交流电源,用万用表直流电压 10 V 挡测量输出电压是否为 5 V。若不正常,则应立即切断交流电源,并对电路重新检查。若正常,则可在输出端接入负载(利用 1 kΩ 电阻和 470 kΩ 电位器串联来代替),并在负载中串入直流电流表(直流电流 5 mA 挡)。调整电位器,观察输出电流在 0~5 mA 变化时输出电压是否稳定。

利用示波器观察电路整流滤波后的波形和输出直流电压的波形。将电路中的 a 线去掉,再观察整流滤波后的波形和输出直流电压的波形。

项目考核

班 级	姓 名	组 号	扣分记录	得 分
项 目	配 分	考核要求	评分细则	
准备工作	10 分	10 min 内完成所有元器件的清点、检测及调换	(1) 超出规定时间更换元件,扣 2 分/个; (2) 检测数据不正确,扣 2 分/处	
电路分析	15 分	能正确分析电路的工作原理	分析错误,扣 5 分/处	
组装焊接	20 分	(1) 能正确测量元器件; (2) 工具使用正确; (3) 元件的位置、连线正确; (4) 布线符合工艺要求	(1) 整形、安装或焊点不规范,扣 1 分/处; (2) 损坏元器件,扣 2 分/处; (3) 错装、漏装,扣 2 分/处; (4) 布线不规范,扣 1 分/处	

续表

班 级		姓 名		组 号		扣分记录	得 分	
项 目	配 分	考核要求		评分细则				
通电调试	15分	(1)直流输出电压约为5V; (2)输出电流为0~5mA		(1)直流无输出或输出偏差太大,扣2分; (2)不能正确使用测量仪器,扣2分/次				
故障分析	15分	(1)能正确观察出故障现象; (2)能正确分析故障原因,判断故障范围		(1)故障现象观察错误,扣2分/次; (2)故障原因分析错误,扣2分/次; (3)故障范围判断过大,扣1分/次				
故障检修	15分	(1)检修思路清晰,方法运用得当; (2)检修结果正确; (3)正确使用仪表		(1)检修思路不清、方法不当,扣2分/次; (2)检修结果错误,扣2分/次; (3)仪表使用错误,扣2分/次				
安全、文明工作	10分	(1)安全用电,无人损坏仪器、元件和设备; (2)保持环境整洁,秩序井然,操作习惯良好; (3)小组成员协作和谐,态度正确; (4)不迟到、早退、旷课		(1)发生安全事故,扣10分; (2)人为损坏设备、元器件,扣10分; (3)现场不整洁、工作不文明、团队不协作,扣5分; (4)不遵守考勤制度,每次扣2~5分				
总 分								

思考与练习

一、填空题

1. 半导体中有_____和_____两种载流子参与导电。
2. 本征半导体中,若掺入微量的5价元素,则形成_____型半导体,其多数载流子是_____;若掺入微量的3价元素,则形成_____型半导体,其多数载流子是_____。
3. PN结在_____时导通,_____时截止,这种特性称为_____性。当温度升高时,二极管的反向饱和电流将_____,正向压降将_____。
4. 用指针式万用表在使用欧姆挡测量有极性电容和半导体器件时,黑表笔接的是万用表内部电池的_____极,而红表笔接的是内部电池的_____极。
5. 常见二极管按材料可分为_____管和_____管,按PN结面积大小又可分为_____型、_____型和_____型。

6. 二极管的主要特性是具有_____。硅二极管死区电压约为_____ V, 锗二极管死区电压约为_____ V。硅二极管导通时的管压降约为_____ V, 锗二极管导通时的管压降约为_____ V。

7. 整流电路是利用二极管的_____性将交流电变为单向脉动的直流电。稳压二极管是利用二极管的_____特性实现稳压的。

8. 发光二极管是一种通以_____电流就会_____的二极管。

9. 光电二极管能将_____信号转变为_____信号, 它工作时需加_____偏置电压。

10. 测得某二极管的正向电流为 1 mA, 正向压降为 0.65 V, 则该二极管的直流电阻为_____ Ω , 交流电阻为_____ Ω 。

11. 直流稳压电源一般由_____、_____、_____和_____组成。

二、选择题

1. 万用表使用完毕, 应将转换开关置于()。

- A. 电阻挡
- B. 直流电流挡
- C. 交流电流最高挡
- D. 交流电压最高挡

2. 杂质半导体中, 多数载流子的浓度主要取决于()。

- A. 温度
- B. 掺杂工艺
- C. 掺杂浓度
- D. 晶格缺陷

3. PN 结形成后, 空间电荷区由()构成。

- A. 价电子
- B. 自由电子
- C. 空穴
- D. 杂质离子

4. 硅二极管的反向电流很小, 其大小随反向电压的增大而()。

- A. 减小
- B. 基本不变
- C. 增大
- D. 不定

5. 将交流电变成单向脉动直流电的电路称为()电路。

- A. 变压
- B. 整流
- C. 滤波
- D. 稳压

三、判断题

1. 在 N 型半导体中如果掺入足够量的 3 价元素, 可将其改为 P 型半导体。()

2. 因为 N 型半导体的多子是自由电子, 所以它带负电。()

3. 二极管在工作电流大于最大整流电流 I_F 时会损坏。()

4. 只要稳压二极管两端加反向电压就能起稳压作用。()

5. 电容滤波电路适用于小负载电流, 而电感滤波电路适用于大负载电流。()

四、计算题

1. 电路如图 1-38 所示, 设二极管为理想的, 试判断在下列情况下, 电路中二极管是导通还是截止, 并求出 AO 两端电压 U_{AO} 。(1) $V_{DD1} = 6\text{ V}, V_{DD2} = 12\text{ V}$; (2) $V_{DD1} = 6\text{ V}, V_{DD2} = -12\text{ V}$; (3) $V_{DD1} = -6\text{ V}, V_{DD2} = -12\text{ V}$ 。

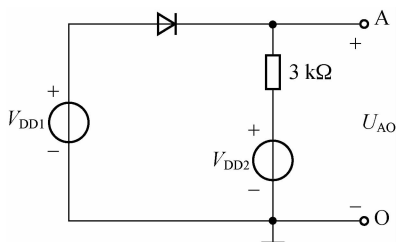


图 1-38 计算题 1

2. 二极管电路如图 1-39 所示, 设二极管为理想的, $u_i = (5 \sin \omega t) \text{ V}$, 试画出 u_o 的波形。

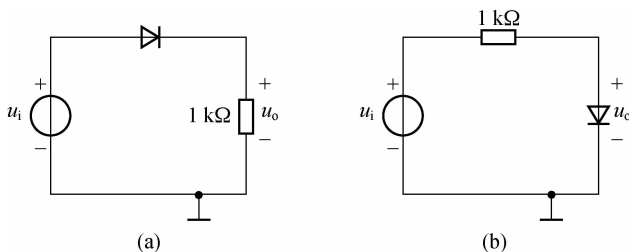


图 1-39 计算题 2

3. 二极管电路如图 1-40 所示, 二极管的导通电压 $U_{D(\text{on})} = 0.7 \text{ V}$, 试分别求出 R 为 $1 \text{ k}\Omega$ 、 $5 \text{ k}\Omega$ 时, 电路中的电流 I_1 、 I_2 、 I_O 和输出电压 U_O 。

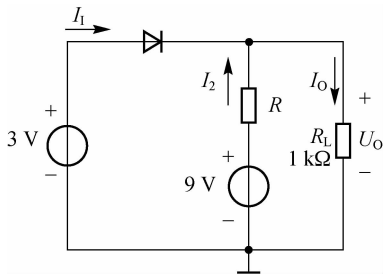


图 1-40 计算题 3

4. 现有两个稳压管, 其稳压值分别为 7 V 和 5 V , 当工作在正向时管压降为 0.7 V , 如果将它们用不同的方法串联后接入电路, 可能得到几种不同的稳压值? 试画出各种不同的串联电路。

5. 稳压电路如图 1-41 所示, 已知稳压二极管的参数 $U_Z = 6 \text{ V}$, $I_Z = 10 \text{ mA}$, $I_{ZM} = 30 \text{ mA}$ 。试求: (1) 流过稳压二极管的电流及其耗散的功率; (2) 限流电阻 R 所消耗的功率。

6. 单相桥式整流电容滤波电路见图 1-24(a), 已知交流电源频率 $f = 50 \text{ Hz}$, $U_2 = 15 \text{ V}$, $R_L = 50 \Omega$ 。试决定滤波电容的大小, 并求出输出电压 U_O 及流过二极管的平均电流及各管承受的最高反向电压。

7. 直流稳压电源如图 1-42 所示, 已知 $U_2 = 10 \text{ V}$, 试回答下列问题: (1) 电路由哪几部分组成? 各组成部分由哪些元器件组成? (2) U_1 、 U_O 各等于多少? (3) 三端稳压器所承受的功耗大约为多少?

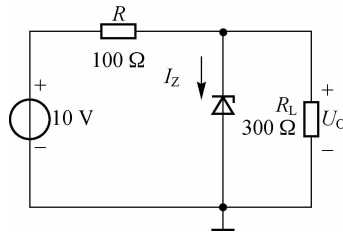


图 1-41 计算题 5

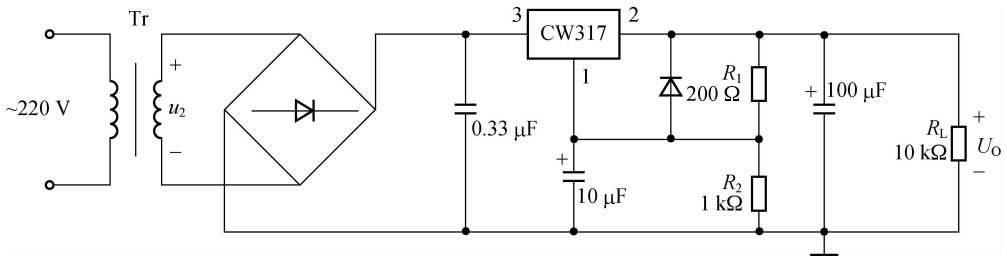


图 1-42 计算题 7