

第2章 半导体二极管及其应用电路

本章要点

1. 半导体的基础知识
2. 半导体二极管的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数以及二极管基本电路及其分析方法和应用
3. 稳压二极管、变容二极管和光电二极管的认识

2.1 半导体的基础知识

2.1.1 半导体

自然界中的各种物质,按其导电能力划分为导体、绝缘体和半导体。通常人们把容易导电的物质称为导体,如金、银、铜等。把在正常情况下很难导电的物质称为绝缘体,如陶瓷、云母、塑料、橡胶等,这些材料在电力系统中得到了广泛应用。导电性能介于导体与绝缘体之间的材料,我们称之为半导体。在电子器件中,常用的半导体材料有:元素半导体,如硅(Si)、锗(Ge)等;化合物半导体,如砷化镓(GaAs)等;以及掺杂或制成其他化合物半导体材料,如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。其中,硅是最常用的一种半导体材料。

半导体有以下特点:

- (1)半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间。
- (2)半导体受外界光和热的刺激时,其导电能力将会有显著变化。
- (3)在纯净半导体中,加入微量的杂质,其导电能力会急剧增强。

2.1.2 本征半导体

本征半导体是一种纯净的半导体晶体。常用的半导体材料是单晶硅(Si)和单晶锗(Ge),其原子结构如图2-1(a)、(b)所示。由图可知硅和锗的外层电子都是四个,外层电子受原子核的束缚力最小,称为价电子,物质的导电性与价电子数有很大关系。有几个价电子就称为几价元素,硅和锗都是四价元素。在导体中,由于金属物质的原子其外层电子离原子核较远,受原子核的吸引力就很小,因此有大量的电子能挣脱原子核的束缚而成为自由电子,这就是为什么导体具有良好导电能力的原因。在绝缘体中,其外层电子离原子核较近,受原子核的束缚力很大,几乎没有自由电子存在,因此它不导电,即绝缘体在正常情况下是绝缘的。在特定条件

下,如在绝缘体两端加上特别高的电压,把外层电子硬“拉”出来,这时绝缘体就变成了导体,这种现象称为击穿。

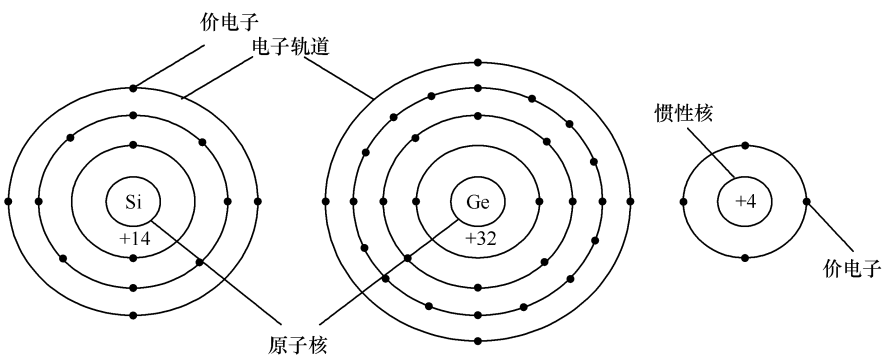


图 2-1 原子结构示意图
(a) 硅原子;(b) 锗原子;(c) 简化模

在硅和锗等半导体材料中,内部原子排列是有规律的,即为晶体结构。每个原子受邻近四个原子的束缚,组成四个共价键。共价键像纽带一样将排列整齐的原子连接起来,如图 2-2 所示。

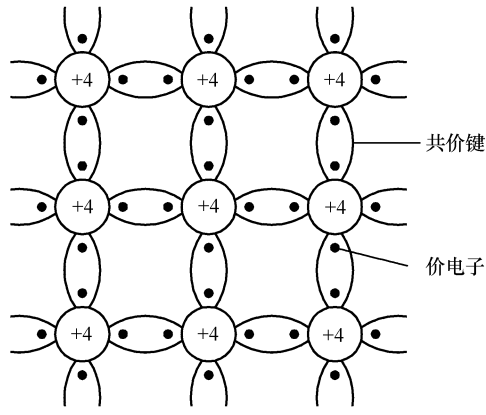


图 2-2 硅和锗的共价键结构

在热力学温度零度($0\text{K} = -273^{\circ}\text{C}$)时,价电子无法挣脱共价键的束缚,因此本征半导体中没有自由电子,此时半导体相当于绝缘体。但在常温下,少量价电子受热激发获得足够能量,挣脱了共价键的束缚而成为自由电子。同时,在原来共价键的位置上留下一个空位,称为空穴。在外加电场或其他能源的作用下,邻近价电子就可填补到这个空位上,而在这个电子原来的位置上又留下新的空位,以后其他电子又可转移到新空位上,因此空穴能参与导电。空穴是由于失去一个电子而形成的,空穴可以看成带正电的导电粒子。

可见,在热激发下,本征半导体中存在两种能参与导电的载运电荷的粒子——

载流子：成对的电子和空穴。因此，在常温下，本征半导体不再是绝缘体了，但常温下由热激发产生的电子 - 空穴对的数量是很少的，这就是为什么本征半导体导电能力很差的原因。

需要指出的是，由热激发产生的自由电子，也会释放能量返回到附近的空穴，这种现象称为复合。

除了上面讨论的热激发以外，也可利用光照进行激发。热激发和光激发统称为本征激发。

在本征半导体中，随着温度的升高或光照的增强，电子 - 空穴对的数量将大大增加，导电能力将大大提高，这就是半导体具有热敏性和光敏性的基本原理。

2.1.3 杂质半导体

杂质半导体是指在本征半导体中掺入了微量其他元素（称为杂质）的半导体。杂质的掺入可以使半导体的导电性能发生显著的变化。根据掺入的杂质不同，杂质半导体可分为 N 型（电子）半导体和 P 型（空穴）半导体两大类。

1. N 型半导体

在纯净的半导体硅（或锗）中掺入微量五价元素（如磷）后，就可成为 N 型半导体，如图 2-3（a）所示。在这种半导体中，自由电子数远大于空穴数，导电以电子为主，故此类半导体也称电子型半导体。

2. P 型半导体

P 型半导体是在本征半导体硅（或锗）中掺入微量的三价元素（如硼、镓等）而形成的。因杂质原子只有三个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，缺少一个电子，因此在晶体中便产生一个空穴，当相邻共价键上的电子受热激发获得能量时，就有可能填补这个空穴，使硼原子成为不能移动的负离子，而原来硅原子的共价键因缺少了一个电子，便形成了空穴，使得整个半导体仍呈中性，如图 2-3（b）所示。

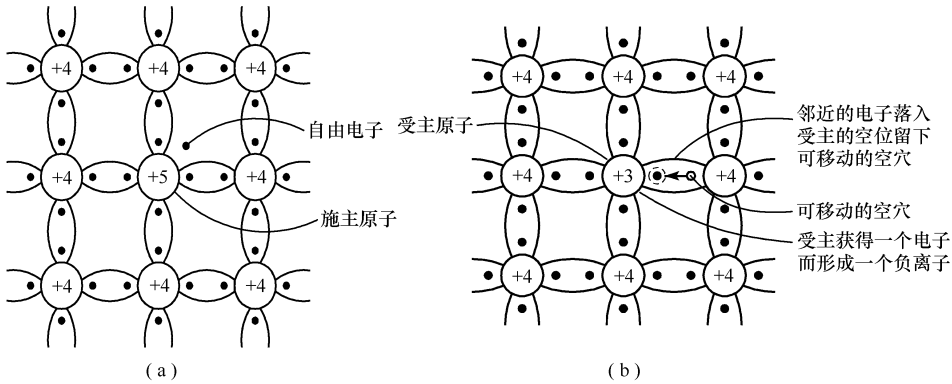


图 2-3 掺杂质后的半导体
(a) N 型半导体; (b) P 型半导体

在 P 型半导体中,原来的晶体仍会产生电子-空穴对,由于杂质的掺入,使得空穴数目远大于自由电子数目,成为多数载流子(简称多子),而自由电子则为少数载流子(简称少子)。导电以空穴为主,故此类半导体又称为空穴型半导体。

2.2 PN 结与晶体二极管

2.2.1 PN 结的基本原理

1. PN 结的形成

在一块完整的晶片上,通过一定的掺杂工艺,一边可形成 P 型半导体,另一边可形成 N 型半导体。

在交界面两侧形成一个带异性电荷的离子层,称为空间电荷区,并产生内电场,其方向是从 N 区指向 P 区,内电场的建立阻碍了多数载流子的扩散运动,随着内电场的加强,多子的扩散运动逐步减弱,直至停止,使交界面形成一个稳定的、特殊的薄层,即 PN 结。因为在空间电荷区内多数载流子已扩散到对方并复合掉了,或者说消耗尽了,因此空间电荷区又称为耗尽层。

2. PN 结的单向导电特性

在 PN 结两端外加电压,称为给 PN 结以偏置电压。

1) PN 结正向偏置——导通

给 PN 结加正向偏置电压,即 P 区接电源正极, N 区接电源负极,此时称 PN 结为正向偏置(简称正偏),如图 2-4(a)所示。由于 PN 结是高阻区,而 P 区与 N 区电阻很小,因而外加电压几乎全部落在 PN 结上。由图可见,外电场将推动 P 区多子(空穴)向右扩散,与原空间电荷区的负离子中和,推动 N 区的多子(电子)向左扩散与原空间电荷区的正离子中和,使空间电荷区变薄,打破了原来的动态平衡。同时电源不断地向 P 区补充正电荷,向 N 区补充负电荷,其结果使电路中形成较大的正向电流,由 P 区流向 N 区。这时 PN 结对外呈现较小的阻值,处于正向导通状态。

2) PN 结反向偏置——截止

将 PN 结按图 2-4(b)所示方式连接,此时称 PN 结为反向偏置(简称反偏)。由图可见,外电场方向与内电场方向一致,它将 N 区的多子(电子)从 PN 结附近拉走,将 P 区的多子(空穴)从 PN 结附近拉走,使 PN 结变厚,呈现出很大的阻值,且打破了原来的动态平衡,使漂移运动增强。由于漂移运动是少子运动,因而漂移电流很小;若忽略漂移电流,则可以认为 PN 结截止。

综上所述,PN 结具有单向导电性,加正向电压时,PN 结电阻很小,电流较大,是多数载流子的扩散运动形成的;加反向电压时,PN 结电阻很大,电流很小,是少数载流子运动形成的。

将一个 PN 结加上相应的两根外引线,然后用塑料、玻璃或铁皮等材料做外壳

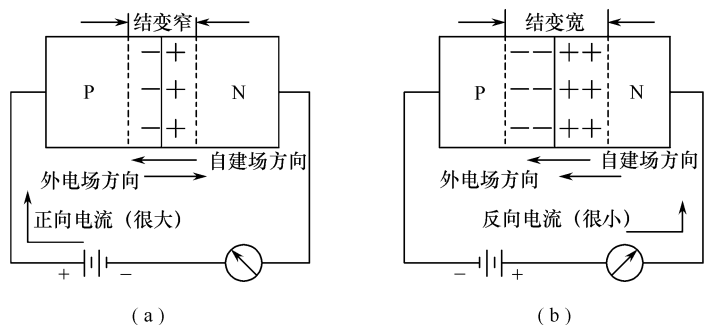


图 2-4 PN 结的单向导电性
(a) 正向连接;(b) 反向连接

封装就成为最简单的二极管。其中,正极从 P 区引出,为阳极;负极从 N 区引出,为阴极。根据所用材料不同,二极管可分为锗管和硅管。

2.2.2 晶体二极管

1. 半导体二极管的结构、符号及类型

1) 类型

- (1)按材料分:有硅二极管、锗二极管和砷化镓二极管等。
- (2)按结构分:根据 PN 结面积大小,有点接触型、面接触型二极管。
- (3)按用途分:有整流、稳压、开关、发光、光电、变容、阻尼等二极管。
- (4)按封装形式分:有塑封及金属封装等二极管。
- (5)按功率分:有大功率、中功率及小功率等二极管。

2) 结构及符号

半导体二极管又称晶体二极管,简称二极管。二极管的结构与符号如图 2-5 所示。

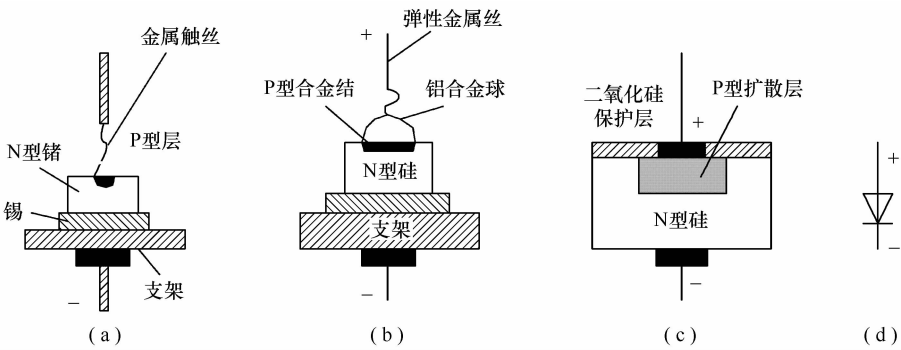


图 2-5 二极管的结构与符号

(a) 中为点接触型二极管;(b)面接触型二极管;(c)平面型二极管;(d)电路符号

点接触型二极管的 PN 结面积和极间电容均很小,不能承受高的反向电压和大电流,因而适用于制作高频检波和脉冲数字电路里的开关元件,以及作为小电流的整流管。

面接触型二极管(或称面结型二极管),这种二极管的 PN 结面积大,可承受较大的电流,其极间电容大,因而适用于整流,而不宜用于高频电路中。

2. 半导体二极管的命名方法

半导体器件的型号由五个部分组成,如图 2-6 所示。其型号组成部分的符号及其意义见附录一。如 2AP9,“2”表示电极数为 2,“A”表示 N 型锗材料,“P”表示普通管,“9”表示序号。

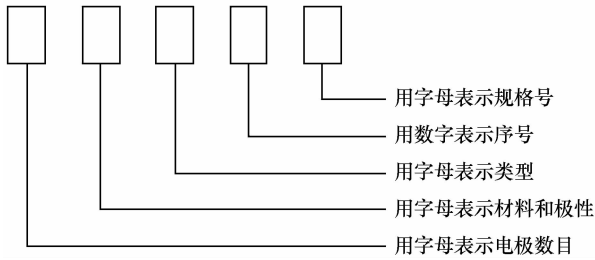


图 2-6 半导体器件的型号组成

3. 晶体二极管的伏安特性

半导体二极管的核心是 PN 结,它的特性就是 PN 结的特性——单向导电性。利用伏安特性曲线可形象地描述二极管的单向导电性。

若以电压为横坐标,电流为纵坐标,用作图法把电压、电流的对应值用平滑的曲线连接起来,就构成二极管的伏安特性曲线,如图 2-7 所示(图中虚线为锗管的伏安特性,实线为硅管的伏安特性)。下面对二极管伏安特性曲线加以说明。

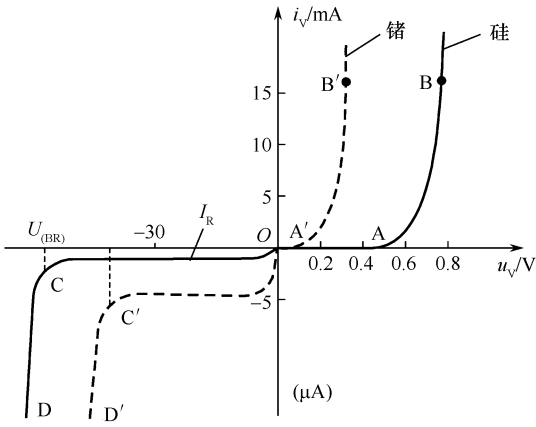


图 2-7 二极管伏安特性曲线

1) 正向特性

OA(OA')段:称为“死区”。相应的A(A')点的电压称为死区电压或门槛电压(也称阈值电压),硅管约为0.5V,锗管约为0.1V。

AB(A'B')段:称为正向导通区。此时硅管的正向导通压降为0.6~0.7V,锗管为0.2~0.3V。二极管正向导通时,要特别注意它的正向电流不能超过最大值,否则将烧坏PN结。

2) 反向特性

OC(OC')段:称为反向截止区。这时二极管呈现很高的电阻,在电路中相当于一个断开的开关,呈截止状态。

3) 反向击穿特性

CD(C'D')段:称为反向击穿区。当反向电压增加到一定值时,反向电流急剧加大,这种现象称为反向击穿。发生击穿时所加的电压称为反向击穿电压。这时电压的微小变化会引起电流很大的变化,表现出很好的恒压特性。同样,若对反向击穿后的电流不加以限制,PN结也会因过热而烧坏,这种情况称为热击穿。

4) 温度对特性的影响

由于二极管的核心是一个PN结,它的导电性能与温度有关。温度升高时,二极管正向特性曲线向左移动,正向压降减小;反向特性曲线向下移动,反向电流增大。

4. 二极管的主要参数

器件的参数是其特性的定量描述,是我们正确使用和合理选择器件的依据。半导体二极管主要参数有以下几个。

1) 最大整流电流 I_{FM}

I_{FM} 是指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流值,由PN结的面积和散热条件所决定,用 I_{FM} 表示。工作时,管子通过的电流不应超过这个数值,否则将导致管子过热而损坏。

2) 最高反向工作电压 U_{RM}

U_{RM} 是指二极管不击穿所允许加的最高反向电压。超过此值时二极管就有被反向击穿的危险。 U_{RM} 通常为反向击穿电压的1/2~2/3,以确保二极管安全工作。

3) 最大反向电流 I_{RM}

I_{RM} 是指二极管在常温下承受最高反向工作电压 U_{RM} 时的反向漏电流,此值越小,二极管的单向导电性越好。此值与温度有密切关系,在高温运行时要特别注意。

4) 最高工作频率 f_M

f_M 是指保持二极管单向导通性能时,外加电压允许的最高频率。二极管工作频率与PN结的极间电容大小有关,容量越小,工作频率越高。

二极管的类型和参数可查阅厂家提供的产品手册。

5. 二极管的选择与使用注意事项

根据上面的介绍可以归纳出选择二极管的几条基本原则:

- (1) 要求导通电压低时选锗管;要求反向电流小时选硅管。
- (2) 要求导通电流大时选平面形;要求工作频率高时选点接触型。
- (3) 要求反向击穿电压高时选硅管。
- (4) 要求耐高温时选硅管。

值得注意的是,由于制造工艺的限制,即使是同一型号的管子,参数的分散性也很大,附录 A-1 给出参数的范围。另外,手册上的参数是在一定的测试条件下测得的,应用时要注意这些条件,若条件改变,相应的参数值也会发生变化。比如, I_R 就是指在一定温度下外加某电压值的反向电流,若温度升高则 I_R 会增大。

6. 二极管的检测

(1) 一般情况下,可利用万用表判断普通二极管的极性,并粗略地鉴别其质量好坏。方法为:将万用表置于 $R \times 100$ 或 $R \times 1k(\Omega)$ 挡($R \times 1$ 挡电流太大,用 $R \times 10k(\Omega)$ 挡电压太高,都易损坏管子)。如图 2-8 所示,调零后用表笔分别正接、反接于二极管的两端引脚,这样可分别测得大、小两个电阻值。其中,较小的是二极管的正向阻值,如图 2-8(a) 所示;较大的是二极管的反向阻值,如图 2-8(b) 所示。由于万用表置电阻挡时,黑表笔连接表内电池正极,红表笔连接表内电池负极,因此测得正向阻值(小电阻)时,与黑表笔相连的就是二极管的正极。

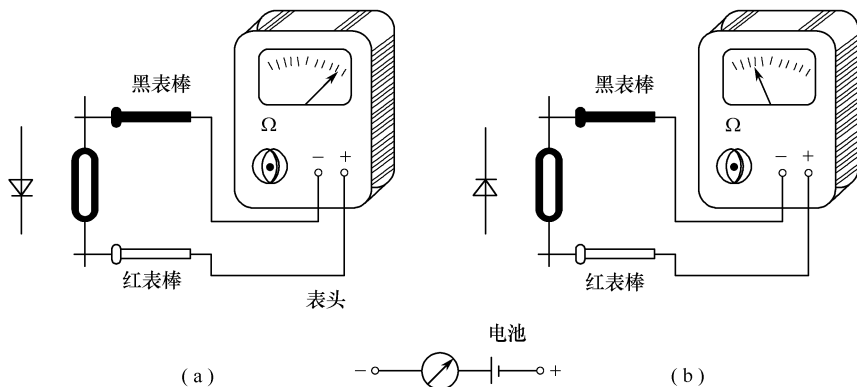


图 2-8 万用表简易测试二极管示意图

(a) 电阻小; (b) 电阻大

判断二极管的好坏,主要是看它的单向导电性能。正向阻值越小、反向电阻越大,则二极管的质量越好。如果一个二极管的正、反向电阻值相差不大,则为劣质管;如果正、反向电阻值都非常大(或都非常小),则二极管内部已断路(或已短路)。根据二极管的正向电阻值,还可以判断它是硅管还是锗管,因为硅二极管的正向电阻一般为几千欧,而锗二极管的正向阻值为几百欧。

(2) 当需要获知二极管的伏安特性时,可利用晶体管特性测试仪测得,也可利用测试电路测得。

7. 半导体二极管的应用

二极管是电子电路中最常用的器件。利用其单向导电性及导通时正向压降很小的特点,可进行整流、钳位和限幅或其他元件进行保护等。在数字电路中常常将二极管当作开关来使用。

1) 钳位

利用二极管正向导通时压降很小的特性,可组成钳位电路,如图 2-9 所示。

图中,若 A 点 $U_A = 0$,二极管 V_D 可正向导通,其压降很小,故 F 点的电位也被钳制在 $0V$ 左右,即 $U_F \approx 0$ 。

2) 限幅

利用二极管正向导通后其两端电压很小且基本不变的特性,可以构成各种限幅电路。限幅电路也称为削波电路,它是一种能把输入电压的变化加以限制的电路,常用于波形变换和整形,如图 2-10(a) 所示。设 $u_i = 5\sin\omega t(V)$, $E = 2V$ 。当 $u_i > E$ 时,二极管导通, $u_o = E = 2V$; 当 $u_i < E$ 时,二极管截止,电阻 R 中没有电流, $u_o = u_i$ 。输入、输出波形如图 2-10(b) 所示。显然,电路把输出电压的正峰值限制在 $2V$ 。

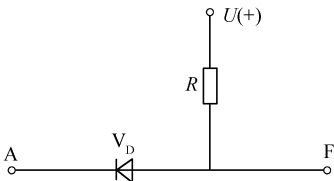


图 2-9 二极管钳位电路

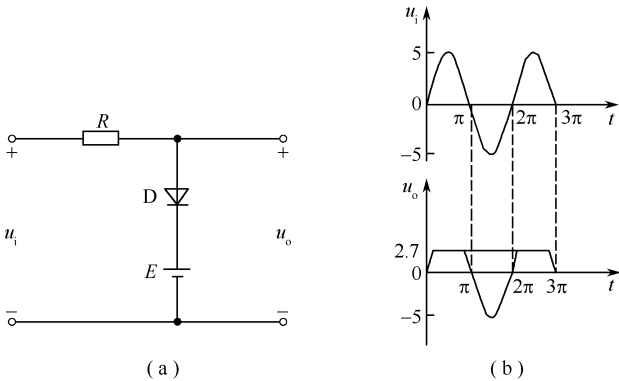


图 2-10 二极管上限幅电路及波形
(a) 电路; (b) 输入、输出波形

3) 元件保护

在电子线路中,常用二极管来保护其他元器件免受过高电压的损害,如图 2-11 所示电路, L 和 R 是线圈的电感和电阻。在开关 S 接通时,电源 E 给线圈供电, L 中有电流流过,储存了磁场能量。在开关 S 由接通到断开的瞬时,电流突然中断, L 中将产生一个高于电源电压很多倍的自感电动势 e_L , e_L 与 E 叠加作用在开关 S 的

端子上,在 S 的端子上产生电火花放电,这将影响设备的正常工作,使开关 S 寿命缩短。接入二极管 V_D 后, e_L 通过二极管 V_D 产生放电电流 i ,使 L 中储存的能量不经过开关 S 放掉,从而保护了开关 S 。除以上用途外,还有许多特殊结构的二极管,例如,发光二极管、热敏二极管等。随着半导体技术的发展,二极管的应用范围越来越多,其中发光二极管是应用较多的一种二极管。

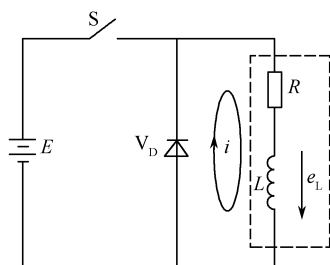


图 2-11 二极管保护电路

2.3 特殊二极管

2.3.1 稳压管

稳压二极管又称齐纳二极管,简称稳压管。它是一种特殊的面接触型硅二极管,其符号和伏安特性曲线如图 2-12 所示,它的正向特性曲线与普通二极管相似,而反向击穿特性曲线很陡。正常情况下稳压管工作在反向击穿区,由于曲线很陡,反向电流在很大范围内变化时,端电压变化很小,因而具有稳压作用。这种“反向击穿”是可恢复的,只要外电路限流电阻保障电流在限定范围内,就不致引起热击穿而损坏稳压管。

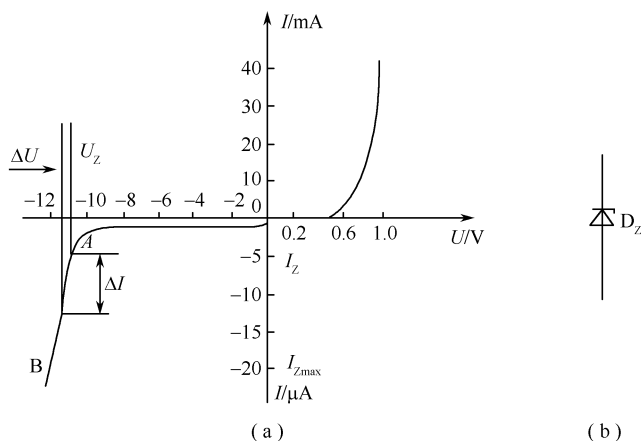


图 2-12 稳压管的伏安特性及符号

(a) 伏安特性; (b) 符号

稳压二极管的主要参数如下:

(1) 稳定电压 U_Z 。稳定电压 U_Z 即反向击穿电压。一般为 $3 \sim 25V$, 高的可达 $200V$ 。

(2) 稳定电流 I_Z 。稳定电流 I_Z 有最大稳定电流 I_{Zmax} 、最小稳定电流 I_{Zmin} 和工

作稳定电流之分。 $I_{Z\max}$ 是指稳压管正常时允许流过的最大电流值,若流过稳压管的电流超过 $I_{Z\max}$ 时,则管子将发热而损坏。 $I_{Z\min}$ 是稳压管维持稳压工作时的最小电流值,若流过稳压管的电流低于 $I_{Z\min}$,则稳压管将不再有稳压作用。稳压管的实际工作电流值 I_Z 要大于 $I_{Z\min}$ 而小于 $I_{Z\max}$,才能保证稳压管既能稳定电压又不至于损坏。

(3)最大耗散功率 P_M 。指保证稳压管安全工作所允许的最大功率损耗,其值为 $P_M = I_{Z\max} \cdot U_Z$ 。

(4)动态电阻 r_Z 。动态电阻也称交流电阻,它指稳压管在正常工作时,电压变化量与电流变化量之比,即 $r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$ 。

稳压管还有许多其他参数,可查阅相关手册。

2.3.2 发光二极管

发光二极管(LED)与普通二极管一样,也是由PN结构成的,同样具有单向导电性,但在正向导通时,由于空穴和电子的复合而发出能量,发出一定波长的可见光。光的波长不同,颜色也不同,常见的LED有红、绿、黄等颜色。所以,它是一种把电能转换成光能的半导体器件。电路符号如图2-13所示。发光二极管用砷化镓、磷化镓等制成,驱动电压低、工作电流小,具有很强的抗振动和抗冲击能力。由于发光二极管体积小、可靠性高、耗电省、寿命长,被广泛用于音响设备及线路通、断状态的指示等。

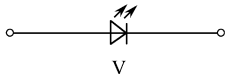


图2-13 发光二极管
电路符号

2.3.3 光电二极管

光电二极管又称光敏二极管,是一种将光信号转为电信号的半导体器件,其电路符号如图2-14所示。光电二极管的结构与普通二极管的结构基本相同,只是在它的PN结处,通过管壳上的一个玻璃窗口能接收外部的光照。光电二极管的PN结在反向偏置状态下运行,其反向电流随光照强度的增加而上升(这时的反向电流叫光电流)。光电流也与入射光的波长有关。光电二极管主要用于需要光电转换的自动探测、计数、控制装置中。

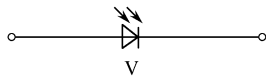


图2-14 光电二极管
电路符号

2.3.4 变容二极管

变容二极管是利用PN结电容可变原理制成的半导体器件,它仍工作在反向偏置状态。它的压控特性曲线和电路符号如图2-15所示。因其容量很小,为皮法数量级,所以主要用于高频场合下,例如,电调谐、调频信号的产生等。

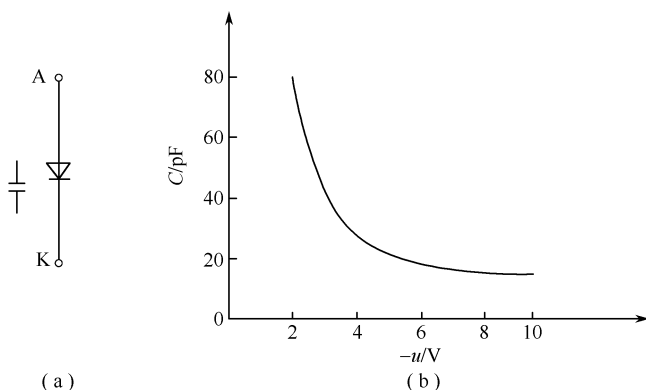


图 2-15 变容二极管符号及特性

(a) 电路符号; (b) 压控特性曲线

小 结

(1) PN 结是半导体器件的基础, PN 结正偏导通、反偏截止, 具有单向导电性、反向击穿性和非线性的特点。

(2) 二极管本质上是一个 PN 结, 其主要特点是单向导电性。其全面的性质可用伏安特性来描述。

(3) 二极管可用于整流、限幅、保护、开关等电路中。

(4) 稳压二极管、发光二极管、光电二极管、变容二极管等都是常用的特殊二极管, 各自用在不同的电路中。

习 题

2.1 填空题:

(1) 杂质半导体有_____型和_____型之分。

(2) 杂质半导体中多数载流子的浓度取决于_____。

(3) 二极管的两端加正向电压时, 有一段“死区电压”, 锗管约为_____, 硅管约为_____。

(4) 单向半波整流电路中, 利用二极管的_____特性, 可以将正弦交流电变成单方向脉动直流电。

(5) 硅稳压二极管主要工作在_____区。

(6) 光电二极管又称_____, 其 PN 结工作在_____状态。

(7) 发光二极管是一种把_____转换成_____的半导体器件。

2.2 如图 2-16 所示的各电路中, 二极管为理想二极管。试分析二极管的工

作状态,并求出流过二极管的电流。

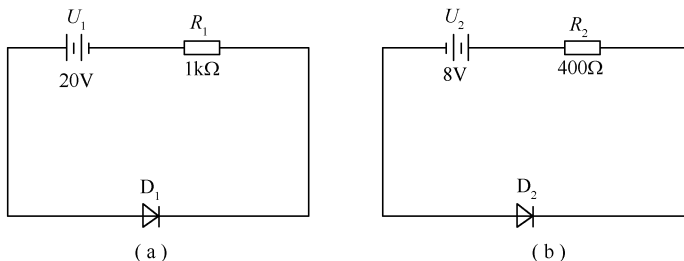


图 2-16 习题 2.2 图

2.3 图 2-17 中, D_1 、 D_2 都是理想二极管, 求电阻 R 中的电流和电压 u_o 。已知 $R = 6k\Omega$, $U_1 = 6V$, $U_2 = 12V$ 。

2.4 如图 2-18 中, D_1 、 D_2 均为理想二极管, 直流电压 $U_1 > U_2$, u_i 、 u_o 是交流电压信号的瞬时值。试求:

- (1) 当 $u_i > U_1$ 时, u_o 的值;
- (2) 当 $u_i < U_1$ 时, u_o 的值。

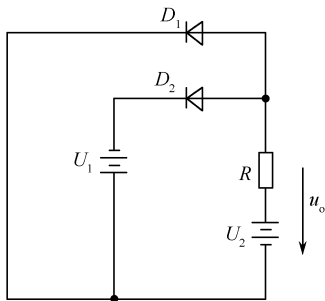


图 2-17 习题 2.3 图

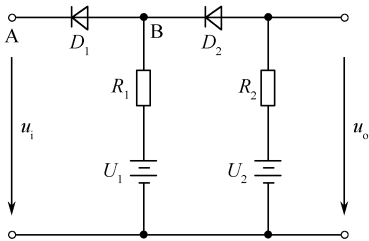


图 2-18 习题 2.4 图

2.5 两个稳压管 D_{Z1} 和 D_{Z2} 的稳压值分别为 $8.6V$ 和 $5.4V$, 正向压降均为 $0.6V$, 设输入电压 U_i 和 R 满足稳压要求。

- (1) 要得到 $6V$ 和 $14V$ 电压, 试画出稳压电路;
- (2) 若将两个稳压管串联连接, 可有几种形式? 各自的输出电压是多少?

2.6 在图 2-19 所示电路中, $U = 5V$, $u_i = 10\sin\omega tV$, D 为理想二极管, 试画出电压 u_o 的波形。

2.7 如图 2-20 中, 求下列几种情况下输出端 F 的电位 U_F 及各元件中流过的电流。

- (1) $U_A = U_B = 0V$; (2) $U_A = 3V$; $U_B = 0V$;
- (3) $U_A = U_B = -3V$ 。

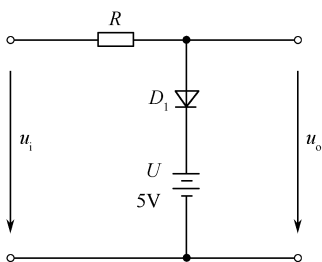


图 2-19 习题 2.6 图

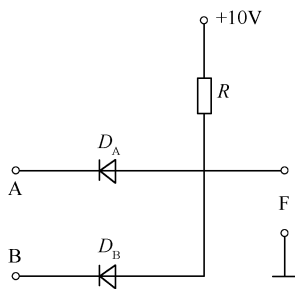


图 2-20 习题 2.7 图