

半导体器件

半导体器件是电子技术的基础。各种各样的电子线路的研发与设计总是离不开半导体器件的运用。电子技术发展到今天的水平,首先应该归功于半导体器件的发展。本章首先介绍了半导体的基本性能和特点,然后讨论了PN结的结构和特性,最后介绍了半导体二极管、晶体管、场效应管及光电器件,为后续章节的学习打下基础。

1.1 半导体基础知识

在相同条件下,物质的导电特性主要取决于其原子结构。铜、铁等金属为导体,其原子最外层电子受原子核的束缚力很小,极易挣脱原子核的束缚成为自由电子,呈现较好的导电特性。橡胶、塑料等材料为绝缘体,其最外层电子受原子核的束缚力很强,极不易摆脱原子核的束缚成为自由电子,因此其导电性很差。除导体和绝缘体外,还有一类物质,它的原子最外层电子受原子核束缚的程度介于导体和绝缘体之间,因此其导电能力也介于两者之间,这就是所谓半导体。通常,半导体的电阻率为 $10^{-4} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ 。在自然界中,属于半导体的材料很多,常用的有硅(Si)、锗(Ge)、硒(Se)、砷化镓(GaAs)等。硅和锗都是4价元素,其中以硅用得最广泛,在以后的讨论中,常以硅为例。

半导体材料的导电能力在不同条件下差异很大。有些半导体对外界温度的变化特别灵敏,温度升高,其导电能力增强。例如纯锗,温度每升高 10°C ,其电阻率就减少到原来的一半。利用这种特性可生产各种热敏元件。有些半导体受到光照和不受光照,其导电能力差别很大。例如常用的硫化镉半导体光敏电阻,在无光照时电阻高达几十兆欧,受到光照时电阻减少到几十千欧。利用这种特性可生产各种光敏元件。如果在纯净的半导体中掺入某些微量杂质可使其导电能力增加几十万至几百万倍。例如在纯硅中掺入百万分之一的硼元素,电阻率大约减小到原来的百万分之一。利用这种特性可做成各种实用的半导体器件,如二极管、晶体管和场效应管等。

为了揭示半导体导电能力变化显著的原因,有必要简单介绍一下半导体物质的内部结构和导电机理。

1.1.1 本征半导体

常用的半导体材料为硅和锗,其原子结构如图1.1.1(a)、(b)所示。硅和锗的最外层有



4 个价电子,是 4 价元素。为便于讨论,采用图 1.1.1(c)所示的简化原子结构模型。

硅和锗材料经过高纯度的提炼后,形成不含杂质的单晶体,所有原子整齐排列,其空间排列结构如图 1.1.2 所示。通常,半导体都具有这种晶体结构,所以,半导体也称为晶体,这就是晶体管名称的由来。本征半导体就是这种完全纯净、具有晶体结构的半导体。在本征半导体的晶体结构中,每一个原子与相邻的 4 个原子结合,每一个原子的一个价电子与另一个原子的一个价电子组成一个电子对,形成晶体中的共价键结构,其平面示意图如图 1.1.3 所示。

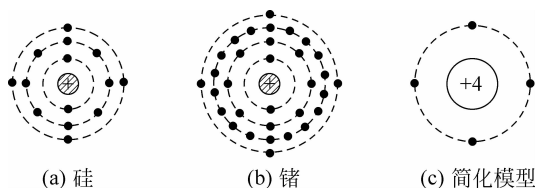


图 1.1.1 硅和锗的原子结构及其简化模型

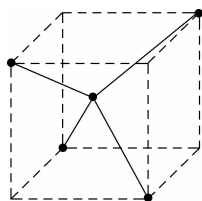


图 1.1.2 硅晶体的原子空间排列

在热力学温度 $T=0\text{K}$ 和无外界能量激发的条件下,每个价电子没有能力脱离共价键的束缚而成为自由电子,这时半导体不能导电,如同绝缘体。但如果温度升高或受到光照时,某些共价键中的价电子从外界获得足够的能量,摆脱共价键束缚而成为自由电子,同时在共价键中留下空位,称为空穴。当共价键中出现了空穴后,邻近共价键中的价电子就填补到这个空位上,而在该价电子的原来位置上出现了新的空穴,接着其他价电子又可能来到这个新的空穴,这种过程持续,就相当于一个空穴在晶体中移动,如图 1.1.4 所示。原子本来是电中性的,自由电子负电荷离开后,空穴可看成带正电荷的载流子。

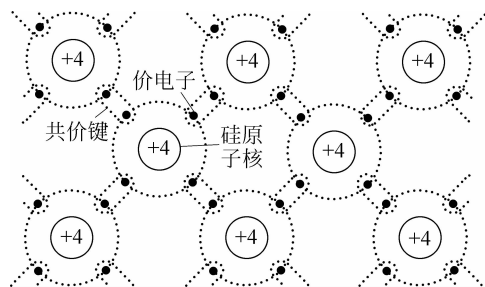


图 1.1.3 硅的共价键结构示意图

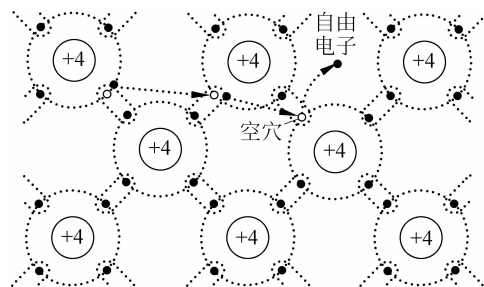


图 1.1.4 硅晶体中的两种载流子

在外电场作用下,带负电荷的自由电子产生定向移动,形成电子电流;另一方面,价电子也按一定方向依次填补空穴,相当于空穴产生了定向移动,形成空穴电流。

由此可见,半导体中存在两种载流子:自由电子和空穴。在本征半导体中,自由电子和空穴成对出现,同时又不不断复合。在一定温度下,载流子的产生和复合达到动态平衡,使载流子的浓度一定。随着温度升高,载流子的浓度按指数规律增加。因此,半导体的导电性能受温度影响很大。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中载流子的浓度很低,因此其导电能力很差。但如果在本征半导体中掺入



某些微量元素后,它们的导电性能将发生显著的变化。掺入杂质的半导体,称为杂质半导体。根据掺入的杂质不同,杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

如果在硅(或锗)的晶体中,采用扩散等工艺,掺入微量 5 价元素,如磷、砷等,则原来晶体中的某些硅(或锗)原子被杂质原子代替。杂质原子的最外层有 5 个价电子,因此它与周围 4 个硅原子组成共价键时,还多余 1 个价电子。这个电子不受共价键的束缚,而只受自身原子核的吸引,这种束缚力比较微弱,在室温下很容易成为自由电子,如图 1.1.5 所示。在室温下,提供自由电子的杂质原子,就成为带一个单位电荷的正离子。在这种半导体中,自由电子的浓度大大高于空穴的浓度,主要依靠自由电子导电,称为 N 型半导体,自由电子是多数载流子(简称多子),而空穴是少数载流子(简称少子)。

2. P 型半导体

如果在本征半导体中,掺入微量 3 价元素,如硼、镓等,则原来晶体中的某些硅(或锗)原子被杂质原子代替。由于杂质原子的最外层只有 3 个价电子,当它和周围的硅(或锗)原子组成共价键时,因缺少一个价电子而形成空穴,如图 1.1.6 所示。在室温下,这些空穴很容易接受邻近共价键中的价电子,而使得杂质原子称为带一个单位电荷的负离子。在这种杂质半导体中,空穴的浓度大大高于自由电子的浓度,主要依靠空穴导电,所以称为 P 型半导体。在 P 型半导体中,空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子。

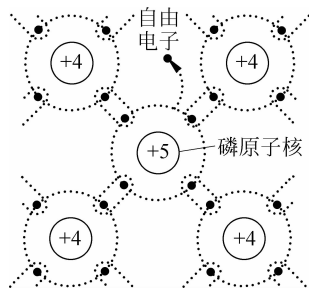


图 1.1.5 N 型半导体的结构示意图

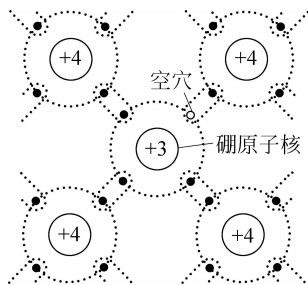


图 1.1.6 P 型半导体的结构示意图

在杂质半导体中,多数载流子的浓度主要取决于掺入的杂质浓度;而少数载流子的浓度主要取决于温度。特别需要注意的是,不论 N 型半导体还是 P 型半导体,虽然它们都有一种载流子占多数,但对外仍呈现电中性,整个晶体仍然是不带电的。

1.1.3 PN 结

1. PN 结的形成

如果在 N 型(或 P 型)半导体的基片上,采用平面扩散法等工艺,掺入 3 价(或 5 价)元素作为补偿杂质,使之形成 P 型(或 N 型)区,则在 P 区和 N 区之间的交界面附近,将形成一个很薄的空间电荷区,称为 PN 结,如图 1.1.7(a)所示。

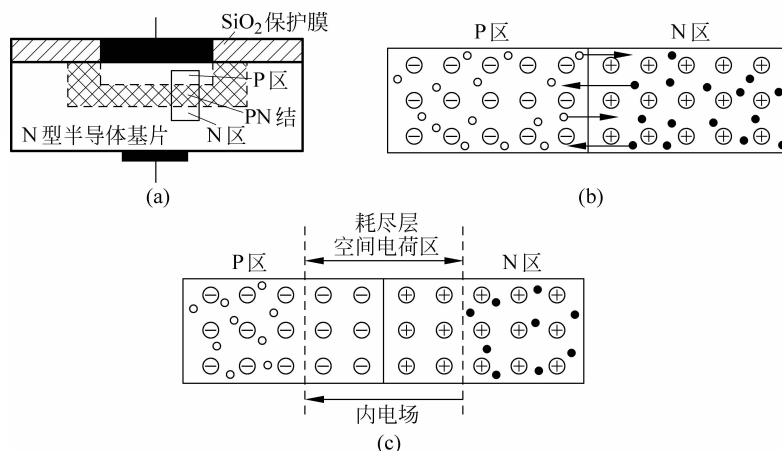


图 1.1.7 PN 结的形成

为了方便说明 PN 结的形成过程,我们将 PN 结附近的区域扩展为 1.1.7(b)所示的形式,即将一块半导体基片的一侧掺杂成为 P 型半导体,另一侧掺杂成为 N 型半导体,则在两者的交界面两侧,由于自由电子和空穴浓度相差悬殊,因而产生扩散运动。自由电子由 N 区向 P 区扩散,空穴由 P 区向 N 区扩散。自由电子和空穴都是带电粒子,因而自由电子由 N 区向 P 区扩散的同时,在交界面 N 区剩下不能移动的带正电的杂质离子;空穴由 P 区向 N 区扩散的同时,在交界面 P 区剩下不能移动的带负电的杂质离子。于是,在交界面形成一个由电荷量相等的正、负离子组成的空间电荷区(也称耗尽层),如图 1.1.7(c)所示。在交界面的 P 区一侧呈现出负电荷, N 区一侧呈现出正电荷,所以形成了一个由 N 区指向 P 区的内电场,这个内电场阻挡了多数载流子的扩散运动,推动少数载流子越过空间电荷区进入对方区域,这种少数载流子的运动称为漂移。当多数载流子的扩散和少数载流子的漂移运动达到动态平衡时,PN 结处于相对稳定状态。

2. PN 结的单向导电性

在 PN 结两端外加不同方向的电压,就可以破坏原来的平衡,从而呈现单向导电性。

1) 外加正向电压(亦称正向偏置,简称正偏)

将电源 E 的正极接 P 区,负极接 N 区,如图 1.1.8 所示,此接法称为正向接法或正向偏置。此时,外电场方向与 PN 结中内电场方向相反,削弱了内电场,使空间电荷区变窄,扩散运动增强,漂移运动减弱。因此,电路中形成一个较大的正向电流 I ,PN 结处于导通状态。图中 R 的作用是限制正向电流 I 的大小。

2) 外加反向电压(亦称反向偏置,简称反偏)

将电源的正极接 N 区,负极接 P 区,如图 1.1.9 所示,此接法称为反向接法或反向偏置。此时,外电场与内电场方向一致,增强了内电场的作用,使空间电荷区变宽,扩散运动减弱,漂移运动增强,在电路中形成一个反向电流 I ,因为少子浓度低,所以反向电流很小,PN 结处于截止状态。在一定温度下,当外加反向电压超过某个值(约零点几伏)后,反向电流不再随着反向电压的增加而增大,所以又称为反向饱和电流。正因为反向饱和电流是由少子产生的,所以对温度十分敏感,随温度升高反向饱和电流急剧增大。

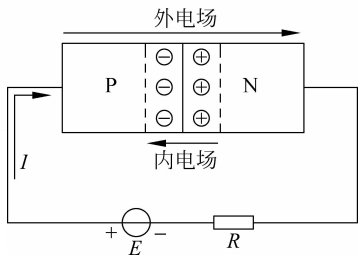


图 1.1.8 外加正向电压

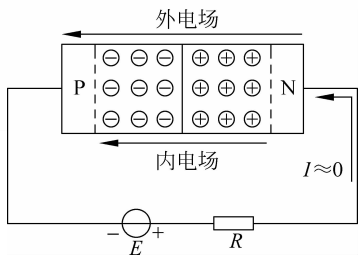


图 1.1.9 外加反向电压

【思考题】

1. 半导体导电机理与金属导体的导电机理有何不同？
2. 空穴电流是不是由自由电子递补空穴所形成的？
3. 既然 N 型半导体中的自由电子多于空穴，而 P 型半导体中的空穴多于自由电子，那么我们是否可以认为 N 型半导体带负电，而 P 型半导体带正电？
4. 什么是本征半导体？本征半导体升温后，两种载流子浓度仍然相等，这种说法是否正确？
5. 未加外部电压时，PN 结中电流从 P 区流向 N 区，这种说法对吗？为什么？

1.2 半导体二极管

1.2.1 基本结构

半导体二极管本质上仍是一个 PN 结，因而具有 PN 结的一些基本特性，其基本结构是由一个 PN 结加上引线 and 管壳构成。图 1.2.1(a) 为普通二极管的图形符号。

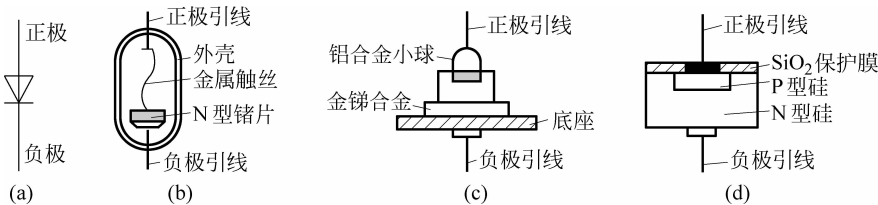


图 1.2.1 二极管的图形符号及三种结构

二极管的类型很多，从制造二极管的材料来分，有硅二极管和锗二极管。从管子的结构来分，主要有点接触型、面接触型和平面型三类，如图 1.2.1(b)、(c)、(d) 所示。点接触型二极管的特点是 PN 结的面积小，结电容小，适用于高频下工作，但不能通过很大的电流，主要用于小电流的整流和高频检波、混频等。面接触型二极管 PN 结的面积大，允许通过较大电流，但只能在较低频率下工作，可用于整流电路。平面型二极管，结面积较大时，可作大功率整流；结面积较小时，结电容也小，适合数字电路作开关二极管用。



1.2.2 伏安特性

硅二极管和锗二极管的性能可用其伏安特性来描述,如图 1.2.2(a)、(b)所示。特性曲线分为两部分:加正向电压时的特性称为正向特性(图 1.2.2(a)或(b)中的右半部分);加反向电压时的特性称为反向特性(图 1.2.2(a)或(b)中的左半部分)。

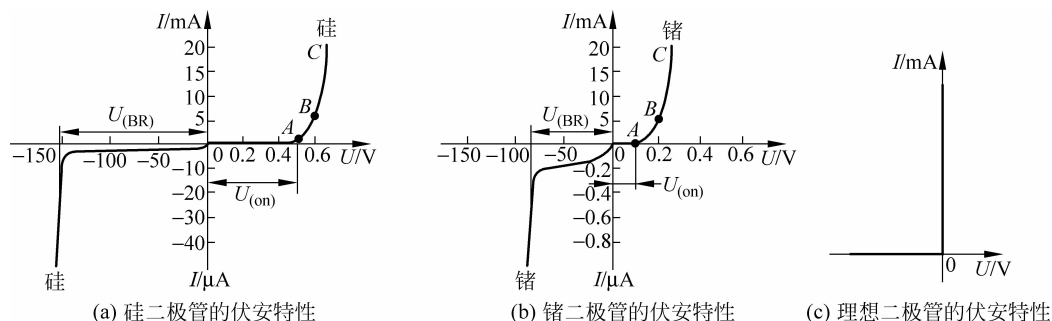


图 1.2.2 二极管的伏安特性

1. 正向特性

外加正向电压较小时,正向电流很小。只有当正向电压超过某一数值时(如图 1.2.2 中的 A 点),才有明显的正向电流。该电压称为死区电压(或称导通电压),用 $U_{(on)}$ 表示,其大小与材料及环境温度有关。通常,硅管的死区电压 $U_{(on)}$ 约 0.5V,锗管约 0.1V。当正向电压超过死区电压后,随着电压升高,正向电流迅速增大,即二极管处于导通状态。其中图中 AB 段的伏安特性曲线,电压增加,电流也按指数规律增加。而 BC 段的伏安特性曲线,电流迅速增加时,电压却变化很小,近似恒压源的特性,此时,二极管的正向压降基本为一常数,硅管为 0.6~0.7V,锗管为 0.2~0.3V。

2. 反向特性

外加反向电压时,反向电流很小,硅二极管的反向电流在纳安(nA)数量级,锗二极管的反向电流较大些。反向电压加到一定值时,反向电流急剧增加,产生击穿,二极管不再具有单向导电性。普通二极管的反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 一般在几十伏以上。

3. 理想二极管

由于二极管是一种非线性器件,为了分析由二极管所组成的各种电路,常需要将二极管的伏安特性曲线进行线性化处理。理想二极管,就是忽略二极管正向压降,将二极管的伏安特性曲线进行理想化处理后得到一种简单的等效模型,即用图 1.2.2(c)所示的两段折线近似二极管的伏安特性曲线。由图 1.2.2(c)可知,当外加正向电压时,二极管导通,其压降为零;而外加反向电压时,二极管截止,电流为零,这相当于把二极管看作一个理想开关。

理想二极管与实际二极管的特性虽有较大的差异,但在实用的二极管电路中,由于外部电源电压往往远大于二极管的正向压降,所以在工程上,常可忽略二极管的正向压降。具体情况可详见例 1.2.1。



1.2.3 主要参数

为了简单明了地描述半导体器件性能和极限运用条件,每一种半导体器件都有一套相应的参数。生产厂家将其汇编成手册,供用户使用。半导体二极管的主要参数有以下几个。

1. 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流是指二极管允许通过的最大正向平均电流,工作时应使平均工作电流小于 I_{OM} ,如超过 I_{OM} ,二极管将过热而烧毁。此值取决于 PN 结的面积、材料和散热情况。

2. 最大反向工作电压 U_{BRM}

最大反向工作电压是二极管允许的最大工作电压。当反向电压超过此值时,二极管可能被击穿。为保证二极管安全工作,通常取击穿电压 $U_{(BR)}$ 的一半作为最大反向工作电压 U_{BRM} 。

3. 反向峰值电流 I_{RM}

反向峰值电流是指在二极管上加最大反向工作电压时的反向电流值。此值越小,二极管的单向导电性越好。由于反向电流是由少数载流子形成的,所以它受温度的影响很大。

此外,二极管还有最高工作频率等参数,表 1.2.1 中列举了两种国产整流二极管的参数,可供参考。

表 1.2.1 两种国产整流二极管的参数

参数 型号	最大整流电流 /mA	最大反向工作电压 /V	反向峰值电流 / μ A	最高工作频率 /kHz	主要用途
2AP6	12	100	≤ 250	1.5×10^5	为点接触型锗二极管, 用作检波和小电流整流
2CP16	300	300	≤ 5	50	为面接触型硅二极管, 用作整流

1.2.4 应用

利用二极管的单向导电性,可以进行整流、检波、限幅、元件保护以及在数字电路中作为开关元件等。

分析二极管应用电路时,关键是判断二极管是导通还是截止,其方法是先将二极管拆去,然后观察二极管是加正向电压还是反向电压,加正向电压时二极管导通,加反向电压时二极管截止。二极管导通时,其两端的正向压降,可用电压源 $U_D = 0.7V$ (硅管,如果锗管用 $0.3V$) 代替,对理想二极管可用短路线代替;二极管截止时,一般将二极管断开,即认为二极管反向电阻无穷大。

例 1.2.1 图 1.2.3(a) 为由硅二极管构成的限幅电路,输出电压 u_o 被限制在一定范围内。当输入电压 u_i 为正弦交流电压时,取 $u_i = 20\sin\omega t$ V,如图 1.2.2(b) 中所示,直流电压源 $E = 10V$,试画出当二极管忽略正向压降和不忽略正向压降两种情况下,输出电压 u_o 的波形。

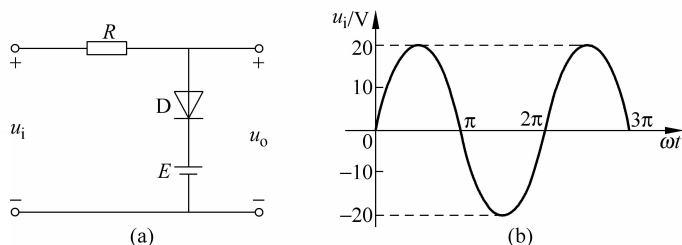
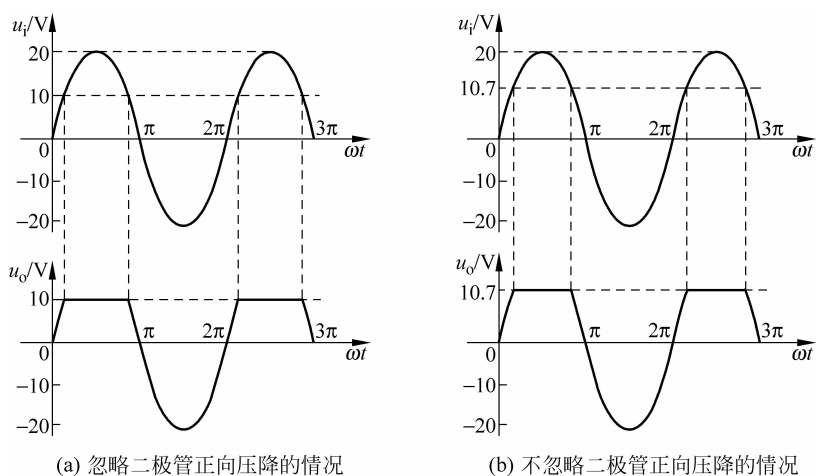


图 1.2.3 二极管的限幅电路

解：当忽略硅二极管的正向压降时，在输入电压 u_i 处于正半周且大于 10V 时，即 $u_i > 10\text{V}$ ，二极管导通， $u_o = E = 10\text{V}$ 。当 u_i 处于负半周或虽处于正半周但其数值小于 10V 时，即 $u_i < 10\text{V}$ ，二极管截止，则 $u_o = u_i$ 。输出电压 u_o 的波形如图 1.2.4(a) 所示。

图 1.2.4 输出电压 u_o 的波形

当不忽略硅二极管的正向压降时，在输入电压 u_i 处于正半周且大于 10.7V 时，即 $u_i > 10.7\text{V}$ ，二极管导通， $u_o = E + 0.7 = 10.7\text{V}$ 。当 u_i 处于负半周或虽处于正半周但其数值小于 10.7V 时，即 $u_i < 10.7\text{V}$ ，二极管截止，则 $u_o = u_i$ 。输出电压 u_o 的波形如图 1.2.4(b) 所示。

比较两种情况下，可见输出电压 u_o 的波形很近似。因此，在通常情况下，我们将二极管当作理想二极管来近似处理，可方便计算。

【思考题】

1. 二极管的伏安特性曲线上有一个死区电压，什么是死区电压？硅管和锗管的死区电压的典型值约为多少？外加正向电压导通后，硅管和锗管的正向压降的值分别约为多少？
2. 为什么二极管的反向饱和电流和外加反向电压基本无关，而当环境温度升高时，又明显增大？
3. 把一个 1.5V 的干电池直接接到(正向接法)二极管的两端，会不会发生什么问题？
4. 在二极管上加反向电压时，会形成很小的反向电流。反向电流的主要特点有哪些？
5. 二极管实质上就是一个 PN 结，其最基本的特性是什么？



1.3 稳压二极管

1.3.1 稳压管的伏安特性

稳压二极管是一种特殊的二极管,它采用硅材料(简称硅稳压管),掺杂浓度高,通常工作在反向击穿区。稳压管的伏安特性如图 1.3.1(a)所示,与普通二极管基本相同,但其可以工作在反向击穿状态,由图可见,当反向电压超过击穿电压 U_Z 时,反向电流急剧增大,但 PN 结两端的电压几乎不变,其大小接近击穿电压 U_Z ,表现出恒压源特性。利用这一特性,在不同的工艺条件下,可制成具有不同稳定电压的稳压管。稳压二极管的图形符号如图 1.3.1(b)所示。

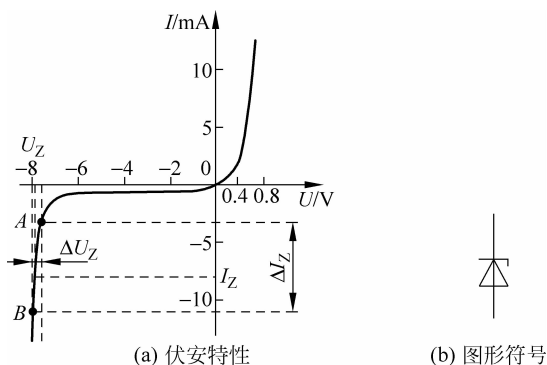


图 1.3.1 稳压管的伏安特性和图形符号

1.3.2 稳压二极管的主要参数

1. 稳定电压 U_Z

稳定电压 U_Z 是稳压管工作在反向击穿区时的稳定工作电压。由于稳定电压随工作电流的不同而略有变化,所以测试 U_Z 时应使稳压管的电流为规定值。稳定电压 U_Z 是挑选稳压管的主要依据之一。不同型号的稳压管,其稳定电压的值不同。对于同一型号的稳压管,由于制造工艺的不同,各个稳压管的稳定电压 U_Z 值也有差别,因而在选用稳压管时需注意。例如,型号为 2CW14 的稳压管,在稳定电流 $I_Z = 10\text{mA}$ 时, U_Z 的允许值在 $6 \sim 7.5\text{V}$ 之间。

2. 稳定电流 I_Z

稳定电流 I_Z 是使稳压管正常工作时的参考电流。如果工作电流低于 I_Z ,则管子的稳压性能变差;如果工作电流高于 I_Z ,只要不超过额定功耗,稳压管可以正常工作。每一种型号的稳压二极管,都规定有一个最大稳定电流 I_{ZM} 。因而,稳压管稳压时的工作电流应介于稳定电流 I_Z 和最大稳定电流 I_{ZM} 之间。



3. 动态电阻 r_z

在图 1.3.1(a)中,当稳压二极管工作在反向击穿区时,如果稳定电流 I_z 的变化由 A 点变化到 B 点,其变化量为 ΔI_z ,则稳定电压对应的变化量为 ΔU_z ,则动态电阻 r_z 就取两者的比值,即

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} \quad (1.3.1)$$

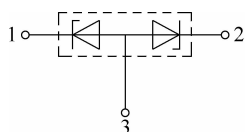
稳压管的 r_z 越小,说明反向击穿特性越陡,稳压特性越好。 r_z 的数值通常为几欧至几十欧,且随着 I_z 的增大,该值减小。在各种稳压管中,以稳定电压为 7V 左右的稳压管的动态电阻最小。

4. 电压温度系数 α_U

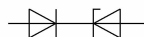
电压温度系数 α_U 是表征稳压值受温度变化影响的系数。例如 2CW14 稳压二极管的电压温度系数是 $0.06\%/^{\circ}\text{C}$,就是说如果温度每增加 1°C ,它的稳压值将升高 0.06% ,假设在 25°C 时的稳压值为 6V,那么在 45°C 时的稳压值将是

$$6 \times [1 + \alpha_U(45 - 25)] \approx 6.1\text{V}$$

一般来说, $U_z > 6\text{V}$ 的稳压管具有正的稳定系数; $U_z < 4\text{V}$ 的稳压管具有负的温度系数;而 U_z 在 $4 \sim 6\text{V}$ 之间的稳压管中,则是两种情况都有。为此,在要求稳压性能较好的情况下,常选用 6V 左右的稳压管。在要求更高的场合,可选用具有温度补偿的稳压管。如 2DW7 型稳压管是由两个稳定电压在 6V 左右的稳压二极管反相串联后制成的,如图 1.3.2(a)所示。当使用 1、2 端引线时,总有一只稳压管处于反向工作,它具有正温度系数;另一只处于正向工作,具有负温度系数,两者可以相互补偿。因此,在实际应用中,有时可将同型号的稳压管反相串联使用,获得具有双向稳压作用的双向稳压管,如图 1.3.2(b)所示,其图形符号如图 1.3.2(c)所示。



(a) 2DW7 型稳压管



(b) 两个同型号的稳压管串联使用



(c) 双向稳压管符号

图 1.3.2 稳压管示例

5. 最大允许耗散功率 P_{ZM}

由于稳压管两端加有电压 U_z ,管子中就有电流 I_z 流过,因此 PN 结上就要产生功率损耗,即 $P_z = U_z I_z$ 。这部分功耗转化为热能,使得 PN 结的温度升高,管子发热。当稳压管的 PN 结温度超过允许值时,稳压管将不能正常工作,以致烧坏。为此,在技术手册中,常对稳压管的最大允许耗散功率 P_{ZM} 作出规定,即 $P_{ZM} = U_z I_{ZM}$ 。为限制流过稳压管的电流 I_z ,使其不超过最大稳定电流 I_{ZM} ,通常要接限流电阻,以免过热而烧毁管子。

表 1.3.1 列出了几种常见稳压管的参数。