



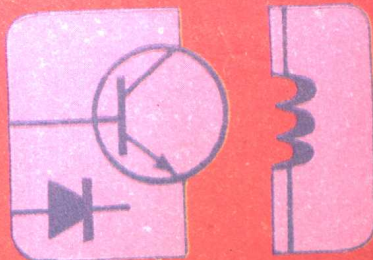
中央广播电视大学教材

电 工 学

下册

DIAN GONG XUE

主编 刘蕴陶



中央广播电视大学出版社

电 工 学

(下册)

刘蕴陶 主 编

中央广播电视大学出版社

(京)新登字 163 号

电 工 学

(下册)

刘蕴陶 主编

中央广播电视大学出版社出版

社址:北京西城区大木仓 39 号北门 邮编:100032

北京印刷三厂印刷 新华书店北京发行所发行

开本 787×1092 1/16 印张 16.75 插页 1 千字 383

1994 年 6 月第 1 版 1994 年 10 月第 1 次印刷

印数 1—21000

定价 9.40 元

ISBN 7-304-00973-X/TM · 22

主持教师:李西平

主 编:刘蕴陶

编 者:刘蕴陶、李西平

目 录

第七章 半导体器件	(1)
§ 7-1 半导体的导电特性	(1)
§ 7-2 PN 结及其单向导电性.....	(3)
§ 7-3 半导体二极管	(5)
§ 7-4 稳压管	(9)
§ 7-5 半导体三极管	(11)
第八章 基本放大电路	(24)
§ 8-1 基本放大电路的工作原理	(24)
§ 8-2 放大电路的分析方法	(30)
§ 8-3 静态工作点的稳定	(39)
§ 8-4 多级放大电路的耦合方式	(42)
§ 8-5 射极输出器	(47)
§ 8-6 功率放大电路	(50)
第九章 集成运算放大器	(63)
§ 9-1 直接耦合放大电路与差动放大电路	(63)
§ 9-2 集成运算放大器简介	(72)
§ 9-3 放大电路中的反馈	(75)
§ 9-4 理想运算放大器及输入方式	(82)
§ 9-5 集成运算放大器的应用	(86)
§ 9-6 集成运算放大器的使用知识	(104)
第十章 直流稳压电源	(114)
§ 10-1 整流电路	(114)
§ 10-2 滤波电路	(119)
§ 10-3 稳压电路	(124)
第十一章 数字电子电路	(132)
§ 11-1 数字电路的特点	(132)
§ 11-2 二进制计数制	(133)
§ 11-3 基本逻辑关系和基本逻辑门电路	(135)
§ 11-4 TTL 集成门电路	(143)
§ 11-5 逻辑代数	(152)
§ 11-6 组合逻辑电路	(158)

§ 11-7	触发器的基本形式	(163)
§ 11-8	按照逻辑功能分类的几种触发器	(169)
§ 11-9	主从型触发器和维持阻塞型触发器	(174)
§ 11-10	寄存器	(181)
§ 11-11	计数器	(187)
§ 11-12	译码器及显示电路	(200)
§ 11-13	集成 555 定时器	(208)
§ 11-14	数—模和模—数转换	(214)
§ 11-15	数字电路应用举例	(219)
第十二章	电工测量	(231)
§ 12-1	电工测量的基本知识	(231)
§ 12-2	常用电工仪表	(234)
§ 12-3	电流、电压和功率的测量	(239)
§ 12-4	电阻的测量 万用表	(245)
第十三章	安全用电	(249)
§ 13-1	触电形式、触电的预防与急救	(249)
§ 13-2	保护接地和保护接零	(251)
§ 13-3	静电防护和电气防火防爆	(253)
附录		(255)
附录一	半导体器件型号命名方法	(255)
附录二	半导体集成电路型号命名法(国家标准 GB3430-82)	(256)
附录三	几种集成运算放大器的主要参数	(258)
附录四	几种 TTL 电路的主要参数	(258)
附录五	常用电路图形符号新旧标准对照表	(259)

第七章 半导体器件

半导体器件最初意指以半导体二极管和三极管为主的电子控制器件,但随着集成技术的飞速发展,其寓意已扩展到具有某些特定功能的半导体组合件。由于半导体器件具有体积小、重量轻、寿命长、耗电少、工作可靠等诸多优点,因此在现代科技领域里获得了极为广泛的应用。

本章首先扼要地介绍半导体的基本知识,接着讨论半导体二极管和三极管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数,为后续各章的学习提供必要的基础知识。

§ 7-1 半导体的导电特性

所谓半导体,顾名思义,就是它的导电能力介于导体和绝缘体之间。在近代电子学中,用得最多的半导体是锗和硅。

很多半导体的导电能力易受外界条件变化的影响,主要表现在以下几个方面:

1. 温度的变化可以明显改变某些半导体的导电率,利用这种热敏效应,半导体可制成各种热敏元件。

2. 光照不仅可以改变某些半导体的导电率,还可产生电动势。利用半导体的光电效应可制成光敏电阻和光电池。尤其是后者在空间技术领域内应用广泛,为人类利用太阳能展现出广阔的前景。

3. 在纯净的半导体中掺入微量的某种杂质,其导电率可增加几十万乃至几百万倍。这是半导体能够制成各种不同用途的电子器件的根本所在。

使半导体导电能力产生变化的根本原因何在呢?为了解这点,需从半导体的原子结构和电机理的分析入手。

一、本征半导体

本征半导体就是由单一元素组成的、具有晶体结构的半导体。锗和硅的原子结构示于图 7-1。

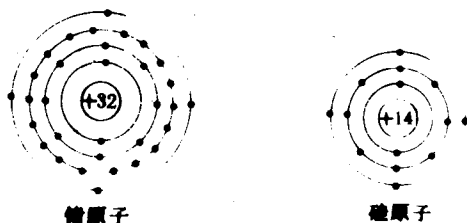


图 7-1 锗和硅的原子结构

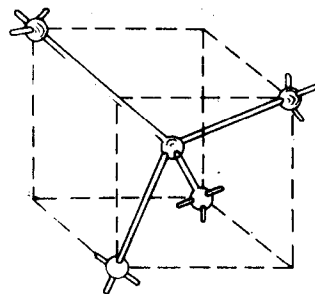


图 7-2 晶体中原子的排列方式

仅仅分析单一原子的结构是无意义的。事实上,锗和硅的晶体结构是三维空间内规则排列的单元晶格组成的。单元晶格为四面体,每个顶点有一个原子,见图 7-2。

锗和硅的外层电子都是 4 个,所以锗和硅都是四价元素。外层电子受原子核的束缚最小,称为价电子。由于原子排列得既整齐又紧密,原来分属于每个原子的价电子就可以转移到相邻的原子上去,于是这些电子实为整个晶体的所有原子所共有,这一特征称为电子的共有化运动。

显然,在电子的共有化运动中,两相邻原子各有一个价电子为两原子所直接共有。也就是说,相邻的原子被共有的价电子联系在一起,这样就形成了晶格中原子与原子间的一种组成结构,这种结构称为共价键,画成平面图,如图 7-3 所示。

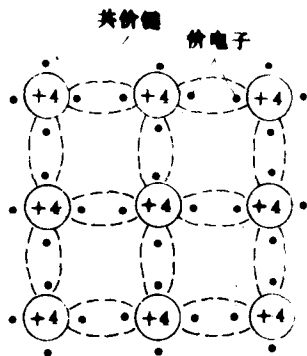


图 7-3 晶体的共价键结构

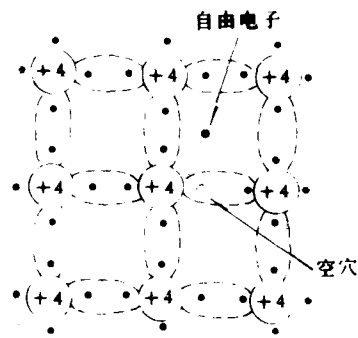


图 7-4 自由电子和空穴的形成

如果价电子仅局限在共价键中运动,半导体是不能导电的,这就好像农田中纵横交错的水渠,水渠不开,水也只能在渠道中流动。因此,电子挣脱共价键的束缚是半导体能够导电的先决条件。

温度接近绝对零度时,共价键中的价电子被束缚得很紧。室温(300K)下,加在晶体上的热能使少量共价键遭到破坏,这种情况示于图 7-4。图中表示一个参与共价键结构的价电子,由于受温度的影响挣脱了共价键的束缚而成为自由电子,这种现象称为热激发。当价电子挣脱束缚成为自由电子后,共价键中就留下一个空位,称为空穴。显然,存在空穴的原子是带正电的。在外加电场的作用下,有空穴的原子便会吸引相邻原子中的价电子来填充这个空穴。于是,在失去一个价电子的相邻原子的共价键中又出现了另一个空穴。如此持续下去,空穴便朝着与电子相反的方向移动。由于空穴和自由电子一样可参加导电,故统称二者为载流子。

当半导体两端加上外电压时,半导体中将出现两部分电流:一是自由电子做定向运动所形成的电子电流,一是仍被原子核束缚的价电子填充空穴所形成的空穴电流。半导体中并存电子导电和空穴导电是半导体导电方式的特点。

自由电子在运动过程中若与空穴相遇,如果它以一定的方式放出原来吸收的能量,就能填充空穴,此谓之复合。因此,本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现,同时又不不断复合。在一定的温度下,产生和复合达到动态平衡,于是半导体中的载流子便维持一定的数目。当然,

温度愈高,载流子的数目也就愈多,因此温度对半导体导电性能的影响是很大的。

二、N 型半导体和 P 型半导体

本征半导体虽然有两种载流子,但数量极少,导电性能很差。如果在纯净的半导体中掺入某些微量杂质,可使半导体的导电性能显著增强。

若在本征硅中掺入杂质磷,这种杂质的外层电子有 5 个,当一个磷原子取代一个硅原子时(图 7-5),外层中的 4 个价电子与 4 个相邻的硅原子形成共价键,第 5 个价电子不在共价键中,很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子。可见,掺入一个 5 价元素的原子,就能提供一个自由电子,因此掺杂所产生的自由电子数量比之热激发产生的自由电子数量要大得多。而自由电子数量的大大增加势必提高复合率,使得热激发产生的空穴数大为减少。在掺杂磷的情况下,导电主要靠自由电子,所以称这种半导体为电子半导体,简称 N 型半导体。在 N 型半导体中,自由电子是多数载流子,而空穴则为少数载流子,多数载流子取决于掺杂,少数载流子取决于温度。

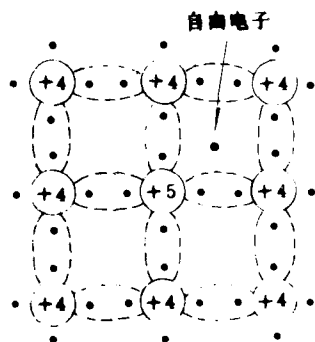


图 7-5 硅晶体中掺磷产生自由电子

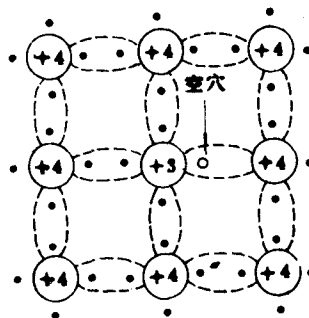


图 7-6 硅晶体中掺硼产生空穴

若在本征硅中掺入杂质硼,这种杂质的外层只有 3 个电子,当一个硼原子取代一个硅原子时,只形成了 3 个共价键,第 4 个由于缺少一个电子而形成空穴,如图 7-6 所示。室温下这个空穴能吸引邻近的价电子来填充,使杂质原子变成带负电的粒子,每掺入一个硼原子就能提供一个空穴,从而使空穴的数量远远超过自由电子。这种半导体的导电主要靠空穴,因此称为空穴半导体,简称 P 型半导体。P 型半导体的空穴是多数载流子,电子是少数载流子。

应该理解:无论是 N 型半导体还是 P 型半导体,电中性杂质加入到电中性的本征半导体中,就整体而言正负电荷仍然平衡,整个晶体呈中性。

思考练习题

1. 电子导电与空穴导电有何区别? 自由电子与空穴复合是否产生空穴电流?
2. N 型半导体和 P 型半导体中的多数载流子和少数载流子是怎样产生的?

§ 7-2 PN 结及其单向导电性

单一的杂质半导体,只能制成电阻元件来使用。如果经过特殊的工艺,将 P 型半导体和 N

型半导体紧密地结合在一起,就会在两种半导体的交界处形成 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的基础。

一、PN 结的形成

在一块半导体中,通过“掺杂”这一特殊工艺,使其一边成为 N 型半导体,另一边成为 P 型半导体。由于 P 型半导体存在较多的空穴, N 型半导体存在较多的电子,这样就要产生载流子的扩散运动。所谓扩散就是物质从浓度大的地方向浓度小的地方运动的形式。载流子的扩散运动如图 7-7 所示。

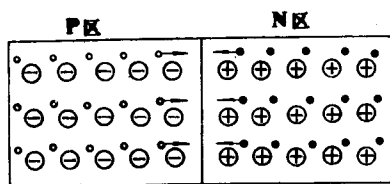


图 7-7 载流子的扩散运动

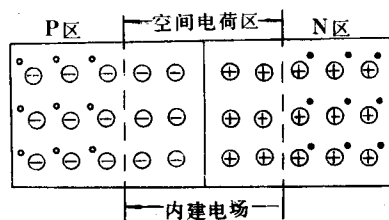


图 7-8 平衡状态下的 PN 结

扩散运动会不会无休止的延续下去,直至两半导体呈现载流子浓度完全一致的状态呢?回答是否定的。这是因为两种异号的载流子伴随着扩散将会在交界面附近复合掉。于是,在 P 型区一边随着空穴的消失留下不可移动的带负电的离子(用 $\ominus$ 表示)。在 N 型区一边随着自由电子的消失留下不可移动的带正电的离子(用 $\oplus$ 表示)。这两种不可移动的粒子便形成了空间电荷区,如图 7-8 所示。而正负离子不同的带电性质又导致了空间电荷区内内电场的建立。这个由 N 区指向 P 区的电场,是由多数载流子扩散运动在其内部形成的,故称为内电场。显然内电场方向是阻止扩散运动继续进行的。事实上,扩散运动在愈益增强了的内电场作用下是逐渐削弱的。

以上我们仅讨论了事物的一个方面,切莫忘记,无论是 N 型半导体还是 P 型半导体总是存在着由热激发产生的可移动的少数载流子的。尽管在扩散运动的初期,少数载流子的运动是微不足道的。但是,随着多数载流子扩散运动的进行,空间电荷区的加宽,也就是内电场的逐步加强,移动到空间电荷区边沿上的少数载流子将在内电场的吸引下形成漂移运动。所谓漂移,就是载流子在电场作用下产生的定向运动,这种运动形成了漂移电流。显然,漂移运动与扩散运动方向是相反的。因此,多数载流子扩散运动的削弱与少数载流子漂移运动的增强一旦达到等量齐观的时候,空间电荷区的宽度就固定下来,整个 PN 结将呈现动态平衡状态。

综上所述,内电场的作用有二,其一是阻止多子作进一步扩散运动,其二是推动少子作漂移运动。PN 结实际上是扩散和漂移两种互为相反运动的电流达到动态平衡时所呈现的状态。

二、PN 结的单向导电性

如果在 PN 结两端加正向电压(又称正向偏置),即外部电源正极接 P 区,负极接 N 区,如图 7-9(a)所示。由于空间电荷区是基本没有载流子的区域,它的电阻率很高,而维持电中性的 P 区和 N 区电阻率较低。因此,我们完全有理由认为外部电压基本上是施加在空间电荷区上

了。显然外加电场与内电场方向相反,因而削弱了内电场,使空间电荷区变窄。这样一来,自然有利于扩散运动的进行,于是多数载流子在外加电压作用下将顺利通过 PN 结(这时 PN 结呈现的正向电阻很低),形成较大的正向电流。在一定的范围内,外加电压愈大,正向电流愈大。

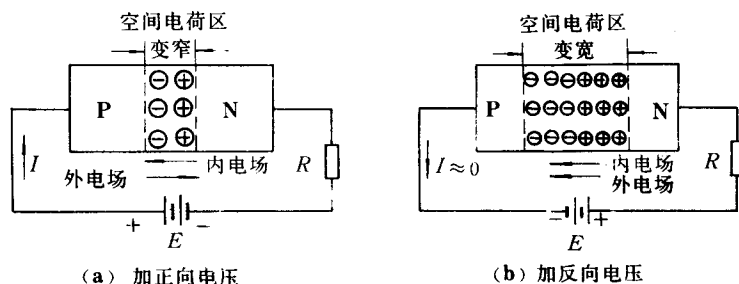


图 7-9 PN 结的单向导电性

如果在 PN 结两端加反向电压(又称反向偏置),即外部电源正极接 N 区,负极接 P 区,如图 7-9(b)所示。这样一来,外电场与内电场方向一致,外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走,使得空间电荷区变宽,导致多数载流子的扩散运动难以进行。

此外,在外电场作用下,P 区的少数载流子电子和 N 区的少数载流子空穴将漂移越过 PN 结形成微小的反向电流(这时 PN 结呈现的反向电阻很高)。尽管少数载流子数量极少,但因其决定于环境温度,故当环境温度上升时,其数量则相对增多。因此,温度对反向电流的影响较大。

由以上分析可知,PN 结加正向电压时,有较大的正向电流流过,这种情况称为导通。加反向电压时,通过的反向电流很小,这种情况称为截止。PN 结所具有的这种特性称为单向导电性。

思考练习题

1. 空间电荷区的电阻率为什么很高?
2. PN 结加反向电压时,空间电荷区是怎样变宽的。

§ 7-3 半导体二极管

一、基本结构

半导体二极管(以下简称二极管)是由一个 PN 结,加上接触电极、引出线和管壳构成的。常见二极管的外形及符号见图 7-10(a)(b)。

二极管视结构形式的不同,分为点接触型和面接触型两大类,图 7-11(a)(b)是这两种二极管的结构示意图。

点接触型二极管是由一根很细的金属丝和一块半导体(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,构成 PN 结的,如图 7-11(a)所示。

由于金属丝很细,形成的PN结面积很小,不能承受高的反向电压和大的电流。这种类型的管子多用来做高频检波和数字电路里的开关元件。

面接触型二极管的PN结是用合金法或扩散法做成的,其结构如图7-11(b)所示。由于面接触型二极管的PN结面积大,可承受较大的电流,所以这种类型的管子适用于整流。

在使用二极管时,必须注意极性不能接错,否则电路非但不能正常工作,还有毁坏管子和其它元件的可能。为此,一般在二极管管壳上标明“—▶”符号或色点。符号箭头所指为正向导通方向,色点所在一端表示为正极端。

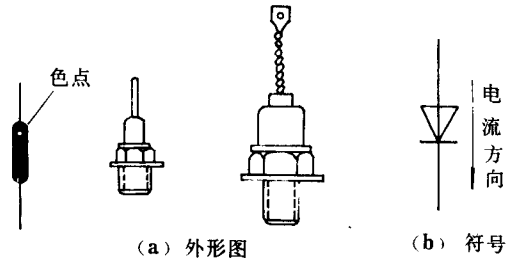


图 7-10 半导体二极管外形及符号

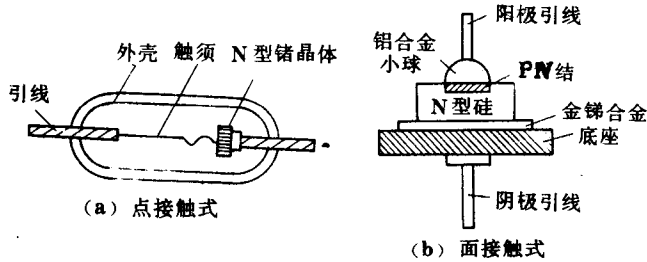


图 7-11 二极管结构示意图

二、伏安特性

二极管的性能常用伏安特性来表示。所谓伏安特性,就是指加在二极管两端的电压和流过二极管的电流之间的数量关系。

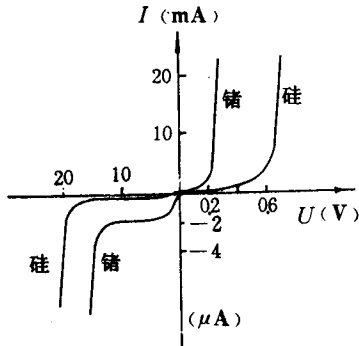


图 7-12 锗、硅二极管的伏安特性曲线

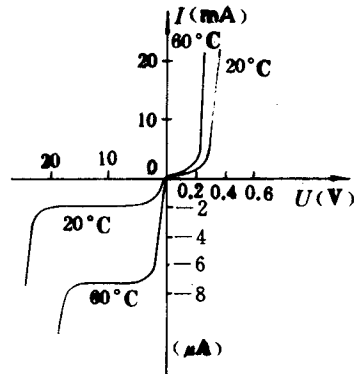


图 7-13 温度对二极管伏安特性的影响

图 7-12 是根据实测结果而描绘出的锗和硅两种二极管的伏安特性曲线。在第一象限是正向特性,第三象限是反向特性。

在二极管正向特性的起始部分,由于外加正向电压较小,外电场还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子所造成的阻力,因此这时的正向电流几乎为零,二极管呈现出很大的电阻。这个范围称为死区、相应的电压称为死区电压。锗管的死区电压约为 0.1V,硅管的死区电压约为 0.5V。当正向电压大过死区电压后,内电场被大大削弱,因而电流增长很快。一般在正常工作的情况下,锗管的正向导通压降为 0.2V,硅管的正向导通压降约为 0.7V。

在讨论 PN 结的反向特性时,我们已经知道由热激发产生的少数载流子,在反向电压作用下将通过 PN 结形成反向电流。但由于少数载流子数目是有限的,因此在反向电压不超过某一范围时,反向电流的大小基本恒定,故通常称其为反向饱和电流。如果外加反向电压过高,反向电流就会突然增大(图 7-12),这种现象称为击穿。发生击穿时的反向电压称为反向击穿电压。PN 结击穿时电流很大,电压也很高,因而消耗在 PN 结上的功率很大,容易使 PN 结发热超过它的耗散功率,从而烧毁二极管。

发生击穿的过程是很复杂的,一般的解释是,当外加反向电压过高时,通过空间电荷区的电子在强电场作用下获得了很大的能量,它们在高速运动中撞击晶体结构中的原子,使更多的电子脱离共价键而出现大量的自由电子和空穴,从而形成很大的反向电流。

温度对二极管伏安特性的影响也是应该注意的。由图 7-13 可见,加反压时,由于少数载流子是由温度决定的,所以温度上升,反向饱和电流就增大。与此同时,反向击穿电压相应下降。

温度对正向特性也有影响。温度升高,在同样的电流下,所需施加的电压可以减小。怎样理解温度的上升使正向电压下降呢?我们首先应该明确,温度上升,P 区和 N 区的少数载流子都要增加,而多数载流子不变。对 P 区而言,电子的增加将使得 PN 结交界面两边的电子浓度差减小,从而使从 N 区扩散到 P 区的电子数减少。同理,从 P 区扩散到 N 区的空穴也将减少。这样,空间电荷区必然变窄的事实表明内电场强度下降了。因此为维持一定的正向电流,所需的外加电压就可以降低。

三、主要参数

为了工程上能够正确选择不同类型,不同应用范围的半导体器件,常常把表征器件特性的参数事先测好,并以手册的形式归类作表(见附录)。二极管的主要参数有下面几个。

1. 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流是指二极管长期工作时,允许通过的最大正向平均电流。因为电流通过 PN 结要引起管子发热,电流过大,发热量超过限度就会烧坏 PN 结。一般 PN 结的面积愈大,最大整流电流愈大。

2. 最大反向电压 U_{RM}

最大反向电压是保证二极管不被击穿而给出的最高反向电压。一般手册上给出的最大反向电压约为击穿电压的一半,其目的是确保管子安全工作。点接触型二极管的最大反向电压为数十伏,面接触型二极管可达数百伏。

3. 最大反向电流 I_{RM}

它是最大反向电压下的反向电流。 I_{RM} 愈大,二极管的单向导电性能愈差,受温度的影响也愈大。硅管的反向电流一般在几个微安以下,锗管的反向电流一般在几十微安至几百微安之间。

除了上述三个主要参数外,还有最高工作频率、结电容以及工作温度等,均可在半导体器件手册中查到。

例 7-1 图 7-14(a)所示电路中,设 $u_i = 10\sin\omega t\text{V}$, $E_1 = E_2 = 6\text{V}$, 二极管具有理想特性(正向导通阻值为零,反向截止阻值为无穷大),试画出 u_o 波形。

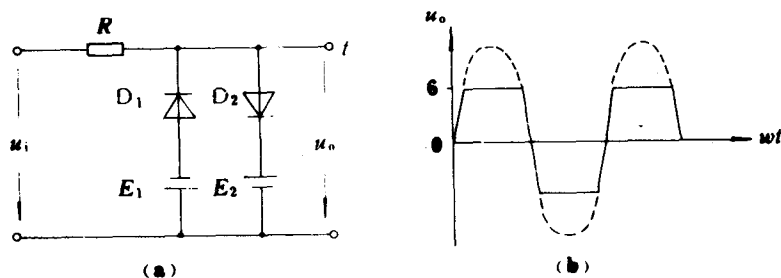


图 7-14 例 7-1 图

解 在 u_i 的正半周, D_1 截止; 而当 $u_i < E_2$ 时, D_2 也截止, 此时 u_o 随 u_i 而变化。当 $u_i \geq E_2$ 时, D_2 导通, u_o 电位被钳制在 6V 。同理, 在 u_i 的负半周, 当 $u_i \leq E_1$ 时, D_1 导通, u_o 电位被钳制在 -6V , 波形见图 7-14(b)。这是一种常见的二极管双向限幅(削波)电路。

例 7-2 在图 7-15(a)所示电路中, D 为理想二极管。当 u_i 为图 7-15(b)所示波形时, 试画出 u_o 波形。

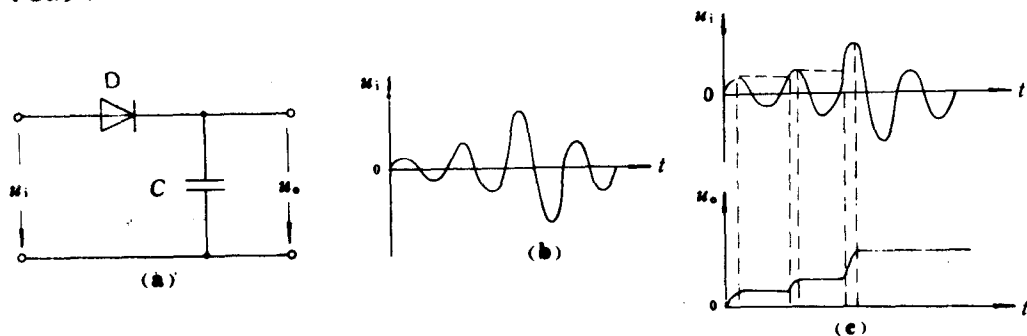


图 7-15 例 7-2 图

解 当二极管 D 导通时, u_i 对 C 充电, 由于 D 为理想二极管, 故 C 上充电电压紧随 u_i 。随着 u_i 的变化, 若 u_i 比 C 上电压低时, D 截止, C 因无放电回路, 其电压保持原值; 若 u_i 超过 C 上电压时, 二极管又导通, u_i 又向 C 充电至另一值, 最后 u_o 固定在 u_i 的最高峰值上, u_o 波形示于图 7-15(c)。此电路为峰值耦合电路。

思考练习题

1. 什么是死区电压, 为什么会出现死区电压, 硅管和锗管的死区电压大约是多少?
2. 二极管的反向饱和电流为什么与反向电压基本无关?
3. 把一个二极管正向连接到 1.5V 的干电池上, 会出现什么现象?

§ 7-4 稳压管

稳压管是一种特殊的半导体二极管, 特殊之处在于它工作在反向击穿状态, 而又不致损坏。原因是在制造工艺上采取了适当的措施, 使得 PN 结接触面上各点的电流比较均匀, 保证了在一定的反向电流数值内, 虽然工作在击穿状态, 但其 PN 结结温不会超过允许数值。稳压管的击穿是可逆的, 图 7-16 示出稳压管的表示符号和伏安特性曲线。

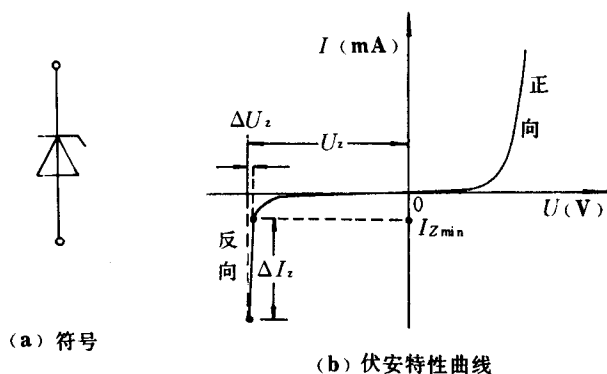


图 7-16 稳压管的符号和特性曲线

稳压管的伏安特性曲线与普通二极管类似, 差异之一是前者的反向特性曲线比后者陡一些。从反向特性曲线上可看出, 当反向电压增高到击穿电压时, 反向电流突然剧增。此后, 电流虽然在很大范围内变化, 但稳压管两端的电压却变化很小。利用这一特性, 稳压管能在电路中起到稳定电压的作用。

描述稳压管特性的参数, 主要有以下几个:

1. 稳定电压 U_Z

稳定电压是指稳压管在正常工作时管子两端的电压。手册中所列的都是在一定条件(工作电流、温度)下的数值。即使同一型号的管子, 由于工艺和其它方面的原因, 其稳压值也有一定的离散性。例如: 2CW19 的稳定电压为 11.5~14V, 是指对于这种型号中的某个管子, 它的稳定电压是在这个范围内的一个确定的数值。

2. 稳定电流 I_Z

稳定电流是指稳压管的工作电压等于稳定电压时的参考电流。电流低于此值时, 稳压效果

略差,高于此值时,只要不超过额定功率均可正常工作。一般手册中还给出其最大值 $I_{Z\max}$,它是稳压管正常工作时,稳定电流的极限值。使用时若超过此值,管子将因过热而损坏。

3. 耗散功率 P_Z

耗散功率是指稳压管不会因 PN 结温度过高而损坏的最大功率。它等于最大稳定电流 $I_{Z\max}$ 与相应的稳定电压 U_Z 的乘积。

4. 动态电阻 r_Z

动态电阻是指稳压管在正常工作时,端电压变化量与相应的电流变化量的比值,即

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad (7-1)$$

稳压管的反向伏安特性曲线愈陡,则动态电阻愈小,稳压性能愈好。稳压管的 r_Z 并非常数,在较低的工作电流范围内,其值有较大差异。例如 2CW19,若工作电流等于 2mA 时, $r_Z \approx 20\Omega$;若工作电流上升到 8mA 时, $r_Z \approx 8\Omega$ 。因此为使稳压效果好些,在允许的电流范围内,工作电流不宜选的太小。

5. 电压温度系数 α_u

α_u 是稳压管稳压值受温度变化影响的系数。例如 2CW19 的电压温度系数是 0.095%/°C,就是说温度每增加 1°C,它的稳压值将升高 0.095%。

一般来说,低于 6V 的稳压管, α_u 是负的;高于 6V 的稳压管, α_u 是正的;而在 6V 左右的稳压管受温度影响较小。

例 7-3 用稳压管构成的稳压电路如图 7-17 所示。已知电源电压 $U=12V$,稳压管的稳定电压 $U_Z=6V$,最大稳定电流 $I_{Z\max}=18mA$,试求 I_L 、 I_Z 值并分析当电源电压变化时,输出电压的稳定是如何依靠稳压管反向击穿特性与稳压电阻 R_Z 的配合来实现的。

解 首先判断稳压管是否工作? 若断开 D_Z ,电阻 R_L 上的电压为

$$U_{R_L} = U \times \frac{R_L}{R_Z + R_L} = 12 \times \frac{5}{5+1} = 10V$$

由于 $U_{R_L} > U_Z$,故稳压管被击穿, R_L 两端电压被钳位在 6V 上。于是有

$$I_L = \frac{U_Z}{R_L} = \frac{6}{5} = 1.2mA$$

回路总电流 I 为

$$I = \frac{U - U_Z}{R_Z} = \frac{12 - 6}{1} = 6mA$$

所以

$$I_Z = I - I_L = 6 - 1.2 = 4.8mA$$

由于 $I_Z < I_{Z\max}$,说明稳压管处于正常工作状态。当电源电压 U 增高时,稳压管的电压也要随之上升。由稳压管反向击穿特性可知,稳压管在反向击穿后,电压稍有增大,通过稳压管的电流就会增加较多,于是稳压电阻 R_Z 上的电压 $U_{RZ} = R_Z(I_L + I_Z)$ 将增大很多。因此,输入电压虽

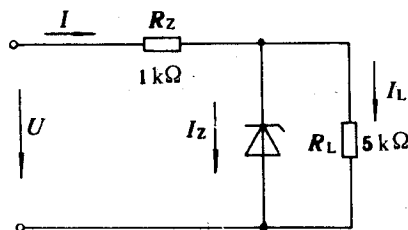


图 7-17 例 7-3 图

然增大了,但稳压电阻 R_z 上的电压也增大,从而使输出电压(稳压管电压)基本上维持不变。相反,当 U 下降时,稳压管电流 I_z 减小,稳压电阻 R_z 上的电压降低,从而使输出电压基本上维持不变。

思考练习题

1. 为什么稳压管的动态电阻愈小,稳压效果愈好?
2. 利用二极管和稳压管的正向特性是否也能稳压,为什么?
3. 有两个稳压管 D_{z1} 、 D_{z2} , 稳定电压分别为 5.5V、7.5V, 若稳定电流都相等, 怎样得到 2、6、8、13V 的稳定电压?

§ 7-5 半导体三极管

半导体三极管(简称晶体管)是最重要的一种半导体器件。它的主要用途之一是利用其放大作用组成放大电路,把微弱的电信号(电压、电流、功率)增高到所需要的数值。例如,广播电台发射出的极其微弱的无线电信号是通过天线接收到收音机中去的,然后再由机内的放大电路把信号放大到足以驱动扬声器发出声音。又如,在自动控制机床上,需要将反映加工要求的控制信号通过放大电路加以放大,从而得到一定的输出功率才能推动执行元件(电动机、液压传动机构、电磁铁等)运行。

本节首先简单介绍管子内部的结构和载流子的运动规律,然后通过特性曲线和工作参数的分析研究,来最终达到对晶体管外特性工作状态的理解。

一、基本结构

晶体管是一个具有两个 PN 结三个电极的半导体器件,它的外形如图 7-18 所示。管子的三个电极,基极、发射极和集电极分别用字母 B、E、C 来表示。虽然晶体管的制造方法有多种,不同类型晶体管的制造工艺也各异,但结构形式不外乎 PNP 和 NPN 两种,图 7-19 是它们的结构示意图和符号。

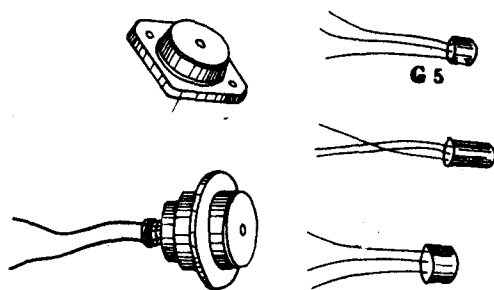


图 7-18 晶体管外形

晶体管的这两种结构形式都具有两个 PN 结,分别称发射结(E、B 结)和集电结(C、B 结)。都有三个区域,中间是很薄(约为几微米到几十微米)且掺杂较少的基区,两侧是发射区和集电区。图 7-19 中画有箭头的是发射极,以便与集电极相区别。箭头的方向代表发射结在正向电压下的电流方向,因此 NPN 型的发射极箭头向外,PNP 型的则向内。

根据使用的半导体材料的不同,晶体管有硅管和锗管之分。当前国内生产的硅晶体管多为 NPN 型(3D 系列),锗晶体管多为 PNP 型(3A 系列)。

NPN 型和 PNP 型晶体管的工作原理完全类似,只是在使用时电源极性联接不同而已。下