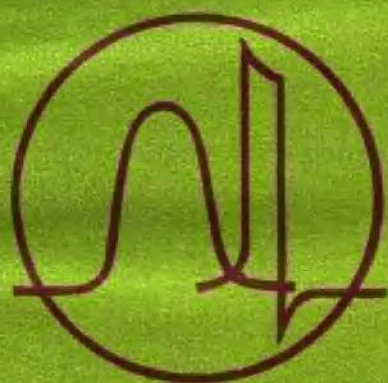


电子线路

电子技术教育丛书



江苏科学技术出版社

本书是根据第四机械工业部于1979年颁布的《电子工业工人技术等级标准》中有关电子线路的具体规定和要求编写的。它是江苏省电子工业局主编的《电子技术教育》丛书中的一本专业基础教材；是为电子类整机、通用和其他有关工种工人逐步达到五级工标准所规定的应知应会的要求，提供必要的电子线路基础知识。此外，本书也可供有关电子技术人员自学或电子类技工学校师生参考。

本书在内容安排上，以系统地叙述各种电子线路的基本原理为主线，以分析单元电路为重点。在写法上，主要用简明扼要的物理概念来阐述各种电路的工作原理和元器件的作用。

全书共分六章，包括晶体管器件、放大电路、正弦波振荡器、直流电源、脉冲电路和数字集成电路。每章末均附有一定数量的复习题。

本书由吴山、王谨之同志审核。

电 子 线 路

谭锡林 缪明才 编

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：南通县印刷厂

开本787×1092毫米 1/32 印张 12 字数 264,000

1982年1月第1版 1982年1月第1次印刷

印数1—35,300

书号 15196·065 定价0.90元

责任编辑 许顺生

出版说明

为了加速电子工业的发展和提高工人的技术水平，第四机械工业部于1979年9月颁发了《电子工业工人技术等级标准》，作为工人技术教育和等级考核的依据。此标准公布后，工厂企业普遍反映需要有一套同它相适应的、系统的技术教育书籍。为此，我们根据标准中规定的应知应会的具体要求，结合当前生产实际，组编了这套《电子技术教育丛书》。

丛书是在江苏省电子工业局主持下，由施福同、吴为公、王谨之、许顺生、舒云台、吴山、张曙光和金仁和等同志组成编委会，进行规划和组稿，分别邀请有关大专院校、科研单位、工厂的教授、讲师、工程师负责编写和审核的。

丛书包括《电工基础》、《电子线路》、《晶体管收音机、录音机和电视机》、《电子测量技术》、《电子计算机原理和应用》、《无线电元件和器件》、《无线电整机装配工艺》、《电子元器件制造工艺》和《电子技术应用和发展》等册，将分别陆续出版。

由于电子工业的类别和工种繁多，等级要求也不一，所以，丛书安排内容的原则是以共同的技术基础为基石，适当照顾数量较多的专业工厂的需要。具体地说，是以工人技术等级标准为依据，将共同性基础理论为主体，兼顾整机厂和常用元器件厂的工艺知识，分别归纳成册。各工厂在组织培训时，可从中选配组合，满足各自的需要。

在《电子工业工人技术等级标准》中规定，对低等级工人的考核重点是产品的质量和数量，而高等级工人则侧重技术、熟练程度和解决技术疑难问题。我们考虑到本丛书应着重帮助低等级工人奠定坚实的技术基础，又适当照顾高等级工人的进修需要，所以决定一般以五级工的相应标准为编写的上限。为使整机调试工、成品检验工等能比较深入地掌握线路原理，故将《电子计算机原理和应用》和《晶体管收音机、录音机和电视机》等册的内容适当引深；另外，又专为元器件厂编写了工艺书籍。因此，这套丛书也可供科技人员、中等专业学校和技工学校师生和业余爱好者作参考。

《电子技术教育丛书》编委会

1981年5月

目 录

第一章 晶体二极管和晶体三极管..... (1)

第一节 半导体的导电原理..... (1)

第二节 晶体二极管..... (9)

第三节 晶体三极管..... (13)

复习题一

第二章 晶体管放大器..... (35)

第一节 低频小信号放大器..... (36)

第二节 功率放大器..... (67)

第三节 负反馈放大器..... (82)

第四节 三种基本放大电路的比较..... (95)

第五节 直流放大器..... (97)

第六节 运算放大器..... (115)

第七节 场效应管放大器..... (129)

第八节 调谐放大器..... (144)

第九节 放大器的调试..... (156)

复习题二

第三章 正弦波振荡器..... (170)

第一节 振荡器的基本工作原理..... (170)

第二节 LC 振荡器..... (174)

第三节 石英晶体振荡器..... (183)

第四节 RC 振荡器..... (187)

复习题三

第四章 晶体管直流电源 (196)

第一节 整流和滤波 (196)

第二节 直流稳压电源 (206)

复习题四

第五章 晶体管脉冲电路 (222)

第一节 脉冲电路的基础知识 (222)

第二节 晶体管的开关特性 (239)

第三节 晶体管反相器和脉冲放大器 (248)

第四节 双稳态电路 (254)

第五节 单稳态电路 (261)

第六节 多谐振荡器 (265)

第七节 射极耦合双稳态电路 (268)

第八节 电压锯齿波发生器 (276)

第九节 电流锯齿波发生器 (282)

第十节 晶体管间隙振荡器 (287)

第十一节 单结晶体管振荡器 (294)

复习题五

第六章 数字集成电路 (303)

第一节 集成电路概述 (303)

第二节 基本逻辑关系 (306)

第三节 TTL逻辑门电路 (315)

第四节 用集成门电路组成脉冲电路 (325)

第五节 集成电路触发器 (331)

第六节 计数器 (340)

第七节 整机实例分析 (360)

第八节 脉冲数字电路的调试和抗干扰措施 (369)

复习题六

第一章 晶体二极管和晶体三极管

本书将讲述各种常用的晶体管单元电路，其中包括低频电路、高频电路、脉冲电路和数字电路。要研究这些晶体管电路，必须首先懂得晶体管的内部结构、作用原理和主要特性，以及它与外部电路的关系。只有这样，才能掌握和运用各种基本的晶体管电路，从而为生产和科研服务。因此，本章专门讨论晶体二极管和三极管的内部结构和主要特性，作为本书其他各章的基础。

第一节 半导体的导电原理

晶体管是由半导体材料制成的。导电性能介于导体和绝缘体之间的物体，叫半导体，如锗、硅等。半导体材料的运用日益广泛，引起人们很大兴趣。

一、半导体中的电子和空穴

图1-1(a)是半导体材料硅(Si)的原子结构示意图。由图可知，硅原子由一个原

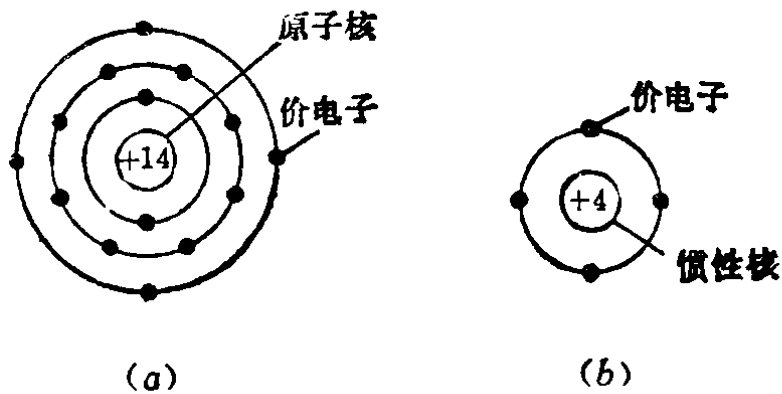


图1-1 硅的原子结构平面示意图
(c) 硅Si的原子结构； (b) 硅Si的原子结构简化图

子核和十四个电子所组成。最外层轨道上有四个电子，在化学里称为价电子。里层的十个电子和原子核构成一个核心。

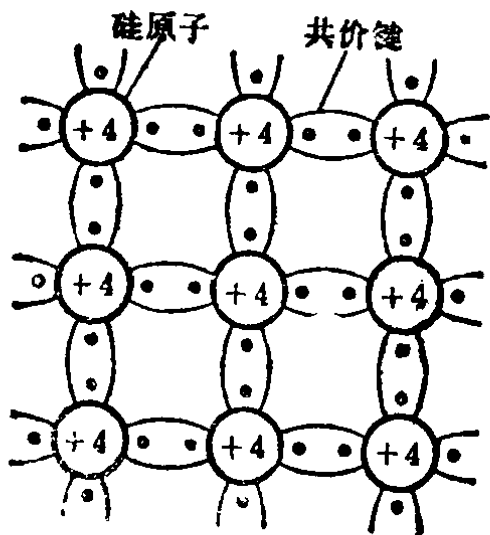


图1-2 硅单晶共价键结构

叫惯性核。如图1-1(b)所示。

当硅半导体材料制成单晶体后，原子排列就很整齐。每个原子最外层的四个电子，除受原子核束缚外，还与周围四个原子相联系。因此，价电子一方面围绕自身的原子核运动，另一方面价电子也时常出现在相邻原子所属的轨道上，为两个原子

所共有。每对共用的价电子，在它们所属的两个原子之间产生一个束缚力，原子和原子之间就是靠这种束缚力连接在一起的。这种组合形式叫共价键结构。如图1-2所示。

没有杂质的半导体（即纯净度达99.999999%以上）称为本征半导体。在本征半导体中，由于共价键结构的特点，虽外层有八个电子，但其所受束缚力不紧，当温度升高或受光的照射时，共价键中某些价电子就有可能获得足够的能量，脱离共价键的束缚而成为自由电子。值得注意的是，共有电子在挣脱束缚成为自由电子后，在原来共价键的位置上就留下一个空穴，见图1-3。在本征半导体中，有一个自由电子就必然产生一个空穴。这样，就形成了电子-空穴对。这种现象叫做本征激发。由本征激发而产生的自由电子可以在晶体中自由漂移，对于空穴来说，由于相邻共价键中的电子很容易移动而填入这个空穴中，而在它原来的位置上又出现了新的空穴，如图1-4所示。带负电荷的自由电子从A到B，

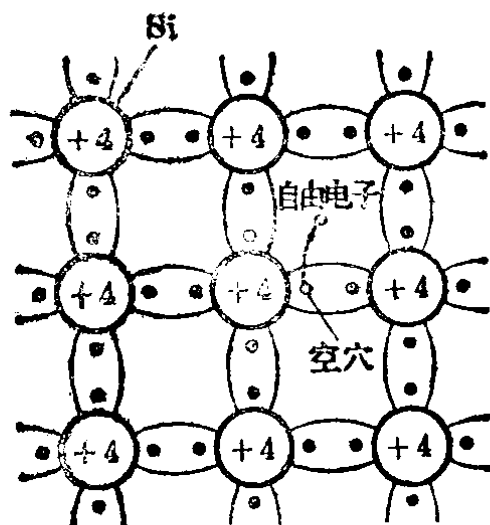


图1-3 热激发产生的电子-空穴对

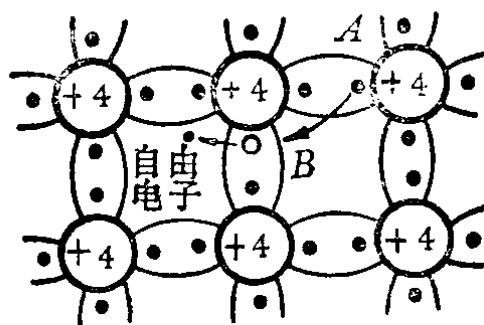


图1-4 空穴的移动

就相当于一个带正电荷的空穴从 B 到 A 。这种空穴的依次递补位移，叫做空穴载流子运动。

由此可见，如果半导体内有电流流过，这个电流是由两部分组成的。一部分是自由电子定向运动所形成的电子电流；另一部分是空穴定向运动所形成的空穴电流。所以，在半导体中，存在两种载流子，即电子载流子和空穴载流子。前者带的是负电荷，后者带的是正电荷，这是半导体导电的一个重要特性。半导体在受光线照射时或环境温度上升时，它的电阻率下降。其原因就在于半导体中载流子的数目有了很大的增长。

二、 n 型半导体和 p 型半导体

上面所讲的本征半导体，虽然会产生本征激发，但其导电能力仍然很差而且很难控制其导电性能，所以它的用处不大。为了控制半导体的导电特性，在纯净的半导体中掺入少量有用的杂质，使其导电特性得到很大的改善，从而制成许多有价值的半导体材料。

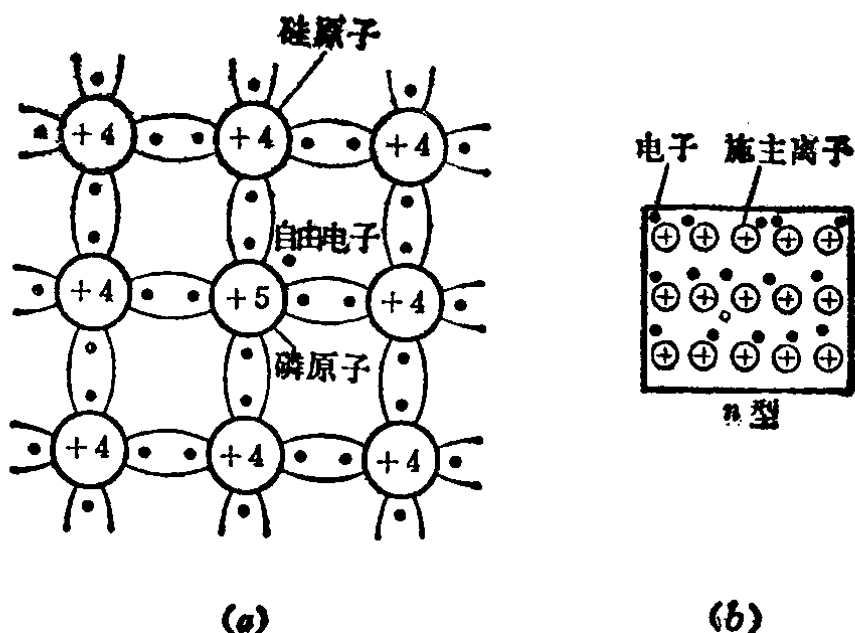


图1-5 n 型半导体

例如，在本征半导体硅中掺入有五个价电子的元素磷。这时，一个磷原子代替一个硅原子的位置，（如图1-5），磷原子的四个价电子跟相邻的硅原子的价电子形成四个共价键，多出的一个价电子虽然还受到磷原子核的束缚，但这种束缚力很小，它很容易脱离磷原子而成为自由电子。这样，掺入杂质磷的每一个原子都可提供一个自由电子，从而使硅晶体中电子载流子数目大量增加，这样半导体的导电性能便显著增强，这种主要靠电子导电的半导体，叫电子型半导体，又称 n 型半导体。掺入的磷原子在晶体中起着施放电子的作用。这类杂质称为施主杂质。需要指出，在 n 型半导体中，由于热运动所产生的电子-空穴对，并不多。这里空穴的浓度与自由电子的浓度相比，要小得多。因此，电子是多数载流子，空穴是少数载流子。为方便起见，把 n 型半导体画成图1-5(b)所示的简化图，小圆黑点表示电子。

如果在本征半导体硅中，掺入有三个价电子的硼元素。

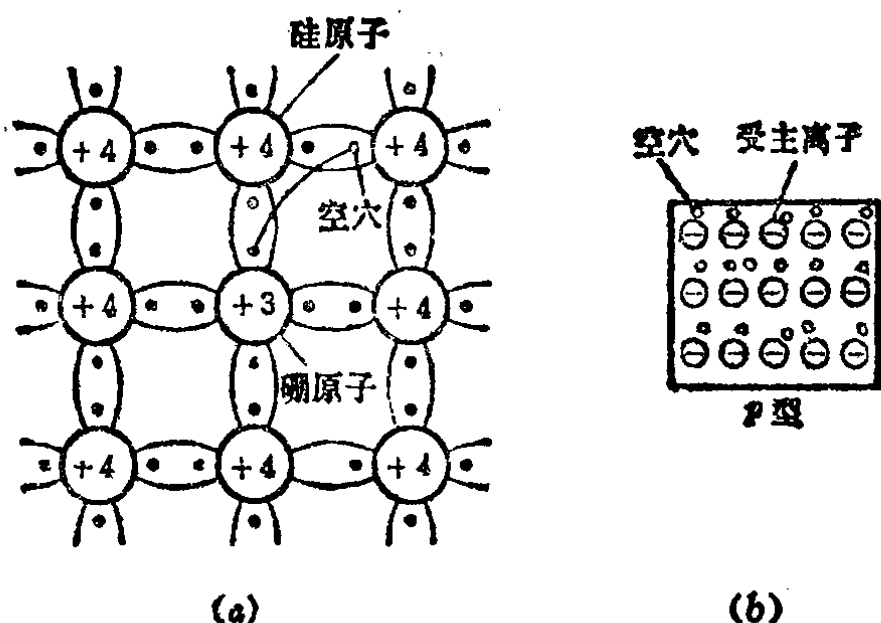


图1-6 p 型半导体

由于硼原子取代了部分硅原子，它的结构变成了如图1-6所示的形状。硼原子只有三个价电子，它只能和相邻的三个硅原子构成共价键，而在第四个共价键上留下了一个空位。相邻硅原子的共价键电子就可以过来填补这个空位而形成新的空穴。在这种半导体中，空穴是多数载流子，电子是少数载流子。这种半导体称为空穴型半导体，或称 p 型半导体。这里硼原子起着接受电子的作用，所以这类杂质叫做受主杂质。同样，可把 p 型半导体画成图1-6(b)所示的简化图，小圆圈表示空穴。

四、 pn 结

如果采用某种半导体制造工艺的方法，使半导体的一部分成为 n 型半导体；另一部分成为 p 型半导体。在 p 型和 n 型半导体的交界处就会形成一种称之为 pn 结的特殊薄层。例如，在图1-7(a)中指出的情况，这里左边是 p 区，右边是 n 区。由于 p 型半导体中的空穴是多数载流子，浓度比较大；而 n 型半

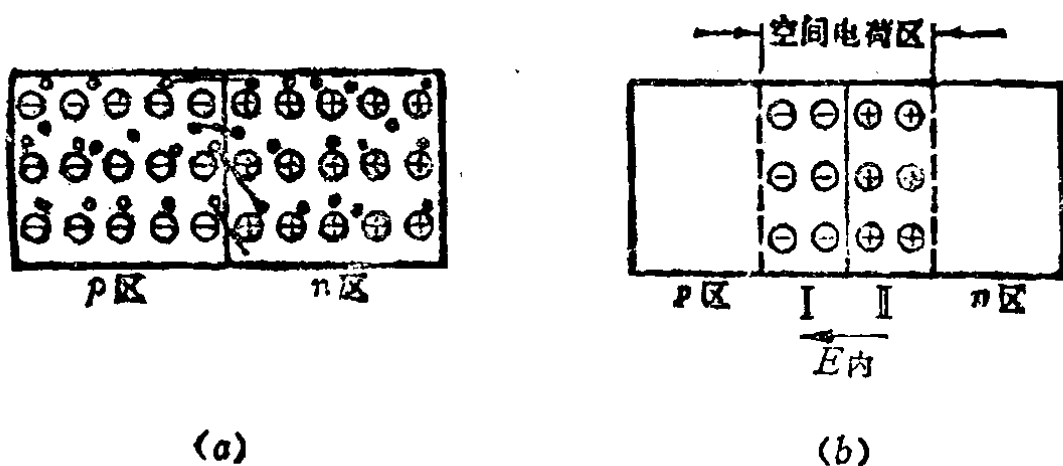


图1-7 pn 结的形成

导体中的空穴是少数载流子，浓度小。于是，空穴就从浓度大的 p 区向 n 区扩散。与此同时，由于在 n 型半导体中电子的浓度大，而 p 型半导体中电子的浓度小，于是电子也从浓度大的 n 区向 p 区扩散。扩散的结果，使左边的 p 区空穴减少。这样，在 p 区的一边就出现了带负电的原子。或者说出现了负离子（原子在正常情况下不带电，它失去电子就带正电，得到电子就带负电，带电的原子叫离子）。同样， n 区中的电子减少，在 n 区的一边就出现了带正电的原子，或者说出现了正离子。所以，在 p 型半导体和 n 型半导体的交界区就形成了带电薄层Ⅰ和Ⅱ。薄层Ⅰ在 p 区内，带的是负电；薄层Ⅱ在 n 区内，带的是正电。由薄层Ⅰ和Ⅱ组成的电荷区就是 pn 结。如图1-7(b)所示。由图可知，由于带正、负电荷的薄层Ⅰ和Ⅱ的存在，在 pn 结的区域里出现了一个电场，叫做内电场，或称结电场。（用 $E_{内}$ 表示）。这个结电场的电力线方向是从薄层Ⅱ指向薄层Ⅰ的。即从 n 区指向 p 区。这样 p 区中的空穴向 n 区扩散必然要通过内电场，它是逆着内电场的方向运动的。根据电学知识可以知道，正电荷（空穴）若要逆电场方向运动，需克服内电场的阻力。同样， n 区的电子若要向 p 区扩散，它

是负电荷（电子）顺内电场方向运动，也受到阻力。由此可知， pn 结电场对扩散起阻挡作用。正由于 pn 结对多数载流子的扩散起阻挡作用，所以 pn 结又称阻挡层。

另一方面，在内电场的作用下， p 区的少数载流子（电子），会被吸向 n 区， n 区的少数载流子（空穴）也会被吸向 p 区。人们把少数载流子在电场作用下的运动叫漂移运动。很明显，电场愈强，漂移运动也愈强。当 pn 结刚建立的时候，扩散运动占着优势地位，随着扩散的进行， pn 结越来越宽，内电场越来越强，漂移运动也越来越强，不难理解，上述扩散与漂移是同时出现的。当扩散和漂移两种运动相等时，空间电荷区的厚度不再增加， pn 结就不再加宽，达到了动态平衡。

如果在 pn 结的两端加上一个正向电压。正向电压的接法是电源的正极接 p 型半导体，

负极接 n 型半导体。电源电压在 pn 结上造成的电场用 $E_{外}$ 表示。这时，电场 $E_{外}$ 的方向从 p 区指向 n 区，如图1-8所示。它跟结电场 $E_{内}$ 的方向是相反的，因此削弱了 pn 结电场，破坏了扩散和漂移运动的动态平衡。也就是说，加上正向电压

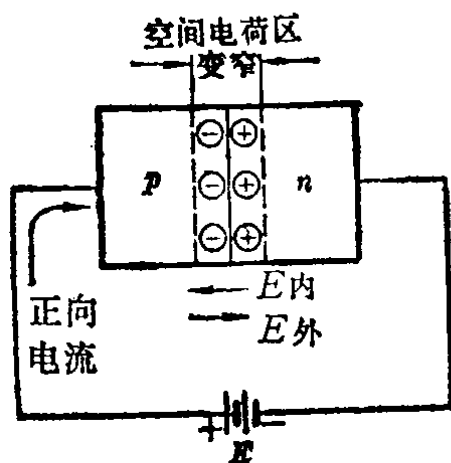


图1-8 正向连接

后，使多数载流子的扩散运动加强，导致扩散运动变成处于主要的地位。扩散电流，即多数载流子运动形成的电流，它是一个较大的正向电流。由此可得出结论：当外加正向电压后，空间电荷区变窄， pn 结电阻减小， pn 结处于导通状态。

与此相反，在 pn 结上加一个反向电压，即电源正极接 n 区，负极接 p 区，如图1-9所示。这时，反向电压所产生的

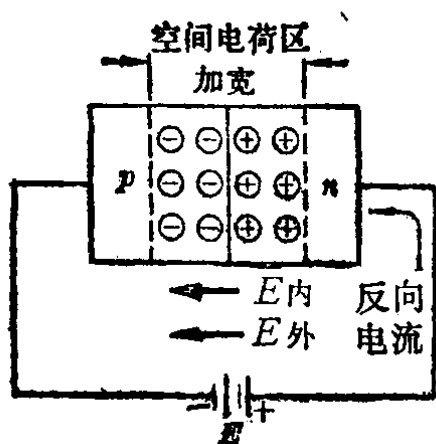


图1-9 反向连接

电场 $E_{外}$ 与 pn 结电场 $E_{内}$ 的方向一致，加强了 pn 结电场。这样，也破坏了扩散和漂移运动的平衡。这时，漂移加剧，漂移运动就占主要地位。由于漂移运动是少数载流子的运动，它的密度很小，所以形成的反向电流很微弱。正因如此，在一定范围内，外加电压 E 即使再增大，反向电流也不会有什么变化，

基本上保持不变。但是，如果温度变化，反向电流也会变化，有时其变化还比较大。这是因为少数载流子是由热运动产生的，它的密度随着温度的升高按指数规律增加。

由此，也可得出结论：当外加反向电压后，空间电荷区变宽， pn 结电阻变大， pn 结处于截止状态。

综上所述， pn 结加正向电压时，电流大，导通；加反向电压时，电流小、截止。这就是 pn 结的单向导电性。

当 pn 结处所加的反向电压不超过一定限度时，反向电流是很小的。当外加反向电压一旦超过一定的数值以后，反向电流就会突然变大，这种情况叫做 pn 结的击穿。发生击穿时的电压称为击穿电压 U_B 。 pn 结一旦击穿，它便失去单向导电的特性。

前面已经讲过， pn 结处形成一个电场。不难理解， pn 结处就有一个电容存在。 pn 结结电容的来源有两个：一个是势垒电容 C_T ；一个是扩散电容 C_D 。当 pn 结加上交变电压时，随着外界电压的变化，阻挡层的宽窄要随着变化，即阻挡层的电荷量要发生变化，其作用相当于一个电容器的充放电。这个电容叫势垒电容。当 pn 结上加正向电压时，载流子的扩

散运动加强。从 p 区经过 pn 结扩散到 n 区的空穴很多，因此来不及与 n 区中的电子复合，导致在 n 区靠近 pn 结的附近有一定程度的积累。同样，从 n 区经过 pn 结扩散到 p 区的电子，也会在 p 区靠近 pn 结的附近有一定程度的积累。这种积累的程度，也会随着外加正向电压的大小，而有所增减。正向电压越高，扩散运动越强，电荷积累也越多。这个效应也相当于一个电容，通常把这种由扩散过程形成的电容叫做扩散电容 C_D 。

在正向接法时，扩散电容 C_D 远远大于势垒电容 C_T ，故 C_T 可以忽略。在反向接法时，反向电流很小，因此 C_D 很小，起主要作用的是势垒电容 C_T 。

总之， pn 结的电容效应只有在所加电压变化时，才呈现它的作用。换句话说，它不但与外加的直流电压有关，还与所加的交变电压有关；而且交变电压的频率越高，影响越大。因此，在低频工作时常被忽略，频率高时，就要考虑其作用。

第二节 晶体二极管

一、晶体二极管的结构

晶体二极管由 pn 结、接触电极、引线和管壳构成。常用的二极管有点接触型、面结合型和平面型几种。

平面型二极管的管芯结构，如图1-10(a)所示。它是利用氧化、光刻、扩散等技术制成。表面的一层二氧化硅薄膜，起着保护层的作用，它把 pn 结与外界隔离，使漏电减小，性能稳定。

点接触型二极管如图1-10(b)所示。它是由金、银或钨

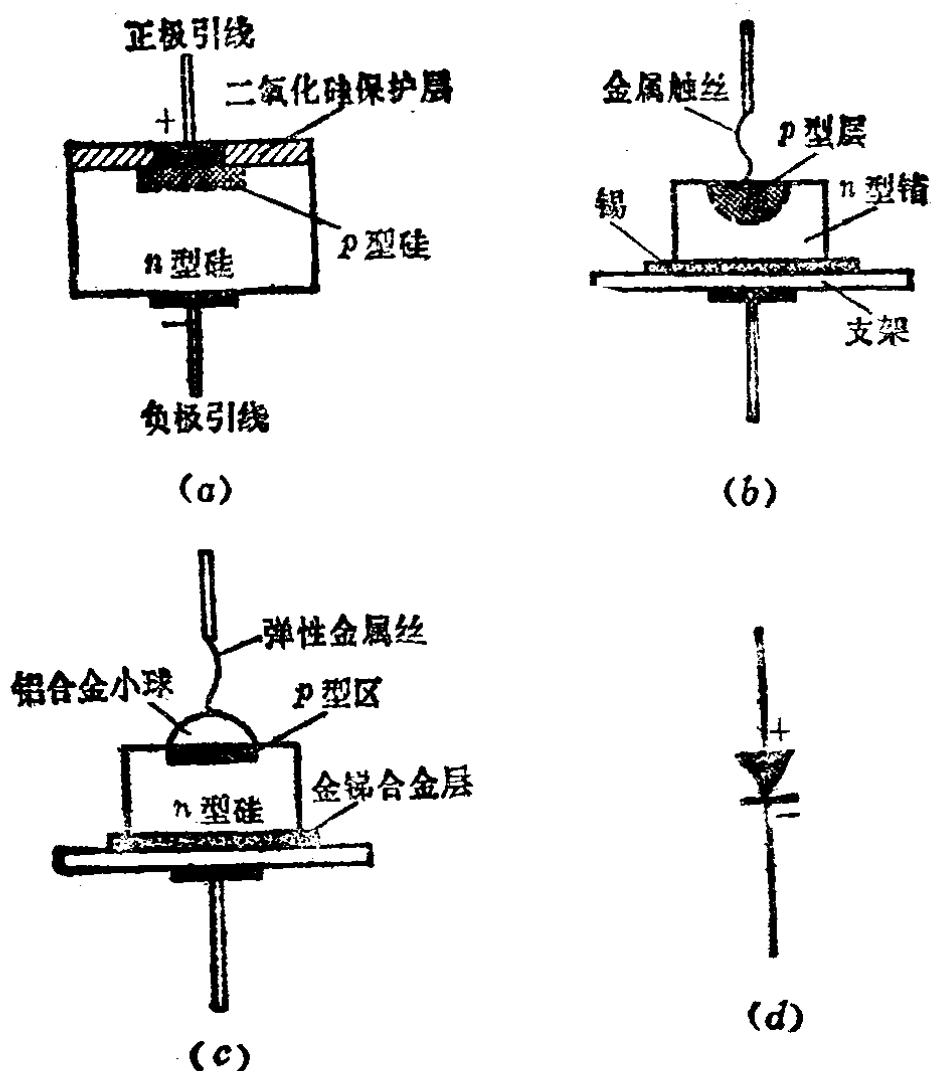


图1-10 晶体二极管的结构和符号
 (a)平面型开关管； (b)点接触型二极管；
 (c)面结合型二极管；(d)符号

等金属作触针与半导体材料相接触，然后通以很大的脉冲电流，使触针与半导体熔接在一起形成 pn 结。这类二极管因为接触面积小，不能承受大的电流和较高的反向电压，故不适宜作整流之用。但是，由于它触点小， pn 结间的结电容也小，所以适用于高频电路中作检波和混频。面结型二极管的 pn 结用合金法制成。它和部分平面型二极管的共同特点是结的面积大，可以通过较大的电流，故宜作整流之用。但是因为结

电容较大，不宜用在高频场合。由上可知，晶体二极管不管是点接触型还是面结型，它们实质上都是一个 pn 结，因此晶体二极管的导电特性就可以用 pn 结的导电特性来描述。为了在实际使用时的方便，我们常用晶体二极管的特性曲线来描述二极管的性能，这种方法既直观又简单。

二、晶体二极管的伏安特性

晶体二极管的伏安特性曲线，就是加到晶体二极管两端的电压和通过二极管的电流之间的关系曲线，如图1-11所示。这种曲线由正向特性和反向特性两部分组成。

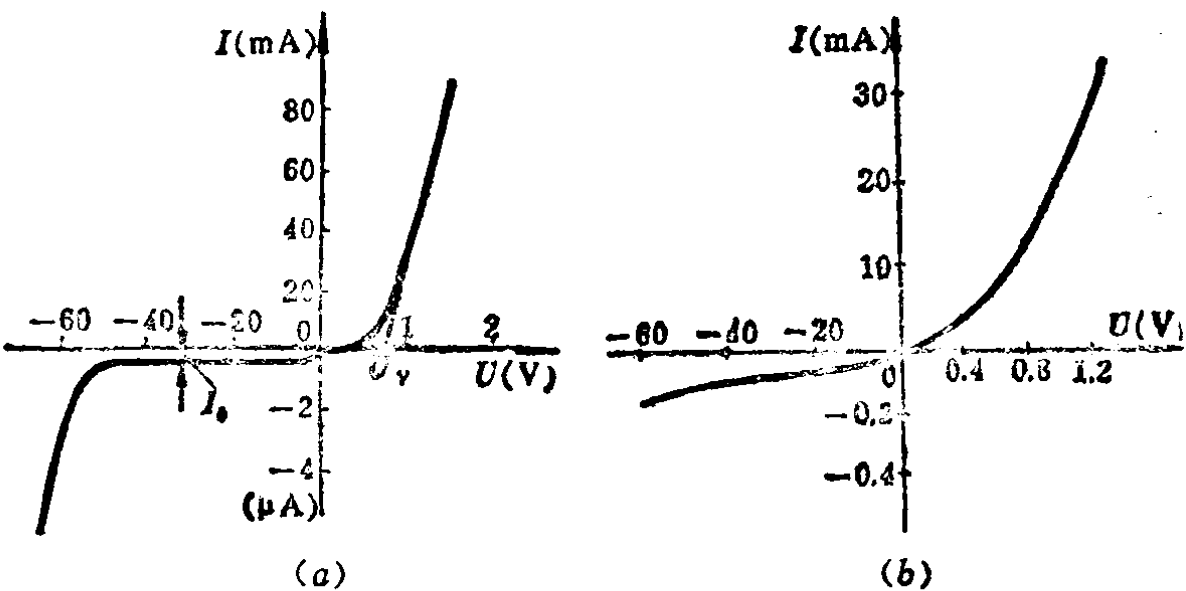


图1-11 晶体二极管的伏安特性曲线
(a)硅； (b)锗

在二极管两端加上正向电压时，管内就有正向电流通过，它们之间的关系曲线如图1-11 (a)和(b)中的右半部所示。曲线的上升开始较慢，在电压超过一定的数值(这个数值常称为阈值电压或死区电压 U_Y ，锗管约0.3伏左右；硅管约0.7伏左右)以后，曲线上升很快。原因是当正向电压较小时，