

中等专业学校教材

电工及电子技术基础

下 册

沈阳电力学校主编

电力工业出版社

中等专业学校教材
电工及电子技术基础
下 册

沈阳电力学校主编

*

电力工业出版社出版
(北京德胜门外六铺炕)

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 10 $\frac{3}{4}$ 印张 240千字
1980年2月第一版 1980年2月北京第一次印刷
印数 00001—18427册 每册 0.90元
书号 15036·4015

内 容 提 要

本书为水利电力类中等专业学校通用教材。

本书分上下两册。上册为电工部分，包括电工基础和电气测量、电机、发电厂厂用电三篇；下册为第四篇是电子技术基础部分，包括晶体管、电子技术的单元电路、电厂常用的电子仪表仪器等基本知识。下册由沈阳电力学校张典谟同志主编。

本书还可供发电厂锅炉、汽机技术工人和有关技术人员参考。

目 录

第四篇 电子技术基础

第十二章	半导体管的基本知识	1
第一节	半导体二极管	1
第二节	半导体三极管	11
第三节	直流偏置	27
第四节	场效应管	29
	复习题	33
第十三章	放大与振荡电路	34
第一节	低频电压放大器	34
第二节	低频功率放大器	38
第三节	反馈与振荡	42
第四节	直流放大器	49
第五节	相敏放大器	52
	复习题	55
第十四章	整流与稳压电路	56
第一节	整流器的指标	56
第二节	单相电阻负载整流电路	57
第三节	具有滤波器的整流电路	62
第四节	三相整流电路	65
第五节	各种整流电路的比较	67
第六节	可控整流	68
第七节	稳压电路	82
	复习题	90
第十五章	脉冲电路	91
第一节	脉冲电路的基本知识	91
第二节	双稳态触发器	98
第三节	单稳态触发器	102
第四节	多谐振荡器	104
第五节	门电路	107
第六节	脉冲电路应用实例	110
	复习题	111
第十六章	电子管	112
第一节	二极管	112
第二节	三极管	116
第三节	多极管和复合管	122

复习题	125
第十七章 电子仪器	125
第一节 晶体管电压表	126
第二节 音频振荡器	131
第三节 电子示波器	137
复习题	146
实验	146
实验一 晶体管简单测试及半导体二极管伏安特性的测定	146
实验二 放大器静态工作点及其性能的测试	148
实验三 单相整流器特性试验	150
实验四 门电路安装及特性试验	151
附录	154
一 半导体器件型号命名方法	154
二 几种半导体二极管的主要参数和外形	155
三 几种半导体三极管的主要参数和外形	158
四 3DO1场效应晶体管的主要参数和外形	163
五 BT33单结晶体管的主要参数和外形	163
六 3CT5、20、50、200硅可控整流元件的主要参数和外形	164
七 几种二极电子管的主要参数和管脚图	165
八 几种三极电子管和多极管的主要参数和管脚图	166

第四篇 电子技术基础

电子技术是一门新型的科学，在实现社会主义的四个现代化中，电子技术的应用有着非常重要的作用。建设现代化的工业、农业和国防均须采用先进的电子技术。电子科学既是多种学科综合的成果又为整个科学技术的研究与发展提供了必要的条件。

从1895年世界上第一台无线电接收机制成到1904年生产出最简单的真空二极管，从1948年生产第一个半导体三极管直至目前的大规模集成电路，在短短的几十年时间里，电子技术发展得非常迅速，应用范围也十分广泛。不仅工业、农业、军事等各方面大量应用电子技术，就是人们日常生活的衣、食、住、行也都与电子技术密切相关。

我国自解放以后，电子技术这门科学也有了很大的发展。三十年来培养了一批电子技术人材，研制了很多电子技术产品，从日常生活使用的收音机、电视机到工农业生产、科学研究使用的测量仪表、自动装置以及大型电子计算机等设备，无论在元件制作、整机设备等各方面都取得了很大的成绩。目前，我国的电子技术同世界先进水平相比，差距还很大，但是，我们有信心在以华主席为首的党中央的英明领导下，通过努力一定能够攀登电子科学技术的高峰。

本册将叙述半导体管的基本知识，首先介绍电子技术中的放大、振荡、整流、稳压、脉冲等单元电路，然后介绍电子管的工作原理及半导体管电压表、音频振荡器、电子示波器的电路及其使用常识。

学习电子技术基础除了为学习热力过程自动化等课程作好准备外，还为在其它方面对电子技术的应用打下一定的基础。在学习过程中要着重对物理概念的理解，掌握电子电路的分析方法，认真进行实验，把理论和实际联系起来。

第十二章 半导体管的基本知识

在各种半导体电子设备中，半导体管是电路中最重要元件。本章将从半导体的特性、PN结的形成开始，介绍半导体二极管、三极管、场效应管的结构、参数和工作原理，分析半导体二极管的单向导电性、半导体三极管放大器工作点的稳定及各种基本放大电路。

第一节 半导体二极管

一、半导体

(一) 导体、绝缘体、半导体

自然界中的物质按导电的能力可以分为三大类，即导体、绝缘体、半导体。容易导电

的物体叫做导体，例如金、银、铜、铁、铝等金属；基本上不导电的物体叫做绝缘体，例如橡胶、塑料、陶瓷、玻璃等；导电能力在导体和绝缘体之间的物体叫做半导体，例如锗、硅、硒等。

以电阻率（一厘米长、一平方厘米截面的物质的电阻值）来区分，导体的电阻率为 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 欧姆·厘米；绝缘体的电阻率为 $10^8 \sim 10^{20}$ 欧姆·厘米；而半导体的电阻率介于两者之间为 $10^{-3} \sim 10^8$ 欧姆·厘米。

不同物质的导电能力所以有差别，其原因在于物质的原子结构不相同。我们知道，自然界中的所有物质都是由原子构成，而原子是由带正电荷的原子核和带负电荷的核外电子组成的。这些核外电子围绕着原子核不停地旋转，原子核所带的正电荷的数量和核外全部电子所带的负电荷数量相等，因此整个原子对外是不显电性的。不同物质的原子核所带正电荷及核外电子的数目和电子排列方式均不相同，从而使各种物质的性质有很大的差别。

在原子核的吸引力及电子运动的惯性离心力作用下，电子围绕原子核分层按一定的轨道旋转。以最简单的氢原子的结构为例，它的原子核外只有一个电子在旋转，如图12-1所示。如果核外电子数目比较多，这些电子就要分层排列。图12-2所示是铝、硅和锗三种原子的结构图。

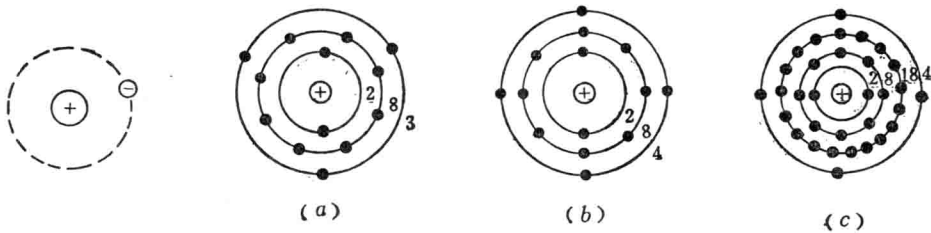


图 12-1 氢原子结构

图 12-2 铝、硅和锗的原子结构
(a)铝；(b)硅；(c)锗

铝原子有13个电子，它们分三层排列，靠近原子核的第一层有2个电子，第2层有8个电子，剩下的3个电子就在最外层，如图12-2(a)所示。硅原子有14个电子，分布在三层轨道上，各层电子数分别为2、8、4如图12-2(b)所示。锗原子有32个电子，分布在四层轨道上，各层电子数分别为2、8、18、4如图12-2(c)所示。

原子最外层的电子数不能超过8个，我们把最外层的电子叫做价电子。某元素有几个价电子就叫做几价元素，所以铝是三价元素，硅和锗都是四价元素。由于价电子离原子核最远，它们受原子核的吸引力也最小，因此容易在外界条件影响下脱离原子核的束缚，成为可以在物质中自由运动的自由电子。

在一般环境温度下，金属就有大量的价电子脱离原子核的束缚成为自由电子。由于电子带有一定量的负电荷，在外电场的作用下能作定向运动而形成电流，所以金属的导电性能好，是良好的导体。在绝缘体中，由于价电子被原子核束缚得很紧，一般条件下自由电子的数量很少，所以导电能力很差，基本上不导电。

图12-3所示是纯净的半导体材料锗的晶体结构。锗的原子按一定规律排列在空间，其中的每一个原子除了吸引住自己的四个价电子外，还吸引相邻的四个原子的四个价电子，

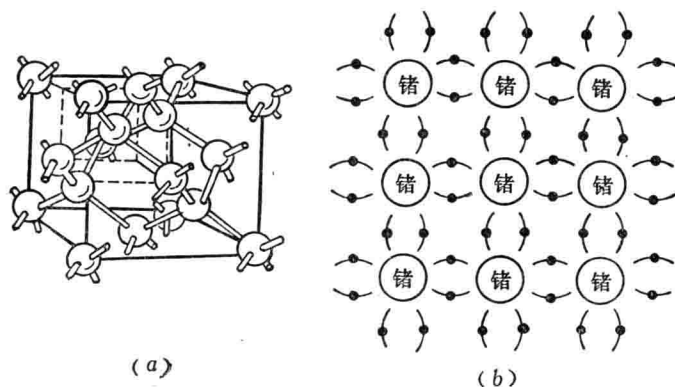


图 12-3 锗晶体结构
(a)立体模型；(b)平面排列

使其外层电子数达到 8 个而处于稳定状态。每两个相邻原子之间都共有一对价电子，像链条一样把两个原子拉住，每对价电子起键的作用，它们所形成的束缚作用称为共价键，这种原子结构称为共价键结构。

当价电子脱离共价键的束缚而成为自由电子以后，在共价键中就留下了一个空位置，这个空位置称为“空穴”。有“空穴”的原子带正电荷，能够吸引相邻原子中的价电子来填补因电子离开而留下的空穴，同时使另一个原子中出现空穴。电子不断填补空穴位置的运动，相当于空穴带正电荷作反方向运动，空穴运动形成的电流叫“空穴流”。自由电子定向运动形成的电流叫“电子流”。

因此，当在半导体两端加电压后，通过它的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，另一部分是电子填补空穴的运动所形成的空穴电流。由于电子、空穴都是带电粒子，统称为载流子。

实际使用的半导体材料，都是含很少量的杂质，原子排列得很整齐的晶体，它们的价电子不像导体那样容易挣脱原子核的束缚，又不像绝缘体那样被原子核束缚得很紧，所以半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。

(二) 半导体的导电特性

半导体虽然不是很好的导体，又不是很好的绝缘体，但是由于它具有一些特殊的导电性能，因此有着很广泛的应用。

半导体的一个特性是它的导电能力随外界条件的不同而有很大的变化。例如半导体的导电能力随温度的变化而剧烈变化，当温度升高或降低 10°C 时，它的导电能力将增强或减弱百分之几十，而导体和绝缘体的导电能力受温度的影响则很小。导体的电阻温度系数为正值，即温度升高，电阻率增大，导电能力减弱。而半导体的电阻温度系数则为负值，即温度升高，电阻率减小，导电能力增强。再如当光线照射到半导体时，半导体的导电能力也会发生变化，光线愈强，导电能力愈好。利用半导体的这些特性，可以制成热敏电阻和光敏电阻。

半导体的另一个特性就是在纯净的半导体中加入少量的某些其它物质以后，能使半导体的导电能力增加达百万倍。以硅为例，只要含有一万万分之一的硼，电阻率就会下降到原来的千分之一，而导体或绝缘体含有少量的其它物质时，其电阻率则几乎不变。

（三）本征半导体、P型半导体、N型半导体

不含杂质、原子排列得很整齐的半导体称为本征半导体。在本征半导体中，当温度升高后，价电子获得能量，将脱离原子核的束缚成为自由电子，这种现象称为本征激发。在激发出一个自由电子的同时就产生一个空穴，自由电子和空穴是成对产生的，称为电子空穴对。在本征半导体中，电子和空穴的数量相等。温度愈高，电子空穴对的数量愈多，半导体的导电能力就愈好。另一方面自由电子在运动过程中又会与空穴相遇而重新结合，这种现象称为复合，电子和空穴通过复合而消失。在一定条件下电子空穴对的产生和复合将达到相对的平衡。在本征半导体中，虽然存在着载流子，但是数量很少，导电能力远达不到实际应用的要求，所以需要加进一些其它的物质，以产生更多的载流子。加进去的物质通常称为杂质，这种杂质是有意识地加入的，它和一般杂质的含义不同。

在锗晶体中掺入少量的镓，锗中掺镓组成的晶体结构如图12-4所示。镓是三价元素，其外层只有三个价电子，因此只能和相邻的三个锗原子组成共价键结构，由于缺少一个电子，所以出现一个空穴。在锗晶体中掺入镓以后，便产生许多空穴，这种掺杂半导体主要是依靠空穴导电，所以叫做空穴型半导体，也叫做P型半导体。在P型半导体中，空穴是多数载流子，电子是少数载流子。

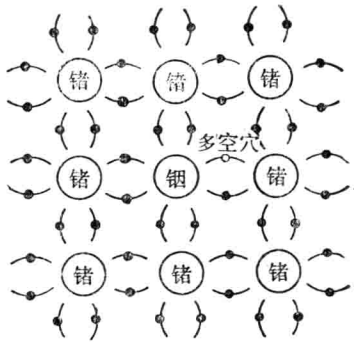


图 12-4 锗中掺镓后多空穴

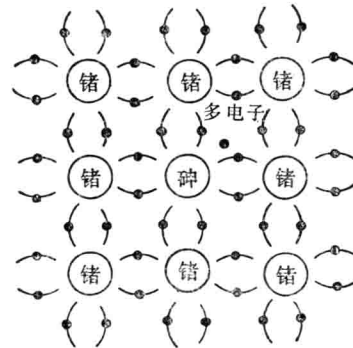


图 12-5 锗中掺砷后多电子

在锗晶体中掺入少量的砷，锗中掺砷组成的晶体结构如图12-5所示。砷是五价元素，外层有五个价电子，其中四个和相邻的四个锗原子组成共价键结构，还多余一个电子。在锗晶体中掺入砷以后，便产生了许多电子，这种掺杂半导体主要是依靠电子导电，所以叫做电子型半导体，也叫做N型半导体。在N型半导体中，电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

不论是多空穴的P型半导体或者是多电子的N型半导体，因为原子核具有和核外电子等量的正电荷，所以它们本身都仍然是中性的。在本征半导体中掺入不同的杂质产生不同的多数载流子，掺入的杂质愈多，多数载流子的数量就愈多。少数载流子则是由于价电子脱离共价键的束缚而产生的，温度愈高、照射光线愈强，少数载流子的数目也就愈多。

二、PN结

用一块N型半导体和一块P型半导体组成一个PN结，可通过演示实验来观察PN结的导电特性。

按图12-6 (a) 连接，电源正极接P型半导体，负极经过电流表、指示灯接N型半导体，电路中有电流通过，指示灯亮。这时，PN结导电，这种连接称为正向连接，PN结处于导通状态。

按图12-6 (b) 连接，电源负极接P型半导体，正极经过电流表、指示灯接N型半导体，电路中没有电流通过，指示灯不亮。这时PN结不导电，这种连接称为反向连接，PN结处于截止状态。

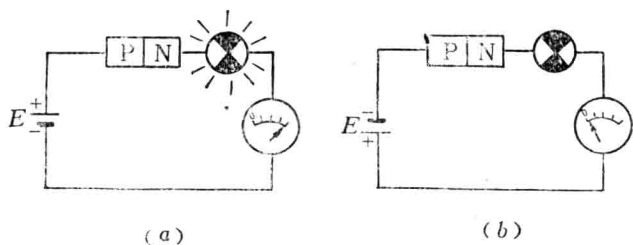


图 12-6 PN结导电特性实验
(a) 正向连接导电；(b) 反向连接不导电

从演示实验可知，P型半导体和N型半导体结合后所形成的PN结具有单向导电的特性。电流只能从P区向N区流动，而不能从N区流向P区，这个特性简称PN结的单向导电性。下面从PN结的形成来分析PN结的单向导电特性。

(一) PN结的形成

P型半导体中多空穴而N型半导体中多电子，因此P型半导体中的空穴浓度比较高，N型半导体中的电子浓度比较高。当把P型和N型半导体“结合”在一起时，就会产生空穴

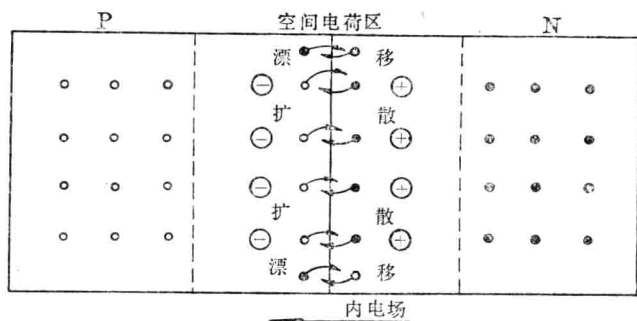


图 12-7 电子及空穴的扩散和漂移

和电子的扩散运动。在P型和N型两种半导体的交界处，P型半导体中的空穴向N型半导体扩散；N型半导体中的电子向P型半导体扩散，这两种多数载流子扩散运动而形成的电流称为扩散电流。扩散的结果使P型半导体失去空穴，获得电子，因此带负电而出现一层负离子区；N型半导体失去电子，获得空穴，因此带正电而出现一层正离子区。在两块半导体的交界处产生一个方向为从N型半导体指向P型半导体的内电场，如图12-7所示。

内电场产生以后，它将阻止P型半导体中的空穴及N型半导体中的电子继续向对方扩散。但是在内电场的作用下，P型半导体中的少数载流子电子将向N型半导体中运动，N型半导体中的少数载流子空穴将向P型半导体中运动，这种在电场作用下载流子的定向运动叫做漂移运动，漂移运动形成的电流叫做漂移电流。扩散电流和漂移电流的方向是相反的。在扩散开始时，扩散作用强，内电场弱，阻止扩散的能力小，扩散电流大于漂移电

流。随着扩散的不断进行，内电场逐渐增强，阻止扩散的能力增大，漂移电流逐渐增大，最后漂移和扩散达到相对平衡的状态，通过PN结的电流为零。这时，两块半导体的交界处形成一个强度一定的内电场，P型半导体侧带负电，N型半导体侧带正电。这样，在PN交界处两侧便出现一个空间电荷区。

当达到平衡状态后，空间电荷区中大都是带电的不能移动的离子，载流子由于复合而数目很少，因此也称耗尽区。空间电荷区有阻挡扩散的作用所以又称阻挡层。P型半导体和N型半导体交界面附近的这一区域通常简称为PN结。

(二) PN结的单向导电性

在PN结两端加上不同方向的电压，可用来分析其导电的情况。

如图12-8所示，当P型半导体接电源正极，N型半导体接电源负极时，外电场和内电场的方向相反，内电场受到削弱，使阻碍扩散的作用减小，扩散超过漂移，因此大量的多数载流子参加运动，从P向N的空穴流和从N向P的电子流形成总电流I。因为这种连接使PN结能够通过电流，所以称为正向连接。这时加在PN结上的电压称正向电压，流过PN结的电流称正向电流。在正向电压作用下，P区的空穴向交界处移动，抵消了空间电荷区中的一部分负电荷，N区的电子向交界处移动，抵消了空间电荷区中的一部分正电荷，所以空间电荷区变窄。

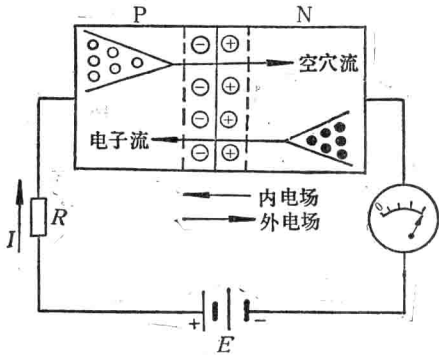


图 12-8 PN结加正向电压

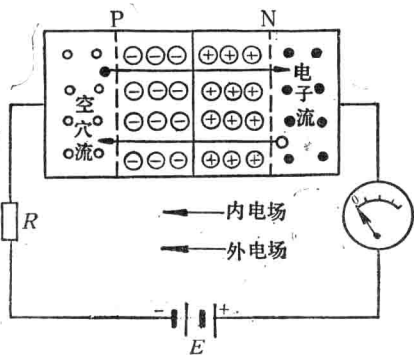


图 12-9 PN结加反向电压

如图12-9所示，当P型半导体接电源负极，N型半导体接电源正极时，外电场和内电场的方向相同增强了内电场，使阻碍扩散的作用增大，扩散不易进行。但是P型半导体中的少数载流子电子和N型半导体中的少数载流子空穴，在电场的作用下形成漂移电流。由于制作半导体材料时，使少数载流子的数量很少，因此漂移电流的数值是很小的。因为这种连接使PN结基本上不能通过电流，所以称为反向连接。这时加在PN结上的电压称反向电压，流过PN结的电流称反向电流。在反向电压的作用下，P区的空穴及N区的电子分别向电源负极及正极移动，使空间电荷的数量增加，所以空间电荷区变宽。

PN结的空间电荷区的宽度随外加电压的大小和方向而变化，即PN结内的电荷随外加电压而变化，其作用相当于存在一个电容，这个电容称为PN结的极间电容或结电容。

PN结的单向导电特性，即是在PN结两端加不同方向的电压，其中通过电流的大小相

差很多。在正向连接时，PN结是导通状态，两端的电压降很小，可以认为它是短路。在反向连接时，PN结是截止状态，通过的电流很小，可以认为它是开路。一般称P型半导体端为正极，N型半导体端为负极。

三、半导体二极管的结构和特性

(一) 半导体二极管的结构

利用PN结的单向导电性，可以制成半导体二极管，简称二极管。二极管按其结构可以分为点接触型和面接触型两种。

图12-10所示是点接触型的二极管。点接触型二极管是在金属触丝与半导体片的接触处形成一个PN结，两端用引线接出并用管壳密封而成。有些管子在其管壳上涂漆以防止光线照射时改变管子的性能，管壳上一般用色点或符号标示管子的极性。

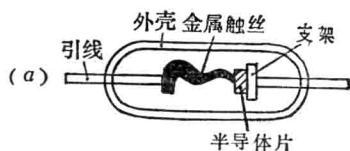


图 12-10 点接触型二极管
(a)结构；(b)外形；(c)符号

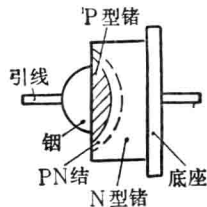


图 12-11 面接触型二极管

图12-11所示是面接触型的二极管的内部结构。以N型锗作基片的面接触型二极管为例，是使N型锗与钢之间产生P型锗，则在P型锗和N型锗之间形成PN结。

面接触型二极管PN结的结面积大，因此可以通过很大的电流，但是结电容也大，所以只能用在低频电路中，如果使用在高频电路中，则因结电容容抗很小，在反向电压作用时，结电容形成通路而使二极管失去单向导电的特性。点接触型二极管正相反，所以适用于高频、小电流的电路中。半导体二极管还以它所用的基片是锗或硅，而称为锗二极管或硅二极管。

(二) 半导体二极管的伏安特性

半导体二极管两端的电压和其中的电流的关系叫做二极管的伏安特性。测试二极管伏安特性的电路如图12-12所示，改变二极管两端电压的方向和大小，可以测出相应的电流数值。图12-12(a)是给二极管加正向电压，图12-12(b)是给二极管加反向电压，图12-13是普通半导体二极管的伏安特性曲线。下面将对二极管的伏安特性曲线分段予以讨论。

1. 正向电压小于 U_1 外加正向电压很小，外电场不足以克服内电场对扩散所产生的阻力，正向电流数值很小。当正向电压大于 U_1 ，内电场阻挡扩散的阻力减弱，正向电流随正向电压的增加有明显的增长。正向电压 U_1 以前称为二极管的死区， U_1 叫做死区电压或起始电压。

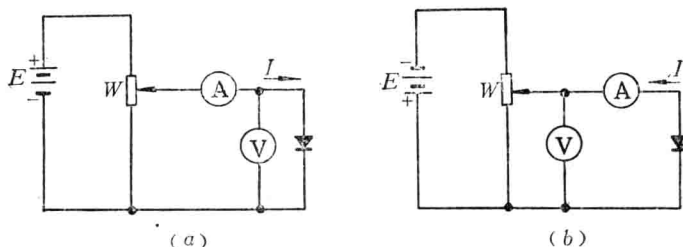


图 12-12 二极管伏安特性测试电路

(a) 测试正向特性; (b) 测试反向特性

2. 正向电压大于 U_2 。内电场的作用很微弱, 二极管接近于一个线性电阻, 电流和电压近似为直线关系, 电流在较大范围内变化, 二极管两端的电压变化却很小。为避免二极管过热而损坏, 正向电流不能超过一定的允许值。

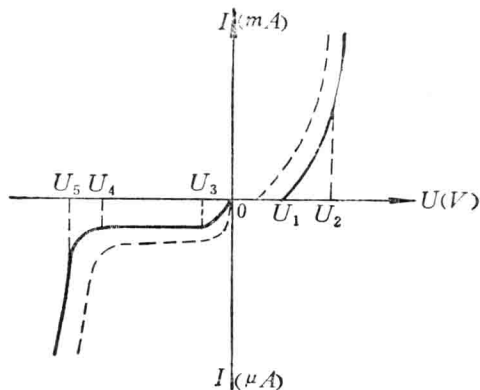


图 12-13 二极管伏安特性曲线

3. 反向电压小于 U_3 。外加反向电压, P 型半导体中的少数载流子电子和 N 型半导体中的少数载流子空穴产生运动, 形成反向电流。反向电压从零增加到 U_3 , 参加运动的少数载流子的数目增加, 反向电流随着反向电压的增加而增加。

4. 反向电压在 U_3 到 U_4 之间。在一定的反向电压下, 少数载流子已经全部参加运动, 在 U_3 到 U_4 之间, 虽然反向电压增加, 但反向电流几乎保持不变, 这种现象

称为饱和。这时的反向电流叫做反向饱和电流。

5. 反向电压在 U_4 到 U_5 之间。二极管的极间漏电流随反向电压的增加而增加。因为反向漏电流和反向电流的方向是一致的, 所以从电流表的读数来看, 反向电流的数值随反向电压的增加而增大。

6. 反向电压大于 U_5 。如反向电压增加到 U_5 , 则反向电流突然剧烈增大, 二极管失去单向导电的特性, 这种现象称为反向击穿, U_5 的电压数值叫做反向击穿电压。发生反向击穿的一种原因是由于很高的反向电压使载流子在阻挡层中加速运动, 撞击原子产生新的电子和空穴, 这些电子和空穴的高速运动又撞击其它原子而产生更多的电子和空穴, 如此迅速的链锁反应使通过 P-N 结的反向电流突然剧烈增大; 另一种原因是阻挡层中的强电场直接将电子从原子中拉出来产生许多电子和空穴从而使反向电流剧烈增大。二极管被击穿后, 其晶体结构遭到破坏, 一般就不能再使用了。

7. 温度的影响。在正、反向电压作用下, 如环境温度升高, 半导体中的自由电子和空穴的数量都要增加, 因此在同样大小的电压作用下, 温度升高后电流数值就要增加, 如图 12-13 中的虚线所示。从温度升高后的伏安特性曲线可看出, 二极管的反向击穿电压降低了, 说明反向击穿电压的大小也受温度的影响。

由于二极管的正、反向电流数值相差很大，正向电流和反向电流采用不同的坐标比例，有时还采用不同的单位。例如在图 12-13 中，正向电流的单位是毫安 (mA)，反向电流的单位是微安 (μA)。

图 12-14 是锗二极管 2AP26 和硅二极管 2CP14 的伏安特性曲线。由于材料不同，两种二极管的特性曲线是不相同的。

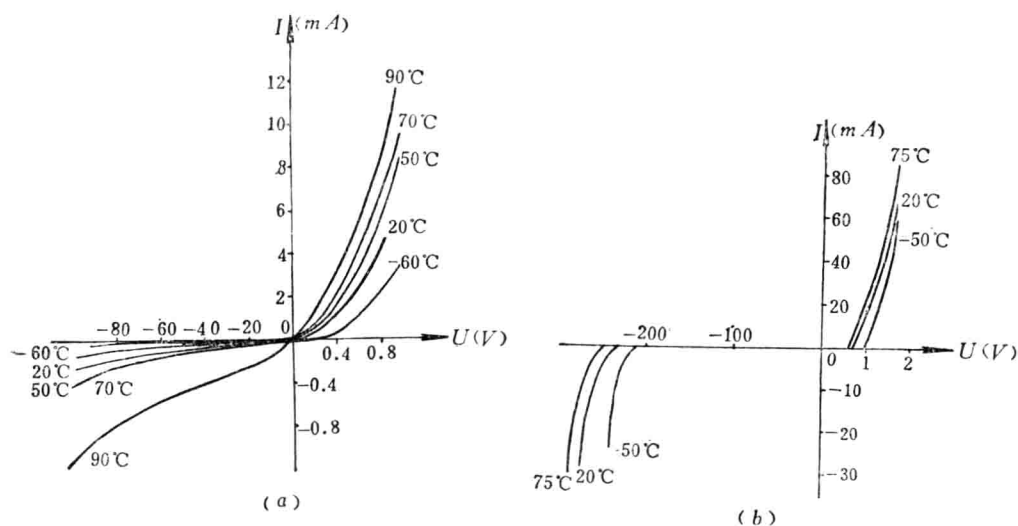


图 12-14 两种二极管伏安特性曲线
(a) 2AP26; (b) 2CP14

从正向特性看，锗管的起始电压较小，约为 0.2 伏左右；硅管的起始电压较大，约为 0.6 伏左右。但是硅管在起始电压后电流上升很快、正向电阻小；锗管在起始电压后电流上升较慢，正向电阻大。

从反向特性看，锗管与硅管相比，反向饱和电流大、反向击穿电压低，而且随着温度的升高反向饱和电流增加得比较慢。为避免 P N 结过热而烧坏，锗管 P N 结的最高使用温度不得高于 100℃，硅管则可达 150℃ 左右。

四、半导体二极管的参数及简易测试

(一) 半导体二极管的主要参数

1. 最大整流电流 二极管长时间使用时，允许流过二极管的最大正向平均电流叫做最大整流电流。因为二极管两端加正向电压，就有较大的正向电流通过使 P N 结发热。为使二极管不致过热而烧坏，通常规定二极管长期工作时，P N 结的结温不超过允许数值所能通过二极管的最大正向平均电流。

点接触型二极管的最大整流电流在几十毫安以下，面接触型二极管的最大整流电流可达几百安培以上。大功率的二极管，为了降低 P N 结的温度以提高最大整流电流数值，经常在电极上装散热片或同时采用风冷、水冷、油冷等方法帮助散热。

2. 最高反向工作电压 当加到二极管两端的反向电压超过一定数值以后，将会产生反向击穿。为使二极管避免击穿损坏，规定二极管长期工作不会损坏的最大反向电压叫做最

高反向工作电压。最高反向工作电压一般是反向击穿电压的三分之一到二分之一。

点接触型二极管的最高反向工作电压在几十伏以下，而面接触型二极管可达几百伏。

3. 最高工作频率 由于二极管存在极间电容，在二极管两端加交流电压时，如果频率过高，则反向电流易通过结电容形成通路而使二极管失去单向导电性。一般规定，因极间电容的影响但又在允许范围内所加交流电压的最高频率叫做最高工作频率。

面接触型二极管的最高工作频率在几千赫芝以下，点接触型二极管可达几百兆赫芝以上。

以上三个参数，是表示二极管特性的主要参数，在使用二极管时还可以通过半导体器件手册查阅二极管的其它参数，如反向电流、正向压降、极间电容等。

(二) 半导体二极管的简易测试

利用万用表，可以粗略地判断二极管的好坏，辨别二极管的正、负电极。

二极管是单向导电元件，因此它的正向电阻愈小，反向电阻愈大，正、反向电阻的差值愈大，则单向导电的性能愈好。测试时把万用表的转换开关拨到欧姆档的 $R \times 100$ 或 $R \times 1000$ （不要拨在 $R \times 1$ 或 $R \times 10K$ 位置，因为 $R \times 1$ 档的电流较大，在测量小电流二极管正向特性时可能将二极管烧坏； $R \times 10K$ 档的表内电池电压高，在测量低反向电压二极管的反向特性时，可能将二极管击穿）。用试笔分别接触二个电极，根据测得的电阻数值进行判断。

如图 12-15 所示，当测出的电阻值很小时，由于万用表的正端红试笔是接表内电池负极，负端黑试笔是接表内电池正极，因此红试笔接触的是二极管的负极，黑试笔接触的是二极管的正极，万用表所指示的是正向电阻数值。如图 12-16 所示，当测出的电阻值很大时，红试笔接触的是二极管的正极，黑试笔接触的是二极管的负极，万用表所指示的是反向电阻数值。

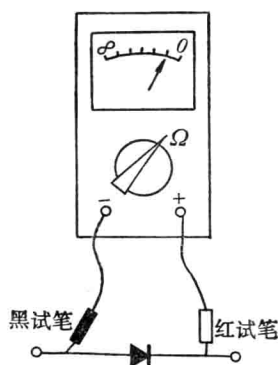


图 12-15 测量二极管正向电阻

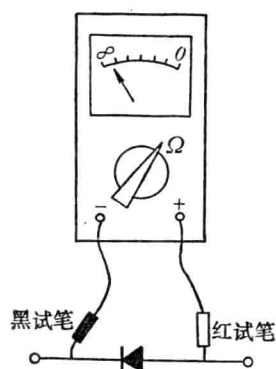


图 12-16 测量二极管反向电阻

二极管的正向电阻值较小，一般在几百欧姆以下，其反向电阻值则在几百千欧姆以上。如果测得的正、反向阻值都很大或都很小，说明二极管已经断路或已失去单向导电性能，不能使用了。

第二节 半 导 体 三 极 管

一、半导体三极管的结构和工作原理

(一) 半导体三极管的结构与符号

半导体三极管是由两个PN结和电极引线及用管壳密封组成的。图12-17是面结合的PNP型三极管的内部结构示意图。

N型锗片作为基片，在两侧各有一个钢球，得到两个P型锗区，它们与N型锗片之间形成两个PN结。左侧杂质浓度较高的小钢球称为发射极用 e (E)表示，右侧杂质浓度较低的大钢球称为集电极用 c (C)表示，中间的N型锗片称为基极用 b (B)表示。

发射极和基极之间的PN结，称为发射结。集电极和基极之间的PN结，称为集电结。

根据制作材料的不同，半导体三极管有PNP型和NPN型两种，它们的工作原理是一样的，只是在使用时外加电源连接的极性不同。今后主要以PNP型半导体三极管为例进行讨论。

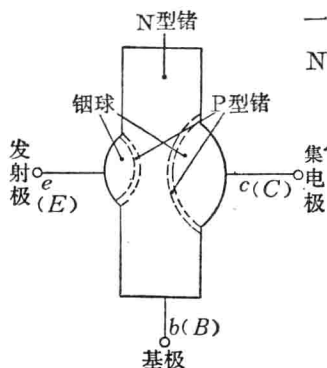


图 12-17 PNP型三极管的内部结构

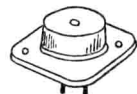
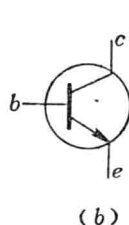
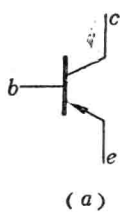


图 12-18 三极管的符号及外形
(a)PNP型；(b)NPN型；(c)三极管的外形

图12-18 (a) 是PNP型半导体三极管的符号，发射极箭头向里。图12-18 (b) 是NPN型半导体三极管的符号，发射极箭头向外。包围 e 、 b 、 c 三个电极的圆圈可画，也可以不画。半导体三极管通常简称为晶体管，图12-18 (c) 是一些晶体管的外形。

(二) 晶体管各电极间电流的分配

晶体管是在各电极之间加上适当的电压，通过管内电子和空穴的运动而工作的。分析管内电子和空穴的运动情况，即各电极间的电流分配是掌握晶体管工作原理的理论基础。

如图12-19所示，在发射结加正向电压 U_{be} ，在集电结加反向电压 U_{cb} 。发射结和集电结将晶体管分成三个区域，即发射区、基区和集电区。图中符号“○”表示空穴，符号“·”表示电子，“○→”和“●→”表示空穴及电子的运动方向，“↔”表示管内的电流方向，“→”表示管外的电流方向。

发射结加正向电压 U_{be} 以后，削弱了发射结的内电场，左边发射区的多数载流子（电子）通过发射结进入基区，产生电子流 I_{ne} 。基区的多数载流子（空穴）通过发射结进入发射区，产生空穴流 I_{pe} 。在制作晶体管时，发射区的杂质浓度比基区的杂质浓度大得多，

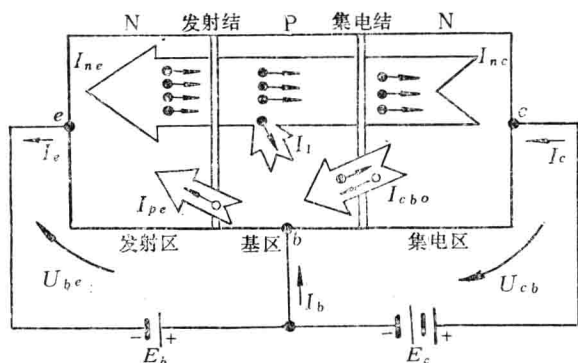


图 12-19 晶体管各电极间电流的分配

从而基区流向发射区的空穴数，比发射区流向基区的电子数少得多，因此，流过发射结的总电流 I_e 主要是由电子流组成， I_c 称为发射极电流。

集电结加较大的反向电压 U_{cb} 以后，增强了集电结的内电场，集电区的多数载流子(电子)和基区的多数载流子(空穴)，都受到阻碍不能通过集电结。但是，集电区的少数载流子(空穴)

和基区的少数载流子(电子)，在反向电压的作用下很容易地通过集电结，形成集电结反向饱和电流，用 I_{cbo} 表示。

大量的电子从发射区到达基区后，基区中发射结附近的电子比集电结附近的电子多，形成浓度上的差别，所以电子继续向集电结扩散，然后在集电结反向电压的作用下，大部分电子被吸引到集电区，形成集电极电流的主要部分 I_{nc} 。电子在基区的扩散过程中，有少部分电子和基区的空穴复合。因此，集电极电流 I_c 包括发射极电子流的主要部分 I_{nc} 和集电结反向饱和电流 I_{cbo} 。

基极电流 I_b 由三部分组成，第一部分是由基区流向发射区的空穴流 I_{pe} ，第二部分是集电结反向饱和电流 I_{cbo} ，第三部分是从发射区经基区去集电区的电子在基区中与空穴复合形成的复合电流 I_1 。

将上述讨论归纳起来可得各电极间的电流关系。

$$I_e = I_{ne} + I_{pe} \approx I_{ne}$$

$$I_b = I_{pe} + I_1 - I_{cbo}$$

$$I_c = I_{nc} + I_{cbo} \approx I_{nc}$$

所以

$$I_e = I_c + I_b$$

由于制作时将基区做得很薄，只有几微米到几十微米，从发射区扩散到基区的电子在基区复合得很少，绝大部分被吸引到集电区，所以 I_1 是很小的。从上面的分析可知， I_{cbo} 和 I_{pe} 的数值是很小的，因此，在晶体管中，集电极电流 I_c 很接近于发射极电流 I_e 。

从基区到发射区的空穴与集电极电流没有什么联系，即发射极电流中的 I_{pe} 部分对 I_c 没有影响，我们把从发射区注入到基区的电子流 I_{ne} 和总发射极电流 I_e 的比值称为发射效率，用 γ 表示。

$$\gamma = \frac{I_{ne}}{I_e} = \frac{I_{ne}}{I_{ne} + I_{pe}}$$

因为 $I_{pe} \ll I_{ne}$ ，所以 $\gamma \approx 1$ 。

电子从发射区到集电区的过程中，有一部分将在基区与空穴复合。我们把到达集电区的电子流和从发射区进入基区的电子流的比值称为复合比，用 η 表示。