

中等专业学校教材

电子技术基础

东北水利水电学校 湖北省水利学校 合编
黑龙江水利工程学校 扬州水利学校

水利出版社

内 容 提 要

本书共分十章,包括半导体二、三极管,半导体交流放大器,正弦波振荡器,直流放大器,直流稳压电源,半导体脉冲电路,晶体管计数电路,集成电路,可控硅整流电路,电子技术在水文电测仪器中的应用等内容。

本书除作为水电站动力设备和陆地水文两专业的教材外,对于中小水电站、机电排灌、水文地质、施工机械等专业也可试用,学时在150以下的其他专业也可选用。并可供从事水电、水文专业的技术人员和工人参考。

中等专业学校教材

电子技术基础

东北水利水电学校 湖北省水利学校
黑龙江水利工程学校 扬州水利学校

合编

*

水利出版社出版发行

(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 20 $\frac{1}{4}$ 印张 457千字

1982年6月第一版 1982年6月北京第一次印刷

印数0001—8030册 定价2.10元

书号15047·4195

前 言

本书是根据一九八一年五月在长春制定的水电站动力设备和陆地水文两专业的《电子技术基础》新的教学大纲编写的。初稿曾于一九七八年编成，并作为校际交流讲义，在有关学校试用过两年。本书是在初稿的基础上经修改加工而成。

本书在内容上着重突出电子电路工作过程的物理实质，对基本单元电路的工作过程作了较为详细地分析和阐述，还对部分内容进行了适当的定量分析，但没有涉及过多的计算。在以电子电路为主的基础上，适当地兼顾半导体器件和电子电路的应用，并且注意了把器件、电路和应用（水轮机电调、水轮发电机可控硅励磁、继电保护等）结合起来讨论。对常用的水文电测仪器的工作原理、测试方法进行了较为详细的讨论。每章均附有小结和习题。

本书第一、三、五、九章和附录由东北水利水电学校李德润同志编写；第二章由黑龙江水利工程学校廖荣长同志编写；第四、六、七、八章由湖北省水利学校盛传鼎同志编写；第十章由扬州水利学校李正宏同志编写。全书由李德润、盛传鼎负责统稿。

本书第一至九章和附录由北京邮电学院谢沅清副教授审稿；第十章由水利部南京水利水文自动化研究所周益祺工程师审稿。他们对书稿作了详细审阅，并进行了认真的修改。在本书初稿审议和修改过程中，有关学校的老师还提出了很多宝贵意见。在此，一并表示感谢！

由于编者业务水平所限，书中肯定存在不少缺点，甚至错误，我们恳切地希望使用本书的教师、同学和其他同志提出批评，加以指正。

编 者

一九八一年十二月

目 录

前 言

第一章 半导体二、三极管	1
1-1 半导体的导电特性	1
1-2 本征半导体 杂质半导体	2
1-3 PN结	5
1-4 半导体二极管	8
1-5 硅稳压管	11
1-6 半导体三极管及其电流放大作用	12
1-7 三极管的特性曲线	16
1-8 三极管的主要参数	20
1-9 光电器件简介	23
1-10 二、三极管简易测试方法	25
本章小结	28
习题	28
第二章 半导体交流放大器	30
2-1 单管交流电压放大器	30
2-2 放大电路的基本分析方法	33
2-3 工作点的稳定	41
2-4 多级放大器	44
2-5 功率放大器	49
2-6 放大器中的负反馈	59
本章小结	66
习题	68
第三章 正弦波振荡器	70
3-1 自激振荡的基本原理	70
3-2 LC振荡电路	72
3-3 石英晶体振荡器	75
3-4 RC振荡电路	77
本章小结	80
习题	81
第四章 直流放大器	82
4-1 简单的直接耦合放大器	82
4-2 差动式放大电路	85
4-3 实用差动放大电路举例	91

本章小结.....	92
习题.....	92
第五章 直流稳压电源.....	94
5-1 单相整流电路	94
5-2 电容器的充放电	99
5-3 滤波电路.....	101
5-4 并联型晶体管直流稳压电源.....	105
5-5 串联型晶体管直流稳压电源.....	108
5-6 三相整流电路.....	112
5-7 特殊整流电路	115
本章小结	118
习题	120
第六章 半导体脉冲电路	122
6-1 脉冲电路的基本知识	122
6-2 逻辑电路.....	124
6-3 RC电路	131
6-4 集电极、基极耦合双稳态电路.....	136
6-5 发射极耦合双稳态电路(施密特电路)	144
6-6 单稳态电路.....	147
6-7 自激多谐振荡器.....	151
6-8 锯齿波振荡电路.....	154
本章小结	155
习题	155
第七章 晶体管计数电路	157
7-1 二进制计数电路.....	157
7-2 二十进制计数器	161
7-3 十进制的数码显示.....	163
7-4 二十进制译码器	166
本章小结	170
习题	170
第八章 集成电路.....	171
8-1 集成电路的基本概念.....	171
8-2 晶体管数字集成电路.....	173
8-3 MOS场效应管集成电路	185
8-4 线性集成组件.....	188
8-5 集成运算放大器应用举例.....	192
本章小结	197
习题	198
第九章 可控硅整流电路.....	200
9-1 可控硅整流元件.....	200

9-2 可控整流电路·····	205
9-3 单结晶体管触发电路·····	212
9-4 其他形式的触发电路·····	219
9-5 可控硅的保护·····	223
9-6 水轮发电机可控硅励磁装置·····	226
本章小结·····	240
习题·····	243
第十章 电子技术在水文电测仪器中的应用·····	245
10-1 雨量部分·····	245
10-2 水位部分·····	248
10-3 流量部分·····	265
10-4 泥沙部分·····	281
习题·····	297
附录 I 本书所用符号说明·····	299
附录 II 半导体器件命名方法(GB249-74)·····	300
附录 III 典型半导体器件参数选录·····	301
附录 IV 晶体管超外差式收音机·····	307
附录 V 电平与分贝·····	315

第一章 半导体二、三极管

半导体电路中的核心元件是半导体二极管和半导体三极管。半导体管全部由固体材料制成，故又称为固体器件。对固体材料来说，按照它们的结构形式可以分成晶体和非晶体两类。而按照它们的导电能力可以分成导体、半导体和绝缘体。目前用来制造半导体器件的锗、硅、砷化镓等材料，它们在结构形式上都是晶体，而在导电机理上又都是半导体，所以半导体管也叫晶体管，或统称半导体器件。

为了掌握好半导体电路技术，就必须对半导体器件的特性有一定的了解。有必要分析研究半导体器件的内部矛盾规律，掌握它的导电性能。PN结是半导体器件的基本结构。所以在学习电子技术基础课程的首章时，从研究半导体的导电原理入手，进而讨论PN结的特性，再引出目前常用的半导体二、三极管。前两部分内容是属于半导体物理的基础知识。而半导体二、三极管的特性和参数则是正确选择合理使用它的依据。

1-1 半导体的导电特性

一、什么是半导体

从电工学知道，同样形状大小的导体和绝缘体，它们的电阻相差极为悬殊。导体电阻率小于 10^{-1} 欧姆·厘米，很容易传导电流，象银、铜、铝、铁等金属材料都是导体。绝缘体电阻率大于 10^{15} 欧姆·厘米，可以认为它不能传导电流，象塑料、陶瓷、云母、石英、橡胶、木材等等均是绝缘体。导电性能介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。它的电阻率约在 $10^{-1} \sim 10^{15}$ 欧姆·厘米间。半导体材料种类繁多，象锗、硅、硒以及大多数的金属氧化物（如氧化铜）和硫化物（如硫化铝），还有许多金属间的化合物（如铋化锑）等都是半导体。

二、半导体的特性

半导体的导电能力在不同条件下有非常大的差别。在某一情况下它象地地道道的导体，而在另一种情况下它又象典型的绝缘体。在生产实践中人们发现半导体具有三个主要特性：

1. 掺杂性 半导体的导电能力随所含微量杂质而发生显著的变化。对于一般材料，例如化学试剂纯度达到99%或99.9%就认为是很高了，此时尚剩余1%或0.1%的杂质，通常并不会影响物质的原来特性。而对半导体来说，情况就不同了。纯硅在室温时的电阻率为214000欧姆·厘米，如果在纯硅中以每一百万个硅原子掺入一个磷原子杂质，此时硅的纯度虽然仍高达99.9999%，但其电阻率却从214000欧姆·厘米一下子降到0.2欧姆·厘米左右，几乎降至一百万分之一。硅电阻率随所含微量杂质的惊人变化虽然可能使人难于想象，但这却是客观事实。这就是半导体最显著、最突出的特性。

如果在导体和绝缘体中掺入同样数量的杂质，其导电性能变化甚微。当在导体和绝缘体中掺入杂质不超过1‰时，它们的电阻率几乎是不变的。这就是半导体区别于导体和绝缘体的特殊性质之一。正因为半导体具有这种特殊性质，人们就利用掺入不同杂质的方法，制造出不同性质，供不同用途的半导体器件。从而使本来不为人们注意的半导体一跃而成为电子技术的主要材料。

2. 热敏性 半导体的电阻率随温度的变化显著。与导体相比，主要有两个差别：首先半导体电阻率的温度系数是负的，而导体是正的，也就是说，当温度升高时，半导体的电阻率会迅速减小，而导体的电阻率却相应的增大；其次，半导体的电阻率随温度的变化很快，而导体的电阻率随温度的变化则要慢得多，以硅为例，当温度从30℃降低至20℃时，其电阻率增加一倍。而铜导体，即使温度上升100℃，电阻率的增加也不到一半。这充分地说明半导体的导电能力与温度间有着密切的关系。

3. 光敏性 半导体的导电能力随光照而发生显著的变化。例如沉积在绝缘基片上的硫化镉薄膜，在没有光照时，其暗电阻为几十兆欧。当受光照时，它的电阻则下降到只有几十千欧，阻值改变了几百倍。这就是说当有光照到某些半导体上时，它表现出导体的性质，导电能力很强。但在没有光照时，它又象绝缘体一样不导电。然而导体和绝缘体一般都不具备这种特性。

除了上述三个方面主要特性外，还有电场、磁场、压力和不同气体等均对半导体的特性有影响。但都不及杂质、温度、光照影响显著。因此在设计使用半导体管和半导体电路时，要特别注意温度和光照的影响。人们还巧妙地利用半导体的这些特性制成自动控制用的热敏电阻、光敏电阻、光电二、三极管以及磁敏、力敏、气敏等元器件。

1-2 本征半导体 杂质半导体

半导体导电性能为什么会有那些多变的特点呢？其根本原因在于物质内部原子与原子间的结合方式以及原子本身的结构，在于运载电荷的粒子——载流子的多少和运动速度的快慢。这一节就从半导体的原子结构去研究半导体的导电机理。

一、半导体的共价键结构

一切物质都是由原子构成的。原子又是由一个带正电的原子核与若干个带负电的电子构成的。电子按一定的规律分层绕原子核运转。

在研究物质导电性能时，需要特别注意的是原子最外层价电子的情况。最外层的电子离原子核较远，受原子核正电荷的吸引力比较小，只要从外部获得一定的能量，就很容易摆脱原子核的束缚，脱离原轨道而成为在物质内部可以移动的自由电子。在价电子层以内的各层电子，通常与原子核比较牢固地结合在一起，因而不参加导电。所以，物质的导电性能只取决于价电子的数目。根据原子理论，原子最外层的电子数目达到八个时最为稳定。各类物质的导电性能大致由以下条件决定：原子的价电子数目少于四个的是良导体，多余四个的是绝缘体，等于四个的是半导体。金属原子的特点是具有不稳固的价电子，在常温下就会脱离自己的轨道成为自由电子。这些自由电子在电场力的作用下，作定向运

动，形成了电流。绝缘体的特点是价电子紧紧地被束缚在自己的轨道上，形成稳固的结构，几乎没有自由电子，所以，很不容易导电。

下面以常用的半导体材料硅和锗为例进一步分析它们的内部结构。图 1-1 (a)、(b) 分别为硅、锗原子结构平面示意图。由图可见，硅和锗原子结构的共同特点是最外层的电子都是四个，都是四价元素。图 (c) 所示是硅与锗的简化结构示意图。

自然界中存在的晶体，常包含着许多小晶粒，每个小晶粒中的原子都按同一序列排列，但晶粒与晶粒之间的排列取向则是没有规则的，这样的晶体称为多晶。常见的铜、铁等许多金属材料就是这样的多晶。但也有一些晶体，它本身只有一个晶粒，也就是说它体内的所有原子都按同一序列排列起来的，

这样的晶体称为单晶。自然界中虽然也有天然的单晶，但在多数情况需要在人工仔细控制的环境下，才能生长出大体积的单晶。当硅、锗半导体材料制成单晶时，其原子排列就由杂乱无章的状态变成了非常整齐的状态，组成某种形式的晶体点阵。

例如硅和锗原子就是按四角形系统组成晶体点阵。即每个原子是处于正六面体中心，而有四个原子位于六面体的不相邻的顶点上，如图 1-2 (a) 所示。硅和锗原子组成单晶体后，原子间靠得很近且距离都是相等的，约为 2.35×10^{-4} 微米。作为单晶体的硅和锗，每个原子最外层的四个价电子，不仅受自身原子核的束缚，还与周围相邻的四个原子发生联结，每相邻的

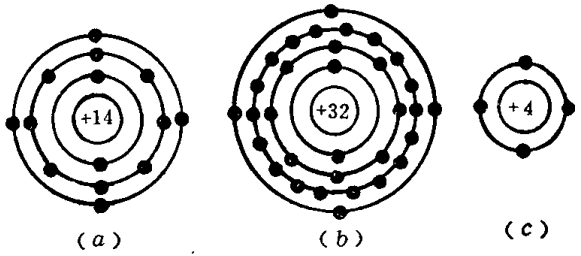


图 1-1 硅和锗原子结构平面示意图
(a) Si 原子，(b) Ge 原子，(c) 简化后的 Si、Ge 原子

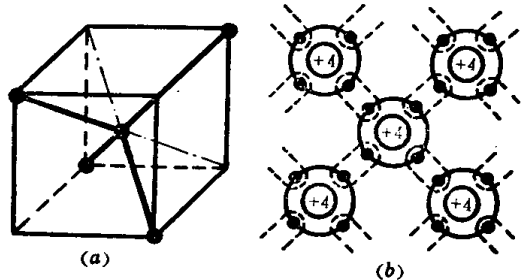


图 1-2 硅、锗单晶体结构
(a) 晶体点阵，(b) 共价键结构

两个原子之间都共有一对电子。电子对中的任何一个电子，一方面围绕自身原子核运动，另一方面也时常出现在相邻的原子所属轨道上。这样两个相邻原子就被一对共有的电子联系在一起了。电子对起了键（联接）的作用，或者说每对共用的价电子，使它们所属的两个原子间产生了一种束缚力，就象链条一样把两个原子互相拉着。将这种靠共用价电子实现的结合，称之为共价键结构，如图 (b) 所示。共价键中的电子叫做价键电子。

对于单晶体中每个硅或锗原子，在外层轨道上实际有八个价键电子，这些外层电子受到较大的束缚，不象导体中的外层电子那样容易自由运动。然而单晶体中的每个原子都是通过共价键达到稳定状态的，其外层电子所受到的束缚又不象在绝缘体中那么紧，这种稳定状态是不牢固的。这一点正是半导体材料具有前述种种独特性能的内在原因。

二、本征半导体中的两种载流子——电子和空穴

经过高度提纯，不含杂质而完全纯净，结构排列完整的半导体，称之为本征半导体。它只有在绝对零度 (-273°C) 才象绝缘体一样。随着温度的升高，半导体的电导率增大了。这是由于少量的价键电子从热运动中得到足够的能量，使价键电子从束缚状态激发到

自由状态而成为自由电子，形成电子载流子，这种现象称为本征激发。这样本征半导体处于外电场作用下自由电子逆电场方向作定向运动就形成电子电流，叫电子导电。

值得特别注意的是，价键电子激发为自由电子后，在原来共价键位置上就留下一个空位，这空位称为空穴，如图 1-3 中用○所示。附近的价键电子就很容易进来填补，而使邻

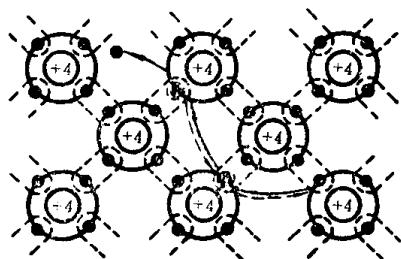


图 1-3 硅锗单晶体中空穴运动

近的共价键上又出现一个新空穴。如此不断的进行下去，就形成了价键电子的特殊形式运动。这种价键电子的运动，相当于带有和价键电子电量相等而符号相反的正电荷粒子沿价键电子运动相反方向的运动，如图 1-3 中虚线矢所示。可以认为，这个带正电荷的空位子运动与一个正电荷粒子运动等效，这种运动称为空穴运动。从本质上说，空穴运动就是价键电子由一种束缚状态转到另一种束缚状态的运动。

可见，空穴也是一种载流子。当半导体处于外电场作用之下时，除形成电子导电外，空穴也在作定向运动——形成空穴电流（此时空穴作与外电场相同方向的定向运动），空穴移动造成的导电叫空穴导电。所以在半导体中，不仅有电子载流子，而且还有空穴载流子。在外电场作用下，半导体中同时存在两种导电现象——电子导电和空穴导电。因此流过半导体中的总电流为电子电流和空穴电流的代数和。

导体和半导体都可以导电，但两者是有区别的。导体中只有电子导电而无空穴导电。因此它们对外界条件的反应也不一样，导体反应差，半导体则反应灵敏。由于半导体原子的热运动，所以能不断地产生自由电子，同时出现相应数量的空穴，即电子和空穴是成对出现的，我们称之为电子空穴对。温度愈高，电子空穴对的浓度愈大，这就是半导体导电性能随温度变化的根本原因。此外，半导体受光照亦能激发电子，光照愈强，形成电子空穴对愈多，这也就是半导体的导电能力随光照度的增强而增大的原因。另一方面，自由电子在运动中又会与空穴重新结合而消失，这是一种相反过程，叫复合。电子空穴对又产生，又复合，这就是半导体内不断进行着的一对矛盾运动。在一定的外界条件下，这对矛盾可以实现相对的平衡。这时产生和复合的过程虽然仍不断的进行着，但电子空穴对始终维持一定的数目，这就是动态平衡。

三、杂质半导体——N型和P型半导体

本征半导体虽然比导体多了一种空穴载流子，但载流子的数目远不能达到实际应用的要求。从具有良好的导电能力要求来看，还相差得远，所以其本身用途不大。半导体技术之所以能够迅速发展，主要是由于人们能够精确地控制半导体的电学性能。通常所用的办法就是先把半导体材料提纯到很高的纯度，除去所有不必要的杂质，然后再在严格的控制条件下掺入所需要的杂质。因此实际构成各种器件的半导体，常常是含有一定杂质的半导体。所谓N型半导体和P型半导体就是用掺杂的办法得到的。

1. N型半导体

如果在四价硅或锗单晶中掺入微量的磷（P）、砷（As）、锑（Sb）等五价元素。则其中一些硅或锗原子的位置被五价原子代替，五价原子中的四个价电子和硅或锗原子的

四个价电子组成共价键，多出一个受原子核束缚很弱的价电子，很容易成为自由电子，如图 1-4 所示。这样掺入硅或锗中每一个五价原子都提供一个自由电子。除因掺杂产生自由电子外，还存在着本征激发所产生的电子空穴对。因此在这种半导体中，参与导电的除数量很多的电子外，还有少量的空穴，主要靠电子导电，故称这种半导体为电子型半导体，通常又称为 *N* 型半导体。为了便于区别，在 *N* 型半导体中，把电子叫做多数载流子，空穴叫做少数载流子。上述五价元素的杂质，因为能在晶体内施舍出自由电子，所以称这五价元素为施主杂质。

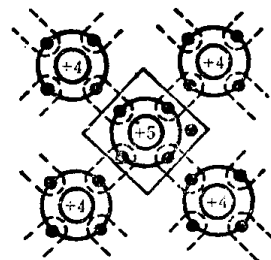


图 1-4

2. *P* 型半导体

如果在硅或锗中掺入硼 (B) 或镓 (Ga)、铝 (Al)、铟 (In) 等三价元素，一些硅和锗原子的位置为三价原子所代替。当三价原子和周围四个硅或锗原子组成共价键时，因

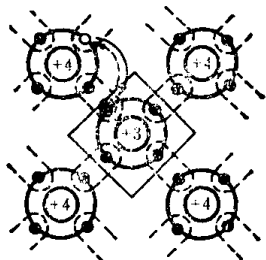


图 1-5

缺少一个电子，形成一个空穴，如图 1-5 所示。这样在硅或锗中的每一个三价原子都可以提供一个空穴，使半导体内空穴载流子数目很多，主要靠空穴导电，故称它为空穴型半导体，通常称 *P* 型半导体。三价元素的杂质掺入四价本征半导体中，所提供的空穴，其主要作用是接受电子，故称这三价元素为受主杂质。由于本征激发，*P* 型半导体中还会同时产生一定数量的电子空穴对，所以也有少量的电子载流子存在。显然在 *P* 型半导体中，

空穴是多数载流子，电子则是少数载流子。

实际上，半导体中经常是既有 *P* 型杂质，又有 *N* 型杂质。哪种杂质的浓度大，就由哪种杂质决定其导电类型。比如在硅中先掺入磷，成为 *N* 型硅。然后再掺入硼，当硼的浓度大大超过磷时，就由 *N* 型转化为 *P* 型硅了，使原来自由电子绝大部分与空穴复合，剩下的自由电子数目就很少了，成为少数载流子，而空穴则是多数载流子。

综上所述，由于掺入不同的杂质，可获得两种不同类型的半导体：*P* 型和 *N* 型半导体，它们统称为杂质半导体。杂质半导体中多数载流子浓度要比本征半导体中载流子浓度大得多，因此杂质半导体的导电能力要比本征半导体强得多。

必须指出，虽然 *P* 型半导体中有大量的空穴载流子，*N* 型半导体中有大量的电子载流子，但就整个半导体而言仍然是电中性的。正如金属导体中平时就有大量自由电子，但金属导体并不显带电一样。

1-3 *PN* 结

在制造半导体器件时，常用合金、扩散或外延等工艺对单晶片进行局部掺杂，使单晶片一部分含有受主杂质而成为 *P* 型的，另一部分含有施主杂质而成为 *N* 型的。在 *P* 型与 *N* 型交界地方就会形成一个特殊的薄层，叫 *PN* 结。它表现出既不同于 *P* 型，也不同于 *N* 型半导

体的新特性。

PN结是半导体二、三极管，可控硅等半导体器件的组成基础。所以在这节中，从分析PN结中P型与N型部分相互作用着手，去认识PN结中载流子运动规律，掌握PN结各种特性，尤其是PN结的单向导电性。

一、PN结单向导电实验

把电压加到PN结两端（半导体二极管就是一个PN结，实际上是把电压加到二极管两端），观察通过PN结的电流与所加电压间关系。当P端接电源正极N端接负极，如图1-6(a)所示。实验表明，随着PN结两端电压提高，通过PN结电流也相应增大且上升很快。只要有零点几伏，灯就亮。这说明PN结电阻很小，或称低阻状态。将PN结与电源这种连接方法称为PN结的正向连接。正向连接通过PN结的电流叫正向电流，加在PN结两端的电压叫正向电压。当P端接负极N端接正极，如图(b)所示，则通过PN结电流非常小。比如当电压加至40~50伏时，电流也只有几个至十几个微安，而且几乎维持不变，灯不亮。这说明PN结的电阻非常大，或称高阻状态。将PN结与电源这种连接方法叫反向连接。

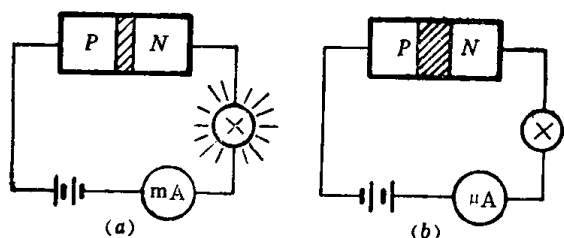


图 1-6

(a) 正向连接；(b) 反向连接

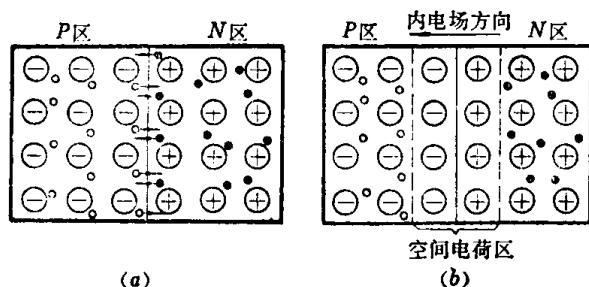


图 1-7 空间电荷区的形成

的状况，其中 $\ominus$ 代表得到一个电子的三价原子。由于它得到多余电子，所以带负电。 $\oplus$ 代表失去一个电子的五价原子，由于它失去一个电子，所以带正电。当扩散时，交界面附近电子从N区转移到P区，同P区空穴复合掉，而在N区留下一些带正电的施主离子。同样空穴从P区转移到N区，同电子复合掉，而在P区留下一些带负电的受主离子，在交界面两侧各形成正、负离子薄层，如图(b)所示。因为这些杂质离子固定在晶体上不能移动，而且不参与导电，称之为空间电荷，于是在P区和N区交界面的两侧，由于两种多数载流子相互向对方区域扩散的结果，就出现一个空间电荷区，这个空间电荷区叫PN结。显然，在PN结这个区域中，并不是电中性的。在N区中施主离子薄层带正电，电位高；P区中受主离子薄层带负电，电位低。这和一对带有不同电荷的平行平板电容器很相似，

反向连接通过PN结的电流叫反向电流，加在PN结两端电压叫反向电压。当用一根导线短接PN结两端时，无论正、反向哪种连接方法，小电珠都会发亮。

这个实验充分说明了，PN结的导电情况与PN结所接电源极性有关，只有正向连接的PN结，它才能导电。而反向连接的PN结则不导电。将PN结这种导电特性，称为PN结的单向导电性。而一般导体的导电则与电源极性无关。

二、PN结的形成

在半导体P区与N区交界面两侧，存在着电子与空穴浓度差，因此就会产生电子与空穴的扩散运动，如图1-7(a)所示。为了便于说明问题，只画了杂质原子的状况。

它们产生一个电场，其方向是由正离子区指向负离子区，由空间电荷区所产生的电场是在PN结内部，所以一般叫内电场、结电场或自建电场，以便和外部电源产生的外电场相区别。由正、负离子薄层所组成的内电场，是具有一定电位差的。所以又将结电场叫做电位壁垒，或简称位垒、势垒。一般条件下，锗PN结的势垒约为0.6伏，硅PN结的势垒约为1.1伏。应当指出在空间电荷区以外的P区和N区中，仍然是电中性的，没有空间电荷，所以也不存在内电场。

虽然内电场是由多数载流子扩散运动形成的，然而当内电场建立起来后，它反过来又对扩散运动起着阻碍作用，故又常常将PN结称为阻挡层。由于它是由载流子移去而形成的，取载流子耗尽之意而又有耗尽层之称。内电场对多数载流子的作用，实际上是使它们向相反方向运动，力图将空穴推回到P区去，电子推回到N区去。然而这个内电场对少数载流子的运动却是极其有利的，它使PN结两边P区中少数电子载流子与N区中的少数空穴载流子顺着内电场方向漂入对方区域。将内电场对多数载流子继续扩散的阻挡作用和推动少数载流子的漂移作用，而形成的有规则运动叫做载流子的漂移运动。

可见载流子的漂移运动与扩散运动是互相对立的。扩散要使电子从N区向P区运动，空穴从P区向N区运动。而漂移则是使电子回到N区，空穴回到P区，以及有利于P区与N区中少数载流子的渡越。所以由于载流子浓度差异而产生的扩散运动与内电场产生的漂移运动形成了一对矛盾。它们相互依存又相互斗争，就构成了PN结内载流子的矛盾运动。在扩散开始的时候，扩散运动占优势，随着扩散过去的电子和空穴数目的增加，空间电荷逐渐增多，空间电荷区逐渐变厚，内电场的漂移作用逐渐增强，对扩散的阻碍越来越大。当扩散与漂移两者作用相等时，这时载流子通过PN结的运动达到了相对平衡状态。从N区向P区扩散过去多少电子，同时就有等量的电子被内电场的漂移作用拉回到N区去，对空穴来说也是一样。因而P区与N区的载流子浓度不再变化。尽管这时扩散与漂移仍在继续进行，但宏观上通过PN结的总电流为零，PN结达到了动态平衡。

三、外电场对PN结的影响

上面谈到的是没有外电场作用，在一定的光照和温度等外界条件下，PN结扩散与漂移运动达到暂时的稳定状态——动态平衡。然而在半导体技术中，人们正是利用给PN结加上不同的外电压，破坏PN结的动态平衡，促使它向有用的方向转化。

1. 外加正向电压 PN结导通

当PN结两端加正向电压时，外电场与内电场方向相反，如图1-8(a)所示。外电场能使P区空穴向负离子薄层移动，使N区电子向正离子薄层移动，并使它们互相中和，这时空间电荷量减少，空间电荷区变窄，位垒降低，消弱了内电场。从而打破了载流子扩散运动与漂移运动的相对平衡，扩散运动大为加强，漂移运动减弱，有利扩散运动进行下去。由于PN结的位垒只有0.6或1.1伏，所以只要加零点几伏

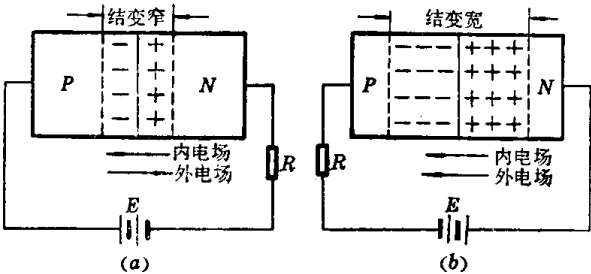


图 1-8
(a)PN结加正向电压；(b)PN结加反向电压

的电压,扩散就将大大增加。也可以说在外电场的帮助下,多数载流子能通畅的越过PN结形成较大的电流,即PN结导通。外加正向电压越大,外电场对内电场的削弱作用越强,流过PN结的电流越大。

2. 外加反向电压 PN结截止

若PN结外加一个反向电压,外电场与内电场方向一致,如图1-8(b)所示。这时外电场与内电场一起加强了漂移作用,共同阻挡多数载流子的扩散运动,驱使P区空穴离开负离子薄层,N区电子离开正离子薄层,从而使正、负离子所带空间电荷增加,空间电荷区加宽,位垒提高,加强了内电场。漂移运动大大超过了扩散运动,多数载流子扩散运动更难以进行。这时P区和N区中少数载流子,在加强了的内电场作用下,却极易于越过PN结漂移到对方区域中。由于半导体中少数载流子浓度小,内电场虽强,但没有更多的载流子可以参与漂移运动。即使在PN结加较高的反向电压,流过PN结的反向电流也极小。所以PN结加反向电压,从宏观上可以认为它不导电,即PN结截止。

综上所述可知,当施加PN结两端电压极性不同时,通过PN结的电流相差极为悬殊。当PN结与电源正向连接时,PN结导通,电流很大,相当于PN结电阻很小,在PN结两端压降很小,可以认为它是短路的。然而,当PN结与电源反向连接时,PN结截止,电流很小,相当于PN结反向电阻很大,可以认为它是开路的。这就是PN结的单向导电特性,或称开关特性。在整流与开关等电路中,都是利用PN结的单向导电特性来工作的。

四、PN结电容

当PN结有外加电压时,其空间电荷区的宽度就随外加电压的大小和方向而改变。也就是说,在P区和N区的交界面附近正、负离子薄层中的空间电荷量随外加电压而增减。这和电容器端电压变化时,将引起电容器两极板充、放电的现象是一样的。将这个电容称为势垒电容。另外在PN结加正向电压时,从P区经PN结扩散到N区的空穴,由于来不及立刻与N区电子复合掉,因而开始时在N区靠PN结附近,要有一定程度的积累,为了维持半导体的电中性,将有同等数量的电子由外电路进入N型区,于是在N区中将贮存空穴-电子对。同理,从N区经PN结扩散到P区的电子,会在P区靠PN结附近有一定程度的积累,也将导致空穴-电子对的贮存。这些空穴-电子对的数量随外加电压大小,或者说随扩散电流的强弱而有所增减,这也是一种电荷存放作用,从而又造成一个附加电容效应,称为扩散电容。二、三极管的极间电容就是由PN结的这两部分电容组成的。

1-4 半 导 体 二 极 管

半导体二极管实际上就是由一个PN结加上电极引线和外壳封装而成的。所以前述PN结的一切特性也都是二极管所具有的特性。本节主要介绍二极管的结构、特性曲线和主要参数等。

一、二极管的结构和类型

根据制作二极管的半导体材料不同,分为锗二极管、硅二极管和砷化镓二极管等。

根据二极管的用途，分为整流二极管、稳压二极管、开关二极管和检波二极管等。

根据二极管的结构，分为点接触型二极管、面接触型二极管和平面型二极管，如图1-9 (a)、(b)、(c)所示。

点接触型二极管，接触面很小，不能通过大电流，一般不超过几十毫安。由于接触面小，所以PN结电容也很小，可用于高频检波、开关电路和小功率整流。面接触型二极管接触面积大，可以通过较大的电流，适于作整流元件。它的PN结电容较大，不能用于高频电路。平面型二极管多用于开关电路中。

二极管在电路图中的符号如图(d)所示。它有两个电极，一个为正极（又叫阳极），即P型半导体的引出端子；一个为负极（又叫阴极），即N型半导体的引出端子。箭头指向表示二极管单向导电时电流的方向。二极管常见外形如图(e)所示。

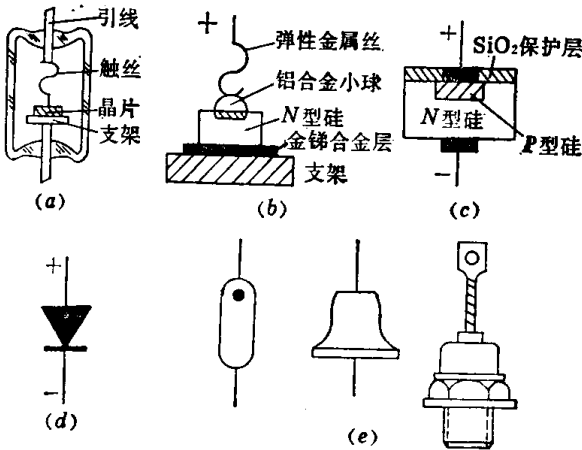


图 1-9

(a)点接触型；(b)面接触型；(c)平面型；(d)符号；
(e)外形

二、二极管的伏安特性

二极管最主要特性就是单向导电特性。它可以通过研究二极管的电压和电流关系来得到进一步的认识。二极管的电压和电流关系曲线，叫做二极管的伏安特性曲线。二极管伏安特性曲线可通过实验方法测绘。先按图1-10接成实验电路。图中D是待测二极管，如2AP14^①，V是电压表，A是电流表，正向用毫安表，反向用微安表，R是保护电阻，防电流过大烧坏管子，W是电位器，K是双刀双向开关，当K打向1时，二极管外加正向电压，打向2时则为反向电压。

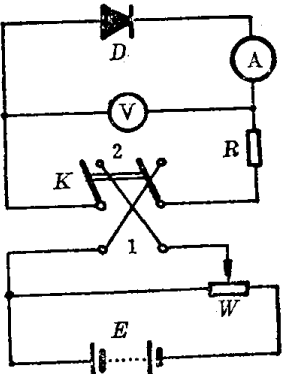


图 1-10

先将K打向1调节电位器W，逐渐改变外加电压大小，分别记录电压表与毫安表读数。再将K打向2，同样测出电压表和微安表读数，填入表1-1内。根据测得数据，在直角坐标系上，绘出二极管电流与电压关系曲线，如图1-11所示。

表1-1 2AP14电流电压关系

正向电压 $U_{正}(V)$	0	0.2	0.4	0.6	0.8
正向电流 $I_{正}(mA)$	0	1	5	12	24
反向电压 $U_{反}(V)$	0	-5	-10	-15	-20
反向电流 $I_{反}(mA)$	0	-0.01	-0.05	-0.075	-0.12

表 1-2 2CP14电流电压关系

正向电压 $U_{正}(V)$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
正向电流 $I_{正}(mA)$	0	0	0	1	10	24
反向电压 $U_{反}(V)$	0	-15	-30	-45	-60	-75
反向电流 $I_{反}(mA)$	0	0	0	0	0	-0.001

① 半导体器件命名方法见附录II。

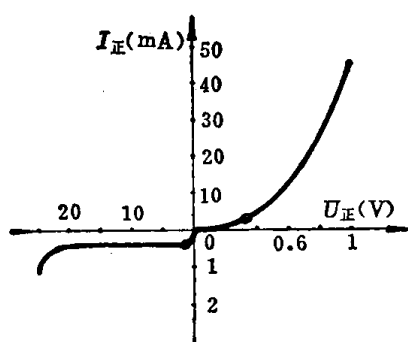


图 1-11 2AP14伏安特性曲线

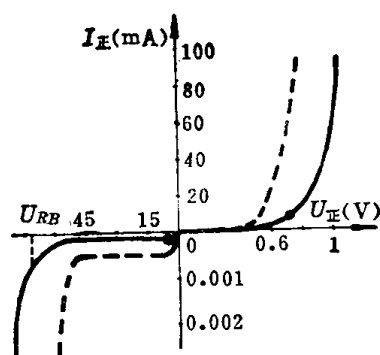


图 1-12 2CP14伏安特性曲线

同样硅二极管，如2CP14的伏安特性曲线，也利用图1-10所示实验电路测绘。测量数据填入表1-2内，其对应的伏安特性曲线如图1-12所示。

二极管伏安特性曲线的讨论

1. 正向特性 当二极管两端加正向电压，就产生正向电流。但当正向电压比较小时，由于外电场还不足以克服内电场对载流子扩散运动所造成的阻力，所以正向电流很小，二极管呈现的电阻较大。当二极管两端电压超过一定数值以后（这个数值称作死区电压或称门坎电压，锗管约为0.2V，硅管约为0.5V），内电场被大大的削弱，二极管的电阻变得很小，电流增长很快。超过门坎电压后，外加电压略微增加一点，电流却会增加很多。

2. 反向特性 当二极管两端加反向电压时，P型和N型半导体中的少数载流子在外电场的漂移作用下顺利地通过PN结，形成反向电流。由于少数载流子为数有限，在一定温度下和每单位时间里，只能提供一定的数量，所以在不大的反向电压作用下，就能使少数载流子全部通过PN结。这时，即使反向电压再增加，反向电流也基本上不变了。因此常称该反向电流为反向饱和电流。在这个范围内，由于电压增加而电流几乎不变，故反向电阻是随电压升高而增大的。

3. 反向击穿特性 由图1-12可见，当反向电压不断增大且接近-70伏左右时，反向电流将急剧增大，这种现象称为反向击穿^①。发生击穿时的电压 U_{RB} 称为反向击穿电压，这时管子的反向电阻就大大地降低，且随反向电压升高而急剧下降。各类二极管反向击穿电压大小不同，点接触型为数十伏以下，面接型一般可达数百伏，最大可达1000伏以上。

4. 温度对伏安特性的影响 随着温度的升高，半导体中多数与少数载流子数目均要增加。因此在同样大小电压作用下，正、反向电流都要增加，但对后者影响显著。温度升高后，二极管伏安特性如图1-12虚线所示。

在不同的温度下，二极管的正向特性是不同的。若保持二极管的电流不变，温度越高，需要施加的正向电压就越小，这个现象称为正向电压（或管压降）的温度漂移。无论是硅管或锗管，当温度每上升1℃，正向电压将下降2~2.5毫伏，常用-(2~2.5)毫伏/度表示。反之，当外加正向电压不变时，温度越高，正向电流越大。至于反向电流虽很小，但受温影响很大。这是因为反向电流是少数载流子在漂移运动驱使下而形成的，而少数载

① 反向击穿的机理，参看1-5中硅稳压管工作原理的说明。

流子又是价键电子由于热激发而产生的缘故。在通常情况下，硅管每上升 8°C ，反向电流增加约一倍；锗管每上升 12°C ，反向电流增加约一倍。综合各类管子在不同温度下的反向击穿特性得到，随温度升高，有的管子反向击穿电压略有升高，有的变化不大，还有的要降低。后者在使用时必须注意。

在高温环境下运用时，为了使管子不致过热，应该具有良好的通风散热措施。同时硅管允许工作的最高温度可达 150°C ，而锗管只在 100°C 范围内使用。因此在同样的 PN 结面积条件下，一般硅管允许通过最大电流密度要比锗管大一倍左右，这是硅管的最重要优点之一。因此大功率二极管大部分都是用硅材料制造的。

三、二极管的主要参数

二极管的参数很多，在制造厂的产品目录和半导体器件手册中，都利用二极管的参数来表征管子的适用范围和性能优劣，作为合理选择正确使用管子的依据。虽然半导体管子寿命很长，如果选择使用不当，就可能使它损坏。下面介绍选用时必须考虑的两个主要的极限参数。

1. 最大正向电流 或称最大整流电流，是指二极管连续长期工作时，允许通过的最大正向平均电流值。它是由半导体材料的性能和 PN 结的面积决定的。当电流超过这个允许值时，将由于发热过度而使管子损坏。

2. 最大反向工作电压 是指允许加在二极管的反向峰值电压。通常是取反向击穿电压的一半或三分之二，保证二极管在使用中不致因反向过压而损坏。

常用几种半导体二极管的主要参数见附录表 III-1、2、3、4。

1-5 硅 稳 压 管

一、稳压管特性

硅稳压管是一种特殊的面接触型半导体二极管，它的伏安特性及其符号如图 1-13 所示。人们发现，当二极管反向击穿后，管子两端电压基本上不随电流大小而变。只要保证管子反向电流小于它的最大允许值，使 PN 结的结温不超过允许值，管子就不会烧坏。利用这种特性，制造出了一种具有非破坏击穿特性的管子，称为稳压管。稳压管的击穿现象是能重复的，而且重复性能很好。由于硅管的热稳定性比锗管好，目前几乎都是采用硅二极管做稳压管，因此称硅稳压管。

对稳压管 PN 结的击穿现象目前有两种解释，就是齐纳击穿和雪崩击穿。所谓齐纳击穿是指半导体耗尽层中的电场强度足够强时，约为 10^6 伏/厘米，直接把价键电子从束缚状态强行大量拉出来，成为载流子，从而使反向电流剧增所出现的击穿现象。空间电荷区较窄，稳压值较低的稳压管属于齐纳击穿。而雪崩击穿是当电场强度增大时载流子在运动中获足够大的能量，于是碰撞晶体结构中价键电子，挣脱束缚参加导电，被撞出来的载流子，在加速运动中，又碰撞其他价键电子，

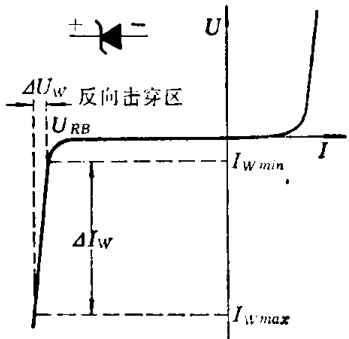


图 1-13